SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I JEJ GŁÓWNIEJSZYCH ZASTOSOWAŃ.

Według wielu nowszych źródeł oraz w części na podstawie dzieła Guillemina „Le monde physique"

OPRACOWALI

Rozalia Nusbaumowa

Bakalaureatka nauk przyr.

i

Henryk Silberstein

Dr. filozofii.

WARSZAWA.

Nakładem księgarni H. OLAWSKIEGO,

ul. Mazowiecka 6.

—

1894.

Wyższa Szkoła Rolnicza w Lublinie
Biblioteka
9313

Дозволено Цензурою.
Варшава, 29 Августа 1893 года.

Biblioteka Główna AR w Lublinie
1000087058

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

PRZEDMOWA.

Podejmując się opracowania w języku polskim dzieła Guillemin'a p. t. „Le monde physique“, mieliśmy na względzie dwie główne zalety tej książki, a mianowicie: nader przystępne i zrozumiałe dla szerszego ogółu przedstawienie zjawisk fizycznych oraz bardzo umiejętne nawiązywanie wielu ciekawych zastosowań praktycznych do teoryj i faktów poprzednio opisanych. Pod temi dwoma względami staraliśmy się trzymać dzieła pisarza francuzkiego, a więc niejako zastosowaliśmy jego metodę przedstawiania rzeczy. Zachowaliśmy także porządek ksiąg, skorzystaliśmy z licznych rysunków i podaliśmy w skróceniu zastosowania praktyczne, z wyjątkiem tychże w księdze o elektryczności i magnetyzmie, które okazały się nieodpowiedniemi w obec nowszych odkryć i wynalazków na tem polu. Co do teoretycznej strony całego dzieła, to okazała się ona po większej części o tyle niewystarczającą, że uznaliśmy za konieczne wprowadzić liczne zmiany, opracować na nowo mnóstwo rozdziałów, zmienić całkowicie układ tych ostatnich, dodać wiele szczegółów i objaśnień. Korzystaliśmy pod tym względem z dzieł wielu uczonych, a mianowicie: Tyndalla, Lomella, Taita, Thompsona,

Jamina, Wüllnera, Müllera-Pouillet'a, Graetz'a i innych, których tytuły dzieł podane są w odnośnikach, w odpowiednich miejscach; księga o elektryczności i magnetyzmie została opracowaną prawie wyłącznie na podstawie wybornego dzieła Graetz'a: „Die Elektricität und ihre Anwendungen"!

R. N.

Lwów, w Sierpniu 1893 r.

SPIS RZECZY.

KSIĘGA PIERWSZA.

Opracowali R. Nusbaumowa i H. Silberstein.

CIĘŻKOŚĆ.

ROZDZIAŁ I.

Ogólne zjawiska ciężkości.

		Str.
§ 1.	Działanie ciężkości na powierzchni ziemi. Zjawiska równowagi i ruchu.	3
§ 2.	Ciążenie powszechne.	8

ROZDZIAŁ II.

Prawa działania siły ciężkości.

§ 1.	Swobodny spadek ciał. Jednakowa prędkość ciał spadających w próżni.	14
§ 2.	Spadek ciał. Kierunek spadku	17
§ 3.	Prawa spadku ciał	20

ROZDZIAŁ III.

W a h a d ł o.

§ 1.	Równość czasu wahnięć wahadła. Stosunek czasu wahnięcia do długości wahadła.	33
§ 2.	Zastosowanie wahadła do regulowania zegarów	40
§ 3.	Zastosowanie wahadła do oznaczenia natężenia siły ciężkości w różnych miejscach oraz do wykazania kształtu i gęstości ziemi . .	42
§ 4.	Zastosowanie wahadła do wykazania obrotowego ruchu ziemi około osi. Doświadczenia Foucault'a	51

ROZDZIAŁ IV.

W a g a.

§ 1.	Ciężar ciał. Środek ciężkości	58
§ 2.	Oznaczenie ciężaru ciał. Waga	63

ROZDZIAŁ V.

Działanie ciężkości na ciała ciekłe.

		Str.
§ 1.	Własności cieczy	73
§ 2.	Jednostajne rozchodzenie się ciśnienia w cieczy. Prawo Pascala. Prasa hydrauliczna	79
§ 3.	Własności cieczy wynikające z jednostajnego rozchodzenia się ciśnienia i ich ciężaru	84
§ 4.	Prawo naczyń połączonych i jego zastosowania. Równowaga cieczy, nie mieszających się z sobą. Libella	91

ROZDZIAŁ VI.

Równowaga ciał zanurzonych w cieczy.

§ 1.	Parcie cieczy z dołu do góry. Prawo Archimedesa. Pływanie	100
§ 2.	Oznaczenie ciężaru właściwego ciał stałych i ciekłych	109

ROZDZIAŁ VII.

Działania międzycząstkowe w cieczach.

§ 1.	Napięcie powierzchniowe. Zjawiska włoskowatości	118
§ 2.	Doświadczenia Plateau. Zjawiska dyfuzyi i osmozy cieczy. Dializa	127

ROZDZIAŁ VIII.

Masowy ruch cieczy.

§ 1.	Wypływ cieczy. Prawo Toricelli'ego	134

ROZDZIAŁ IX.

Działanie ciężkości na ciała gazowe.

§ 1.	Własności gazów	139
§ 2.	Ciśnienie powietrza	144
§ 3.	Barometry	150
§ 4.	Pompy. Syfon	160

ROZDZIAŁ X.

Ściśliwość i prężność gazów.

§ 1.	Prawo Boyele'a—Mariotte'a. Manometry.	166
§ 2.	Prężność gazów. Pompy powietrzne, czyli maszyny pneumatyczne	175
§ 3.	Ściśliwość gazów. Pompy zgęszczające	187

ROZDZIAŁ XI.

Prawo Archimedesa w zastosowaniu do gazów.

§ 1.	Pozorna strata na ciężarze ciała, znajdującego się w atmosferze gazowej. Baroskop	194
§ 2.	Balony. Podróże nadpowietrzne	197

ROZDZIAŁ XII.

Zjawiska, zachodzące przy stykaniu się gazów z ciałami stałemi, ciekłemi i lotnemi.

Str.

§ 1. Pochłanianie gazów przez ciała stałe. Błonka gazowa. Obrazy Mosera. 209
§ 2. Pochłanianie gazów przez ciecze 213
§ 3. Wypływ gazów. Porywanie gazu przez strumień płynu. . . 215
§ 4. Dyffuzya gazów 219

KSIĘGA DRUGA.

Opracował H. Silberstein.

DŹWIĘK.

ROZDZIAŁ I.

Powstawanie i rozprzestrzenianie się dźwięku.

§ 1. Zjawiska dźwięku w przyrodzie 225
§ 2. Różne sposoby powstawania dźwięku 228
§ 3. Rozchodzenie się dźwięku w ciałach stałych, ciekłych i gazowych . 230
§ 4. Prędkość dźwięku w powietrzu i w innych środkach . . . 235
§ 5. Odbicie i załamanie dźwięku 241

ROZDZIAŁ II.

Istota dźwięku.

§ 1. Ciało wydające dźwięk, znajduje się w stanie ruchu drgającego. . 249
§ 2. Rozchodzenie się dźwięku w powietrzu. Fale dźwiękowe . . 254
§ 3. Zależność prędkości dźwięku od sprężystości i gęstości środka . . 261
§ 4. Natężenie dźwięku. 270

ROZDZIAŁ III.

Tony.

§ 1. Wysokość tonu. Granice słuchu. Długość fal dźwiękowych. Zasada Doepplera 274
§ 2. Drgania strun. Węzły i pętlice. Tony harmoniczne . . . 286
§ 3. Drgania sztab, błon i dzwonów. Figury dźwiękowe Chladni'ego. Podłużne drgania sztab 293
§ 4. Zjawiska rezonansu, czyli odbrzmiewania. Prawa drgań słupów powietrznych. Piszczałki. Metoda oznaczania prędkości dźwięku w gazach, cieczach i ciałach stałych 308
§ 5. Interwale tonów, używanych w muzyce. Gamy. Temperatura. . 325
§ 6. Optyczne metody badania drgań dźwiękowych 331

ROZDZIAŁ IV.

Zasadnicze zjawiska fal dźwiękowych.

§ 1. Interferencya dźwięku 343
§ 2. Współdrganie i współbrzmienie. Kołysanie dźwięku: uderzenia i pauzy. Tony kombinacyjne 352
§ 3. Uginanie się fal dźwiękowych 360

ROZDZIAŁ V.

Analiza i synteza dźwięku.

Str.

§ 1. Rezonatory. Analiza dźwięku za pomocą metody optycznej i graficznej. Fonautograf i fonograf 362
§ 2. Koloryt muzyczny (brzmienie) 368
§ 3. Synteza dźwięków 370

ROZDZIAŁ VI.

Muzyka i ucho.

§ 1. Fizyczne warunki harmonii muzycznej. Współdźwięk (konsonans) i rozdźwięk (dyssonans). Akordy 374
§ 2. Instrumenty muzyczne. Narząd głosowy człowieka . . . 380
§ 3. Ucho 388

KSIĘGA TRZECIA.

Opracowała R. Nusbaumowa.

ŚWIATŁO.

ROZDZIAŁ I.

Światło w przyrodzie.

§ 1. Zjawiska ogólne 395
§ 2. Źródła światła 397

ROZDZIAŁ II.

Rozprzestrzenianie się światła w środkach jednorodnych.

§ 1. Prostolinijne rozprzestrzenianie się światła 399
§ 2. Cień i półcień 403
§ 3. Natężenie światła 409
§ 4. Prędkość światła 417

ROZDZIAŁ III.

Odbicie światła (Katoptryka).

§ 1. Prawa odbicia 425
§ 2. Odbicie od zwierciadeł płaskich 428
§ 3. Sekstant 433
§ 4. Odbicie od zwierciadeł krzywych 437

ROZDZIAŁ IV.

Załamanie światła (Dioptryka).

§ 1. Ogólne zjawiska i prawa załamania 450
§ 2. Zupełne wewnętrzne odbicie. Załamanie światła przy zjawiskach astronomicznych 456

Str.

§ 3. Załamanie światła w środkach, ograniczonych płaszczyznami równoległemi i nierównoległemi. 461
§ 4. Załamanie światła w soczewkach. 466

ROZDZIAŁ V.

Przyrządy optyczne.

§ 1. Ciemnia optyczna. Mikroskop słoneczny. 477
§ 2. Mikroskop prosty i złożony 481
§ 3. Lunety. Teleskopy. 485

ROZDZIAŁ VI.

Rozszczepienie światła.

§ 1. Rozkład i skład białego światła 495
§ 2. Barwy dopełniające. Klassyfikacya barw. Teorya tęczy . . 500
§ 3. Achromatyzm 506

ROZDZIAŁ VII.

Analiza spektralna.

§ 1. Linie Fraunhofer'a. Widmo słońca 510
§ 2. Analiza spektralna ciał ziemskich. Spektroskop. . . . 518

ROZDZIAŁ VIII.

Pochłanianie światła.

§ 1. Barwy ciał 522
§ 2. Fluorescencya. Fosforescencya 526
§ 3. Chemiczne działanie promieni 531

ROZDZIAŁ IX.

Teorya światła.

§ 1. Doświadczenie Fresnel'a. Falowy ruch eteru 541
§ 2. Interferencya światła. Długość fali i częstość drgań dla różnych barw. Amplituda drgań 550
§ 3. Zasada Huyghens'a 557
§ 4. Rozszczepienie i pochłanianie światła w obec teoryi falowania . . 564
§ 5. Uginanie światła (dyfrakcya) 569
§ 6. Barwy cienkich warstw 574

ROZDZIAŁ X.

Polaryzacya światła.

§ 1. Podwójne załamanie 581
§ 2. Własności promieni spolaryzowanych 587
§ 3. Przyrządy polaryzacyjne. Polaryzacya przez odbicie i zwykłe załamanie 594

Str.

§ 4. Interferencya przez podwójne załamanie 603
§ 5. Polaryzacya obrotowa 610

ROZDZIAŁ XI.

Oko ludzkie.

§ 1. Budowa oka. Tworzenie się obrazu. Oko daleko i krótkowidzące . 622
§ 2. Widzenie dwojgiem oczu. Stereoskop. Odczuwanie barw . . 629

KSIĘGA CZWARTA.

Opracowała R. Nusbaumowa.

CIEPŁO.

ROZDZIAŁ I.

Rozszerzanie się ciał od ciepła.

§ 1. Zjawiska rozszerzania się i kurczenia 639
§ 2. Mierzenie temperatury. Termometry 644
§ 3. Rozszerzalność ciał stałych 660
§ 4. Rozszerzalność cieczy 672
§ 5. Rozszerzalność i gęstość gazów 680

ROZDZIAŁ II.

Zmiana stanów skupienia.

§ 1. Topienie. Rozpuszczanie w cieczy 689
§ 2. Krzepnienie. 699
§ 3. Wrzenie 709
§ 4. Parowanie i własności par. 719
§ 5. Mierzenie prężności par 724
§ 6. Gęstość par. Mięszanina par i gazów. Hygrometrya . . . 736
§ 7. Objaśnienie wrzenia. Stan sferoidalny 750
§ 8. Zastosowania praktyczne 758
§ 9. Skroplenie gazów 767

ROZDZIAŁ III.

Kalorymetrya.

§ 1. Ciepło właściwe. Metody mierzenia ciepła właściwego . . . 779
§ 2. Ciepło właściwe ciał stałych, ciekłych i gazowych. Ciepło topliwości i lotności. Niektóre zasady termochemii 787

ROZDZIAŁ IV.

Rozprzestrzenianie się ciepła.

§ 1. Ciepło promieniste 799
§ 2. Odbicie, pochłanianie i wysyłanie ciepła promienistego . . . 807
§ 3. Identyczność światła i ciepła promienistego 818
§ 4. Przewodnictwo ciepła 823
§ 5. Zastosowania praktyczne 835

ROZDZIAŁ V.

Mechaniczna teorya ciepła.

		Str.
§ 1.	Powstawanie ciepła przez tarcie, ciśnienie i uderzenie	840
§ 2.	Istota ciepła. Zasada zachowania energii. Mechaniczny równoważnik ciepła	845
§ 3.	Objaśnienie zjawisk ciepła właściwego i utajonego	855
§ 4.	Słońce, jako źródło ciepła. Palenie	863
§ 5.	Ogrzewanie mieszkań	874

ROZDZIAŁ VI.

Maszyny parowe.

§ 1.	Pierwsze obserwacye nad prężnością pary. Maszyna Papin'a, Savery'ego i Newcomen'a. Odkrycia Watt'a	883
§ 2.	Budowa maszyny parowej i praca przez nią wykonana	890
§ 3.	Statki parowe	903
§ 4.	Lokomotywy	906
§ 5.	Zastosowanie pary w przemyśle. Inne motory	912

KSIĘGA PIĄTA.

Opracowali R. Nusbaumowa i H. Silberstein.

ELEKTRYCZNOŚĆ I MAGNETYZM.

ROZDZIAŁ I.

Elektrostatyka, czyli nauka o elektryczności w stanie równowagi.

§ 1.	Zjawiska zasadnicze	919
§ 2.	Przewodniki i nieprzewodniki, czyli izolatory. Elektroskop	924
§ 3.	Prawo Coulomba. Maszyna elektryczna. Potencyał. Gęstość elektryczności	929
§ 4.	Elektryczność przez wpływ, czyli indukcya. Kondensator. Butelka lejdejska. Maszyna Holtz'a. Elektrometr Thomson'a	941

ROZDZIAŁ II.

Elektrodynamika, czyli nauka o elektryczności w stanie ruchu.

§ 1.	Elektryczność przez dotknięcie. Prąd galwaniczny	961
§ 2.	Elementy Daniell'a, Bunsena, Leclanche'a i gazowy. Działanie prądu. Busola stycznych	970
§ 3.	Prawa prądu galwanicznego. Prądy rozgałęzione. Galwanoskop	980

ROZDZIAŁ III.

Działania prądu galwanicznego.

§ 1.	Działanie cieplne i świetlne prądu galwanicznego	996
§ 2.	Termoelektryczność	1007
§ 3.	Działanie chemiczne prądu elektrycznego. Elektroliza. Prądy polaryzacyjne	1014

ROZDZIAŁ IV.

Magnetyzm.

Str.

§ 1. Siły magnetyczne. Solenoidy. Wzajemny wpływ prądów galwanicznych i magnesów. Galwanometry. 1028

§ 2. Wzajemny wpływ prądów galwanicznych. Molekularne prądy magnetyczne 1044

§ 3. Prądy indukcyjne. Drgania elektryczne. Doświadczenia Hertz'a. Związek pomiędzy światłem i elektrycznością. 1053

ROZDZIAŁ V.

Zastosowania elektryczności.

§ 1. Maszyny dynamoelektryczne 1080

§ 2. Akumulatory. Transformatory 1093

§ 3. Światło elektryczne łukowe i żarowe 1110

§ 4. Elektryczne przenoszenie siły 1128

§ 5. Elektrotypia, czyli galwanoplastyka. Otrzymywanie metali w stanie czystym 1147

§ 6. Telegrafy 1155

§ 7. Telefon i mikrofon. 1171

ROZDZIAŁ VI.

Elektryczność atmosferyczna.

§ 1. Błyskawica i piorun. Piorunochron. Zorza północna . . . 1187

KSIĘGA PIERWSZA.

CIĘŻKOŚĆ.

ROZDZIAŁ I.

Ogólne zjawiska ciężkości.

§ 1. Działanie ciężkości na powierzchni ziemi. Zjawiska równowagi i ruchu.

Kamień na pewnej wysokości nad ziemią pozostawiony samemu sobie, spada na dół, poruszając się tak długo, dopóki nie dosięgnie trwałej podstawy; ciało okrągłe, np. kula, stacza się po równi, nachylonej do horyzontu; płynne massy, jak woda strumieni i rzek, biegną po nachylonej płaszczyznie, służącej im za łożysko. Wszystkie te zjawiska, oraz wiele innych, które następnie poznamy, stanowią rozliczne przejawy jednej i tej samej siły, a mianowicie *ciężkości*. Wszystkie ciała bez wyjątku, czy to znajdujące się na powierzchni naszej planety, czy w jej głębi, czy też w powietrznych warstwach naszej atmosfery, są ciężkie. Dla ciał stałych i ciekłych, fakt ten oddawna znany był powszechnie. Pokażemy wkrótce, że obejmuje on także pary i gazy. Lecz wpływ ciężkości uwidocznia się nietylko w zjawiskach ruchu. Działa ona także ustawicznie i na ciała znajdujące się w stanie spoczynku, a właściwie w stanie równowagi. Kamień spadający, po dosięgnięciu ziemi, wydaje nam się nieruchomym, w istocie jednak wywiera on ciśnienie na ciała, służące mu za podstawę.

Ciśnienie to, które można uwidocznić za pomocą sprężyny (fig. 1), ciągle wyprężanej przez uczepioną do niej masę i które nazywamy ciężarem ciała, czujemy sami przez wysiłek mięśni ręki naszej, podtrzymującej kamień. Książka spoczywająca na stole, ciśnie jednak nań; z kolei stół wywiera ciśnienie na ziemię. Masa metalowa uwiązana na nitce lub strunie, wypręża ją, a naprężenie to, trwające tak długo, dopóki nie przetniemy nitki, dowodzi najlepiej, że siła ciężkości bezustannie działa na uwiązane ciało. Z wszystkiego tego wynika bardzo jasno, że gdy ciało się nie porusza, nie należy jeszcze sądzić z tego, że nie podlega ono działaniu żadnej siły; owszem, mamy prawo twierdzić, że ani jedno ciało na ziemi, a nawet najmniejsza cząstka ciała stałego, ciekłego lub gazowego, nie wyłamuje się na chwilę z pod wpływu siły ciężkości. Astronomia uczy nas, że ziemia posiada kształt prawie kulisty i że wykonywa jednocześnie dwa rodzaje ruchów, w których biorą udział wszystkie znajdujące się na niej ciała. Jeden ruch polega na jednostajnem obracaniu się ziemi naokoło swej osi; drugi jest postępowym ruchem naokoło słońca, odbywającym się ze zmienną szybkością. Lecz równowaga pojedyńczych części ziemi nie zostaje naruszoną przez żaden z tych ruchów. Stałe masy, stanowiące skorupę ziemską; jądro wewnętrzne, będące prawdopodobnie w stanie stopionym; część płynna na powierzchni ziemi czyli morza i nakoniec powłoka gazowa, otaczająca kulę ziemską ze wszystkich stron, znajdują się w stanie równowagi, wynikającej z wzajemnego na siebie ciśnienia pojedyńczych części, wskutek siły ciężkości.

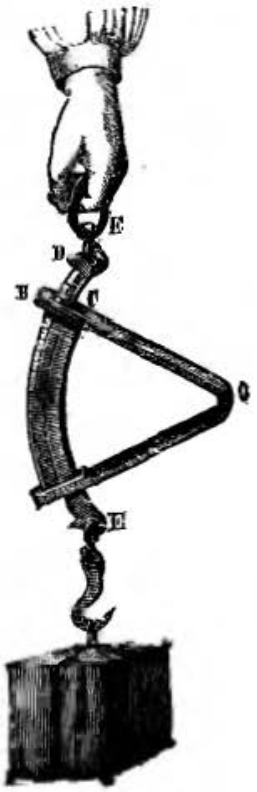


Fig. 1. Działanie siły ciężkości, uwidocznione przez wyprężenie sprężyny.

Prawdopodobnie cała ziemia była niegdyś płynną, [1]) a roz-

[1]) Przeciwko tej hypotezie, za twórcę której uchodzi zwykle Laplace, występowała w nowszych czasach szkoła neoneptunistów z Bischoffem na czele, tymczasowo jednak zachowamy jeszcze tę hypotezę.

maite warstwy, tworzące jej wnętrze, układały się według swych gęstości, to jest najcięższe znalazły się najbliżej środka, najlżejsze zaś na powierzchni; w taki tylko sposób byłyby spełnione warunki, niezbędne dla równowagi ciał płynnych, pozostających pod wpływem siły ciężkości. Pomijając zresztą wewnętrzne części ziemi, niedostępne naszemu badaniu, u pozostałych widzimy dokładnie to samo ugrupowanie: na spodzie masa stała — *ląd*, następnie na trzech czwartych powierzchni część płynna — *morze;* nakoniec nad obydwiema ciała gazowe — *powietrze.*

Wszystkie te części cisną jedne na drugie. Badając grunt lądów lub wysp, widzimy, że wszystkie jego części wzajemnie służą sobie jako podpory. W górach i równinach, dzięki wpływowi siły ciężkości, działającej na każdą pojedyńczą cząstkę, masy są tak ułożone, że równowaga nigdy albo bardzo rzadko zostaje naruszoną. Gdyby działanie siły ciężkości ustało, inne siły przyrody, nie znajdując oporu, zburzyłyby lądy, skały i góry, tam gdzie obecnie widzimy porządek, będący rezultatem równowagi mas, zapanowałby chaos.

Człowiek, jako naśladowca natury, spożytkował siłę ciężkości i powstające przez nią ciśnienie, przy wznoszeniu najtrwalszych budowli. Stałe materyały umieszczał on możliwie pionowo, a przez to udało mu się wznieść pomniki, które w ciągu wieków stawiały opór niszczącym wpływom elementów, jak np. egipskie piramidy. Siła ciężkości utrzymuje także wodne masy w ich naturalnych łożyskach, jeziora i morza w granicach, w obrębie których ciecze te pozostawałyby w spoczynku, gdyby zewnętrzne siły nie poruszały ciągle górnemi ich warstwami. Zdarza się, że pod wpływem nieprawidłowo działających sił ziemskiego pochodzenia, jak np. trzęsienia ziemi i huragany, a także wskutek prawidłowego wahania przypływu i odpływu, morze wznosi się bardzo wysoko i występuje po za zwykłe granice. Wkrótce jednak powraca ono do normalnego stanu równowagi i spoczynku, poczęści wskutek ciężaru swych składników, poczęści zaś wskutek wzajemnego tarcia cząstek wody. Laplace, szukając warunków absolutnie stałej równowagi morza, znalazł jeden tylko, a mianowicie że gęstość wód oceanu powinna być nieco

mniejszą od gęstości ziemi; właśnie temu warunkowi staje się zadosyć w przyrodzie. Gdyby wody morskie były jeszcze lżejsze niż są, znajdowałyby się ciągle w stanie największego wzburzenia, gdyby zaś były cięższe, naruszenie równowagi wskutek przypadkowych przyczyn ze strony lądów i skał, sprowadzałoby najokropniejsze katastrofy. Lecz siła ciężkości działa nietylko na masy, z których składają się lądy i morza; warstwy powietrzne również ulegają jej wpływowi. Gdyby nie ciśnienie, utrzymujące warstwy te blizko ziemi, to z jednej strony elastyczność albo dążność do rozszerzania się, będąca, jak następnie zobaczymy, główną własnością gazów, z drugiej zaś siła zwana odśrodkową, wynikająca z obrotowego ruchu ziemi i dążąca do odrzucania ciał od środka tej ostatniej, rozproszyłyby całą atmosferę po przestrzeniach wszechświata. Takie są w ogólnych zarysach zjawiska, występujące wskutek ciągłego, i że tak powiemy, utajonego działania siły ciężkości na ziemi. Siła ta właśnie utrzymuje wszędzie równowagę i przywraca ją napowrót w wypadkach naruszenia przez inne czynniki przyrody.

Ale i zjawiska ruchu, wywoływane przez tę siłę, przedstawiają obraz niemniej ciekawy i wspaniały.

Nieprzezwyciężone dążenie wszystkich ciał ku środkowi ziemi sprawia, że wody przenikają do jej wnętrza. Przesiąkanie to rozluźniając ziemię i skały, powoduje kruszenie się gór; stoki tych ostatnich stają się coraz bardziej obnażone, a odłamki napełniają doliny. Przyczyną tych zjawisk nie jest jedynie siła ciężkości; zobaczymy następnie, że dopiero w połączeniu z innemi siłami fizycznemi lub chemicznemi, a szczególniej z ciepłem, wywołuje ona większą część zjawisk ruchu, odbywających się na powierzchni naszej ziemi i w otaczającej ją atmosferze; jednakowoż siła ciężkości odgrywa w zjawiskach tych rolę najgłówniejszą.

Często dzieło zniszczenia uwidocznia się dopiero w chwili nastąpienia katastrofy. Olbrzymie masy skaliste, podminowane u podstaw, tracą nagle równowagę i staczają się ku dołowi, druzgocząc wszystko na swej drodze. W ten sposób całe góry pokryły swemi gruzami wsie i miasta, a historya zapisała liczne przykłady podobnych okropnych wydarzeń. W XIII wieku góra Gre-

nier, wierzchołek której obecnie jeszcze przewyższa góry na południowej stronie doliny Chambéry, oberwała się częściowo i pogrzebała miasteczko Saint-André, oraz liczne wsie; do dziś dnia pokazują przepaście Myans, kryjące pozostałości ludzkich siedzib i trupy ich mieszkańców. Niemniej straszny wypadek miał miejsce w r. 1806, kiedy z boków góry Ruffi stoczyła się olbrzymia masa skał, która kompletnie zasypała wiele wsi i częściowo zapełniła małe poblizkie jezioro. Zbytecznem byłoby obliczać wielkość niszczącej potęgi takich mas, spadających często z bardzo znacznych wysokości, z coraz wzrastającą prędkością. Lawiny są to zjawiska podobne, lecz zdarzające się daleko częściej, niż kruszenie lub obrywanie się gór. Tutaj wielkie masy śniegu, nagromadzone na pochyłości górskiej lub na brzegu przepaści, wskutek własnego ciężaru obrywają się i spadają na dół, miażdżąc wszystko co staje im na drodze. Często drobny impuls, jak wystrzał pistoletu, a nawet krzyk, wystarczają do naruszenia równowagi i wywołania zjawiska. W lodowych górach okolic podbiegunowych, wzajemne ciśnienie brył jest przyczyną zjawisk podobnych, wskazujących nieprzepartą potęgę siły ciężkości. Lodowce, to jest masy stałego śniegu, zbitego na twardy lód, ulegając na stokach góry ciśnieniu mas wyżej leżących, staczają się powoli, a postępowy ich ruch tak jest energiczny, że skały, po których on się odbywa, zostają mocno porysowane przez krystaliczną masę lodu i zawarte w niej odłamki kamieni [1]).

Podczas wybuchów wulkanicznych, zamknięte gazy, wskutek swej prężności, wyrzucają często w powietrze popiół, kawały kamieni, a nawet całe skały, a jakkolwiek masy te, wyrzucone do góry siłą uderzenia z wnętrza ziemi, zdają się być na chwilę uwolnione z pod wpływu siły ciężkości, to jednak przeciwdziałanie tych dwóch czynników nie trwa długo i wkrótce masy wulkaniczne ulegają niezmiennemu prawu, któremu poddane są wszystkie ziemskie ciała. To samo prawo rządzi spadaniem gradu, deszczu, śniegu, to jest tych części pary wodnej, które wskutek

---

[1]) Reclus-Ule, Ziemia

zgęszczenia stały się cięższe od warstw powietrznych, do wysokości których się wzniosły pod wpływem działania ciepła.

Dotychczas mówiliśmy tylko o właściwym spadku ciał, których równowaga, wskutek jakiejkolwiek przyczyny, została naruszoną. Ale na powierzchni naszej planety odbywają się inne jeszcze ruchy, także zależne głównie od siły ciężkości i tworzące zadziwiający cykl, bez którego życie na ziemi wkrótceby wygasło. Bezustanne parowanie wody powoduje tworzenie się chmur, które, wskutek różnicy w ciężarze cząstek pary, stanowiącej chmurę i w ciężarze powietrza, wznoszą się do górnych warstw atmosfery. Para wodna, skraplając się, staje się cięższą, spada na ziemię i tworzy potoki, strumienie i rzeki; następnie biegnie po naturalnej pochyłości gruntu i łączy się z wodami oceanu, bądź to dążąc wolno w prądzie majestatycznym, bądź to pędząc szybko i z szumem po bardziej stromem łożysku. Czasami wody, wstrzymane przez naturalne przeszkody, rozszerzają się w jeziora; innym razem, znalazłszy się nad brzegiem ściany skalistej, spływają z niej pod postacią wodospadu; przypomnimy tutaj tylko wodospad Renu, blizko Szafhuzy, wodospad Niagary w północnej Ameryce i katarakty Zambezu w południowej Afryce. Prądy wodne spotykamy nietylko na lądzie, przez ocean również przebiegają prądy, których prawidłowość ruchu podtrzymywaną jest przez siłę ciężkości, jakkolwiek powstanie swoje zawdzięczają one, jak zobaczymy, działaniu innego czynnika przyrody, a mianowicie ciepła. Siła ciężkości nakoniec w połączeniu z innemi czynnikami przyrody, rządzi wszystkiemi ruchami w atmosferze. Niema jednem słowem zjawiska na ziemi, w którem siła ciężkości nie brałaby ciągłego udziału, bądź to przywracając równowagę, bądź to powodując ruch. Nawet tam, gdzie na pozór została przezwyciężoną, działa ona bezustannie i z jednakową mocą, tak, że niema sposobu zniweczenia jej wpływu.

§ 2. Ciążenie powszechne.

Widzieliśmy wyżej, że wszystkie zjawiska, których obraz przesunął się przed nami, są skutkiem jednej i tej samej przyczy-

ny, zwanej siłą ciężkości. W ogóle *siłą* nazywamy każdą przyczynę, która wywołuje ruch ciała, albo zmienia kierunek lub prędkość ruchu.

Pytanie, jaka jest właściwa natura siły ciężkości, leży po za obrębem naszej pracy; ograniczymy się też na zbadaniu jej działań i praw, według których one zachodzą. Rozważmy tedy następujące punkty. W jakim kierunku ciało spada, gdy nie znajduje żadnej przeszkody; dalej, na jaki punkt ciała dana siła wywiera swe działanie; nakoniec z jaką mocą stara się wprawić w ruch każdą materyalną cząstkę. Wszystkie te pytania zostały przez naukę rozwiązane.

Zajmiemy się najprzód kierunkiem działania siły ciężkości.

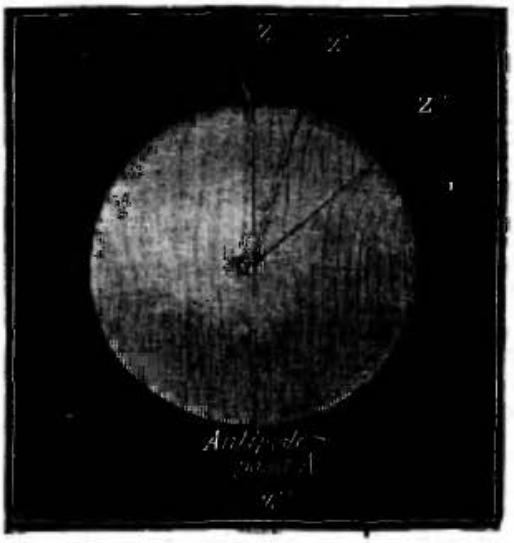


Fig. 2. Środek ziemi, jako punkt przecięcia pionowych.

Wszystkie ciała spadają z góry na dół w kierunku prostopadłym do miejsca spadku i w tym też kierunku cisną na podstawę. Kierunek ten zowie się *pionowym*. Zdaje się, jakoby siła ciężkości działała z wnętrza ziemi, a ponieważ przy niezbyt małych odległościach, wszystkie owe prostopadłe linie pozornie biegną równolegle do siebie, możnaby pomyśleć, że działa tutaj niejedna siła, lecz mnóstwo pojedyńczych sił, mających swe siedlisko w rozmaitych punktach wnętrza ziemi. Łatwo jednak wykazać, że wniosek taki nie byłby ścisłym. W istocie siła ciężkości działa wszędzie w jednym i tym samym kierunku. W każdej miejscowości, pod wszelkiemi szerokościami geograficznemi, na równiku, na biegunach, na równoleżnikach pomiędzy biegunem a równikiem, siła ta objawia się zawsze w kierunku prostopadłym do poziomu.

Każdą niezbyt wielką część południka ziemskiego, to jest koła, przechodzącego przez oba bieguny i przez jakikolwiek punkt na ziemi, można uważać za prostą linię, która stanowi poziom

dla danej miejscowości. Prostopadłe do tych poziomów czyli linje pionowe jak z, z', z'' (fig. 2, *str.* 9) dla różnych punktów, na południku tym leżących, przedłużone do wnętrza ziemi, schodzą się w centrze koła południkowego, który jest zarazem środkiem C ziemi. Równoległość tedy pomiędzy różnemi liniami pionowemi, nasuwająca myśl o wielorakości sił ciążenia, jest tylko pozorną, w istocie bowiem linie te przecinają się w jednym punkcie, to jest w środku ziemi, który możemy uważać za siedlisko *siły ciężkości.*

Ściśle mówiąc, ziemia nie przedstawia doskonałej kuli, przy biegunach bowiem jest spłaszczoną, na równiku bardziej wypukloną i dlatego pionowe punktów położonych w rozmaitych szerokościach geograficznych, nie przecinają się dokładnie w tym samym punkcie, rezultat więc powyższy jest tylko przybliżony. Oprócz tej przyczyny zboczenia, działają jeszcze inne, jak zobaczymy, lokalne nieprawidłowości, które bardzo komplikują określenie owego siedliska siły ciężkości. Dla nas wszakże rozmaite te zboczenia nie są ważne i dlatego powyższe wyłuszczenie możemy wyrazić w formie następującego prawa:

Wszystkie ciała dążą do środka ziemi. Ciężkość działa na nie jako jedna siła, wychodząca z tego punktu.

Od prawa tego nie znamy żadnych wyjątków.

Czy ciało znajduje się na powierzchni ziemi, czy na jakiejkolwiek wysokości w powietrzu, czy też wewnątrz ziemskiej skorupy w najgłębszych warstwach jej pokładów, w każdym wypadku obserwacya stwierdza słuszność tego prawa.

Wobec tego nie należy pojęć „na dół“ i „do góry“, mających tylko znaczenie lokalne, stosować do całej w ogóle kuli ziemskiej. W poprzednich wiekach nie miano jeszcze o tem dokładnego wyobrażenia, kiedy bowiem Kolumb puszczał się w podróż w celu znalezienia zachodniej drogi do Indyj, zrobiono mu między innemi i ten zarzut, że jeżeli nawet uda mu się zjechać na dół po kuli ziemskiej, to nie może jednak się spodziewać, że będzie mógł powrócić do góry po stromej drodze. Widzimy, że w tym razie pojęcia góry i dołu, stosowne dla naszego miejsca zamieszkania, zostały niewłaściwie uogólnione do całej kuli ziemskiej.

Obecnie nawet pojęcie o tem, że kierunki spadania ciał schodzą się w jednym punkcie, nie jest jeszcze tak rozpowszechnionem, jakby tego należało oczekiwać. Ludzie, zdolni wyobrazić sobie, że ziemia jest kulą, zamieszkałą we wszystkich punktach swej powierzchni, nie mogą jednak pojąć, w jaki sposób przeciwnożni względem nas mieszkańcy potrafią utrzymać się na ziemi, gdy nogi ich skierowane do góry, a głowa na dół, oraz w jaki sposób utrzymuje się u nich równowaga wszystkich ciał stałych i ciekłych. Po głębszem zastanowieniu przekonaliby się wkrótce, że pojęcia „na dół“ i „do góry“ są tylko względnemi, że na bardzo wielkiej kuli, wszystkie części powierzchni można z jednakową słusznością uważać jako poziome i że dążenie wszystkich ciał do środka ziemi objaśnia dostatecznie utrzymywanie się tych ciał na powierzchni, niezależnie od miejsca, w którem się one znajdują.

Czy tylko ziemia wywiera powyżej opisane działanie? Czy nie mamy raczej przed sobą specyalnego tylko wypadku daleko ogólniejszej siły, przejawiającej się w całym wszechświecie?

Przed dwoma jeszcze wiekami na pytania te nie umiano dać żadnej odpowiedzi. W owym dopiero czasie doświadczenia Galileusza nad spadkiem ciał i głębokie badania Huyghens'a nad podstawami mechaniki, pozwoliły Newtonowi dowieść, że siła wywołująca zjawiska ciężkości na powierzchni ziemi, jest tą samą, która w całym wszechświecie utrzymuje ciała niebieskie na właściwych im drogach. Siła ciężkości jest tylko oddzielnym wypadkiem ciążenia powszechnego.

Pod tem ostatniem pojmujemy ten ogólny fakt, że dwa jakiekolwiek ciała przyciągają się i mają dążność zbliżania się ku sobie, albo, gdy nic temu nie stoi na przeszkodzie, istotnie się zbliżają z siłą, w pewien określony sposób zależną od ich mas i od ich wzajemnej odległości.

Masą danego ciała nazywamy ilość jego materyi. Pojęcie masy należy ściśle odróżnić od pojęcia ciężaru. Ten ostatni zmienia się względnie do położenia ciała na ziemi, jest inny, jak zobaczymy później, na równiku, inny na biegunie, dalej byłby różny na ziemi, słońcu, księżycu i t. d. Natomiast masa danego

ciała, czyli ilość jego materyi pozostaje tą samą, niezależnie od położenia jego we wszechświecie. Jednakże w tem samem miejscu ziemi równe masy mają jednakowe ciężary i dla tego w tych warunkach ciężar może stanowić miarę masy tak, że przyjmujemy, że ciało 2, 3 i t. d. razy cięższe od innego posiada tyleż razy większą masę. Prawo, wyrażające zależność przyciągania się dwóch ciał od ich mas i odległości można przedstawić w następujący sposób: Jeżeli siłę, z jaką przyciągają się dwie jednakowe masy, znajdujące się w odległości równej jednostce, oznaczymy przez jedność, to podwojenie jednej z dwóch mas powiększy ową siłę także dwa razy; jednoczesne potrojenie drugiej masy, potraja wielkość tej samej siły, tak że będzie ona 2×3, to jest sześć razy większa, niż w początku. Lecz siła ta zależy nadto od odległości, dzielącej przyciągające się ciała. Jeżeli, przy niezmiennych masach, zmniejszymy dwa razy tę odległość, przyciąganie będzie 2×2, to jest cztery razy większe; przy odległości trzy razy mniejszej, przyciąganie będzie 3×3, to jest dziewięć razy większe i t. d. *Przyciąganie więc pomiędzy ciałami jest wprost proporcyonalne do iloczynu z ich mas i odwrotnie proporcyonalne do kwadratu* [1]) *z odległości.*

Jest to prawo zasadnicze, a zjawiska, zależne od siły ciężkości, przedstawiają tylko specyalne zastosowanie tego prawa. Nie było rzeczą łatwą wyprowadzić zeń odpowiednie wnioski; obliczyć wzajemny wpływ wszystkich pojedyńczych, bardzo drobnych mas, składających ogólną masę kuli ziemskiej i znaleść ostateczny rezultat wszystkich tych działań. Newton, a po nim wielcy matematycy, którzy rozwijali dalej jego idee, jak d'Alembert, Euler, Maclaurin, Lagrange, Laplace i inni, pokusili się o rozwiązanie tego trudnego zadania. Dowiedli oni, że kula, w której materya zupełnie jednostajnie jest rozmieszczoną, działa na każdy zewnętrzny punkt dokładnie tak samo, jak gdyby cała materya ta skupioną była w środku kuli. Podobnie zachowuje się kulista warstwa, mająca wszędzie jednakową grubość, a więc i sze-

---

[1]) Kwadratem liczby nazywamy iloczyn, otrzymany z pomnożenia jej przez samą siebie.

reg takich, koncentrycznie ułożonych warstw, których gęstość zmienia się według pewnego określonego prawa.

Ten ostatni właśnie wypadek ma miejsce z naszą ziemią i skupienie niejako siły ciężkości w środku ziemi objaśnia, dlaczego wszędzie ciała spadają w kierunku prostopadłym do poziomu danego miejsca, to jest w kierunku, który łączy ciało spadające ze środkiem ziemi.

Musimy atoli ciągle zachowywać w pamięci, że cała masa kuli ziemskiej wywiera przyciąganie, przyczem najdrobniejsza nawet jej cząstka bierze udział w wytwarzaniu ogólnego rezultatu. Pod wpływem tego przyciągania, kamień zostawiony swobodnie, zbliża się do ziemi, ponieważ jednak przyciąganie mas jest wzajemne, to znaczy, że każda z nich przyciąga i jest przyciąganą, i ziemia więc zbliża się wtedy do kamienia. Oba ciała dążą ku sobie, lecz tylko ruch kamienia jest widoczny, siła bowiem powodująca ten ruch jest bardzo znaczną, w stosunku do masy kamienia; ruch zaś ziemi jest nieskończenie powolny, gdyż przyciąganie wywierane przez kamień na ziemię jest w stosunku do jej masy niezmiernie małem.

Powiedzieliśmy już, że przyciąganie ciał jest faktem powszechnym, w istocie, przejawy jego widzimy nietylko na ziemi, ale w ogóle we wszechświecie.

Ziemia i księżyc przyciągają się wzajemnie, a z kolei oba te ciała w takim samym znajdują się stosunku względem słońca. Wszystkie planety naszego systemu słonecznego ciągle wpływają na siebie wzajemnie, również jak i na olbrzymią kulę, świecącą we wspólnem ich ognisku. Ogromna masa tej kuli słonecznej utrzymuje je wszystkie na ich drogach. Ruchy ciał niebieskich naszego systemu zmieniają się i wzajem regulują pod wpływem tej samej siły wzajemnego przyciągania ciał. Przytoczymy tutaj dwa tylko wybitne przykłady ciążenia w przestrzeniach niebieskich. Peryodyczne zjawiska przypływu i odpływu morza są rezultatem przyciągającego wpływu księżyca i słońca. Meteory, te miniaturowe ciała niebieskie, spadające niekiedy na powierzchnię naszej planety, dowodzą, że przyciąganie ziemi jest w stanie wyprowadzić zewnętrzne masy z właściwych im dróg. W końcu

najnowsze astronomiczne badania dowodzą, że ta sama siła przejawia się w ruchach najodleglejszych gwiazd. Gwiazdy podwójne, są to systemy słońc, znajdujące się w olbrzymich od nas odległościach i również obracające się naokoło siebie, widoczno. zatem, że i wzajemny ich ruch musi ulegać tym samym prawom, według których odbywają się ruchy planet.

ROZDZIAŁ II.

Prawa działania siły ciężkości.

§ 1. Swobodny spadek ciał. — Jednakowa prędkość ciał spadających w próżni.

Dawno już zauważono, że ciała ciężkie, jak naprzykład metale, spadają na ziemię znacznie prędzej od ciał lekkich, spuszczonych z tej samej wysokości i od czasów Arystotelesa przyjmowano, że prędkość spadku zależy od ciężaru i od materyału spadającego ciała. Do Galileusza nikt jednak nie pomyślał o stwierdzeniu słuszności tego poglądu i dopiero doświadczenia, wykonane przez uczonego włoskiego ze szczytu sławnej wieży pochyłej w Pizie (tabl. I), wykazały jego błędność. Kule z różnych metali — ze złota, miedzi, ołowiu, mające jednakową objętość, lecz różny ciężar, spadały ze szczytu tej wieży na powierzchnię ziemi prawie w tym samym czasie; jedna tylko kula woskowa znacznie się opóźniała. Różnica atoli w czasach spadku nie była dosyć dużą, aby ją można było przypisać nierównym ciężarom spadających ciał; w takim bowiem razie ciało dwa razy cięższe spadałoby także dwa razy prędzej, czemu jednak doświadczenie kłam zadawało. Powtarzając podobne doświadczenia w powietrzu i w wodzie, Galileusz przekonał się, że różnice w czasach spadku zależą od gęstości środka (powietrza, wody), a nie od ciężarów spadających ciał, z czego wywnioskował, że opór śródka stanowi prawdziwą przyczynę obserwowanych różnic.

Wniosek ten możemy stwierdzić doświadczeniem, wykonanem po raz pierwszy przez Newtona. Weźmy w tym celu długą

szklaną rurę, zakończoną mosiężnemi oprawami, z których jedna jest hermetycznie zamkniętą, druga zaś wydłuża się w rurkę, dającą się *zamknąć kranem i połączyć z pompą powietrzną*. Wprowadźmy do wnętrza rury drobne przedmioty o rozmaitym ciężarze — kawałki metalu, drzewa, korka i wypompowawszy z niej powietrze, zamknijmy kran. Jeżeli teraz nagłym ruchem przewrócimy rurę i nadamy jej położenie pionowe, to wszystkie te przedmioty jednocześnie spadną na dno (fig. 3). Gdybyśmy to samo zrobili wtedy, gdy rura zawiera powietrze, to zauważylibyśmy rożnicę w spadku: ciała najcięższe spadłyby najprędzej, najlżejsze zaś — najwolniej. Jeżeli będziemy powtarzali to doświadczenie tak, aby za każdym razem coraz bardziej wypompowywać powietrze, to zobaczymy, że różnica ta staje się tem mniejszą, im mniej jest powietrza w rurze i że przy możliwie zupełnej próżni, wszystkie ciała, niezależnie od swego ciężaru, jednocześnie dosięgają dna rury.

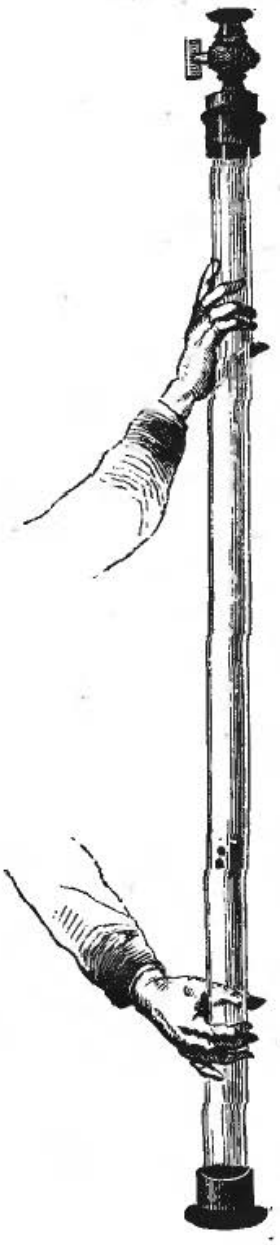


Fig. 3. Doświadczenie, pokazujące, że wszystkie ciała spadają w próżni z jednakową szybkością.

Z powyższego wynika, że opór środka stanowi *istotną przyczynę nierównej prędkości spadku* różnych ciał. Rozważmy wypadek dla nas najważniejszy — gdy ciała spadają w powietrzu. Spuśćmy z tej samej wysokości dwa ciała jednakowo wielkie, lecz różnego ciężaru, dajmy na to pieniądz metalowy i krążek papierowy. Każden z nich spadając, musi ciągle rozsuwać cząstki powietrza, przez co — jak zobaczymy później — traci część swej prędkości; stratę tę, w danym razie dla obu ciał jednakową z powodu równej ich objętości, ponosi jednak w wypadku z pieniądzem większa masa, niż w wypadku z papierem, przez co zmniejszenie prędkości krążka jest większem niż pieniądza i pierwszy wolniej spada na ziemię. Różnica byłaby jeszcze znaczniejszą, gdyby ciała te spadały

w środku gęściejszym od powietrza, np. w wodzie. Jeżeli zaś położymy krążek na pieniądzu, tak, ażeby one razem jako jedna całość spadały, to oba jednocześnie dosięgną ziemi dlatego, że w tym razie pieniądz toruje drogę krążkowi, rozsuwając przed nim cząstki powietrza. Z drugiej strony weźmy dwa ciała równego ciężaru, lecz różnej objętości — kartkę papieru i kulkę zrobioną z takiej samej kartki; jeżeli spuścimy je z jednakowej wysokości, to kartka później spadnie na ziemię, z powodu bowiem większej swej powierzchni musi ona rozsunąć więcej cząstek powietrza niż kulka, wskutek czego traci bardziej na prędkości. Gdyby ludzie, zamiast ślepo wierzyć w autorytet Arystotelesa, byli zadali sobie pracę wykonania ostatnio przytoczonego prostego doświadczenia, to łatwo przekonaliby się, jak błędnem jest zdanie — jeszcze do dziś dnia przez wielu wyznawane — że prędkość spadku zależy od ciężaru i od materyału spadającego ciała. Widzieliśmy, że przeciwnie: dwa ciała równego ciężaru i z tego samego materyału (kartka i kulka papierowa) spadają z niejednakową prędkością i że przyczyna tej różnicy wcale od czego innego zależy. Doświadczenie atoli dopiero w nowszych czasach zyskało moc rozstrzygającą w kwestyach nauki i my w tej książce tylko te poglądy będziemy uważali za ostatecznie dowiedzione, które udało się wprost stwierdzić na drodze doświadczalnej, albo które zostały wyprowadzone z danych, opartych na doświadczeniu.

To, cośmy wyżej powiedzieli o ciałach stałych, stosuje się w równej mierze do ciał płynnych i gazowych. Masa wody, spadając rozszczepia się na mnóstwo kropli, w końcu zaś na drobny pył, a to wskutek wielkiej ruchliwości swych cząstek i oporu powietrza. Zjawisko to występuje bardzo wyraźnie w naturalnych wodospadach, gdzie woda spada ze znacznej wysokości, jak to ma miejsce naprzykład z wodospadem „Staubbach“ (Staub—pył i Bach—strumień).

Natomiast w rurze, pozbawionej powietrza, woda spada jako spójna masa, zachowując przytem cylindryczny jej kształt i wydając przy uderzeniu dźwięk podobny do tego, jaki wydaje suche ciało stałe. Tak samo dym, wznoszący się w zwykłych warunkach w górę — a to dla przyczyn, które później poznamy, zamknięty w rurze, z której wypompowano powietrze, spada na dno, co pokazuje, że i gazy podlegają działaniu ciężkości.

Mimochodem zauważymy, że opór, jaki stawia powietrze spadającym ciałom, ma pewne znaczenie dla rolnictwa, które i tak już wiele cierpi od szkód, wyrządzanych przez grad. Bez tego oporu, najdrobniejsze krople deszczu, spadając z wysoko unoszących się chmur, uderzałyby o ziemię z wielką mocą i sprawiałyby groźne spustoszenia.

Drogą powyższych doświadczeń zyskaliśmy pierwsze prawo tyczące się działań ciężkości: *Wszystkie ciała w jednem i tem samem miejscu spadają w próżni z jednakową prędkością, niezależną od ich objętości, ani od ciężaru.*

§ 2. Spadek ciał. Kierunek spadku.

Kierunek działania siły ciężkości jest prostopadły do płaszczyzny poziomej danego miejsca, ta ostatnia zaś określa się niewielką powierzchnią spoczywającego płynu — zwykle wody. Uwiążmy na nitce jakiś ciężarek i przymocujmy drugi jej koniec do stałej podpory (fig. 4); zawieszony ciężarek spada ku ziemi i wypręża nitkę; kierunek, jaki przyjmuje ta ostatnia, gdy po kilku wahaniach przejdzie w stan spoczynku — nazywamy pionowym, sznurek zaś z ciężarem —pionem; przyrządem tym posługują się rzemieślnicy w celu pionowego ustawiania różnych przedmiotów. Jeżeli zawiesimy pion nad

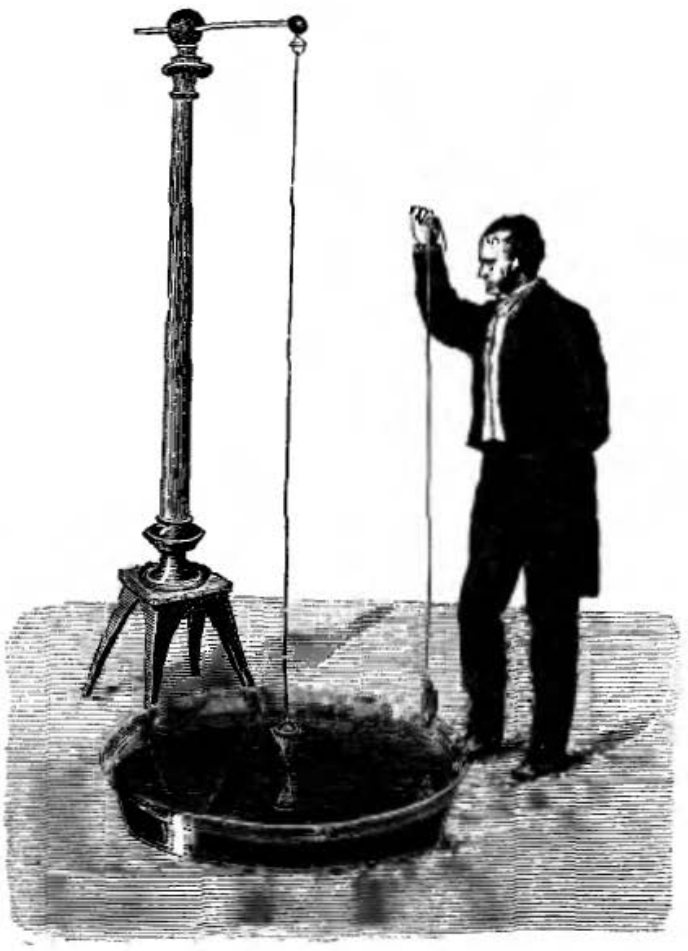


Fig. 4. Kierunek działania ciężkości jest prostopadły do powierzchni spoczywającego płynu.

powierzchnią spoczywającego płynu, naprzykład nad naczyniem napełnionem rtęcią, to zobaczymy, że kierunki wyprężonej nitki i jej obrazu stanowią prostą linię, co na mocy praw odbijania się światła, które później wyłuszczymy, pokazuje, że oba te kierunki są prostopadłe względem powierzchni płynu; tak samo się zachowuje inny pion, którego koniec trzymamy w ręku.

Jakeśmy już przedtem nadmienili, to różne linje pionowe nie są równoległe między sobą; przy nieznacznych jednak odległościach kąt, jaki one tworzą, jest tak mały, że nie daje się prawie wymierzyć. Pionowe dwu punktów, oddalonych od siebie na 31 metrów, przeciętnie tworzą kąt 1″, a jest to wielkość, którą astronomowie i geodeci zaledwie przy pomocy najczulszych przyrządów mogą jeszcze oznaczyć. Jeżeli będziemy brali na powierzchni ziemi punkty coraz bardziej oddalone od siebie, to kąt, utworzony przez ich pionowe, przybiera wszystkie wartości od 0° do 180°. Gdy dwa punkty leżą na tym samym południku, a więc gdy mają jednakową długość geograficzną, wtedy kąt rzeczony równa się różnicy ich szerokości geograficznej; tak naprzykład: dla Paryża i Dunkierki wynosi on w przybliżeniu 2° 12′, dla Londynu i Edynburga — 4° 25′ i t. d. Tylko więc o ciałach, znajdujących się na nieznacznej od siebie odległości, możemy powiedzieć, że kierunki ich spadku są prawie zupełnie równoległe.

Jeżeli doświadczenia powyższe z pionem będziemy wykonywali w pobliżu jakiejś wielkiej masy, naprz. wysokiej góry, to zauważymy zboczenie od kierunku pionowego w stronę góry, zależące od przyciągania, wywieranego przez tę masę na pion. Zboczenie takie, zawsze nieznaczne, pierwsi obserwowali Bouguer i Lacondamine na stoku góry Chimborazo. W r. 1774 Maskelyn i Hutton zmierzyli kąt, utworzony przez dwa piony, pomieszczone jeden na północnej, drudzy zaś na południowej stronie góry Schihallion w Szkocji i znaleźli go równym 53″, podczas gdy kąt, obliczony z odległości dwu tych obranych punktów wynosi tylko 41″; zboczenie więc o 12″ zostało spowodowane przez przyciągające działanie masy tej góry.

Ruch obrotowy ziemi naokoło osi powoduje także zboczenie od kierunku spadku. Ciało, znajdujące się na pewnej wysoko-

ści, w punkcie a, spadłoby na ziemię w punkcie A, leżącym na tej samej pionowej, gdyby ziemia się nie obracała. Jeżeli natomiast ziemia się obraca, to w czasie, gdy ciało spada, punkt a opisuje łuk $aa_{,,}$, większy od łuku $AA_{,,}$, opisywanego przez punkt A. Ponieważ tedy ciało w chwili, gdy zaczyna spadać, posiada większą prędkość obrotową niż punkt A i takową zachowuje przez cały czas spadku, przeto spadnie ono nie w punkcie A, lecz w $A_{,,}$, leżącym bardziej na wschód (fig. 5). Zboczenie to jest żadne tam, gdzie prędkość $= o$, to jest na biegunach, staje się coraz większem w miarę tego, jak zbliżamy się od bieguna ku równikowi i na tym ostatnim dosięga *maximum*. Przy wysokości spadku $= 100$ metr., zboczenie to na równiku wynosi według obliczenia 33 milimetry. Słuszność tego teoretycznego wniosku, wynikającego z założenia, że ziemia się obraca, pierwszy stwierdził Benzenberg doświadczeniami, wykonanemi z wieży Michała w Hamburgu, później zaś Reich. Ten ostatni urządzał odnośne doświadczenia w miejscu, wolnem od ciągów powietrza, zmniejszających dokładność rezultatów, mianowicie w głębokim szybie jednej z kopalń frejburskich w Saksonji. Gdy spuszczał on kule metalowe z punktu A (fig. 5), znajdującego się u wejścia do szybu, takowe spadały nie w punkcie B, leżącym na tej samej pionowej, lecz w punkcie B', położonym o 28 milimetrów dalej na wschód, przy głębokości szachtu $= 158{,}5$ metrom. Rezultat ten dostatecznie się zgadza z teoretycznie obliczonym — 26,6 milim. Opisane doświadczenia z drugiej strony możemy uważać za bezpośredni dowód ruchu obrotowego ziemi naokoło osi.

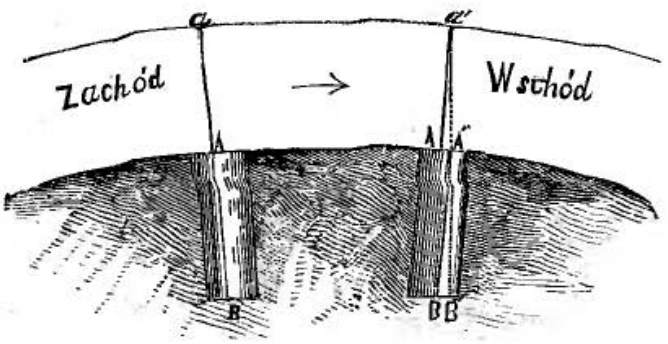


Fig. 5. Zboczenie ku wschodowi swobodnie spadających ciał.

§ 3. Prawa spadku ciał.

Galileusz w badaniach swych nad spadkiem ciał nie ograniczył się na obaleniu wyłuszczonego już przez nas błędu co do przyczyny nierównej prędkości spadających ciał. Zauważył on mianowicie, że prędkość ta staje się tem większą, im znaczniejszą jest wysokość spadku, i że droga, przebiegana przez ciało, rośnie w szybszym stosunku niż czas, innemi słowy, że ciało w następujących po sobie równych odstępach czasu przebywa coraz większe przestrzenie. Zapewne i przed nim zrobiono już podobne spostrzeżenie, jemu jednak bezsprzecznie należy się zasługa odkrycia praw tych zjawisk, t. j. stosunków, jakie zachodzą pomiędzy prędkością, drogą przebytą i czasem spadku. Drogą teoretycznego rozumowania doszedł on do wniosku, że prędkość spadającego ciała powinna wzrastać proporcyonalnie do czasu spadku, czyli, że ciało spadające przez 2, 3, 4 i t. d. razy dłuższy czas nabywa tyleż razy większej prędkości i stwierdził ten wniosek sławnemi doświadczeniami, noszącemi jego imię; mamy tu na myśli *doświadczenia Galileusza nad spadkiem ciał po równi pochyłej.*

Miarę siły, pod wpływem działania której ciężkie ciało, naprzykład kula metalowa, swobodnie spada na ziemię, daje nam jego ciężar; chcąc powstrzymać spadek takiego ciała, musimy na nie działać równym mu ciężarem w kierunku przeciwnym kierunkowi działania ciężkości. Gdy ciało spada swobodnie, wtedy ruch jego jest tak szybki, że nie możemy bezpośrednio obserwować dróg, jakie ono przechodzi w pewnych określonych odstępach czasu; rzecz się jednak zmienia, jeżeli spadek odbywa się nie w kierunku pionowym, lecz po równi pochyłej. Miarę siły, pod wpływem której kula a spada po równi pochyłej AB, daje nam ciężarek — przyczepiony za pomocą nici do kuli i przerzucony przez blok w sposób pokazany na fig. 6 — ściśle wystarczający do powstrzymania jej ruchu. Otóż przekonano się doświadczalnie, że jeżeli kierunek działania ciężarka — t. j. kierunek części nici, znajdującej się pomiędzy kulą a blokiem — jest równoległy do linii AB, to równowaga ma miejsce wtedy, gdy ciężarek jest tyle razy mniejszym od ciężaru kuli, ile razy AC (wysokość rów-

ni pochyłej) jest mniejszą od AB (jej długości). Naprzykład kulę, ważącą 10 kilogramów i znajdującą się na równi pochyłej, której wysokość do długości ma się jak 1 do 10, możemy utrzymać w równowadze 1 kil., na równi pochyłej, dla której stosunek ten jest jak 1 do 20 — ciężarem $^1/_2$ kilogr. i t. d. Ciało więc spada po tych równiach pod wpływem 10, 20 i t. d. razy zmniejszonej niejako siły ciężkości, wskutek tego nabywa także, w tym samym czasie 10, 20 i t. d. razy mniejszej prędkości. Pojmujemy tedy, że dobierając odpowiednio nachylonej równi, możemy spadek ciała na tyle zwolnić, że drogi, przebywane przez nie w określonych odstępach czasu, dają się już bezpośrednio mierzyć, co pozwala wyprowadzić prawa spadku ciał pod wpływem siły ciężkości.

Rezultaty, otrzymane przez uczonego włoskiego, jakkolwiek wystarczyły do odkrycia praw spadku, nie są jednak dosyć dokładne. Do doświadczalnego wykazania tych praw używają przeto obecnie innych doskonalszych przyrządów, które teraz opiszemy. Przedtem jednak zaznaczymy jeszcze, że w XVII-ym wieku Riccioli i Grimaldi potwierdzili rezultaty Galileusza, spuszczając ciężkie ciała z różnych wież i mierząc czasy spadku przy pomocy wahadła, a w 1699 r. ojciec Sebastyan wynalazł nawet w tym celu stosowną maszynę. Dopiero jednak fizyk angielski Atwood zbudował maszynę, dającą bardziej dokładne rezultaty, a w nowszych czasach jenerał Morin wynalazł przyrząd samozapisujący wyniki doświadczeń.

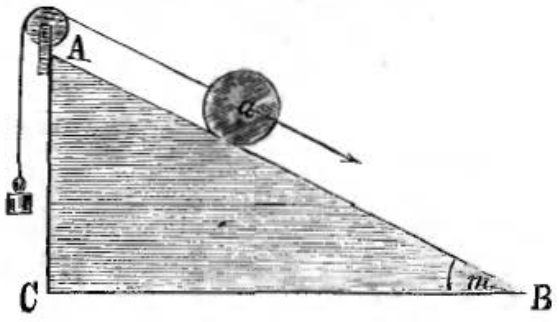


Fig. 6. Kula na równi pochyłej.

Atwood używa następującego sposobu do zwolnienia ruchu spadających ciał. Dwa dokładnie równe ciężary uwiązane są do dwu końców jedwabnego sznura, przerzuconego przez blok t. j. koło mające na obwodzie wyżłobienie; dla zmniejszenia tarcia oś bloka spoczywa nie w stałych panwiach, lecz na dwu parach — jednej z przodu, drugiej z tyłu — nieco zachodzących na siebie

kół (fig. 7). W takiem położeniu cały ten system pozostaje w spoczynku dlatego, że uwiązane ciężary wzajemnie się równoważą. Dla wprawienia go w ruch, należy na jednym z nich położyć jakiś nadciężarek: wtedy obie części sznura przesuwają się w kierunkach wręcz przeciwnych, zachowując jednak przytem pionowy kierunek i jeden ciężar — ten, na który kładziemy nadciężarek— spada, drugi zaś się wznosi. Łatwo atoli pojąć, że spadek będzie tem więcej zwolniony, im mniejszym jest nadciężarek w stosunku do ciężaru całej poruszającej się masy, t. j. bloka, nitki, obu ciężarów i nadciężarka. Przypuśćmy, że blok waży 3 gr., nitka — 1 gr., każdy z ciężarów— 10 gr., nadciężarek zaś— 1 gram, wtedy masa 25 gr. zostaje wprawioną w ruch przez siłę równą tylko ciężarowi 1 grama, podczas gdy w swobodnym spadku ta sama masa poruszałaby się pod wpływem własnego swego ciężaru, a więc siły równej ciężarowi 25 gr., czyli 25 razy większej. Spadek przeto w maszynie Atwooda, przy rzeczonym stosunku nadciężarka do ciężaru całej masy będzie taki sam, jak gdyby natężenie siły ciężkości było 25 razy mniejszem, przyczem same prawa spadku zostają niezmienione. Wskutek tak zwolnionego ruchu, obserwacya jest bardzo ułatwioną; dla uczynienia jej możliwie dokładną, cały przyrząd zbudowany jest (fig. 8) jak następuje:

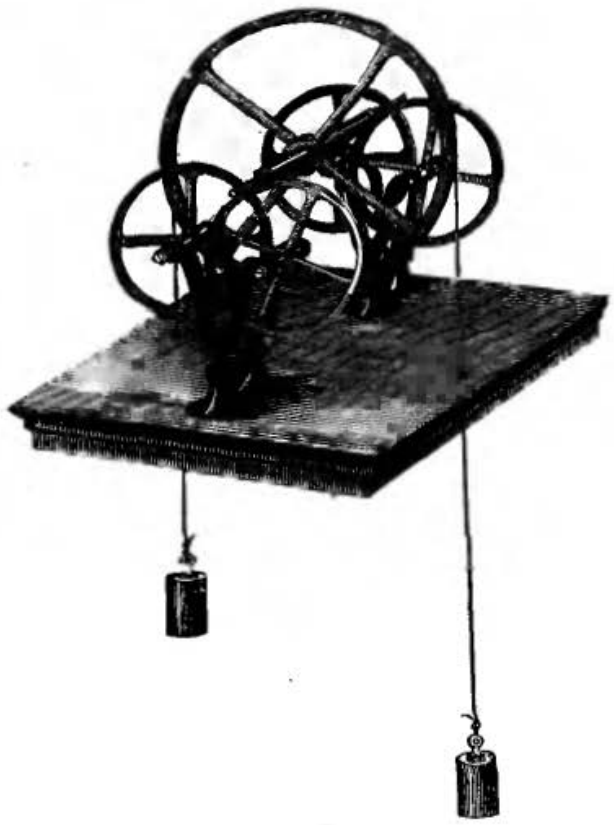


Fig. 7. Układ kół w maszynie Atwooda.

Płyta drewniana (przedstawiona oddzielnie na fig. 7) wraz ze znajdującemi się na niej kołami, przedziurawiona w dwu punktach dla przepuszczenia sznura, umieszczoną jest poziomo na słu-

pie, 3 metry długim, ustawionym prostopadle na ciężkiej drewnianej podstawie, której za pomocą szrubek możemy nadać położenie poziome.— Z lewej strony słupa znajduje się skala, dokładnie podzielona na centymetry, pozwalająca odczytywać drogi, jakie przebywa spadający przed nią ciężar. — W dowolnem miejscu możemy przyszrubować do skali talerzyk, o który uderza spadający przed nią ciężar, wydawanym przy tem dźwiękiem zdradzając koniec swego ruchu; oprócz tego, także w dowolnem miejscu, lecz zawsze wyżej od talerzyka, daje się do niej przymocować pierścień, który swobodnie przepuszcza ciężar, zatrzymuje zaś położony na tym ostatnim nadciężarek z powodu wydłużonego jego kształtu. Przed rozpoczęciem ruchu, ciężar spoczywa na podstawce, znajdującej się przy

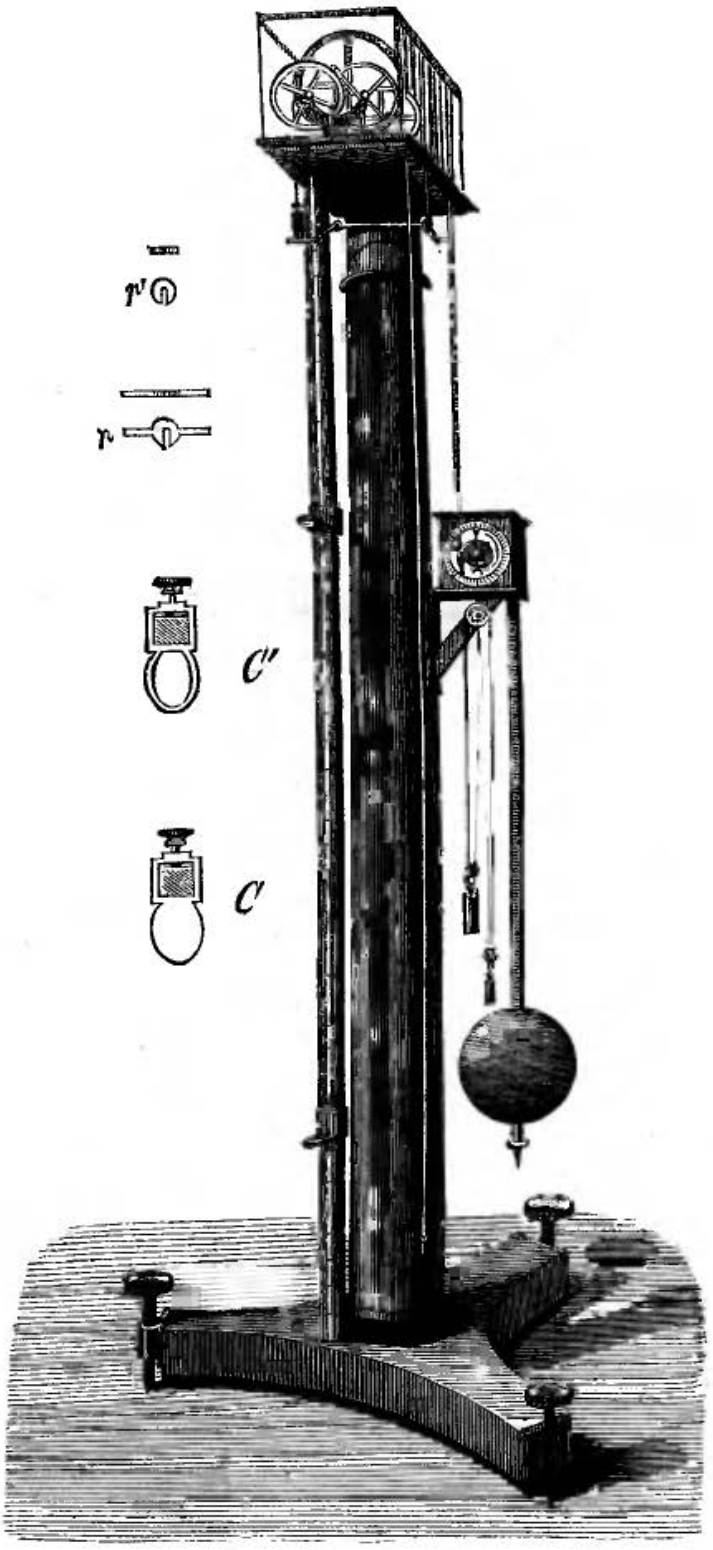


Fig. 8. Maszyna Atwooda.

0 skali i połączonej z zegarem głośno bijącym sekundy za pomocą mechanizmu tak urządzonego, że z chwilą usunięcia podstawki ciężar zaczyna spadać, a jednocześnie zegar zaczyna bić, co pozwala dokładnie mierzyć czas, upływający od początku spadku.

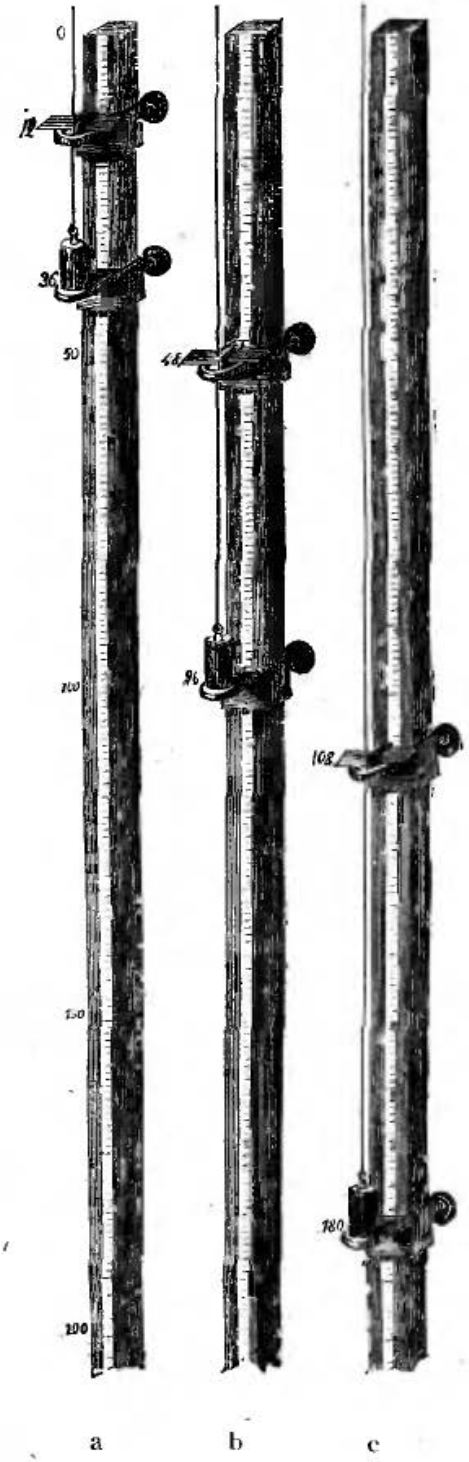


Fig. 9. Ilustracja prawa prędkości.

Przyprowadziwszy przyrząd do stanu, przedstawionego na fig. 8, rozpoczynamy doświadczenia. Połóżmy na ciężarze nadciężarek p i usuńmy podstawkę. W tej chwili masa zostaje raptownie wystawioną na działanie ciężkości, zegar pierwszy raz bije i ciężar z nadciężarkiem zaczyna spadać. Poprzednio już wypróbowaliśmy, że w końcu pierwszej sekundy dobiega on do 12 podziałki; jeżeli w tem miejscu *przymocujemy pierścień* (fig. 9*a*) to zatrzyma on nadciężarek, w tej więc chwili siła, pod wpływem której cała masa się poruszała, nagle przestanie działać, sam ciężar jednak się nie zatrzyma, lecz, przeszedłszy swobodnie przez pierścień, dalej będzie spadać. Chcąc wiedzieć, jaką drogę przebywa on w ciągu 2 sekundy, musimy talerzyk przymocować w takiem miejscu skali, ażeby uderzenie ciężaru o talerzyk następowało jednocześnie z drugiem uderzeniem zegaru; za pomocą kilku prób przekonywamy się, że dzieje się to wtedy, gdy talerzyk znajduje się przy podziałce 36, co pokazuje, że ciężar w 2 sekundę przebył drogę równą 24 cent. (od 12 do 36). W podobny spo-

sób dowiadujemy się, że i w 3, 4, 5 i t. d., jednem słowem w każdą sekundę od chwili ustania działania nadciężarka, ciężar przebywa tę samą drogę 24 cent., t. j. że wtedy w jednakowych odstępach czasu przechodzi równe drogi. Dla znalezienia więc drogi, jaką ciało, po ustaniu działania na nie siły, przebywa w pewnym czasie, należy drogę, przebywaną w ciągu jednej sekundy— drogę tę nazywamy w tym wypadku prędkością ruchu — pomnożyć przez liczbę sekund, w ciągu których ono się porusza. Z tego już wynika, że prędkość równa się drodze, podzielonej przez czas i że czas równa się drodze, podzielonej przez prędkość. Ruch taki nazywamy *jednostajnym*.

Pozwólmy teraz nadciężarkowi p działać, zamiast przez 1, przez 2, 3 i t. d. sekundy. Próby pokazują, że w tym celu należy pierścień umieścić przy podziałce 48, 108 i t. d. W każdym wypadku ruch spadającej masy, po zatrzymaniu nadciężarka, jest jednostajny, jak o tem możemy się przekonać zapomocą prób powyżej opisanych. Z doświadczeń tych i wielu innych jeszcze, dających ten sam rezultat, wynika, że po ustaniu działania siły na ciało, to ostatnie porusza się dalej z jednostajną prędkością. Prędkość ta jednak jest tem większą, im dłużej działa siła: Jeżeli pierścień umieścimy przy 12 podziałce, a więc gdy nadciężarek p działa przez 1 sek., wtedy ciężar w następną sekundę przebywa drogę 24 cent. — od 12 do 36 podziałki (fig. 9*a*); gdy pierścień znajduje się przy 48 — gdy nadciężarek p działa przez 2 sek.— to ciężar podczas następującej sek. przechodzi drogę 48 cent. — od 48 do 96 podz. (fig. 9*b*); po 3 sek. prędkość równa się 72 cent. — od 108 do 180 pod. (fig. 9c) i t. d.

Po 1 sek. prędkość równa się.	. .	24 cent.
„ 2 „ „ „ „	. . .	$48 = 24 \times 2$
„ 3 „ „ „ „	. . .	$72 = 24 \times 3$ i t. d.

Gdybyśmy użyli innego nadciężarka do poruszenia tej samej masy, to prędkość jej w końcu 1-szej sek. byłaby także inną, ale w końcu 2, 3 i t. d. sekundy — również 2, 3 i t. d. razy większą, niż po upływie 1 sekundy. Doświadczenia te pokazują, że

prędkość ciała, spadającego pod wpływem ciężkości, wzrasta proporcyonalnie do czasu. Ruch, którego prędkość zmienia się zgodnie z tem prawem, nazywamy *jednostajnie przyśpieszonym*, sam zaś przyrost prędkości w ciągu 1 sekundy — *przyśpieszeniem*, (w powyższych przykładach wynosi ono 24 cent.); jeżeli przy tem w początku ciało nie posiada żadnej prędkości, jak to ma miejsce *w omówionych doświadczeniach*, to prędkość w końcu 1-szej sek. równa się przyśpieszeniu.

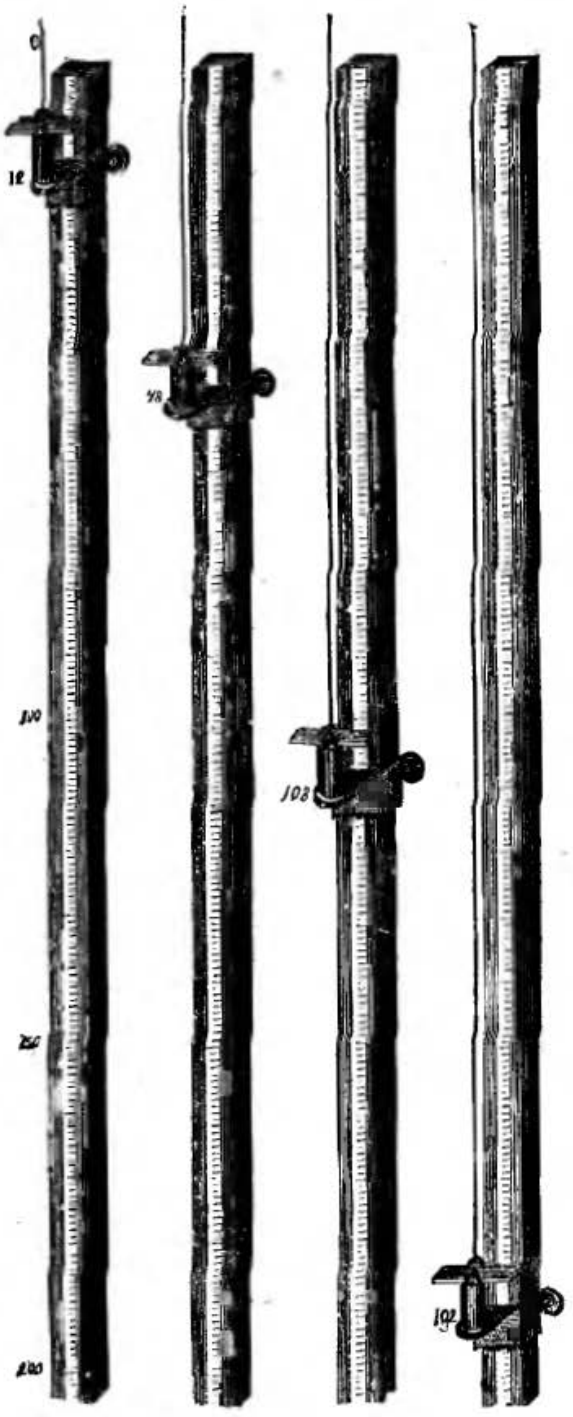


Fig. 10. Ilustracya prawa dróg w ruchu jednostajnie przyśpieszonym.

Zbadawszy zależność, zachodzącą pomiędzy prędkością spadającego ciężaru, a czasem działania nań siły, zobaczmy teraz, w jakim stosunku znajduje się do tego czasu droga przebyta. Ponieważ chodzi tu o to, ażeby nadciężarek działał przez cały czas spadku, pierścień więc, który go zatrzymuje, jest już teraz zbyteczny i dlatego przy poniższych doświadczeniach zdejmujemy go. Za pomocą kilku prób dowiadujemy się, że talerzyk należy umieścić przy 12, 48, 108, 192 i t. d. podziałce, ażeby spadający ciężar wraz z nadciężarkiem uderzał oń po upływie 1, 2, 3, 4 i t. d. sek. (fig. 10).

Drogi więc przebyte podczas działania nadciężarka są następujące:

po 1 sek. . . . . 12 cent.
„ 2 „ . . . . . 48 = 12 × 4
„ 3 „ . . . . . 108 = 12 × 9
„ 4 „ . . . . . 192 = 12 × 16 i t. d.

Z tego widzimy, że dla znalezienia drogi, jaką spadające ciało przebywa po 2, 3, 4 i t. d. sekundach, należy drogę, w ciągu pierwszej sekundy pomnożyć przez 4, 9, 16 i t. d. t. j. przez kwadrat z liczby sek. od początku ruchu. Gdybyśmy do powyższych doświadczeń użyli innego nadciężarka, to dla dróg otrzymalibyśmy wprawdzie inne liczby, ale stosunek ich byłby ten sam. Możemy tedy drugie prawo spadku, odkryte już dawniej przez Galileusza, sformułować jak następuje: *Droga, jaką przechodzi ciało, spadające pod wpływem ciężkości, wzrasta proporcyonalnie do kwadratu z czasu, upłynionego od początku ruchu.*

Zobaczmy teraz, jakie drogi przebywa spadające ciało w każdą oddzielną sekundę. W opisanych doświadczeniach przyśpieszenie wynosi 24 cent., o tyle bowiem wzrasta prędkość w ciągu każdej sekundy, (jak to dobrze uwydatnia fig. 9), droga zaś przebyta podczas pierwszej sek. równa się 12 cent. a więc połowie; przy innym stosunku nadciężarka do ciężaru całej poruszającej się masy, przyspieszenie byłoby innem, ale zawsze droga w ciągu pierwszej sekundy byłaby dwa razy od niego mniejszą. Widzimy tedy, że *droga przebyta w ciągu pierwszej sek. przez ciało, spadające pod wpływem ciężkości, równa się połowie przyśpieszenia.*

Podczas pierwszej sek. ciało przebywa drogę 12 cent., podczas dwóch pierwszych sek. 48 c., a więc podczas samej tylko drugiej sek. 36, podczas trzech pierwszych sek. 108 cent., a więc w ciągu samej tylko trzeciej — 60 cent. i t. d.

Droga w 1-szej sek. . . 12 c. = 12 × 1
„ „ 2-ej „ . . 36 „ = 12 × 3
„ „ 3-ej „ . . 60 „ = 12 × 5 i t. d.

Ten sam stosunek otrzymalibyśmy, używając innego nadciężarka, co pokazuje, że *drogi w oddzielnych następujących po sobie*

sekundach, przebywane przez ciało spadające pod wpływem ciężkości, mają się do siebie jak szereg liczb nieparzystych.

Poprzednio podaliśmy już prawo, wyrażające zależność pomiędzy prędkością i czasem spadku (fig. 9). Przedstawione na tej figurze doświadczenia pozwalają także wyrazić stosunek pomiędzy prędkością a drogą przebytą. Przypominamy tu raz jeszcze, że części skali od 0 do podziałki, przy której znajduje się pierścień, przedstawiają drogi przebyte w ciągu 1-ej, 2-ch, 3-ch i t. d. sekund, od pierścienia zaś do talerzyka—prędkości w końcu 1-ej, 2-ej, 3-ej i t. d. sekundy. Mamy więc:

Czas	1″	2″	3″
Drogi	12 . . .	48 = 12 × 4 . . .	108 = 12 × 9 i t. d.
Prędkości	24 . . .	48 = 24 × 2 . . .	72 = 24 × 3 i t. d.

Ciało więc, spadając z 4, 9, 16, 25 i t. d. razy większej wysokości, nabywa 2, 3, 4, 5 i t. d. razy większej prędkości; przy innym nadciężarku otrzymalibyśmy ten sam rezultat. Gdy z dwu liczb jedna, będąc pomnożona przez samą siebie, daje drugą, to pierwszą nazywamy pierwiastkiem kwadratowym tej drugiej, tak naprzykład: 2 jest pierwiastkiem kwadrat. 4, 3—9, 4—16, 5—25 i t. d. Otóż, w powyższej tabliczce liczby wyrażające, ile razy prędkość w końcu 2-ej, 3-ej i t. d. sek. jest większą niż w końcu pierwszej sek., są pierwiastkami kwadratowemi liczb wyrażających, ile razy droga przebyta w 2, 3 i t. d. sek. jest większą, niż droga w pierwszej sekundzie. Rezultat tych doświadczeń możemy więc sformułować w ten sposób: *prędkość ciała spadającego wzrasta proporcyonalnie do pierwiastku kwadratowego z drogi przebytej.*

Trzy ostatnie prawa, któreśmy tu wykazali doświadczalnie, wynikają zresztą już z zasadniczego prawa spadku — z prawa dróg. Prawo to możemy nadto stwierdzić i na ciele, spadającem pod działaniem niezmniejszonej siły ciężkości, za pomocą maszyny, zbudowanej, według pomysłu Poncelet'a, przez Morina. Zasadniczą część tej maszyny stanowi cylindryczny ciężarek, ku dołowi stożkowato zaostrzony, który spada pomiędzy dwoma wyprężonemi drutami, kreśląc przy tem przymocowanym doń ołów-

kiem linię na znajdującej się za nim kolumnie, oblepionej w tym celu papierem — (fig. 11).

Gdyby kolumna pozostawała nieruchomą, wtedy ołówek ciężarka nakreśliłby na papierze, podczas spadku, linię pionową, z której nie dałby się wyprowadzić żaden wniosek co do wielkości dróg, przebytych przezeń w każdą sekundę. Kolumna jednak—przy pomocy odpowiedniego mechanizmu, którego urządzenie nas tu bliżej nie obchodzi—obraca się naokoło swej osi z jednostajną prędkością, a ołówek kreśli wtedy na papierze linię krzywą, której własności odrazu dają *poznać* prawo spadku.

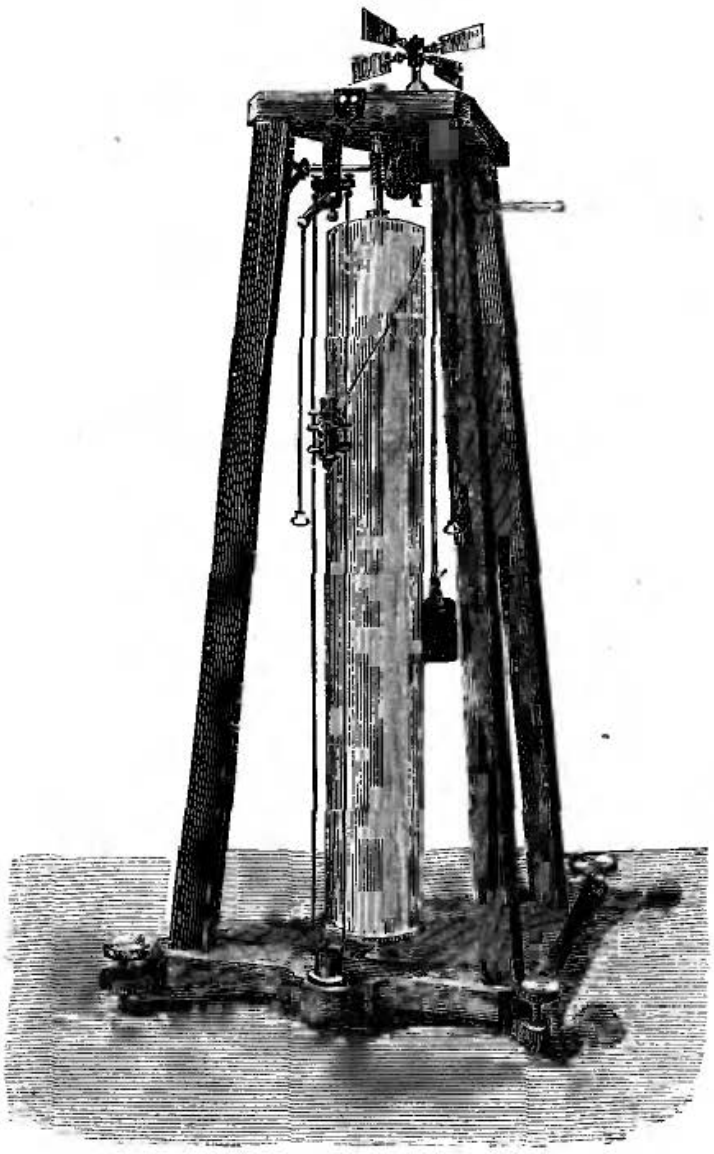


Fig. 11. Maszyna Morina.

Gdy mianowicie, zdjąwszy papier z kolumny, rozwiniemy go, to znajdziemy na nim nakreśloną linię, znaną w geometryi pod nazwą *paraboli*, która ma następującą własność — (fig. 12). Jeżeli przez najwyższy jej punkt-wierzchołek przeprowadzimy linię pionową — t. z. oś paraboli i horyzontalną i z dowolnych punktów paraboli opuścimy prostopadle na każdą z tych linij (na rysunku prostopadłe te są przedsta-

wione przez linie kropkowane, to odległości [1]) tych punktów od linii horyzontalnej mają się do siebie jak kwadraty z odległości tychże punktów od osi. Jeżeli oddzielimy naprzykład na linii horyzontalnej, począwszy od 0, 5 równych części, to odległości punktów podziału od 0 mają się do siebie, jak 1, 2, 3, 4, 5, linie zaś poprowadzone od tych punktów równolegle do osi aż do spotkania z parabolą — jak 1, 4, 9, 16, 25 t. j. jak kwadraty poprzednich liczb.

Ponieważ kolumna obraca się z jednostajną prędkością naokoło osi, przeto równe odległości pomiędzy dwoma następującemi po sobie punktami podziału na linii horyzontalnej przedstawiają równe odstępy czasu, kropkowane zas linie równoległe do osi — drogi przebyte przez swobodnie spadające ciało w końcu każdego odstępu czasu; drogi te mają się, jak pokazuje rysunek, jak kwadraty z czasów spadku, przez co zostaje dowiedzione prawo dróg spadku.

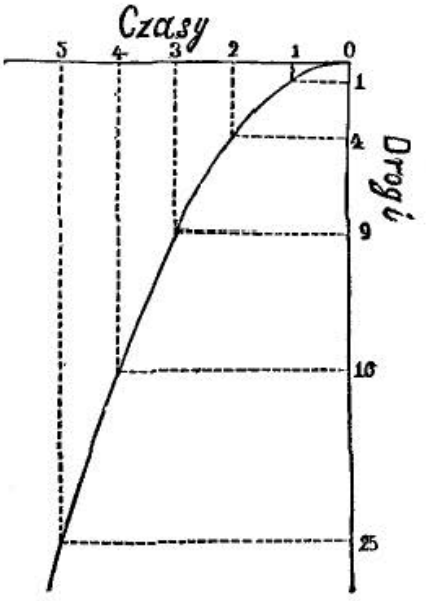


Fig. 12. Ilustracya prawa dróg spadku.

Nie należy zresztą sądzić, ażeby opisane przez nas maszyny Atwooda i Morina dawały absolutnie dokładne rezultaty; do tego brak jeszcze wielu warunków: należałoby mianowicie w tym celu usunąć wpływ tarcia, opór powietrza i inne przeszkody ruchu, czego jednak przy używaniu powyższych przyrządów niepodobna uczynić. Rezultaty te na tyle atoli się zgadzają z teoretycznie obliczonemi, że możemy je uważać za doświadczalne stwierdzenie praw spadku.

Doświadczenia, wykonane za pomocą równi pochyłej i maszyny Atwooda, polegają na tem, że sztucznie zmniejszamy natężenie siły ciężkości, a przez to i prędkość spadającego ciała, przy

---

[1]) Odległość jakiegoś punktu od pewnej linii mierzy się wielkością prostopadłej, opuszczonej zeń na tę linię.

czem jednak samę prawa spadku — wyrażające stosunek między czasem prędkością i drogą — zostają niezmienione. Wskutek jednak tego zmniejszenia działającej siły, a także wskutek przeszkadzającego wpływu tarcia i oporu powietrza doświadczenia te nie pozwalają bezpośrednio oznaczyć drogi, jaką przebyłoby ciało swobodnie spadające w próżni po upływie pewnego czasu, albo prędkości, jakiej ciało takie nabyłoby w końcu 1-szej sekundy, czyli przyśpieszenia; doświadczenia z maszyną Morina także nie dają nam dokładnej wielkości tego ostatniego i w nich bowiem spadek ciała nie jest wolnym od przeszkód. Jakiej metody należy użyć, aby ściśle oznaczyć przyśpieszenie swobodnego spadku, o tem dowiemy się w następnym rozdziale, tutaj zaś zaznaczymy tylko, że przyspieszenie to, będące miarą natężenia siły ciężkości, nie jest jednakowem we wszystkich punktach na powierzchni ziemi, lecz zmienia się wraz z szerokością geograficzną, dalej zależy od lokalnego ukształtowania skorupy ziemskiej, a także od większej lub mniejszej odległości punktu, z którego ciało spada, od środka ziemi.

Jeżeli więc teraz wprowadzimy pewne wartości liczebne, to nie należy zapominać, że stosują się one tylko do spadku w próżni, do doświadczeń wykonywanych bardzo blizko powierzchni ziemi i do pewnego ściśle określonego punktu obserwacyjnego, naprzykład, jak w poniżej podanych liczbach, do obserwatoryum paryskiego.

W takich warunkach, ciało w końcu pierwszej sekundy nabywa prędkości 9,8094 metr. — takiem więc będzie przyśpieszenie dla Paryża [1]). W ciągu 1-szej sek. ciało przebywa drogę równą połowie przyśpieszenia, a więc 4,9047 m.

po 2 sekundach droga równa się 19,619 m. (4,9047 × 4)
„ 3 „ „ „ 44,142 „ (4,9047 × 9)
„ 4 „ „ „ 78,475 „ (4,9047 × 16)
„ 5 „ „ „ 122,618 „ (4,9047 × 25)
i t. d.

---

[1]) W Warszawie przyśpieszenie wynosi 9,81195 metr.

W podobny sposób moglibyśmy obliczyć także czas, jakiego potrzebuje ciało na to, ażeby spaść z pewnej wysokości, oraz prędkość, jaką ma przy spadnięciu na ziemię. Otrzymalibyśmy naprzykład następujące wartości:

Wysokość spadku w metrach	Czas spadku w sekundach	Prędkość nabyta w metrach
1	0,45	4,429
2	0,64	6,264
3	0,78	7,672
4	0,90	8,858
5	1,01	9,904
10	1,43	14,006
100	4,51	44,203

Ażeby więc spaść z wysokości 100 metrów, ciało potrzebowałoby nieco więcej niż $4^1/_2$ sekundy i nabyłoby w końcu spadku prędkości równej 44,2 m.

Przypominamy tu raz jeszcze, że, wskutek oporu powietrza, w praktyce rezultaty się różnią od powyżej podanych, i że wielkość tego oporu zależy od stosunku masy spadającego ciała do jego powierzchni, a także od jego kształtu. Bardzo ciekawemi pod tym względem są doświadczenia, wykonane w XVII wieku przez fizyka Désaguliers'a w obecności Newtona, Halleya, Derhama i innych uczonych. Spuszczał on na ziemię z wysokości 88,35 metr. — z latarni znajdującej się ponad kopułą ś-go Pawła w Londynie — różne ciała, jak kule ołowiane o średnicy 54 milimetrów i pęcherze wypełnione powietrzem o średnicy 135 mil. Kule przebyły tę przestrzeń w ciągu $4^1/_2$, pęcherze natomiast dopiero po upływie $18^1/_2$ sekund; w próżni tak jedne jak i drugie przebyłyby tę drogę w ciągu $4^1/_4$ sek.

ROZDZIAŁ III.

Wahadło.

§ 1. Równość czasu wahnięć wahadła. Stosunek czasu wahnięcia do długości wahadła.

Opowiadają, że Newton, znajdując się pewnego dnia w swym ogrodzie w Woolstrop, zauważył, jak jabłko oderwało się od drzewa i spadło na ziemię. Codzienne to zdarzenie, według tegoż opowiadania, było powodem, że zaczął zastanawiać się nad tem, czy tajemnicza siła, odrywająca jabłko od drzewa, działająca na wszystkie ciała bez względu na to, czy znajdują się one w głębokościach dolin, czy na wierzchołkach gór, nie rozpościera jeszcze dalej swego wpływu, czy i księżyc np. nie podlega jej działaniu? Genialny badacz oddał się z zapałem temu zagadnieniu, niestety jednak, oparł on początkowe swe obliczenia na błędnych rezultatach pomiarów południka ziemskiego i dlatego obliczenia te wypadły niezadawalniająco. Dopiero po dwudziestu prawie latach, gdy dokonano nowych, dokładniejszych pomiarów, udało się Newtonowi otrzymać cyfry, zupełnie zgodne z obserwacyą. W ten sposób wzniesionym został gmach, do którego podstaw dostarczyli Kepler, Galileusz i Huyghens; następcy zaś Newtona pracowali ciągle i do ostatnich czasów nad wykończeniem i uzupełnieniem tego gmachu: mamy tu na myśli naukę o *ciążeniu powszechnem.*

Podobny do powyższego przypadek, jeżeli go tak nazwać można, był również powodem badań, rozpoczętych przez Galileusza nad ruchem wahadła. Będąc jeszcze studentem w Pizie, znajdował się on pewnego razu na nabożeństwie w kościele. Mało zwracając uwagi na odbywającą się ceremonię, skierował wzrok na drogocenny świecznik, arcydzieło Benvenuta Celliniego, wiszący na długim sznurze przed ołtarzem i odbywający powolne wahania w jednę i drugą stronę. Kołysania świecznika stawały się coraz powolniejszemi, a jednak czas pojedyńczego wahnięcia nie ulegał zmianie [1]). Zjawisko to wielce zdziwiło Galileusza; stwierdził

[1]) Bertrand „Galileusz i jego dzieła."

on później słuszność swej obserwacyi za pomocą doświadczeń, urządzonych w mieszkaniu i znalazł zarazem stosunek, jaki zachodzi pomiędzy czasem jednego wahnięcia, a długością nitki, na której uwiązany był wahający się ciężar. Lecz dopiero długo po nim, mianowicie w r. 1673, Huyghens uzupełnił piękne to odkrycie i podał matematyczne prawo ruchu wahadła. Prawo to chcemy obecnie wyłuszczyć i pokazać zarazem jaki jest jego związek z siłą ciężkości.

Wyobraźmy sobie, że na dolnym końcu nitki niewyciągalnej i nieważkiej uwiązane jest nieskończenie małe, lecz ciężkie ciało M, górny zaś koniec nitki przymocowany jest w A (figura 13). Ciężar wypręża nitkę i zmusza ją do zajęcia pionowego położenia. Cały ten system znajduje się w spoczynku. Jeżeli, przy ciągle wyprężonej nitce, odchylimy ciało z M do M'', to siła ciężkości i w tem nowem jego położeniu nie przestaje nań działać. Wiemy, że, wskutek działania tej siły, ciało dąży do zajęcia jak najniższego położenia, w danym też wypadku zacznie ono spadać na dół; gdyby było swobodnem, spadałoby w kierunku linii $M''G$, to jest w kierunku pionowym, lecz sprzeciwia się temu nitka, według określenia naszego, nie dająca się wyciągnąć, dla tego też ciało spada wzdłuż krzywej linji $M''M$, czyli po łuku koła, środek którego znajduje się w A. Drogę z M'' do M ciało przebywa ruchem przyśpieszonym, gdyż opuszcza się ku dołowi pod wpływem siły ciężkości, przyczem prędkość, jaką ono posiada w punkcie M, zależy od wysokości spadku, którą mierzy się tylko w kierunku pionowym, a więc w naszym przykładzie będzie to wysokość aM. Rezultat działania siły ciężkości jest tutaj taki sam, jak gdyby ciało spadło bezpośrednio z a do M. Teoretycznie daje się dowieść, że gdy ciało spada z pewnej wysokości, to niezależnie od linii po jakiej spada, posiada w końcu taką prędkość, że może ono przy odpowiednich warunkach znowu wznieść się do tej samej

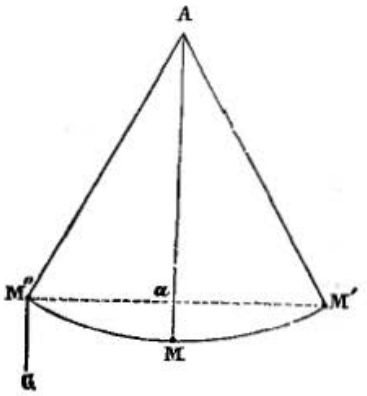


Fig. 13. Oscylacyjny ruch prostego wahadła.

wysokości. W naszym przykładzie ciało posiada w punkcie M taką prędkość, że wznosi się do punktu M', leżącego na tej samej poziomej linii, co i punkt M'', opisując łuk MM', równy łukowi MM''. Drogę z M do M' przebywa ono wbrew działaniu siły ciężkości, która niemniej jednak wywiera swój wpływ, t. j. zmniejsza stopniowo prędkość ciała, przez co ruch jego ku górze jest opóźniony; w punkcie M' prędkość ta staje się równą zeru i ciało spada napowrót. Ponieważ warunki są te same, co i w punkcie M'', ciało, spadając wykona taki ruch jak przedtem, to jest znów opuści się do M, następnie podniesie się do M'' i tak dalej. Ruch ten trwałby wiecznie, gdyby nie opór powietrza i tarcie w punkcie przyczepienia nitki, które osłabiają i w końcu zatrzymują poruszenia ciała.

Przyrząd, który tutaj opisaliśmy, nosi nazwę *prostego* czyli *matematycznego* wahadła. Ściśle mówiąc, przyrząd taki istnieje tylko w teoryi, zbudować go nie można, niema bowiem nici nieważkich i niewyciągalnych, a i uwiązane na nitce ciało nie może być zredukowanem do jednego punktu. Dlatego też w praktyce musimy się zadowolnić przyrządem, podobnym tylko do powyżej opisanego i noszącym nazwę *złożonego* albo *fizycznego* wahadła.

Cały ruch od M'' do M' nazywamy *wahnięciem*; czas, potrzebny do jego wykonania — *czasem wahnięcia*, wielkość zaś łuku, przebieżonego od pionowego położenia — *amplitudą wahnięcia*.

Weźmy wahadło, możliwie zbliżone do matematycznego — dajmy na to bardzo małą, ciężką kulkę, uwiązaną na nici — odchylmy je na mały kąt (nie więcej nad 3^0) od położenia pionowego i policzmy liczbę jego wahań w pewnym określonym czasie. Niechaj w ciągu 1 minuty wykona ono 40 wahań, czas więc jednego wahnięcia wynosi $1\frac{1}{2}$ sek. Z postępem czasu kołysania wahadła stają się coraz mniejsze, w końcu zaś tak nieznaczne, że możemy je zauważyć jedynie za pomocą lunety, skierowanej na nić wahadła, ale i wtedy będzie ono w tymże czasie wykonywało tyleż wahań, co i w początku. Gdybyśmy odchylili wahadło od położenia pionowego na wielki kąt, naprzykład na 40^0, to zobaczylibyśmy, że do wielkich wahań wymaga ono dłuższego czasu, niż do małych. Z doświadczeń tych wyprowadzamy

pierwsze prawo wahadła, odkryte już przez Galileusza: *Czas małych wahnięć jednego i tego samego wahadła jest niezależnym od amplitudy wahania; wahania są izochroniczne (od greckich wyrazów: izos—równy i chronos—czas), czyli że wahadło do ich wykonania potrzebuje jednakowego czasu.* Może się to wydać na pierwszy rzut oka dziwnem, że wahadło, odchylone na większy kąt, a więc przebiegające większy łuk, czyni to w tym samym czasie, co i wahadło odchylone na mniejszy kąt, mające do przebycia mniejszą drogę, mniejszy łuk. Stanie się to jednak zrozumiałem, skoro uprzytomnimy sobie, że w pierwszym wypadku wahadło, jako bardziej odchylone, spada z większej wysokości, a więc według praw spadku, nabywa także większej prędkości, wskutek czego może przebyć większą drogę w tym samym czasie, co i w drugim razie, gdy przebiega mniejszy łuk. Jednakże prawo powyższe, jak to pokazuje rachunek i doświadczenie, stosuje się jedynie, i to z pewnem tylko przybliżeniem, do wahań o małej amplitudzie, nie przenoszącej 3^0.

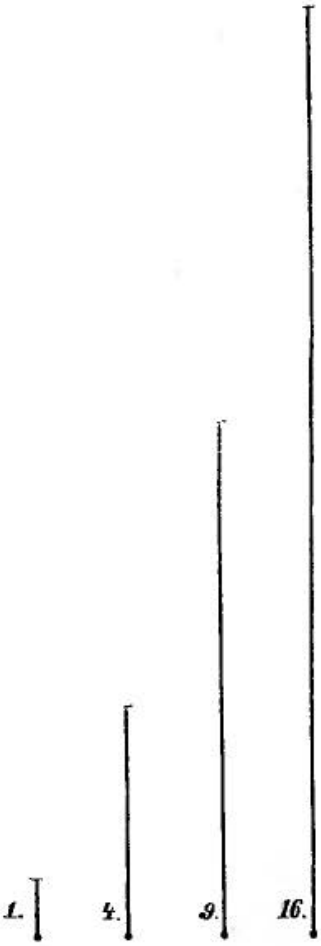


Fig. 14. Zależność czasu wahnięcia od długości wahadła.

Uwiążmy teraz na końcach jednakowo długich nitek kulki o różnym ciężarze i z rozmaitego materyału, naprzykład platynową, ołowianą, drewnianą i t. d. i wyprowadźmy je jednocześnie z pionowego położenia; zobaczymy, że wszystkie te wahadła wykonywają jedno wahnięcie w tym samym czasie, co dowodzi, że *czas wahnięcia wahadła nie zależy od jego ciężaru, ani od materyału.*

Zbadajmy obecnie stosunek, jaki zachodzi między czasem wahnięć różnych wahadeł i ich długością; w tym celu sporządźmy sobie kilka wahadeł, których długości mają się do siebie, jak 1 do 4, do 9, do 16 i t. d. (fig. 14) i wprawmy je w ruch. Łatwo mo-

żemy się przekonać, że na wykonanie jednego wahnięcia, wahadło 4 razy dłuższe potrzebuje 2 razy większego czasu, 9 razy dłuższe— 3 razy większego czasu, 16 razy dłuższe—4 razy większego czasu i t. d. niż wahadło, którego długość równa się 1. Mamy więc:

Długość wahadeł . . .	1	4	9	16	i t. d.
Czas wahnięć	1	2	3	4	i t. d.,

z czego wyprowadzamy drugie prawo wahadła: czas *wahnięć jest wprost proporcyonalny do pierwiastków kwadratowych z długości wahadeł.* Tak naprzykład w Warszawie wahadło, którego długość wynosi 0,9941 metr. wykonywa jedno wahnięcie dokładnie w ciągu 1 sekundy; chcąc otrzymać wahnięcia $^1/_2$ sekundowe, musimy wziąć wahadło 4 razy krótsze, a więc mające 0,2485 metr., dla 2-sekundowych wahnięć wahadło powinno mieć 4 razy większą długość—3,9764 m. i t. d.

Wahadło, odchylone od położenia pionowego, wraca doń napowrót, *t. j. spada wskutek działania siły ciężkości, nadającej mu* pewną prędkość; ta ostatnia zaś zależy od natężenia siły ciężkości, które mierzy się, jak już wiemy, prędkością, jakiej nabywa ciało, swobodnie spadające w próżni w końcu 1 sekundy, czyli przyśpieszeniem, oznaczanem zwykle przez g. Łatwo pojąć, że im większem jest natężenie siły ciężkości w danem miejscu, a więc im większem jest g, tem krótszego czasu wahadło potrzebuje do wykonania jednego wahnięcia. Rachunek pokazuje, że *czas wahnięcia jednego i tego samego wahadła jest odwrotnie proporcyonalny do pierwiastku kwadratowego z przyśpieszenia.* Gdyby naprzykład natężenie siły ciężkości zwiększyło się 4 razy, wtedy to samo wahadło kołysałoby się 2 razy prędzej, a więc jedno wahnięcie wykonywałoby w 2 razy krótszym czasie; przeciwnie: przy 4, 9 i t. d.-kroć zmniejszonem natężeniu ciężkości, wahadło kołysałoby się 2, 3 i t. d. razy wolniej, jedno więc wahnięcie trwałoby 2, 3 i t. d. razy dłużej.

Powyższe prawa ujęte są we wzór matematyczny, wyrażający zależność czasu wahnięcia od długości wahadła i od wielkości przyśpieszenia, dozwalający przeto obliczyć jednę z tych wielkości, jeżeli dwie pozostałe są znane. Wiedząc, jak wielkiem

jest przyśpieszenie w danem miejscu i znając długość wahadła, możemy na mocy tego wzoru obliczyć czas jednego wahnięcia, albo z góry powiedzieć, jak długiem powinno być wahadło, jeżeli przy danem przyśpieszeniu ma ono wykonywać jedno wahnięcie w danym czasie; nareszcie znając czas wahnięcia wahadła danej długości, możemy oznaczyć wielkość g dla danego miejsca. Wzór ten jest słusznym tylko dla wahadła matematycznego, doświadczenia więc, które urządzamy dla jego stwierdzenia, mogą dać rezultaty tylko przybliżone dlatego, że: 1) zawieszony ciężar nie jest pojedyńczym punktem, jak w wyobrażanem wahadle matematycznem, lecz zwykle soczewką lub kulą, wyrobioną z jakiegoś metalu; 2) sam pręt lub nitka wahadła także posiada pewien ciężar; 3) opór powietrza, jako też tarcie w punkcie zawieszenia, nie dające się zupełnie uniknąć, coraz bardziej zwalniają kołysania. Jeżeli jednak użyjemy przyrządu, możliwie zbliżonego do wahadła matematycznego, to otrzymamy rezultaty na tyle zgodne z teoretycznie obliczonemi, że możemy je uważać za doświadczalne stwierdzenie praw wahadła.

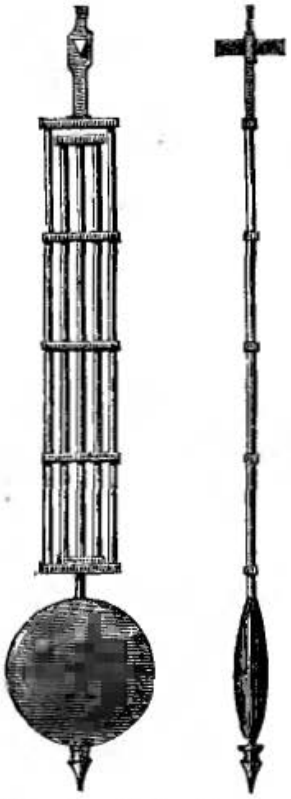


Fig. 15. Wahadło złożone, widziane od przodu i z boku.

Rozważmy teraz nieco bliżej budowę wahadła fizycznego czyli złożonego. Składa się ono po większej części z metalowej soczewki lub kuli, przymocowanej do dolnego końca pręta w ten sposób, ażeby oś jego przechodziła przez środek soczewki lub kuli; przez górną część pręta przechodzi trójgraniasty nóż, opierający się ostrą swą krawędzią na twardej polerowanej podstawie, zwykle z agatu lub stali; na ostrzu tem zawieszone jest całe wahadło, które dzięki temu urządzeniu, doznaje przy wahaniach nieznacznego tylko tarcia (fig. 15). Co jednak mamy uważać za długość takiego wahadła? W wahadle matematycznem czyli prostem, składającem się z jednego tylko ciężkiego punktu i nieważkiej nici, długością nazywamy odległość tego punktu od punktu zawieszenia;

od długości tej, jak wiemy już, zależy czas wahnięcia. Fizyczne natomiast wahadło składa się z nieskończenie wielu takich ciężkich punktów; gdyby każdy z nich stanowił oddzielne wahadło, wtedy kołysałyby się one z różną prędkością, mianowicie te, które leżą bliżej punktu zawieszenia, wahałyby się prędzej od tych, które są odeń bardziej oddalone. Że jednak wszystkie te ciężkie punkty są stale z sobą połączone w jednę całość, muszą więc one wszystkie wykonywać swe wahania w jednym i tym samym czasie, co możebnem jest tylko przez to, że punkty, bliższe punktu zawieszenia, ruch swój zwalniają, dalsze zaś przyśpieszają; wahania przeto każdego oddzielnego punktu zostają przyśpieszone pod wpływem punktów wyżej położonych, zwolnione zaś przez punkty niżej położone. Pomiędzy pierwszemi a ostatniemi musi istnieć taki punkt, dla którego przyśpieszenie ruchu i zwolnienie tegoż wzajemnie się znoszą i który tedy wykonywa swe wahania zupełnie w ten sam sposób, jak gdyby inne nie istniały, a on sam tylko tworzył matematyczne wahadło. Punkt ten nazywamy *środkiem wahań*, odległość zaś jego od punktu zawieszenia—*sprowadzoną długością wahadła fizycznego*. Czas wahnięcia wahadła fizycznego jest taki sam, jak wahadła matematycznego, mającego długość, równą długości sprowadzonej wahadła fizycznego, środek bowiem wahań wykonywa takie wahania, jak to wahadło matematyczne, inne zaś punkty, jako stale połączone ze środkiem wahań, muszą równocześnie z nim odbywać swe wahania. W wypadku, gdy pręt wahadła jest bardzo cienki, kula zaś—z bardzo ciężkiego materyału, naprzykład z platyny, środek wahań leży w środku kuli; w ogóle gdy kształt wahadła fizycznego jest prawidłowy, wtedy położenie tego punktu daje się oznaczyć drogą rachunku matematycznego. Możemy atoli środek wahań wahadła fizycznego dosyć dokładnie oznaczyć także na drodze doświadczalnej: w tym celu zawieszamy po za niem inne wahadło, możliwie zbliżone do matematycznego, w ten sposób, ażeby ich punkty zawieszenia leżały na jednej poziomej linii i staramy się temu ostatniemu nadać taką długość, aby wahało się ono zgodnie z tem, którego środek wahań chcemy znaleźć. Gdy po kilku próbach udaje się nam to uczynić, wtedy znaleziona długość naszego przy-

bliżenie matematycznego wahadła będzie zarazem szukaną długością sprowadzoną badanego wahadła fizycznego, środek zaś jego wahań leży w odległości, równej tej długości od punktu zawieszenia. Znając położenie środka wahań, a więc i długość sprowadzoną danego wahadła fizycznego oraz wielkość przyśpieszenia dla danego miejsca, możemy już na mocy wzoru obliczyć czas wahnięcia.

§ 2. Zastosowanie wahadła do regulowania zegarów.

W wiele lat po odkryciu zasadniczych praw wahadła przez Galileusza, znakomity uczony holenderski Huyghens, żyjący w drugiej połowie XVII wieku, wsławił się ważnemi pracami, tyczącemi się tego samego przedmiotu. On pierwszy pokazał, jak znaleźć środek wahań fizycznego wahadła i zastosowawszy je do regulowania biegu zegarów, umożliwił dopiero dokładne mierzenie czasu.

Zegary zwykle bywają poruszane przez ciężar, spadający pod wpływem ciężkości, — który za pomocą uwiązanej doń nici wprawia w ruch obrotowy walec wraz z nasadzonem nań kołem zębatem, — albo przez spiralnie zwiniętą sprężynę, która, stopniowo się rozkręcając, w podobny sposób porusza jakieś koło. Obracające się koła z kolei zahaczają o inne i ostatecznie przenoszą swój ruch na wskazówkę, posuwającą się po cyferblacie. Ażeby zegar odpowiadał celowi, ruch kół i wskazówki musi naturalnie być jednostajnym; wiemy jednak, że ciężar, według omówionych już w poprzednim rozdziale praw działania ciężkości, spada ruchem przyśpieszonym, to samo dotyczy zwiniętej sprężyny; koła więc zegara obracałyby się w obu wypadkach ze zmienną prędkością, gdybyśmy nie potrafili za pomocą stosownego urządzenia ujednostajnić ich ruchu; otóż rolę takiego regulatora w niektórych zegarach odgrywa wahadło, hamujące spadek ciężaru w sposób, przedstawiony na fig. 16 (str. 41).

Koło ze skośnemi zębami osadzone jest na osi, na którą nawinięty jest sznur z uwiązanym doń ciężarem P. Po nad kołem znajduje się t. z. hamulec A C B, mający kształt litery V, który zależnie

od swego położenia, z lewej albo z prawej strony zahacza o zęby koła, gdy kołyszące się wahadło porusza go to w jednę, to w drugą stronę. Figura 16 przedstawia wahadło właśnie w chwili, gdy zajmuje ono skrajne położenie z lewej strony. Koło zębate, obracające się pod działaniem spadającego ciężaru w kierunku strzałki, przy rzeczonem położeniu wahadła nie może się dalej poruszać dlatego, że ząb *a* zostaje wstrzymany przez hak A; gdy jednak wahadło, a wraz z niem hamulec zaczyna się wahać w przeciwną stronę, wtedy hak A wznosi się do góry, uwalniając przytem ząb *a* i koło znowu się obraca, dopóki opuszczający się hak B nie zatrzyma zęba *b* koła, co nastąpi wtedy, gdy wahadło zajmie skrajne położenie z prawej strony (wręcz przeciwne temu, jakie przedstawione jest na figurze). W następnej chwili wahadło znowu wraca ku lewej stronie, hak B teraz się podnosi, uwalniając ząb *b* i koło dalej się obraca, dopóki opuszczający się hak A nie zatrzyma następnego zęba *c*, co nastąpi w chwili, gdy wahadło powtórnie zajmie skrajne położenie z lewej strony. Przy każdem więc wahnięciu wahadła w jednę

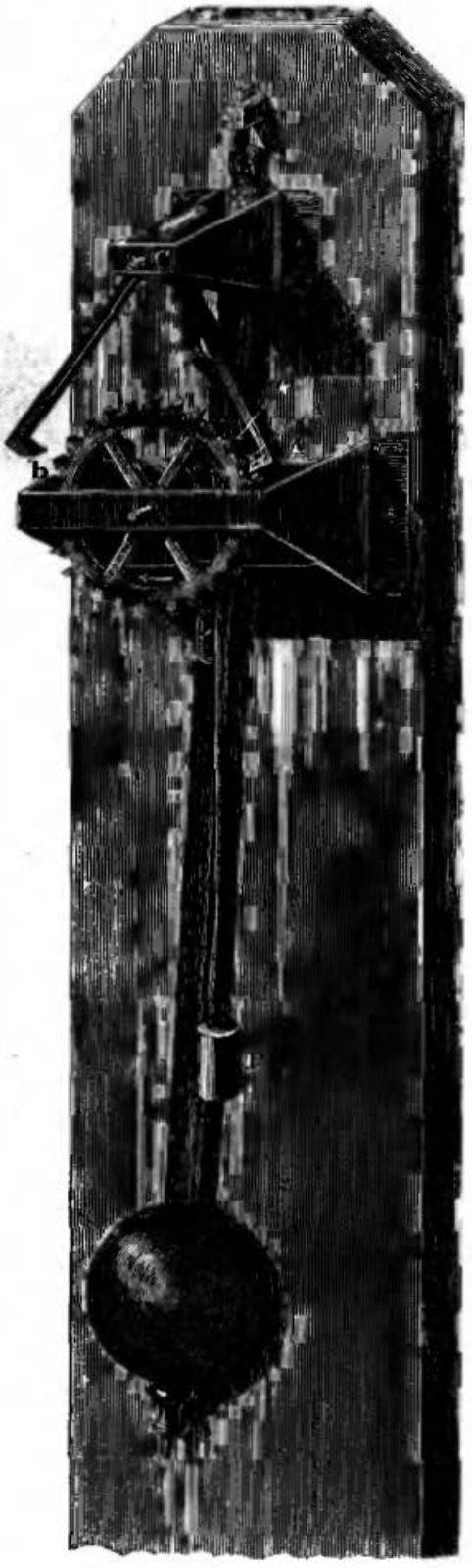


Fig. 16. Hamulec zegarowy.

i drugą stronę, koło posuwa się o jeden ząb. Jeżeli wahadło wykonywa jedno wahnięcie w ciągu 1 sek., a koło posiada 30 zębów, wtedy zrobi ono całkowity obrót w 1 minutę, przyczepiona doń wskazówka będzie więc pokazywała sekundy. Przy każdem wahnięciu, obrót walca, na którym osadzone jest koło zębate i spadek ciężaru zostają wstrzymane i po każdem wstrzymaniu spadek ciężaru nanowo się rozpoczyna, a że odstępy czasu pomiędzy dwoma następującemi po sobie przestankami są równe z powodu izochronizmu wahań wahadła, spadek więc ciężaru będzie się odbywał jednostajnie, o co właśnie tu chodzi. Hamulec przedstawia nadto jeszcze jednę korzyść: wahadło przy kołysaniach swych musi przezwyciężać różne przeszkody i dlatego wkrótce zatrzymałoby się, gdyby się kołysało samo jedno; przy powyższem jednak urządzeniu, koło zębate za każdem poruszeniem wywiera uderzenie wsteczne na jeden z haków hamulca, a przez to i na wahadło, wskutek czego przeszkody ruchu zostają przezwyciężone.

§ 3. Zastosowanie wahadła do oznaczenia natężenia siły ciężkości w różnych miejscach oraz do wykazania kształtu i gęstości ziemi.

Postaramy się teraz wytłómaczyć, w jaki sposób badania nad wahadłem przyczyniły się do rozwiązania wielu ważnych kwestyj, tyczących się natężenia siły ciężkości w różnych miejscach oraz kształtu i gęstości naszej planety. Jakeśmy to już wyłuszczyli w 1 § niniejszego rozdziału, czas wahnięcia wahadła zależy od jego długości i od wielkości miejscowego przyśpieszenia. Jeżeli więc policzymy ilość wahań, wykonywanych przez wahadło, którego długość już poprzednio dokładnie wymierzoną została, w pewnym wystarczająco znacznym czasie, naprzykład w ciągu jednego dnia, to możemy dokładnie oznaczyć czas jednego wahnięcia; znając zaś ten ostatni, łatwo już na mocy wzoru wahadła obliczyć wartość dla przyśpieszenia g, dającego nam miarę natężenia siły ciężkości w danem miejscu. W ten sposób otrzymano podaną już w poprzednim rozdziale wartość dla g w Paryżu, mianowicie 9,8094 metr. (taką prędkość miałoby, w na-

zwanem miejscu, ciało, spadające w próżni, w końcu 1-szej sekundy). Naodwrót z tej wartości długość wahadła sekundowego, t. j. takiego, które wykonywa jedno wahnięcie dokładnie w ciągu 1 sek.—dla Paryża oblicza się na 0,994 metra.

Wyobraźmy sobie teraz, że podróżnik posuwa się od równika ku biegunowi, wtedy w różnych punktach swej drogi będzie się on znajdował w niejednakowej odległości od środka ziemi, ta ostatnia bowiem nie jest dokładną kulą. Rzeczona odległość mianowicie jest największą na równiku, następnie maleje i na biegunie posiada wartość najmniejszą. Ponieważ ciążenie między dwiema masami zmniejsza się w stosunku odwrotnym do kwadratu z ich odległości, dla tego więc jednego już powodu natężenie siły ciężkości musi wzrastać od równika ku biegunowi. Do tego przyłącza się jeszcze druga okoliczność, mianowicie ruch obrotowy ziemi około osi, który przeciwdziała sile ciężkości i działanie jej po części znosi. Wskutek tego ruchu obrotowego ziemi, ciała, znajdujące się na jej powierzchni, starają się od niej oddalić, i to z tem większą siłą, im większą jest prędkość obrotowa danego punktu, czemu jednak przeszkadza przyciąganie, wywierane na nie przez ziemię. Dążność ta do oddalania się od ziemi jest największą na równiku—dlatego, że położone na nim punkty opisują przy obrocie ziemi największą drogę, a więc mają największą prędkość obrotową (i dla innego jeszcze względu, którego nie możemy tu wyłuszczyć), zmniejsza się w miarę tego, jak oddalamy się od równika ku jednemu z biegunów i na tych ostatnich staje się równą zeru. Działanie to możemy uwidocznić za pomocą przyrządu, przedstawionego na fig. 17. Lekkie obręcze metalowe, tworzące kulę,

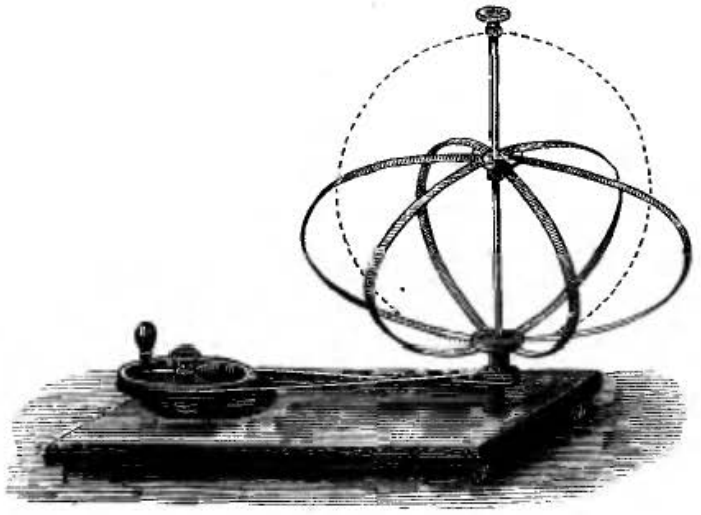


Fig. 17. Spłaszczenie obręczy wskutek ich ruchu obrotowego.

będąc wprawione w szybki ruch obrotowy, zostają spłaszczone na końcach osi i spłaszczenie jest tem znaczniejszem, im prędzej będziemy obracali korbę, a przez to i obręcze. Dla wymienionych dwóch przyczyn, natężenie siły ciężkości musi zmniejszać się od równika ku biegunom. Otóż do dokładnego mierzenia tych zmian służy wahadło, przyczem możemy postępować według jednej z dwóch następujących metod:

Przy pierwszej metodzie używa się wahadła o niezmiennej długości, którego pręt i soczewka stale są z sobą połączone, ostrze zaś, na którem ono spoczywa, nie daje się przesunąć. Wahadło takie, którego długość może się zwiększyć lub zmniejszyć tylko pod wpływem zmiany temperatury (1), będzie się wahało tem prędzej, im większem jest natężenie siły ciężkości, tak że liczba jego wahnięć w ciągu jednej doby będzie wzrastała, w miarę posuwania się z niem od równika ku biegunowi. Naprzykład, wahadło o długości 1 metra wykonywa w ciągu 24 godzin w Paryżu 86,137 wahnięć, na równiku—tylko 86,017, na biegunie zaś najwięcej—86,242 wahnięć. Z rachunku wypada, że stosunek natężeń siły ciężkości w dwóch punktach obserwacyjnych równa się stosunkowi kwadratów liczb wahnięć jednego i tego samego wahadła w ciągu jednakowego czasu.

Przy drugiej metodzie w każdem oddzielnem miejscu wprawiamy w kołysania wahadło długości dowolnej, lecz dokładnie znanej. Liczba wahnięć, wykonanych przez dane wahadło w ciągu dostatecznie dużego czasu, podzielona przez liczbę sekund tegoż czasu, daje nam dokładną wartość czasu jednego wahnięcia, znając zaś ten, możemy na mocy wzoru obliczyć długość wahadła sekundowego. Z zestawienia wartości, otrzymanych w ten sposób dla wahadeł sekundowych w różnych miejscach, daje się obrachować stosunek natężeń ciężkości dla tych punktów.

---

(1) O wpływie tym pomówimy w księdze o cieple, tutaj zaś nadmienimy tylko, że można urządzić takie wahadło, którego długość pozostaje stałą bez względu na temperaturę. Wahadło takie, zwane kompensacyjnem, przedstawione jest na fig. 15 (str. 38).

Zmniejszenie natężenia siły ciężkości na równiku po raz pierwszy było obserwowane za pomocą powyższego sposobu przez uczonego francuzkiego Richera podczas podróży, odbytej w r. 1671 z Paryża do Kajenny w Południowej Ameryce. Od tego czasu liczni pierwszorzędni badacze zajmowali się tym przedmiotem i z wielką ścisłością oznaczyli długość wahadła sekundowego, pośrednio więc i wielkość g dla różnych punktów na ziemi.

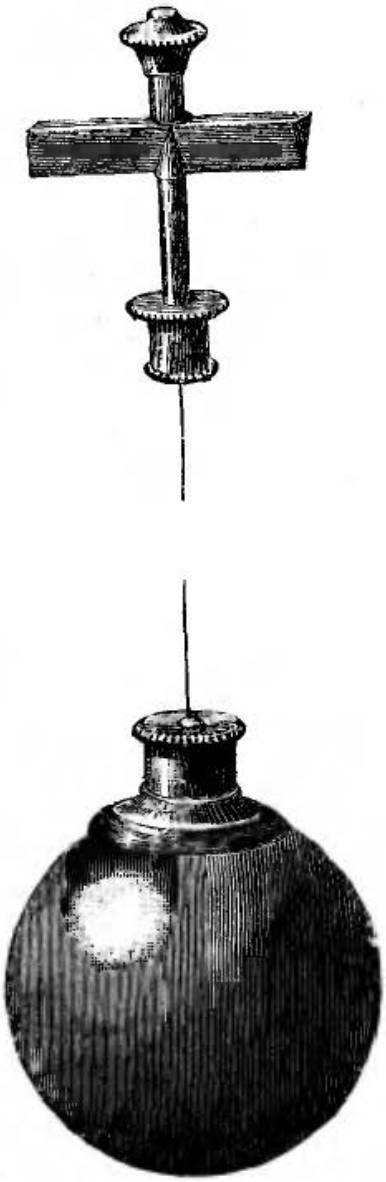


Fig. 18. Wahadło Bordy.

Podajemy tu opis wahadła, zbudowanego przez Bordę, którem uczony ten, zarówno jak i jego następcy Biot i Mathieu posługiwali się w swych badaniach, przedsięwziętych w Paryżu, Bordeaux i Dunkierce. Składało się ono (fig. 18) z kuli platynowej, o srednicy $36\frac{1}{2}$ milimetrów, przylepionej za pomocą cienkiej warstewki łoju do wklęsłej od dołu blaszki metalowej (1), wiszącej na bardzo mocnym, w całej swej długości jednakowo grubym drucie. Drut ten przymocowany był do małego walca, przez górną część którego przechodzi trójgraniasty nóż, opierający się dolną swą ostrą krawędzią na dwóch podstawkach z bardzo twardego kamienia, którym nadano położenie dokładnie poziome. Podstawki z kolei spoczywały na żelaznej podpórce, wmurowanej do ściany gmachu, oddalonego od ludnych ulic; w ten sposób zabezpieczono podstawki i wiszące na nich wahadło od wszelkich wstrząśnień.

(1) Przy takiem urządzeniu można było kulę platynową zastąpić inną z odmiennego materyału, co dozwoliło stwierdzić, że czas wahnięcia jest niezależny od ciężaru i od materyału wahadła (patrz str. 36), jeżeli tylko przytem sprowadzona jego długość pozostaje niezmienioną.

Wahadło to zawieszono przed bardzo dokładnym zegarem, którego bieg został uregulowany według obserwacyj astronomicznych i który był zawieszony na ścianie w taki sposób, że nie pozostawał w żadnym związku z wahadłem platynowem. Nakoniec wahadło i zegar umieszczono w oszklonej szafce, dla uchronienia ich od ewentualnych ciągów powietrza (fig. 19).

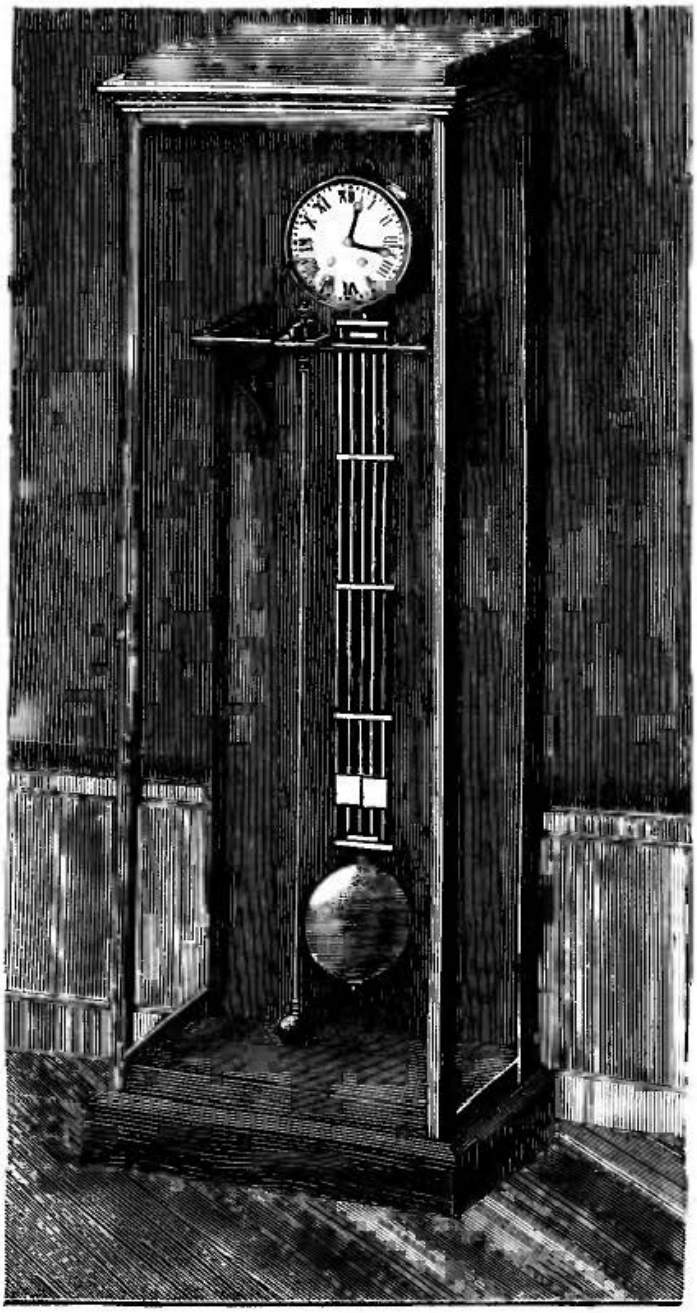


Fig. 19. Wahadło Bordy. Oznaczenie czasu wahnięcia za pomocą metody koincydencyj.

Dla możliwie dokładnego oznaczenia czasu wahnięcia wahadła platynowego, porównywa się jego wahania z kołysaniami wahadła zegarowego. W tym celu za pomocą lekkiego uderzenia wprawia się wahadło platynowe w kołysania i obserwuje te ostatnie, a zarazem i kołysania wahadła zegarowego, przez lunetę, ustawioną naprzeciw opisanego przyrządu w odległości mniej więcej 10 metr.

Patrząc przez lunetę na przyrząd, widzimy, jak wahadło zegarowe, na dolnej części którego poprzednio jeszcze nakreśliliśmy cienką linię pionową, i wahadło płatynowe oddzielnie prze-

chodzą przez pole widzenia. Ponieważ jedno wahadło zawsze nieco prędzej będzie się kołysało od drugiego—niechaj w naszym przykładzie czyni to wahadło platynowe — to po pewnej liczbie wahań oba jednocześnie wejdą w pole widzenia i w środku jego się pokryją, a wtedy zobaczymy tylko drut wahadła platynowego, ten bowiem zasłoni znajdującą się po za nim kreskę wahadła zegarowego. Moment ten nazywamy koincydencyą (zlewaniem się) i obieramy go za punkt wyjścia dla naszych obserwacyj. Dla lepszego uchwycenia tego momentu, rozpoczynamy spostrzeżenia nieco wcześniej, widzimy wtedy, jak jedno wahadło coraz więcej dogania drugie, aż nareszcie oba dokładnie jednocześnie przechodzą przez środek pola widzenia i otrzymujemy pierwszą koincydencyę. Przy następnych kołysaniach, wahadło platynowe będzie coraz bardziej wyprzedzało zegarowe, tak, że po pewnym czasie pierwsze już wraca, podczas gdy drugie jeszcze naprzód się kołysze i po pewnym czasie wracające wahadło platynowe pokryje w środku pola wahania naprzód jeszcze idące wahadło zegarowe; do tego punktu wahadło platynowe zrobiło więc, licząc od poprzedniej koincydencyi, obranej za punkt wyjścia, o jedno wahnięcie więcej od zegarowego. Dalej wahadło platynowe coraz bardziej wyprzedza zegarowe, po pewnym czasie kołysze się z niem już w jednym kierunku i nareszcie poruszając się w tę samą stronę, znowu jednocześnie z niem przechodzi przez środek pola widzenia, zupełnie tak samo, jak przy pierwszem spostrzeżeniu. Przy tej drugiej koincydencyi, wahadło platynowe wykonało o 2 wahnięcia więcej, niż zegarowe (zawsze licząc od obranego punktu wyjścia) i tak przy każdej następnej koincydencyi zrobi ono o jedno wahnięcie więcej. Przypuśćmy, że wahadło zegarowe wykonywa jedno wahnięcie dokładnie w ciągu 1 sekundy i że do chwili, gdyśmy zaobserwowali 10 koincydencyj, wskazówka zegaru posunęła się o 50 sek., wtedy wahadło platynowe oczywiście wykonało 60 wahnięć, czas więc jednego wahnięcia równa się $^{50}/_{60}$ czyli $^{5}/_{6}$ sekundy. W ogóle czas wahnięcia badanego wahadła będzie się równał ilorazowi z liczby sekund, upłynionych od początku obserwacyi, przez sumę z liczby sekund i z liczby koincydencyj. Metoda ta, nosząca nazwę metody

koincydencyj, dozwala oznaczyć czas wahnięcia z bardzo wielką dokładnością.

Poniższa tabliczka pokazuje długość wahadła sekundowego i wielkość przyśpieszenia g dla różnych szerokości geograficznych:

	długość wah. sek.		g.	
dla szerok. 0° (na równiku) . . .	0,99103	metra	9,78103	metr.
„ 45°	0,99352	„	9,80606	„
„ 52°, 13′,6″ (Warszawa)	0,9941	„	9,81195	„
„ 90° . . (na biegunach)	0,99619	„	9,83109	„

Jakeśmy to już powyżej wyłuszczyli, zmienność natężenia siły ciężkości w różnych miejscach na ziemi zależy od dwóch przyczyn: 1) od tego, że ziemia nasza nie jest dokładną kulą, lecz nieco spłaszczoną na biegunach; 2) od tego, że, wskutek jej ruchu obrotowego około osi, różne punkty, znajdujące się na powierzchni ziemi, mają dążność do oddalania się od jej środka. Otóż zbadano, jak wielkim jest udział każdej z tych przyczyn. Obliczono, że gdyby ziemia była dokładną kulą, wtedy wskutek samego tylko jej ruchu obrotowego natężenie ciężkości na równiku byłoby o $^1/_{289}$ mniejszem, niż na biegunach. (Rachunek pokazuje także, że gdyby ziemia obracała się 17 razy prędzej niż obecnie, wtedy ciała, znajdujące się na równiku nie posiadałyby żadnego ciężaru, a więc pozostawione samym sobie w powietrzu, nie spadałyby na ziemię). Z drugiej strony pomiary geodetyczne wykazały, że odległość punktu, leżącego na równiku od środka ziemi (średni promień równikowy) jest o 3 mile większą niż takaż odległość punktu, położonego na jednym z biegunów (promień biegunowy). Ze ścisłych obliczeń wypada, że wskutek obu wymienionych przyczyn natężenie ciężkości jest na biegunach o $^1/_{200}$ większem, niż na równiku. Znając wpływ ruchu obrotowego ziemi, można już było z badań nad wahadłem obliczyć jej spłaszczenie, wyrażające się stosunkiem różnicy promienia równikowego i biegunowego do promienia równikowego. Spłaszczenie to według pomiarów geodetycznych wynosi $^1/_{299}$, z badań nad wahadłem wypada dlań wartość $^1/_{292}$, a więc bardzo blizko się zgadzająca z poprzednią.

Przy porównaniu wahań wahadła w różnych okolicach na ziemi, odkryto zadziwiający fakt, że w niektórych miejscach wskazują one natężenie ciężkości większe od tego, jakie wypada według rachunku z ich szerokości geograficznej, w innych natomiast— mniejsze. Ponieważ wypadki pierwszego rodzaju zaobserwowano głównie na wyspach, leżących na pełnem morzu, w bardzo znacznej odległości od lądu, drugiego zaś przeciwnie—na wybrzeżach lub w środku kontynentów, niektórzy wyciągnęli z tego wniosek, że „powierzchnia wód na środku oceanów bardziej się obniża, tak że jest ona tam bliższą środka ziemi, w blizkości lądów zaś przeciwnie podnosi się do znacznej wysokości i przeto więcej jest oddaloną od środka ziemi, niż należałoby wnosić ze znalezionego spłaszczenia ziemi" (1). Wahadło wykazywałoby tedy nawet nierówności w krzywiznie kuli ziemskiej.

Z porównania długości wahadeł sekundowych dla dwu punktów, *leżących pod tą samą szerokością geograficzną, z których* atoli jeden znajduje się na szczycie wysokiej góry, drugi zaś— na wysokości poziomu morza, daje się obliczyć gęstość ziemi, t. j. *daje się oznaczyć, ile razy większą jest masa ziemi w porównaniu* do masy równej objętości wody. Do tego samego rezultatu można dojść przez porównanie wahań wahadła na powierzchni ziemi i w pewnej głębokości jej wnętrza, a to na zasadzie twierdzenia, według którego stosunek natężeń ciężkości w punkcie na powierzchni ziemi i w pewnym punkcie jej wnętrza zależy od stosunku odległości tych punktów od środka ziemi i od stosunku gęstości warstwy zewnętrznej i jądra wewnętrznego; stosunek natężeń ciężkości oblicza się z wahań wahadeł, pomieszczonych w tych punktach. Opierając się na rzeczonem twierdzeniu, Airy, obecny dyrektor obserwatoryum astronomicznego w Greenwich, wprawiał w kołysania dwa wahadła, z których jedno pomieścił na powierzchni ziemi u wejścia do szybu kopalni w Harton, drugie zaś—na dnie jego w głębokości 384 metrów. Za każdem wahadłem znajdował się, podobnie jak w powyżej opisanych doświadczeniach Bordy, dokładny zegar, według którego oznaczano

(1) Saigey, „Fizyka ziemi".

czas wahnięcia za pomocą metody koincydencyj. Obserwacye, w ten sposób dokonane, pokazały, że przyśpieszenie na dnie tego szybu jest o $^1/_{19190}$ większem, niż na powierzchni. Z tego rezultatu wynika, że gęstość warstw kuli ziemskiej wzrasta od powierzchni ku jej środkowi, w przeciwnym bowiem razie natężenie ciężkości musiałoby się ku wnętrzu ziemi zmniejszać, czemu przeczy obserwacya. Na podstawie znanego składu gruntu naokoło kopalni, oznaczono średnią gęstość warstwy zewnętrznej—mającej w tym wypadku grubość, równą głębokości szybu, a więc 384 metr.—w pobliżu szybu na 2,5. Airy przyjął, że taką samą jest średnia gęstość zewnętrznej warstwy (rzeczonej grubości) całej kuli ziemskiej, co można uczynić bez popełnienia znacznego błędu,—chociaż warstwa ta nie jest naturalnie wszędzie jednorodną—dlatego, że na wielkość natężenia ciężkości w danem miejscu mają przeważnie wpływ tylko masy, znajdujące się w najbliższem jego otoczeniu. Ze znanych odległości punktów u wejścia i na dnie szybu od środka ziemi i z powyżej podanej gęstości zewnętrznej warstwy, oblicza się gęstość wewnętrznego jądra (to jest całej kuli ziemskiej bez zewnętrznej warstwy grubości 384 metr.) na 6,5; a ponieważ w obec masy tego ostatniego, masa warstwy zewnętrznej jest nic nieznaczącą, można przeto przyjąć, że średnia gęstość całej kuli ziemskiej jest przybliżenie 6,5 razy większą, niż wody. Poprzednicy Airy'ego—Cavendish, Maskelyne, Hutton i Reich, którzy starali się rozwiązać tę samą kwestyę za pomocą innych metod, znaleźli średnią gęstość ziemi równą tylko mniej więcej 5,5—rezultat, jak widzimy, dosyć znacznie się różniący od poprzedniego, co jednak, w obec trudności samego zadania, nie powinno nas dziwić. W każdym razie, na podstawie wszystkich tych wyników, mamy prawo wnosić, że wnętrze ziemi składa się z materyi daleko gęstszej, niż zbadana dotychczas skorupa ziemska.

§ 4. Zastosowanie wahadła do wykazania ruchu obrotowego ziemi około osi. Doświadczenia Foucault'a.

Zawieśmy na haczyku *b* giętką nitkę z uwiązaną do niej ciężką kulką i wprawmy wahadło w kołysania tak, ażeby te odbywały się w jakiejkolwiek określonej płaszczyznie, dajmy na to w płaszczyznie ramki (fig. 20). Jeżeli teraz cały przyrząd osadzimy wydrążeniem *a* na osi t. z. maszyny odśrodkowej, wskazanej na fig. 17 i będziemy go obracali z dowolną prędkością, to przy dostatecznie delikatnem zawieszeniu w *b*, wahadło będzie się jednak wciąż kołysało w tej samej absolutnej płaszczyznie, ukazując swym ruchem stale jednę stronę pokoju. Przy każdym pół-obrocie przyrządu, wszystkie średnice koła, nakreślonego na stoliku po kolei przejdą pod kulką wahadła i podczas gdy płaszczyzna ramki będzie się odchylała na coraz to większy kąt od płaszczyzny wahań, ta ostatnia zachowa pierwotne swe położenie w przestrzeni (a więc pozornie będzie się odchylała od płaszczyzny ramki w kierunku, przeciwnym kierunkowi obrotu). Z doświadczenia tego przekonywamy się, że płaszczyzna wahań wahadła pozostaje stałą, pomimo że punkt jego zawieszenia się obraca.

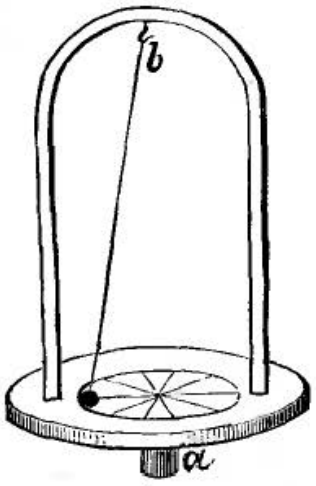


Fig. 20. Stałość płaszczyzny wahań wahadła.

Wyobraźmy sobie teraz, że znajdujemy się na biegunie *p* (fig. 21, *str.* 52) i przypuśćmy, że zawieszone tam wahadło, które w stanie spoczynku zajmuje położenie, stanowiące przedłużenie osi ziemi pp_1, wprawione w ruch wykonywa kołysania wzdłuż jednej ze średnic znajdującego się pod niem koła, podzielonego na stopnie, naprzykład wzdłuż średnicy *b c*. Ponieważ ziemia się obraca z zachodu na wschód i robi całkowity obrót w ciągu 24 godzin, linia *b c* po upływie 1 godziny posunie się o 15° na wschód od pierwotnego swego położenia, wahadło jednak, zacho-

wując stale płaszczyznę wahań, kołysać się będzie w tym samym co i poprzednio kierunku; skoro jednak ruchu ziemi dostrzedz nie moglibyśmy, przeto wydawałoby się nam, że nie linia $b\,c$ odstąpiła o 15^0 na wschód, lecz przeciwnie, że płaszczyzna wahań posunęła się o tyleż stopni w kierunku odwrotnym, t. j. od wschodu na zachód, czyli w kierunku pozornego ruchu słońca. Po 2 godzinach płaszczyzna wahań pozornie odchyli się od linii $b\,c$ o 30^0 na zachód, po 6 godzinach stanowić będzie z linią $b\,c$ kąt prosty, po 12 godzinach wahadło znowu kołysać się będzie wzdłuż linii $b\,c$ i t. d. i po upływie całej doby płaszczyzna wahań pozornie wykona jeden całkowity obrót, w każdej chwili zlewając się z płaszczyzną innego południka.

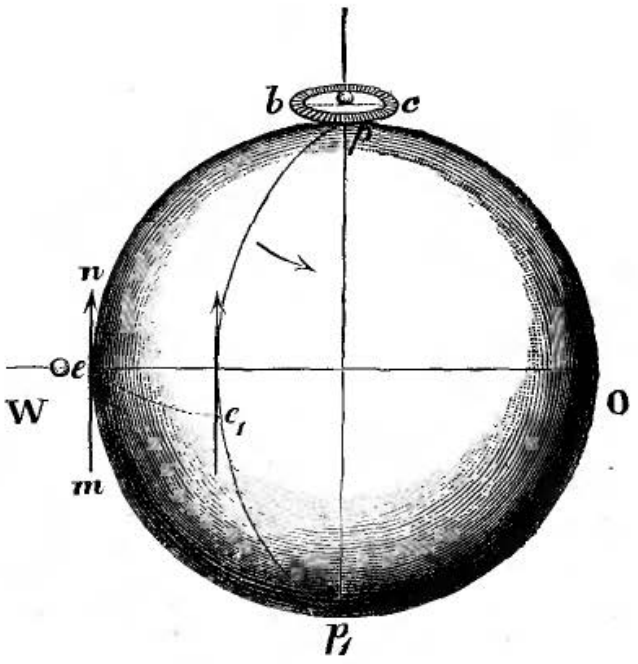


Fig. 21. Wahadło na biegunie i na równiku.

Rzecz się zmieni, jeżeli wahadło zawiesimy na równiku, w punkcie e (fig. 21). Niechaj wahadło kołysze się naprzykład wzdłuż linii południkowej $m\,n$ — stycznej do koła południkowego $p\,e\,p_1$, w punkcie e; po pewnym czasie, wskutek obrotu ziemi, punkt e, a wraz z nim wahadło i linia południkowa przejdzie do punktu e_1, leżącego na wschód od e, przytem linia $m\,n$ przyjmie położenie równoległe do pierwszego, a że płaszczyzna wahań pozostaje stałą, przeto i w punkcie e_1 wahadło będzie się kołysało wzdłuż linii południkowej. Tak samo rzecz się będzie miała, jeżeli wahania będą się odbywały w jakiejkolwiek innej płaszczyznie. Na równiku więc płaszczyzna wahań wahadła nie odchyla się wcale od pierwotnego swego położenia, obrót ziemi nie powoduje tam żadnego pozornego obrotu tej płaszczyzny.

Nieco zawilszemi stają się stosunki, gdy wahadło znajduje się w jakiejś średniej szerokości geograficznej pomiędzy równikiem a biegunem, naprzykład w punkcie A (fig. 22). Niechaj kołysania wahadła znowu odbywają się wzdłuż linii południkowej $m\,n$, która leży w płaszczyznie koła południkowego $p\,e\,p_{,,}$ przedłużenie jej przetnie więc przedłużenie osi ziemi $p\,p_{,}$ w punkcie o. Gdy wskutek obrotu ziemi, punkt A przejdzie do $A_{,,}$ wtedy linia południkowa przyjmie położenie $m_{,}\,n_{,,}$ które z poprzedniem stanowi kąt $A\,o\,A_{,,}$ wahadło natomiast, zachowując stale płaszczyznę wahań, będzie się kołysało wzdłuż linii $a\,b$, równoległej do $m\,n$ i tworzącej teraz z linią południkową $m_{,}\,n_{,}$ kąt $a\,A_{,}\,m_{,,}$ równy kątowi $A\,o\,A_{,}$. Ponieważ jednak nie możemy zauważyć istotnego odchylenia (od zachodu na wschód) linii południkowej od płaszczyzny wahań wahadła, będzie się nam więc wydawało, że ta ostatnia odchyliła się od linii południkowej o kąt $A\,o\,A_{,}$ w kierunku przeciwnym, to jest od wschodu na zachód, czyli w kierunku pozornego ruchu słońca. Kąt $A\,o\,A_{,}$ (kąt pozornego obrotu płaszczyzny wahań) jest mniejszym od kąta $A\,B\,A_{,}$ (kąta istotnego obrotu ziemi) i to tem mniejszym, im bliżej równika leży punkt A. Podczas więc gdy ziemia robi całkowity obrót, płaszczyzna wahań wahadła, pomieszczonego w jakimkolwiekbądź punkcie między równikiem i biegunem, wykonywa tylko część obrotu, do całkowitego przeto obrotu potrzebuje ona dłuższego czasu niż 24 godzin i to tem dłuższego, im mniejszą jest szerokość geograficzna danego punktu. Znając tę ostatnią, można obliczyć, w jakim czasie płaszczyzna wahań wahadła wykonywa całkowity pozorny obrót, tak naprz. dla Warszawy, leżącej pod 52°, 13′, 5″ sz. geogr., czas ten wynosi przeszło $1\,^3/_5$ doby.

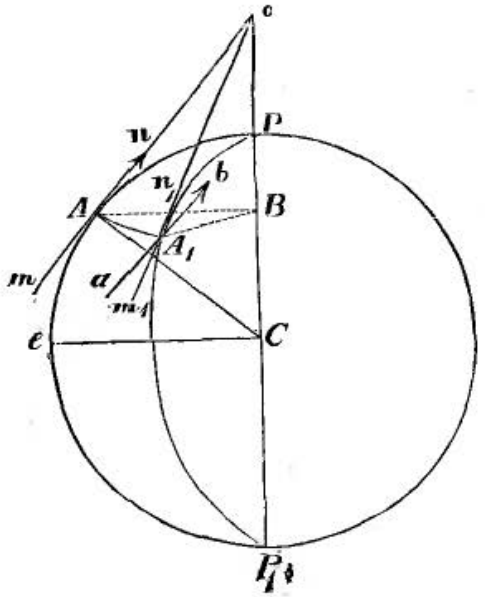


Fig. 22. Wahadło między równikiem i biegunem.

Opisane zjawiska staną się dla czytelnika, być może, zrozumialszemi po rozważeniu poniższych doświadczeń z bardzo prostym przyrządem, składającym się z ramki *a b c* (fig. 23), do której przymocowuje się giętki pręt stalowy, zakończony kulką *d*. Ramkę możemy za pomocą szrubki *M* przymocować w jakiemkolwiek położeniu do osi *MN*, około której daje się ona obracać. Jeżeli ramka zajmuje położenie, wskazane na fig. 23, wtedy pręt *c d* stanowi przedłużenie osi *MN;* niechaj ta ostatnia wyobraża oś ziemi, wtedy cały przyrząd przedstawia wahadło, zawieszone na

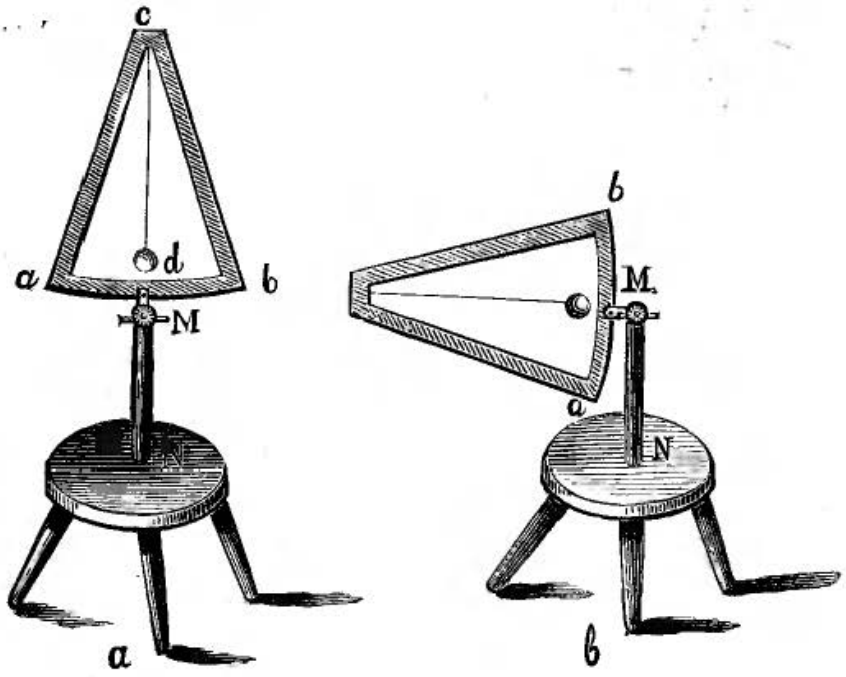


Fig. 23 i 24. Przyrząd ilustrujący pozorne odchylenie płaszczyzny wahań na biegunie (23), na równiku (24).

biegunie. Odchylmy kulkę *d* w kierunku *a* i pozostawmy ją samej sobie; wskutek sprężystości pręta będzie się ona wahała tam i napowrót w płaszczyznie ramki wzdłuż dolnej krawędzi *a b*, ukazując swym ruchem stale jednę stronę pokoju. Jeżeli teraz będziemy obracali ramkę, to zobaczymy, że płaszczyzna wahań będzie tworzyła z płaszczyzną ramki coraz to większy kąt i kiedy ramka wykona całkowity obrót, płaszczyzna wahań zrobi takiż pozorny obrót w kierunku przeciwnym.

Nadajmy teraz ramce położenie prostopadłe do osi (fig. 24), wtedy przyrząd nasz przedstawia wahadło, zawieszone na równiku. Wprawiwszy kulkę w kołysania znowu wzdłuż krawędzi ab i obracając ramkę, przekonamy się, że w tym razie nie następuje żadne odchylenie płaszczyzny wahań, t. j. kulka wcale nie wyjdzie z płaszczyzny ramki, pomimo obrotu przyrządu. Nareszcie przy mniejszem, niż w poprzednim wypadku, nachyleniu ramki względem osi MN, (fig. 25) przyrząd będzie przedstawiał wahadło, znajdujące się między równikiem i biegunem. Obracając ramkę, zobaczymy, że płaszczyzna tej ostatniej odchyla się od płaszczyzny wahań kulki, podobnie jak przy pionowem ustawieniu ramki, z tą jednak różnicą, że kąt odchylenia będzie teraz mniejszy niż w pierwszym wypadku, tak że gdy ramka wykona całkowity obrót, płaszczyzna wahań nie zrobi jeszcze całkowitego pozornego obrotu, nastąpi to dopiero później, i to tem później, im bardziej nachyloną jest ramka względem osi.

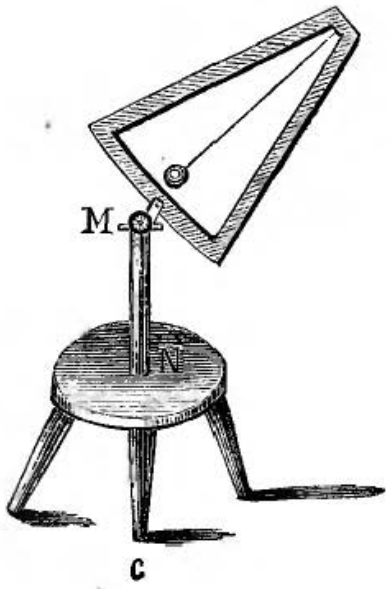


Fig. 25. Przyrząd ilustrujący pozorne odchylenie płaszczyzny wahań między równikiem i biegunem.

Gdybyśmy w powyższych doświadczeniach zawiesili kulkę nie na pręcie, lecz na nitce, wtedy ta ostatnia, przyjąwszy przy nachylonem położeniu ramki (fig. 24 i 25) kierunek pionowy, wyszłaby z ramki i nie moglibyśmy za pomocą opisanego przyrządu pokazać pozornego odchylenia płaszczyzny wahań. Natomiast pręt stalowy nie będzie się zwieszał pionowo, gdy ramka jest nachyloną względem osi; niemniej jednak stanowi on wahadło, chociaż kołysania jego zachodzą tu nie wskutek działania ciężkości, lecz wskutek sprężystości pręta.

Pozorne odchylenie płaszczyzny wahań wahadła po raz pierwszy było obserwowane w r. 1851 przez znakomitego fizyka

francuzkiego Foucault'a, który wykazał także, że zjawisko to zależy od ruchu obrotowego ziemi około osi. Doświadczenia, wykonywane przezeń z początku w obserwatoryum paryzkiem, później zaś w Panteonie—przed bardzo liczną publicznością, ściągnęły na siebie uwagę całego świata naukowego i były następnie wielokrotnie powtarzane w różnych miejscach, wydajac wszędzie ten sam rezultat. Chcąc dobrze uwidocznić odchylenie płaszczyzny wahań, należy użyć bardzo długiego wahadła, które raz wprawione w ruch, długo zachowywałoby swe kołysania, i delikatnie je zawiesić tak, ażeby mogło swobodnie się wahać w każdej pionowej płaszczyznie. Foucault do doświadczeń swych użył wahadła (fig. 26, *str.* 57), składającego się z ciężkiej mosiężnej kuli, mającej od dołu ostrze i przyczepionej do stalowego pręta długości 64 metrów, który z kolei przytwierdzony był do metalowej płyty, umieszczonej pod kopułą Panteonu. Ażeby wprawić wahadło w kołysania w jednej płaszczyznie i nie nadać mu ruchu bocznego, wyprowadzano je z pionowego położenia i przywiązywano do jakiegoś nieruchomego przedmiotu za pomocą nitki; po przepaleniu tej ostatniej wahadło rozpoczynało swój ruch, wykonywając wielkie kołysania, które, jakkolwiek z biegiem czasu stawały się coraz mniejszemi, z łatwością jednak mogły być zauważone nawet po upływie całej doby. Naokoło wahadła znajdowała się okrągła drewniana galerya, podzielona na stopnie i posypana piaskiem, na którym ostrze kuli za każdem wahnięciem kreśliło linię; posuwanie się tej linii od wschodu na zachód wskazywało pozorne odchylanie się płaszczyzny wahań. Ze znanej szerokości geogr. dla Paryża można było obliczyć, na jaki kąt powinna się pozornie odchylić płaszczyzna wahań w ciągu określonego czasu, jeżeli ziemia obraca się około osi w 24 godzin; otrzymane w praktyce rezultaty dobrze się zgadzały z teoretycznie obliczonemi. Podobne doświadczenia, przedsięwzięte w innych miastach, wszędzie doprowadziły do wyników, zgodnych z teoryą tak, że mogą one być uważane za niezbity doświadczalny dowód ruchu obrotowego ziemi około osi.

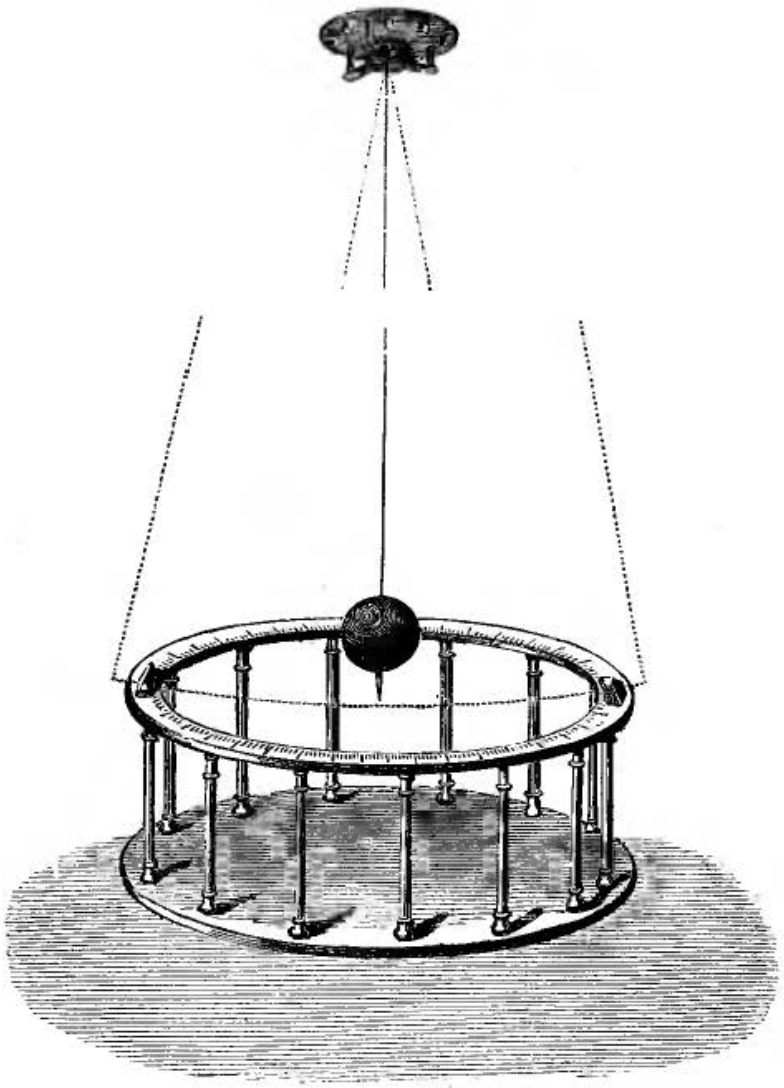


Fig. 26. Doświadczenie Foucault'a, wykonane w panteonie paryzkim w r. 1851.

Wahadło znalazło, oprócz wymienionych, jeszcze liczne inne zastosowania, jak naprzykład do mierzenia taktu przy wykonywaniu utworów muzycznych (metronom), do mierzenia bardzo wielkich prędkości (wahadło balistyczne) i t. d. Że jednak opisowi tego ważnego przyrządu i tak już poświęciliśmy więcej miejsca, niż na to pozwala zakres niniejszego dzieła, musimy przeto czytelnika co do bliższych szczegółów wzmiankowanych zastosowań odesłać do obszerniejszych podręczników fizyki.

ROZDZIAŁ IV.

§ 1. Ciężar ciał. Środek ciężkości.

Każde ciało stałe składa się z cząstek, w pewien określony sposób połączonych ze sobą, a wszystkie te cząstki jednakowo ulegają przyciągającemu wpływowi ziemi. Otóż rachunek pokazuje, że suma przyciągań, wywieranych przez ziemię na każdą cząstkę danego ciała, jest taką samą, jak gdyby całe to przyciąganie skierowane było tylko na jeden punkt tegoż ciała. Innemi słowy, gdy ciało spoczywa na podstawie, to wszystkie jego cząstki cisną na nią, lecz rezultat jest taki sam, jak gdyby suma tych ciśnień skupioną była w jednym punkcie ciała. Suma tych wszystkich ciśnień stanowi *ciężar* ciała, a punkt ześrodkowujący w sobie zjednoczone to ciśnienie, zowie się *środkiem ciężkości* (fig. 27 G) (1). Oznaczenie tego punktu w wielu razach jest bardzo ważnem. Jeżeli masa jest równomiernie w ciele rozmieszczoną i jeżeli ono posiada przytem kształt zupełnie prawidłowy, środek ciężkości łatwo daje się oznaczyć geometrycznie, jak pokazują następujące przykłady.

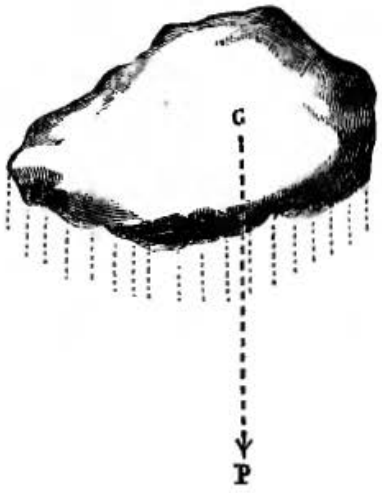


Fig. 27. Środek ciężkości.

Środek ciężkości linii prostej znajduje się na połowie jej długości; w kwadracie, w prostokącie lub w ogóle w równoległoboku środek ten leży w punkcie przecięcia dwóch przekątnych (fig. 28, *str.* 59); w trójkącie znajduje się on w punkcie przecięcia linij, łączących wierzchołek ze środkiem przeciwległego boku; w krążku, w pierścieniu lub w elipsie leży on w ich środku.

---

(1) We wszystkich poniższych figurach punkt, w którym znajduje się środek ciężkości, oznaczamy przez literę *G*.

Prawidłowe pryzmaty, oraz równoległościany, a także proste i skośne cylindry mają swój środek ciężkości na połowie osi (fig. 29, *str.* 60); w piramidzie zaś i stożku leży on na linii, która łączy wierzchołek ze środkiem podstawy, na jednej czwartej od tej ostatniej (fig. 29). Środek ciężkości kuli i elipsoidu znajduje się w ich centrze (fig. 30, *str.* 61).

Najczęściej wszakże ciało nie posiada zupełnie prawidłowego kształtu, albo też masa nie jest w niem równomiernie rozmieszczoną, wtedy można oznaczyć środek ciężkości za pomocą doświadczenia.

Z powyższego określenia środka ciężkości wynika, że ciało znajduje się w równowadze, gdy ów środek leży na jednej pionowej z punktem podparcia lub zawieszenia. Zawieśmy ciało na sznurze i poczekajmy, aż przyjmie on kierunek pionowy i nastąpi równowaga; wtedy wiemy, że środek ciężkości leży na przedłużeniu sznura (fig. 31, *str.* 61); następnie przymocujmy sznur w innym punkcie ciała i powtórzmy doświadczenie, a otrzymamy drugie przedłużenie, na którym leży środek ciężkości. A więc ten ostatni znajduje się jednocześnie na obu przedłużeniach, czyli w punkcie ich wzajemnego przecięcia (fig. 31 *G*). Metoda ta z łatwością daje się zastosować do określania środka ciężkości ciał płaskich; przy innych zaś ciałach trudno jest niekiedy oznaczyć dokładnie przedłużenie kierunku pionowego do ich wnętrza.

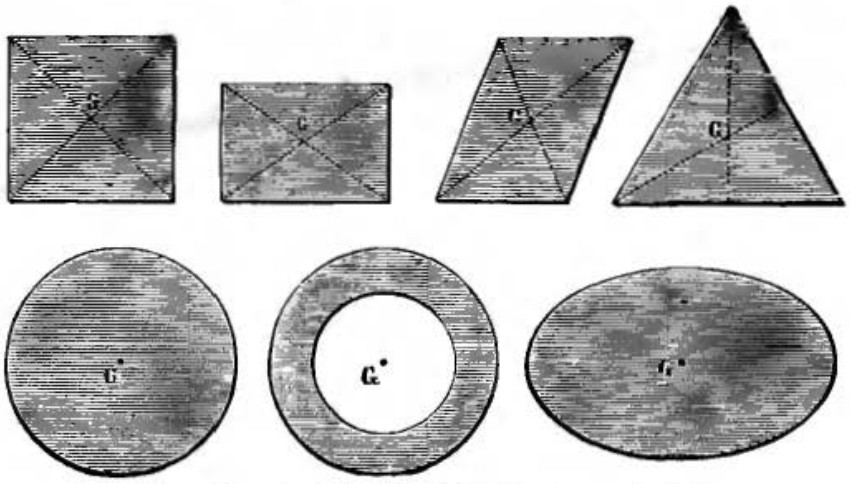


Fig. 28. Środek ciężkości kilku figur płaskich.

Powiedzieliśmy już, że warunkiem równowagi ciał jest, ażeby środek ich ciężkości leżał na jednej pionowej z punktem zawieszenia lub podparcia. Rozważmy tedy najprzód ciała zawieszone w punkcie, około którego mogą swobodnie się obracać. Jeżeli ciało jest zawieszone w samym środku ciężkości (fig. 32, *str.* 62, krążek środkowy), wtedy znajduje się ono zawsze w stanie równowagi niezależnie od położenia, jakie zajmuje, w każdym bowiem razie środek ciężkości i punkt zawieszenia wypadają na

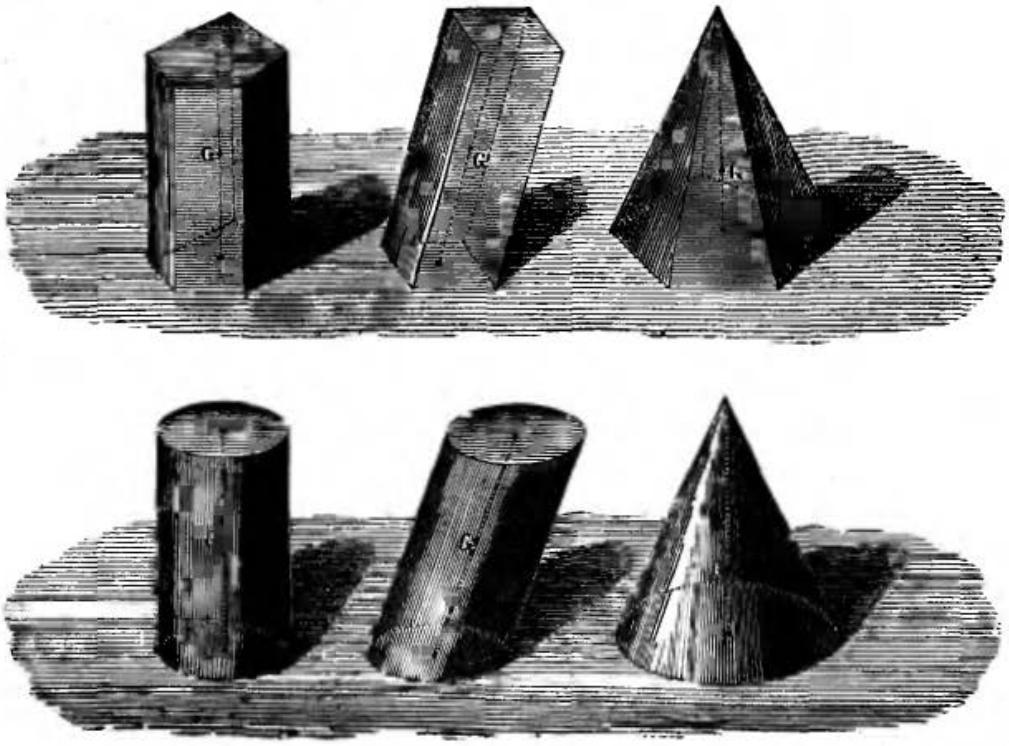


Fig. 29. Środek ciężkości kilku ciał bryłowatych.

jednej pionowej. Taka równowaga zowie się *obojętną*. Ciałom, mającym obracać się jednostajnie około swych osi, jak np. kołom rozpędowym w maszynach, staramy się zawsze nadać równowagę możliwie obojętną. Jeżeli środek ciężkości leży poniżej punktu zawieszenia (fig. 32, krążek prawy), to przy wyprowadzeniu ciała z równowagi, środek ten wznosi się do góry, a ponieważ siła ciężkości ustawicznie dąży do jego obniżania, przeto sprowadza go ona w końcu do pierwotnego położenia i równowaga zostaje przywróconą. Taka równowaga zowie się *stałą*, a jako przykład może tu służyć wahadło.

Nakoniec jeżeli środek ciężkości leży powyżej punktu zawieszenia (fig. 32, krążek lewy), to przy najlżejszem odchyleniu ciała z położenia równowagi, środek ten zostaje obniżonym, a siła ciężkości, obniżając go coraz bardziej, oddala go od pierwotnego położenia równowagi i ciało nie prędzej przechodzi w stan spoczynku, aż środek ciężkości nie znajdzie się poniżej punktu zawieszenia. Taką równowagę nazywamy *niestałą*.

Zwróćmy się obecnie do ciał podpartych. Gdy mniejsza lub większa część powierzchni ciała opartą jest o podstawę, wtedy dla równowagi jego wystarcza, jeżeli pionowa, opuszczona ze środka ciężkości, pada wewnątrz podparcia. Skośny cylinder lub ciało owalne, postawione tak, jak pokazuje figura 33 (*strona* 62), znajdują się w stanie równowagi; gdyby zaś, wskutek ich nachylenia, pionowa, opuszczona ze środka ciężkości, wypadła po za punktami podpartemi, ciała te przewróciłyby się. Fig. 34 (*str.* 63) przedstawia równowagę ciała podpartego w trzech punktach; i tutaj także widzimy, że owa linia pionowa pada wewnątrz figury podparcia. Również i wieża w Pizie, rysunek której przedstawiony jest na tablicy I, jakkolwiek mocno nachylona, utrzymuje się w równowadze, gdyż pionowa, opuszczona ze środka ciężkości całej budowy, spotyka ziemię wewnątrz podstawy wieży. Nosiwoda pochyla się na prawo, tragarz zaś ku przodowi w tym celu (fig. 35, *str.* 63), ażeby pionowa ze wspólnego środka ciężkości ich własnego ciała i noszonego cię-

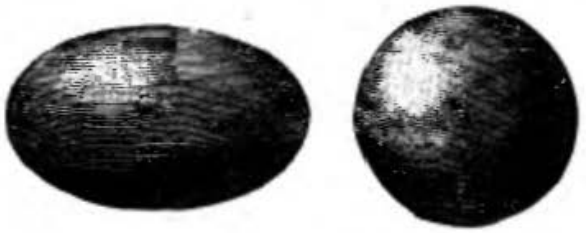


Fig. 30. Środek ciężkości elipsoidu i kuli.

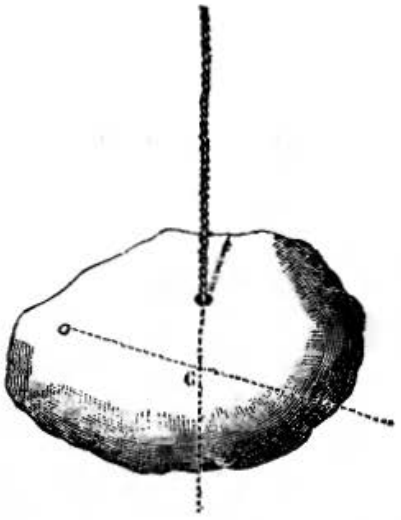


Fig. 31. Określenie środka ciężkości ciała, mającego nieprawidłowy kształt.

żaru, padała wewnątrz figury podparcia, opisanej przez ich nogi. Wóz, jadący po bardzo pochyłej drodze, (fig. 36, *str.* 64) znajduje się w równowadze, dopóki środek ciężkości leży nad czworobokiem, utworzonym przez połączenie czterech kół; gdy droga staje się zbyt pochyłą, albo wstrząśnienia podczas jazdy tak silnemi, że ów środek wypada po za granicami czworoboku, wtedy wóz przewraca się.

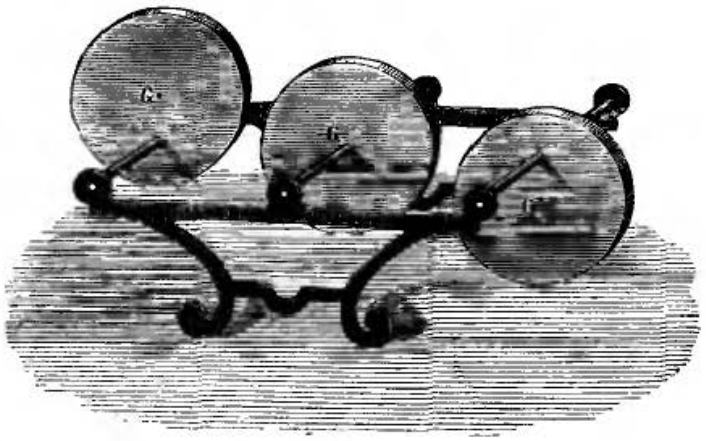


Fig. 32. Równowaga niestała, obojętna i stała.

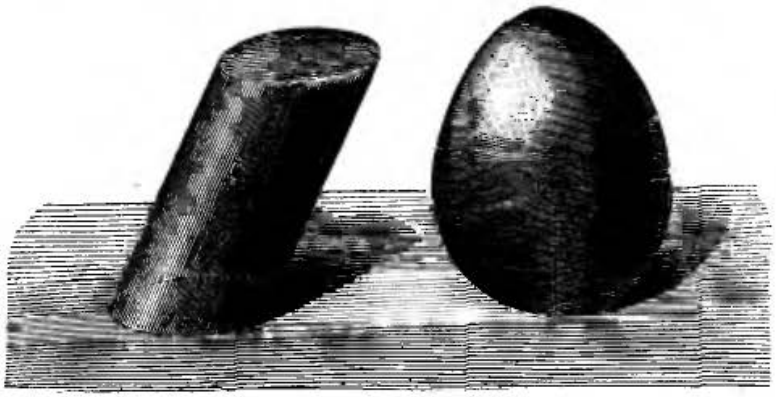


Fig. 33. Równowaga ciał podpartych.

Równowaga ciała jest tem stalszą, im większą jest jego podstawa, im trudniej wyprowadzić pionową, opuszczoną ze środka ciężkości po za tę podstawę. Oprócz tego, stałość równowagi ciała jest tem większą, im niżej znajduje się jego środek ciężkości; dla tego samego bowiem kąta odchylenia, środek

ów nizko leżący jest jeszcze podparty (fig. 37 *G*, a po odchyleniu *G'*—*str.* 64), podczas gdy wyżej leżący już jest po za płaszczyzną podparcia (fig. 37, *C* i *C'*, *str.* 64). Zasady te znalazły liczne zastosowania w praktyce, a czytelnik w codziennem życiu spotka na każdym kroku te zastosowania; powiemy więc tylko, że w ogóle wszystkie ciała, które powinny stać mocno i pewnie, mają szeroką podstawę i możliwie nizko umieszczony środek ciężkości.

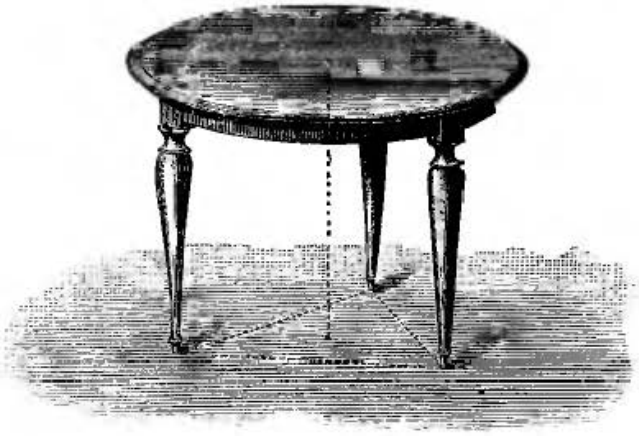


Fig. 34. Równowaga ciała podpartego w trzech punktach.

§ 2. Oznaczenie ciężaru ciał. Waga.

Przyrządy, służące do oznaczania ciężaru ciał i znane pod nazwą *wag*, przedstawiają wielką rozmaitość w budowie i urządzeniu. — Zajmiemy się najprzód opisem wag najprostszych, a następnie przejdziemy do bardziej złożonych; przedtem jednak musimy poznać w ogólnych przynajmniej zarysach zasady dźwigni, jestto bowiem niezbędne do zrozumienia teoryi wagi.

Fig. 35. Położenie równowagi osób, dźwigających ciężary.

Dźwignią nazywamy każdy drąg niegiętki, podparty w jednym punkcie, około którego może się obracać. W dźwigni pierwszego rodzaju podparcie (fig. 38, *C*) znajduje się pomiędzy dwoma jej końcami, na które z jednej strony działa ciężar *Q*, a z drugiej jakakolwiek siła *P*. — W dźwigni drugiego rodzaju podparcie znajduje się na jednym jej końcu, na drugi działa siła, a ciężar zawieszony jest pomiędzy niemi (fig. 39). Nareszcie w dźwigni trzeciego rodzaju ciężar i podparcie

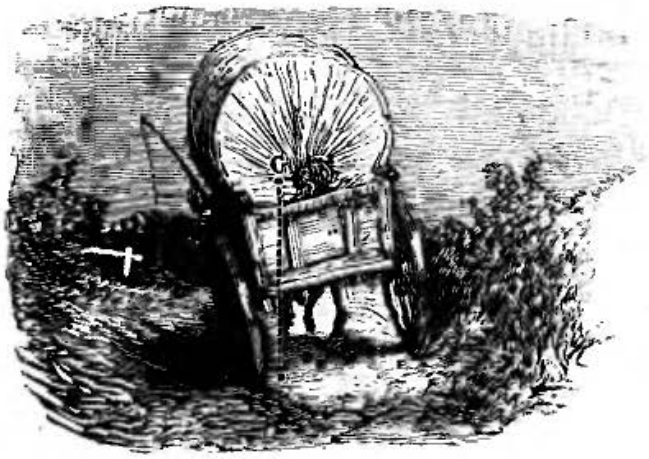


Fig. 36. Równowaga na płaszczyznie pochyłej.

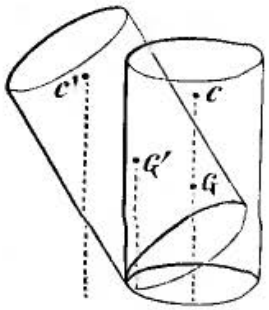


Fig. 37. Wpływ położenia środka ciężkości na równowagę ciała.

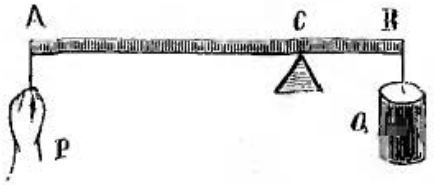


Fig. 38. Dźwignia pierwszego rodzaju.

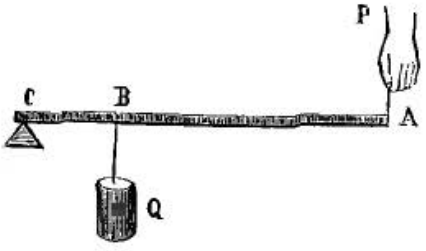


Fig. 39. Dźwignia drugiego rodzaju.

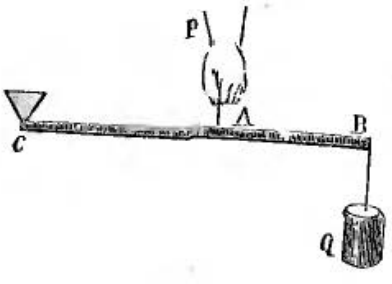


Fig. 40. Dźwignia trzeciego rodzaju.

znajdują się na jej końcach, a siła działa pomiędzy niemi (fig. 40). We wszystkich trzech rodzajach dźwigni, część, leżącą pomiędzy podparciem (*C*) i punktem przyczepienia siły (*A*) nazywamy

ramieniem siły; część zaś pomiędzy podparciem a punktem przyczepienia ciężaru (*B*) nazywamy *ramieniem oporu.* (1) Wszędzie ciężar *Q* obniżałby ramię oporu, gdyby mu nie przeciwdziałała siła *P.* Dla równowagi dźwigni potrzeba, ażeby mniejsza siła działała na tyleż razy większe ramię i naodwrót, czyli że siła i ciężar powinny być w stosunku odwrotnym do długości ramion, na które działają. Dźwignie opisane tutaj, przedstawione są na rysunkach w położeniu poziomem, to jest w stanie równowagi: wszędzie siła *P* jest tyle razy większą lub mniejszą od ciężaru *Q*, ile razy mniejszem lub większem jest ramię siły od ramienia oporu.

Jeżeli dźwignia jest podpartą w samym środku, a więc gdy ramiona jej są jednakowe, wtedy dla równowagi potrzeba, ażeby na oba końce dźwigni działały siły równe. *Waga zwyczajna* (fig. 41) przedstawia właśnie dźwignię równoramienną. Widzimy tutaj drąg *A B*, przez środek którego przechodzi trójgraniasty nóż *O*, zwrócony ostrą krawędzią ku dołowi; wystające końce tego noża oparte są z przodu i z tyłu na ramce, na której zawieszoną jest waga, drąg więc może bez wielkiego tarcia przechylać się w jednę i drugą stronę. Ramiona *O A* i *O B*, oprócz jednakowej długości, powinny mieć jednakowy ciężar, wtedy bowiem równoważą się wzajemnie i drąg nieobciążony zajmuje położenie poziome. Po obu stronach wiszą szalki *P P*, służące do nakładania ważonego ciała i gwichtów. Przy jednakowem obciążeniu szalek, drąg powinien zachować położenie poziome; jeżeli zaś na jednę z nich położymy ciężar większy, to drąg musi pochylać się w stronę bardziej obciążoną. Wspólny środek ciężkości wagi po-

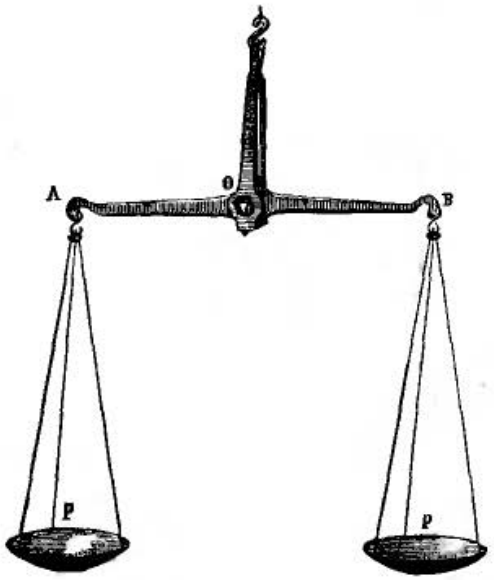


Fig. 41. Waga zwyczajna.

(1) Jeżeli kierunki działania siły i oporu są prostopadłe do kierunku dźwigni, jak to pokazano na fig. 38, 39 i 40.

winien leżeć poniżej osi, około której drąg się obraca, wtedy bowiem waga znajduje się w stanie równowagi stałej, tak że przy równem obciążeniu szalek, drąg po kilku wahnięciach, powraca do położenia poziomego. W starożytności jeszcze używano wagi, zwanej obecnie *wagą rzymską* (fig. 42). Drąg *A B*, zawieszony na nożu w punkcie *O*, podzielony jest na dwa ramiona: jedno *O A* krótkie i szerokie, drugie *O B*—długie i wązkie. Na końcu krótszego ramienia zawieszoną jest szalka, na której umieszcza się ważone ciało; wzdłuż dłuższego ramienia przesuwa się stały gwicht *P;* po odjęciu tego ostatniego i przy szalce nieobciążonej drąg powinien zajmować położenie poziome. Jeżeli na szalkę położymy ciężar *Q*, a z drugiej strony zawiesimy gwicht *P*, to według powyższej zasady dźwigni, równowaga nastąpi wtedy, gdy odległość gwichtu od punktu zawieszenia będzie w takim stosunku do ramienia *O A*, w jakim ciężar *Q* pozostaje do ciężaru *P*. Na drągu oznacza się podziałki, w ten sposób mianowicie, że na szalce umieszcza się znany ciężar, np. 1 kilogram, a w tym punkcie drąga, w którym należy, dla przywrócenia równowagi, zawiesić gwicht *P*, pisze się znak 1. Kreśląc podobne znaki w odległości dwa, trzy i t. d. razy większej, otrzymujemy punkty, w których powinien być zawieszany gwicht *P* przy obciążeniu szalki 2, 3 . . . . kilogramami. Odległość pomiędzy dwoma znakami dzieli się na dziesięć części, co pozwala określać dziesiąte części kilograma. Waga rzymska jest wygodną z tego względu, że wymaga tylko jednego gwichtu; bardzo jednak ścisłą być nie może.

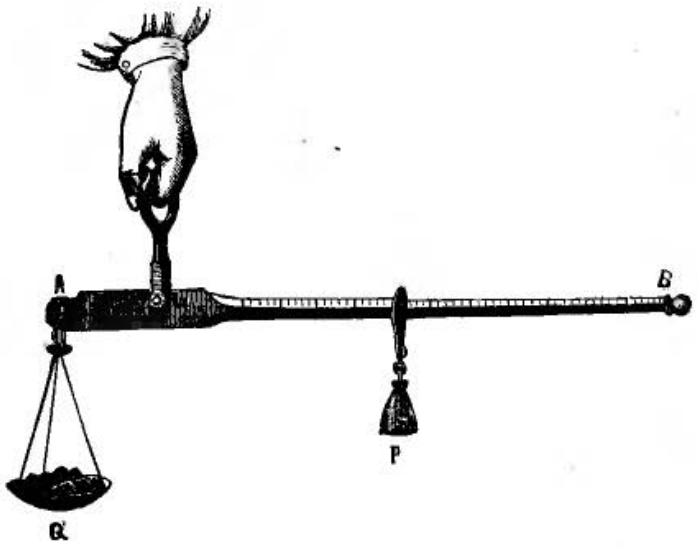


Fig. 42. Waga rzymska.

Waga dziesiętna (fig. 43) łączy wygodę ze ścisłością i dlatego stanowi obecnie przyrząd, mający szerokie praktyczne zastosowanie. Na słupie *H O* oparty jest, za pośrednictwem noża *O*, drąg *A C;* do dłuższego ramienia tego drąga w *C* przyczepioną jest szalka *b c*, służąca do nakładania gwichtów; na drugiem jego ramieniu w *B* i *A* wiszą dwa pręty, podtrzymujące u dołu dwie platformy *G D* i *L K*. Dolna platforma opiera się w *K* o nóż; górna zaś, również za pośrednictwem noża, opiera się o dolną. Ciało ważone umieszcza się na górnej platformie, w dowolnem miejscu; dla wygody, oraz dla ochrony systemu drągów, dodaje się jeszcze drewnianą ścianę *E F*, o którą można oprzeć dany ciężar. Ciało *P*, leżące na górnej platformie, ciśnie na nóż *I*, przezeń na dolną platformę *L K*, następnie za pośrednictwem

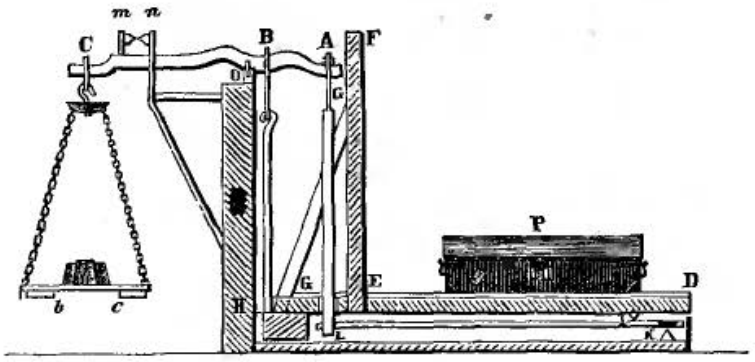


Fig. 43. Waga dziesiętna.

pręta *L A*, swobodnie przechodzącego przez otwór w górnej platformie, ciśnienie to przenosi się na punkt *A* drąga. Oprócz tego ciało ciągnie ku dołowi pręt przymocowany do górnej platformy, przez co ciśnienie jego działa także na punkt *B* drąga. Ramię *L K* jest pięć razy dłuższem od ramienia *I K* i dlatego ciśnienie w punkcie *A* równa się tylko jednej piątej ciśnienia w punkcie *I*. Ponieważ dalej ramię *O A* jest dwa razy krótszem od ramienia *O C*, to dla przeciwdziałania ciśnieniu w *A* należy na szalce umieścić gwicht, którego ciśnienie jest dwa razy mniejsze od tegoż ciśnienia w *A*, a więc dziesięć razy mniejsze od ciśnienia w *I*. Nakoniec ramię *O C* jest dziesięć razy dłuższem od ramienia *O B* i dlatego, dla przeciwdziałania ciśnieniu w *B*, potrzeba na szalkę

położyć gwicht, którego ciśnienie jest dziesięć razy mniejsze. A więc dla równowagi drąga wystarcza, gdy na szalce *b c* leży dziesiąta część ciężaru *P*, umieszczonego na górnej platformie wagi. Równowaga jej ma miejsce wtedy, gdy ostrza *m* i *n* znajdują się na jednej prostej linii.

Do ważenia bardzo wielkich ciężarów, jak np. ładownych wozów, lokomotyw i t. p. używa się wagi podobnej, lecz mocniej

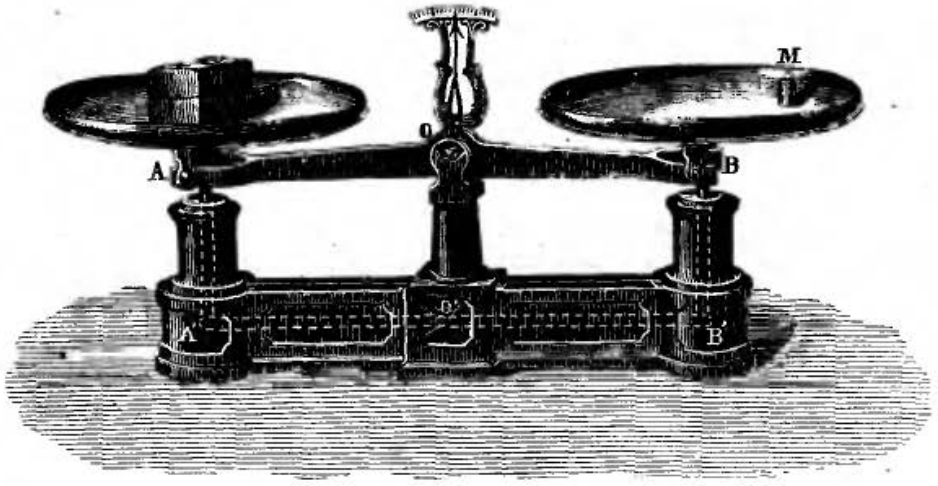


Fig. 44a. Waga Roverbal'a.

zbudowanej; oprócz tego stosunek długości ramion jest taki, że dla równowagi, należy na szalce umieszczać tylko setną część ciężaru ważonego ciała.

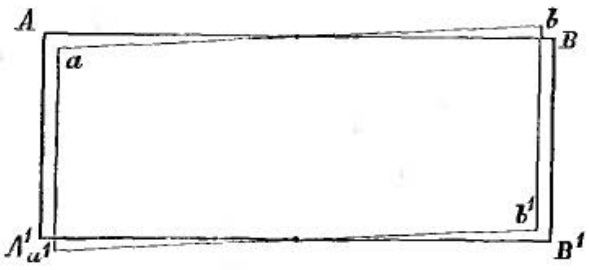


Fig. 44b.

W handlu znajdujemy bardzo często *wagę Roverbal'a* (fig. 44), składającą się z dwóch jednakowej długości drągów *A B* i *A' B'*, z których pierwszy jest widzialny u góry, drugi zaś jest ukryty w podstawie wagi. Leżące nad sobą końce drągów są ze sobą ruchomo połączone za pomocą prętów pionowych; środki drągów opierają się o noże *O* i *O'*, leżące na jednej prostej linii. Końce górnego drąga podtrzymują dwie szalki, na których umieszcza się ważone ciało i gwichty. Dla równowagi potrzeba, ażeby szalki były jednakowo obciążone;

wtedy drągi zajmują położenie poziome, a strzałka, przytwierdzona do górnego drąga, stoi pionowo. Jeżeli na jednę z szalek położymy ciężar większy, drągi zajmą położenie pochyłe i prostokąt $A\ B\ A'\ B'$ (fig. 44*a*) przyjmie postać równoległoboku $a\ b\ a'\ b'$ (fig. 44*b*), a jedna z szalek zostanie wzniesioną do góry, druga— opuszczoną ku dołowi.

Wyżej opisane przyrządy wagowe używają się w codziennem życiu, w wypadkach, w których wielka ścisłość nie jest konieczną. Lecz do celów naukowych wymaganą jest waga, nietylko *dokładna*, ale także bardzo *czuła*, to jest taka, która przy bardzo małej różnicy w ciężarze ciał, umieszczonych na szalkach,

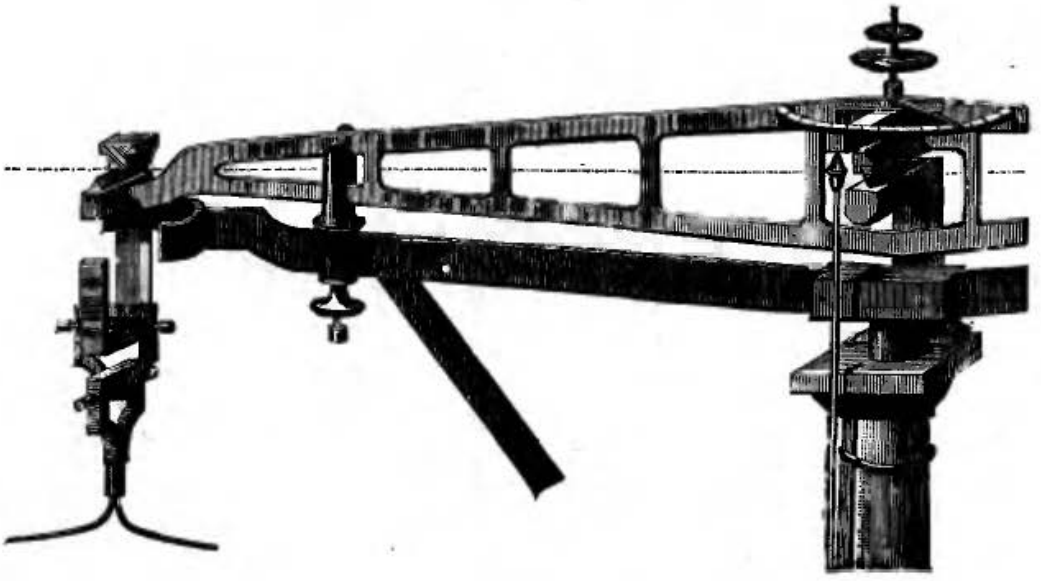


Fig. 45. Ramię wagi chemicznej.

ulega znacznemu odchyleniu od położenia poziomego. Waga jest tem czulszą, im dłuższym i lżejszym jest jej drąg, a także im mniejszą jest odległość jej środka ciężkości od punktu podparcia drąga; oprócz tego, ten ostatni punkt i punkty zawieszenia szalek powinny leżeć na jednej prostej linii, wtedy bowiem czułość wagi jest niezależną od wielkości obciążenia.

Waga chemiczna odpowiada właśnie tym warunkom. Fig. 45 przedstawia jedno jej ramię; na fig. 46 widzimy ją w całości. Drąg tej wagi ma kształt mocno wydłużonego romba, w kilku miejscach wydrążonego, a to w celu możliwego zmniejszenia jego ciężaru. Przez środek drąga przechodzi trójgraniasty nóż sta-

lowy, którego ostra krawędź spoczywa na twardej polerowanej podstawie z agatu. Na końcach drąga znajdują się dwa podobne, lecz mniejsze noże, zwrócone ostrzem ku górze; na nich, za pośrednictwem odpowiednio zgiętych sztabek, zawieszone są szalki. Powyżej środka drąga widzimy dwa krążki, z których górny może być podnoszonym lub opuszczanym, co pozwala zmieniać położenie środka ciężkości całej wagi, a więc umożliwia nada-

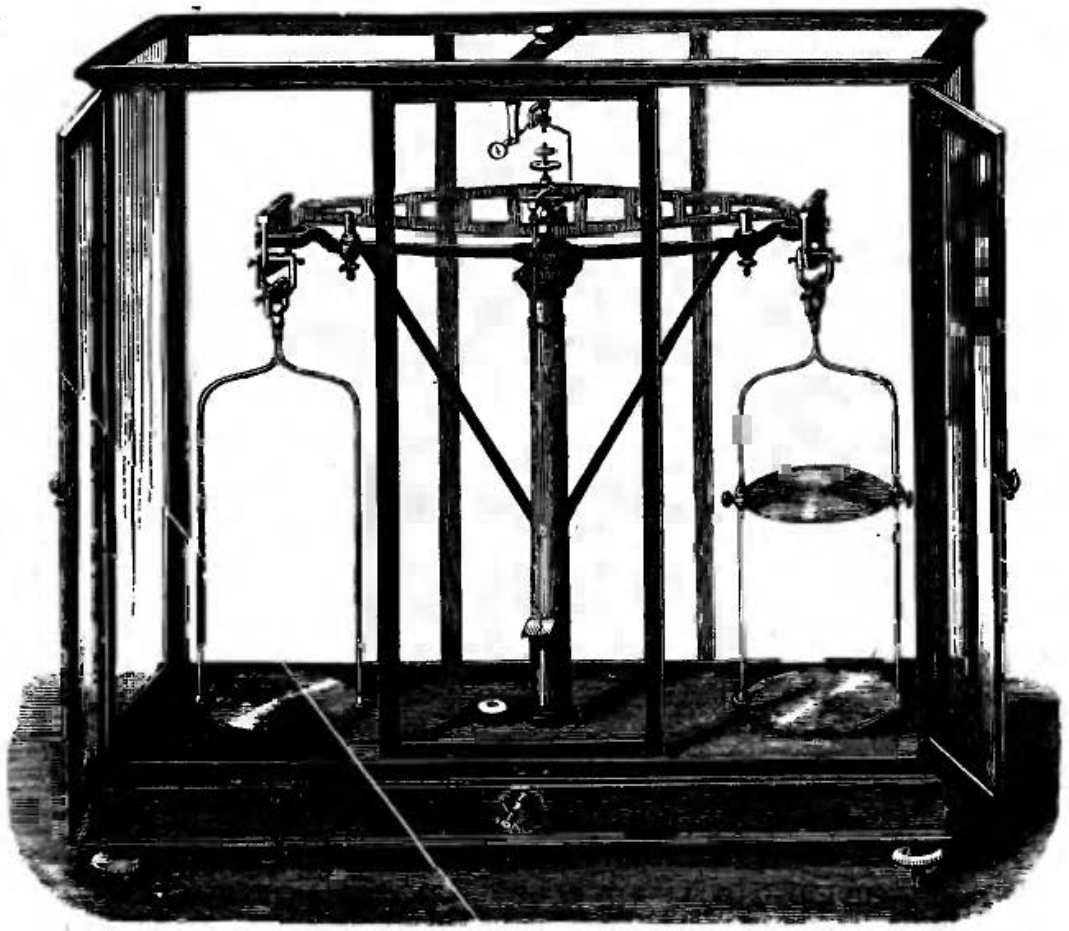


Fig. 46. Waga chemiczna.

wanie jej pożądanego stopnia czułości. Dolny krążek ma po jednej stronie otwór, tak że masa jego jest nierównomiernie naokoło osi rozmieszczoną, co znów pozwala przez obracanie krążka powiększać nieco obciążenie po jednej lub drugiej stronie; w ten sposób mogą być wyrównane niezmiernie małe różnice, spowodowane np. przez obecność ledwo dostrzegalnych pyłków. Z przodu drąga, pośrodku, widać długą wskazówkę, zwróconą ku dołowi; zajmuje ona położenie pionowe, gdy płaszczyzna, przechodząca

przez trzy wspomniane ostrza nożów, jest poziomą. Dolny koniec wskazówki porusza się wzdłuż łuku, na którym oznaczone są podziałki, pozwalające mierzyć wielkość odchylenia; podczas równowagi wskazówka stoi przed podziałką, oznaczoną zerem.

W celu uchronienia wagi od szkodliwych wpływów powietrza i wilgoci, umieszcza się ją w szklanem pudle, którego drzwiczki należy otwierać tylko podczas obciążania szalek. Wewnątrz pudła znajduje się naczyńko z ciałem pochłaniającem wilgoć; cały zaś przyrząd powinien być umieszczony na nieruchomej podstawie. Dla zaoszczędzania noży, po skończonem ważeniu, cały drąg zostaje zwykle podniesiony do góry i unieruchomiony za pomocą ramki metalowej, mającej kształt litery V; mechanizm, poruszający tę ramkę, ukryty jest wewnątrz słupa wagi, a guzik, umieszczony na dole zewnątrz pudła, umożliwia wprawienie w ruch tego mechanizmu.

Widzimy tedy, że waga chemiczna może istotnie być bardzo dokładną i czułą. Rzecz naturalna, że i gwichty używane do takiej wagi, muszą być nadzwyczaj dokładnie obrobione; często też eksperymentatorzy sami przygotowują sobie maleńkie gwichty z drutu platynowego, wymagające szczególnej staranności i pozwalające oznaczać ciężar mniejszy od jednego *miligrama*, to jest tysiącznej części grama. (1) Przy użyciu wszakże wagi chemicznej, wyżej opisanej, takie maleńkie gwichty stają się zbyteczne. Tutaj bowiem widzimy pośrodku drąga półkole, wzdłuż którego przesuwa się strzałka, mogąca być obracaną za pomocą mechanizmu, umieszczonego tuż pod górną ścianką pudła; podziałki półkola odpowiadają miligramom, tak że ustawienie strzałki na podziałce 1, 2, 3 . . . . z lewej strony, znaczy to samo, co obciążenie lewej szalki 1, 2, 3 . . . . miligramami.

Fizycy uciekają się często do metody *podwójnego ważenia* (metoda Bordy), która pozwala dokładnie określić ciężar ciała nawet wtedy, gdy ramiona drąga wagowego nie są zupełnie ró-

---

(1) Jestto waga jednego sześciennego centymetra wody dystylowanej przy 4°; tysiąc gramów stanowi jeden kilogram, równający się 2,44 naszego funta.

wne. Umieszczamy tedy dane ciało na jednej szalce, a na drugą sypiemy śrótu lub piasku, aż do nastąpienia równowagi; następnie zdejmujemy ciało, a na jego miejscu kładziemy gwichty tak długo, dopóki równowaga nie zostanie przywróconą; rozumie się, że gwichty te przedstwiają dokładny ciężar ważonego ciała.

Na zakończenie rozdziału powiemy jeszcze o pewnej własności ciał, dającej się oznaczyć za pomocą wagi. Wiadomo mianowicie, że równe objętości różnych ciał posiadają niejednakowy ciężar, że np. dana objętość drzewa waży mniej, niż taka sama objętość żelaza, szkła lub kamienia. Zwykle porównywa się ciężar wszystkich ciał stałych i płynnych do ciężaru równej objętości wody dystylowanej, mającej 4°, a liczbę, jaką otrzymujemy z podzielenia ciężaru danego ciała przez ciężar równej objętości wody, nazywamy *ciężarem właściwym* tegoż ciała. Naprzykład ciężar właściwy srebra wynosi 10,47, to znaczy, że metal ten waży tyleż razy więcej od wody, wziętej w takiej samej co on objętości. Widzimy tedy, że pojęcie o ciężarze właściwym jest w związku z ciężarem ciał, to jest z działaniem na nie siły ciężkości.

Jeżeli zaś porównamy masę czyli ilość materyi danego ciała do masy równej objętości wody, to stosunek dwóch tych mas zowie się *gęstością* tegoż ciała. Wiemy już, że jakkolwiek masy ciał są niezależne od siły ciężkości, to jednak ciężar ich daje nam miarę wielkości ich mas (1), a więc np. ciała jednakowo ciężkie zawierają jednakową ilość materyi. Wynika z tego, że stosunek ciężarów dwóch ciał równa się stosunkowi ich mas, czyli że *ciężar właściwy* i *gęstość* ciał wyrażone są przez jedne i te same cyfry. Pomimo to, należy ściśle odróżniać dwa te pojęcia, jedno bowiem wiąże się z ciężarem ciał, drugie—z ich masą. O metodach, za pomocą których można oznaczyć ciężar właściwy ciał, powiemy obszernie w jednym z następnych rozdziałów.

---

(1) Pod warunkiem, że ciężar tych mas oznaczamy w jednem i tem samem miejscu na ziemi.

ROZDZIAŁ V.

Działanie ciężkości na ciała ciekłe.

§ 1. Własności cieczy.

Codziennie jesteśmy świadkami wielu rzeczy, w wysokim stopniu zasługujących na naszą uwagę, które jednak przechodzą niepostrzeżenie, nie pobudzając nas wcale do zastanowienia się nad niemi. Tu należą naprzykład rozmaite postacie, w jakich występują ciała, bądź to znajdujące się w stanie stałym, ciekłym lub gazowym, bądź to przechodzące z jednego z tych *stanów skupienia* w inny. Na czem właściwie polega różnica między lodem i wodą i co się dzieje, gdy ta ostatnia zamienia się w parę? Jakie zmiany zachodzą w układzie cząstek ciała w chwili, gdy ono topnieje lub się ulatnia, albo przeciwnie—gdy krzepnie lub się skrapla? Na pytania te nauka dopiero zaczęła dawać określone odpowiedzi, dokładne bowiem zbadanie rzeczonych zjawisk i warunków, od jakich zależą, połączone jest z trudnościami, z których małą zaledwie część udało się przezwyciężyć. W końcu księgi o cieple wyłuszczymy bliżej najnowsze poglądy na naturę różnych stanów skupienia oraz na procesy, zachodzące przy zmianach stanu; tutaj zaś ograniczymy się tylko ogólną charakterystyką stanów skupienia, zwłaszcza ciekłego, o ile to jest niezbędnem do zrozumienia poniżej omówionych zjawisk.

Kształt kawałka ołowiu możemy zmienić, wywierając nań ciśnienie w jednym jakimkolwiek kierunku, przyczem nie potrzebujemy go podpierać z boków; pręt drewniany możemy rozłamać, podpierając oba jego końce i uciskając mniej lub więcej silnie środek; drut metalowy możemy rozerwać, przymocowując jeden jego koniec i zawieszając na drugim bardzo wielki ciężar. Ciała te posiadają, jak powiadamy, wielką spójność,—co znaczy, że cząstki ich silnie nawzajem się trzymają, tak że dla ich przesunięcia lub rozłączenia należy użyć znacznej siły—i możemy na nie wywierać silne ciśnienie lub ciągnienie, nie naruszając ich całości. Ciała takie nazywamy *stałemi*, cechują się one samodzielną objętością i samodzielną postacią.

Przeciwnie, jeżeli na wodę, spirytus, kwas siarczany, nie zawarte w naczyniu, a więc nie podparte z boków, wywieramy chociażby bardzo słabe ciśnienie, wtedy cząstki tych ciał natychmiast rozbiegają się na wszystkie strony; jeżeli przechylimy szklankę z wodą, część jej, bezpośrednio nie podparta, oddzieli się od reszty i spadnie na ziemię. Cząstki tych ciał są tak luźno z sobą związane, tak łatwo ruchliwe, że do ich przesunięcia lub zupełnego rozłączenia wystarcza już bardzo słaba siła. Jednakże spójność w tych ciałach, jakkolwiek słabsza niż w ciałach stałych, jeszcze istnieje, posiadają one więc samoistną objętość, nie mają atoli, wskutek wielkiej ruchliwości swych cząstek, samodzielnej postaci, lecz przyjmują kształt naczynia, w którem się znajdują. Ciała takie zowią się *cieczami*.

Nalejmy trochę wody do obszernego naczynia: woda zbierze się na dnie i odgraniczy się wyraźnie zarysowaną płaszczyzną od znajdującego się nad nią powietrza; tak samo zachowują się wszystkie ciecze. Jeżeli natomiast do opróżnionego zamkniętego naczynia wprowadzimy najmniejszą chociażby ilość powietrza, wodoru lub kwasu węglanego, każde z tych ciał natychmiast się rozszerzy, całkowicie i jednostajnie wypełniając naczynie tak, że w każdym jego centymetrze sześciennym będzie się znajdowała jednakowa ilość powietrza, wodoru lub kwasu węglanego. Spójność w takich ciałach jest prawie żadna, nie mają one, podobnie jak i ciecze, samoistnej postaci, tem się jednak różnią od tych ostatnich, że nie posiadają także samodzielnej objętości, lecz zajmują każdą wolną przestrzeń, rozszerzając się rak długo, dopóki nie napotkają przeszkody; nie można ich więc przechowywać w otwartem naczyniu. Ciała takie zowią się *gazami*.

Niektórzy oznaczają ciecze i gazy wspólnem mianem płynów, rozumiejąc pod temi ostatniemi w ogóle takie ciała, które, wskutek wielkiej ruchliwości swych cząstek, nie posiadają samodzielnej postaci; płyny tem się różnią od ciał stałych, że nie będąc podparte z boków, nie wytrzymują najlżejszego chociażby ciśnienia w jednym tylko kierunku. Niektóre, niżej wyszczególnione prawa, wynikające z wielkiej tej ruchliwości cząstek, stosują się w równej mierze do wszystkich płynów—tak do cieczy, jak i do gazów.

Odkładając badanie własności gazów do jednego z następnych rozdziałów, zwróćmy się teraz do bliższego rozważenia cieczy. Powiedzieliśmy już wyżej, że w cieczach spójność, jakkolwiek słabsza niż w ciałach stałych, jednak jeszcze istnieje; otóż możemy się o tem przekonać za pomocą bardzo prostych doświadczeń. Zetknijmy z powierzchnią wody płytę z materyału, który zostaje zwilżony przez wodę, naprzykład ze szkła (fig. 47), a zobaczymy, że chcąc odjąć płytę, trzeba użyć pewnej siły; gdy to nastąpi, dostrzeżemy na płycie cienką warstewkę wody, z czego wnosimy, że owa siła zużytą została na przezwyciężenie spójności cieczy, na oderwanie warstewki wody, pozostałej na płycie od reszty cieczy.

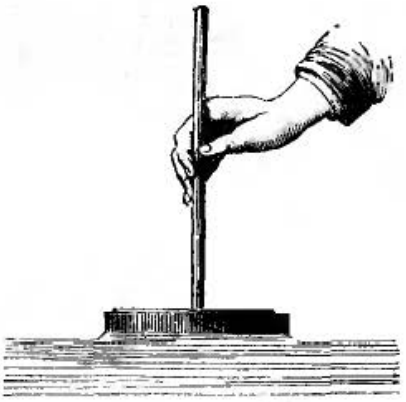


Fig. 47. Spójność cieczy.

Gdybyśmy do powyższego doświadczenia, zamiast szklanej, użyli płyty z takiego materyału, który nie zostaje zwilżony przez wodę, naprzykład z mosiądzu, to i wtedy musielibyśmy użyć pewnej siły na odłączenie płyty; ponieważ jednak w tym razie nie przezwyciężamy spójności cieczy, płyta bowiem mosiężna po odjęciu od wody jest suchą, musimy więc przyjąć, że dana siła zużytą tu zostaje na oderwanie mosiężnej płyty od wody, na przezwyciężenie *przylegania* wody do mosiądzu. A oto inne, jeszcze bardziej pouczające doświadczenie: zanurzmy pałeczkę szklaną w wodzie i następnie ostrożnie wyjmijmy ją; zobaczymy, że pałeczka jest zwilżona, co dowodzi, że przyleganie wody do szkła jest silniejszem od spójności między samemi cząstkami wody. Dalej spostrzegamy, że woda spływa po pałeczce i zbiera się na dolnym jej końcu w postaci kropli; tworzenie się tej ostatniej dowodzi istnienia spójności pomiędzy cząstkami wody, inaczej bowiem dolne części kropli, ulegając działaniu ciężkości, oderwałyby się od górnych. Utworzona kropla, wciąż się powiększając wskutek ściekającej wody, odrywa się w końcu i spada na ziemię, następuje zaś to w chwili, gdy działanie ciężkości na kroplę może pokonać jej spójność. Istnienia

spójności w cieczach dowodzi także kulista postać kropli rosy na liściach (fig. 48) lub kropli rtęci, wylanej na płytę, której ona nie zwilża, naprzykład na płytę drewnianą (fig. 49); bez tej spójności drobne te ciekłe masy rozpostarłyby się, wskutek działania ciężkości, po powierzchni, na której spoczywają; działanie to zostaje w tym razie przezwyciężone przez spójność cząstek wody, względnie rtęci.

Fig. 48. Kulista postać kropli rosy.

Różnica więc pomiędzy ciałami stałemi a ciekłemi polega tylko na różnym stopniu spójności, która u pierwszych jest tak wielką, że utrudnia wzajemne przesuwanie lub rozłączenie cząstek, u drugich zaś—tak nieznaczną, że najsłabsze już siły zewnętrzne mogą ją zniweczyć. Atoli i spójność ciał stałych możemy przezwyciężyć, wywierając na nie *dostatecznie wielkie ciśnienie*; Tresca mianowicie wykazał, że najtwardsze nawet i najgęstsze ciała stałe mogą pod wpływem bardzo znacznego ciśnienia wykonywać ruch, niewiele się różniący od zjawiska wypływu cieczy, nie zmieniając przytem swego stanu skupienia. Zjawisko podobne do wypływu cieczy możemy także wywołać u ciał stałych, rozdrabniając je na bardzo delikatny proszek i pomieszczając w naczyniu, na dnie którego znajduje się niewielki otwór (fig. 50, str. 77).

Fig. 49. Spójność cieczy: krople rtęci.

Podczas jednak gdy ciała stałe zachowują się w podobny sposób tylko w razie, gdy wywieramy na nie bardzo wielkie ci-

śnienie, albo gdy są delikatnie sproszkowane, ciecze czynią to już pod wpływem bardzo słabych sił; tak naprzykład spójność wielkich mas wody, spadających ze znacznej wysokości, zostaje przezwyciężoną przez opór powietrza, który sprawia, że masy te rozszczepiają się na bardzo drobny pył (patrz str. 16).

Podobnie jak u ciał stałych, tak i u cieczy znajdujemy różne stopniowania spójności: znamy takie ciecze, jak melasa, różne żywice, stopiona siarka przy pewnych temperaturach, tłuste oleje i t. d., których cząstki powoli tylko zmieniają swe położenie i dopiero po pewnym czasie wypełniają wklęsłości naczynia, w którem się znajdują; wypływanie ich jest bardzo powolnem, a cząstki nie tak łatwo się rozłączają; ciecze takie nazywamy *ciągłopłynnemi*. Inne znowu, jak woda, zwłaszcza gorąca, alkohol, eter i t. d. odznaczają się bardzo wielką ruchliwością cząstek—są to ciecze *lekkopłynne*. Nareszcie odróżniają jeszcze trzeci rodzaj cieczy—*ciężkopłynnych*, do których należą rtęć i stopione metale. Zaznaczmy tutaj, że ciepło i ciśnienie wywierają wielki wpływ na zmianę stopnia spójności ciał; o wpływie tym pomówimy szczegółowo w nauce o cieple.

Fig. 50. Wpływ drobno sproszkowanych ciał.

Z powodu łatwej ruchliwości cząstek, ciecze nie mają porów we właściwem tego słowa znaczeniu,—to jest luk, dostrzegalnych gołem okiem, albo dających się rozpoznać przy pomocy mikroskopu,—jak np. gąbka lub papier; gdyby w masie cieczy na chwilę utworzyła się jakaś większa luka, łatwo przesuwalne cząstki wnetby ją wypełniły. Najsilniejsze też szkła powiększające nie wykazują nam w cieczy żadnych luk, t. j. wolnych przestrzeni, któreby nie były zajęte przez jej masę; każda ciecz *wydaje nam się* absolutnie ciągłą. Przedwczesnym jednak byłby wniosek, jaki możnaby wyprowadzić na mocy takiego świadectwa mikroskopu, że nie istnieją wcale wolne przestrzenie między cząstkami cieczy; niektóre zjawiska zniewalają nas raczej do wręcz przeciwnego przypuszczenia. Jeżeli np. do ściśle

odmierzonego litra bardzo stężonego alkoholu dolejemy takiż litr wody, to, po dokładnem ich zmięszaniu i doprowadzeniu mięszaniny do pierwotnej temperatury, otrzymamy w rezultacie nieco mniej niż dwa litry cieczy; zjawisko to daje się wytłómaczyć jedynie przypuszczeniem, że podczas mięszania cząstki alkoholu wchodzą w wolne przestrzenie, rozdzielające cząstki wody, te ostatnie zaś — w wolne przestrzenie między cząstkami alkoholu. Na korzyść takiego poglądu przemawia także dobrze znany fakt, że objętość cieczy, za nielicznemi wyjątkami, stale zmniejsza się w miarę jej oziębiania, co tłómaczymy sobie w ten sposób, że przy obniżeniu temperatury wolne przestrzenie między cząstkami cieczy się zmniejszają, czyli że same te cząstki zbliżają się ku sobie.

Czy możemy jednak zmniejszyć objętość cieczy za pomocą samego tylko ciśnienia, albo innemi słowy, czy ciecze są *ściśliwe?* Pytanie to pierwsi usiłowali rozstrzygnąć na drodze doświadczalnej fizycy z florenckiej Academia del Cimento. Myśl ich doświadczeń jest następująca: ze wszystkich brył o jednakowej powierzchni kula posiada największą objętość, tak, że odkształcając w jakikolwiek sposób kulę, zawsze zmniejszamy jej objętość; jeżeli więc kulę szczelnie wypełnimy jakąś cieczą, naprzykład wodą i, zalutowawszy ją, poddamy silnemu ciśnieniu, to w razie gdy ciecze są ściśliwe, woda zmieści się także w zmniejszonej objętości odkształconej kuli, w przeciwnym razie przesiąknie ona przez jej ściany. Próby, wykonane w opisany sposób z wodą, zawartą w srebrnych lub złotych kulach, pokazały, że woda przesiąka przez pory ich ścianek, z czego wzmiankowani fizycy wyprowadzili wniosek, że za pomocą samego tylko mechanicznego ciśnienia nie można zmniejszyć objętości cieczy. Próby te atoli nie są dostatecznie przekonywającemi, niewiadomo bowiem, jakby się zachowywała woda lub inna jakaś ciecz w naczyniu z tak spójnego materyału, przez który nie mogłaby przesiąkać. Późniejsze też doświadczenia, podjęte w celu sprawdzenia tego wniosku, wykazały niedokładność eksperymentów akademików florenckich; różni fizycy dowiedli, że ciecze są ściśliwe i zdołano nawet dokładnie oznaczyć stopień tej ściśliwości dla różnych cieczy, wystawionych na działanie pewnego określonego ciśnienia przy da-

nej temperaturze. Z doświadczeń tych okazało się, że, przy temperaturze 0°, objętość rtęci pod wpływem ciśnienia jednej atmosfery (1) zmniejsza się zaledwie o 0,000003, wody—o 0,00005, alkoholu etylowego—o 0,00008 i t. d.; ściśliwość cieczy, jak widzimy, jest nadzwyczaj małą, możemy ją więc, bez popełnienia znacznego błędu, w dalszych naszych wywodach pominąć.

§ 2. Jednostajne rozchodzenie się ciśnienia w cieczy. Prawo Pascala. Prasa hydrauliczna.

Z nader łatwej ruchliwości cząstek cieczy wynika, że znajduje się ona w równowadze tylko wtedy, gdy siły, działające na każdą jej oddzielną cząstkę wzajemnie się równoważą, gdy więc, naprzykład, ciśnienia na cząstkę z dwóch stron przeciwnych są dokładnie jednakowe; inaczej bowiem cząstka ta, ulegająca, jak widzieliśmy, wpływowi najsłabszej nawet siły, posunęłaby się w kierunku silniejszego ciśnienia. Dalej z tejże własności wynika, że ciśnienie, w jakimkolwiek kierunku doznawane przez zamkniętą dokoła ciecz, jednostajnie się rozchodzi wewnątrz całej jej masy, podobnie jak przy naciskaniu woreczka grochu lub piasku, ziarna ich rozbiegają się na wszystkie strony i uciskając ściany woreczka, wydymają go. Cząstki cieczy, bezpośrednio uciskane, usuwają się (ciecze bowiem są prawie zupełnie nieściśliwe) i cisną z kolei na najbliższe cząstki, te znowu na sąsiednie i t. d., aż ciśnienie nie wyrówna się w całej jej masie.

Pascal pierwszy w r. 1650 odkrył prawo, dotyczące zachowania się cieczy pod tym względem; brzmi ono jak następuje: *ciśnienie, wywierane na zamkniętą ze wszech stron ciecz, rozchodzi się jednostajnie poprzez całą jej masę tak, że każda jednakowa powierzchnia wewnątrz i na granicy cieczy doznaje jednakowego ciśnienia, a więc dwa, trzy, cztery i t. d. razy większa powierzchnia doznaje tyleż razy większego ciśnienia.* Jeżeli przeto wypełnimy jakąś cieczą naczynie, opatrzone równemi walcowatemi otworami

(1) Ciśnienie jednej atmosfery równa się ciśnieniu, wywieranemu przez ciężar 1,033 kilogr. na 1 centymetr kwadratowy.

(fig. 51), w które wchodzą dokładnie dopasowane tłoki i następnie będziemy wywierali na jeden z tych tłoków pewne ciśnienie, to musimy na każdy z pozostałych wywierać z zewnątrz dokładnie takie samo ciśnienie, ażeby przeciwważyć ciśnienie, doznawane przez te tłoki od wewnątrz. Pominęliśmy przytem ciężar samej cieczy; chcąc twierdzenie to wykazać doświadczalnie, należałoby uwzględnić także ciśnienie, jakie ciecz ciężarem swym wywiera na własne swe cząstki, oraz na ściany naczynia. A teraz wykonajmy inne doświadczenie: nalejmy wody do naczynia, utworzonego z dwóch walcowatych rur o nierównej średnicy, połączonych u dołu kanałem; następnie, zamknąwszy rury dokładnie dopasowanemi tłokami, pomieśćmy na węższym z nich gwicht, ważący

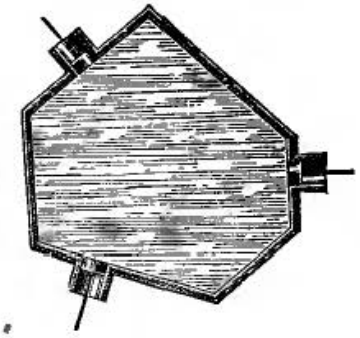


Fig. 51. Jednostajne rozchodzenie się ciśnienia w cieczy.

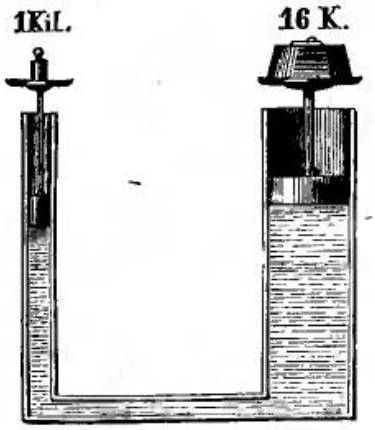


Fig. 52. Zasada prasy hydraulicznej.

1 kilogram (fig. 52); wtedy każda powierzchnia cieczy lub ściany naczynia, równa dolnej powierzchni tego tłoku, będzie doznawała ciśnienia 1 kilograma. Chcąc więc utrzymać drugi tłok na tej samej wysokości co i pierwszy, musimy na tamtym położyć tyle razy większy ciężar, ile razy dolna powierzchnia jego jest większą od dolnej powierzchni węższego tłoku. Jeżeli naprzykład stosunek tych powierzchni jest jak 1 do 16, wtedy, dla równowagi, należy szerszy tłok obciążyć 16 kilogr. I przy tem doświadczeniu pominęliśmy, dla uproszczenia sobie zadania, ciężar samych tłoków; właściwie zaś równowaga będzie miała miejsce wtedy, gdy stosunek ciężarów tłoków wraz z pomieszczonemi na

nich gwichtami będzie taki sam, jak stosunek powierzchni poprzecznych przekrojów tłoków. Możemy więc dowolnie zwiększać ciśnienie, wywierane na wodę (albo jakąkolwiek inną ciecz), jeżeli tylko postaramy się o to, aby ta ostatnia z kolei cisnęła na dostatecznie wielką powierzchnię, jak to widzimy na fig. 52. Na tej właśnie zasadzie polega maszyna, mająca bardzo szerokie praktyczne zastosowanie, zwana *prasą hydrauliczną* (1).

Myśl urządzenia takiej maszyny pierwszy powziął był Pascal; przy praktycznem urzeczywistnieniu tej myśli napotkał on atoli jednę trudność (niżej będzie o niej mowa), której nie mógł przezwyciężyć i dopiero w wiele lat po nim, mianowicie w r. 1797 angielski inżynier Bramah zbudował prasę, odpowiadającą celowi.

Budowę prasy hydraulicznej—w postaci, w jakiej obecnie powszechnie się używa—pokazują figury 53 i 54 (str. 82). Składa się ona z walcowatej pompy *A*, połączonej za pomocą rurki *d* z obszernem walcowatem naczyniem *B*, w którem może się posuwać w górę i na dół dokładnie dopasowany tłok *C*. Do górnego końca tego tłoka przymocowaną jest płyta *K*, poruszająca się wraz z nim wzdłuż 4 słupów, na których spoczywa stała płyta *M N*; między tą ostatnią i płytą *K* pomieszcza się przedmioty, które chcemy poddawać bardzo silnemu ciśnieniu. Przedmioty te zostają silnie sprasowane, gdy tłok *C*, wskutek ciśnienia od dołu podnosi się, co dokonywa się za pomocą pompy ssąco-tłoczącej *A* (2), wsysającej wodę ze zbiornika *P* i wtłaczającej ją następnie przez rurkę *d* do naczynia *B* (fig. 54). Tłok tej pompy porusza się w górę i na dół za pomocą dźwigni drugiego rodzaju *O;* przy podnoszeniu tłoka, woda wchodzi do wnętrza pompy, przy spychaniu zaś tłoka woda wchodzi do rurki *d*, a następnie do *B*.

Wskutek gwałtownego ciśnienia, jakiego woda doznaje w *B*, przesiąkałaby ona przez szczeliny, zawsze znajdujące się pomiędzy tłokiem *C*, a ścianami naczynia *B* — nawet przy użyciu najdoskonalszego materyału — gdyby nie zdołano temu zapobiedz.

---

(1) Od greckiego wyrazu: hydor—woda.

(2) Bliższe szczegóły o pompach czytelnik znajdzie w jednym z następnych rozdziałów.

O przeszkodę tę właśnie rozbijały się wszelkie próby Pascala

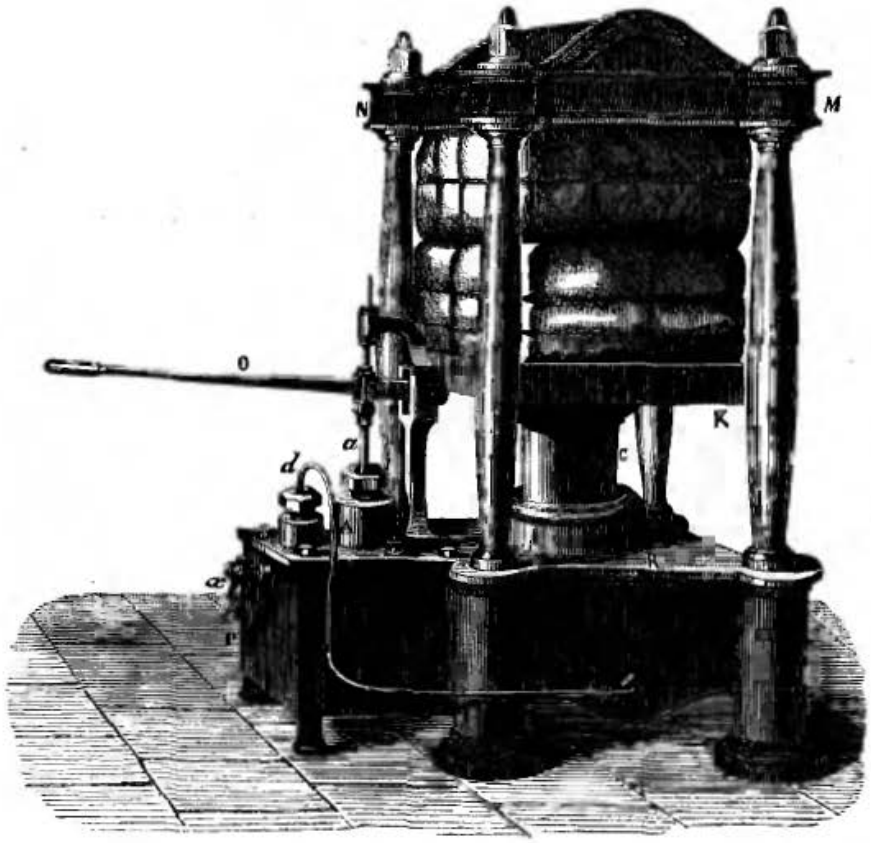


Fig. 53. Prasa hydrauliczna.

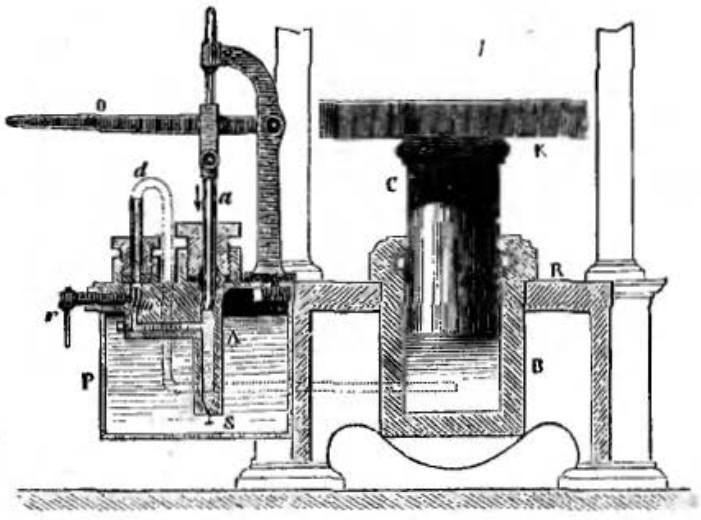


Fig. 54. Pionowy przekrój prasy hydraulicznej.

zbudowania dobrej prasy hydraulicznej i dopiero Bramah zdołał przeszkodę rzeczoną usunąć, a to za pomocą następującego, bar-

dzo dowcipnego sposobu: W wyżłobieniu, biegnącem dokoła wewnętrznej powierzchni ściany naczynia *B*, pomieścił on pierścień z nieprzemakalnej skóry, mający postać rynienki, otwartej od dołu (fig. 55); przy takiem urządzeniu, im gwałtowniej woda jest ściskaną, tem lepiej wchodzi ona w wolną przestrzeń pomiędzy ściankami pierścienia i tem silniej przyciska jednę z nich (zewnętrzną) do ścian naczynia *B*, drugą zaś (wewnętrzną) do tłoka *C*, objętego dokoła przez ten pierścień. W ten sposób pierścień doskonale zapobiega wszelkiemu przesiąkaniu wody, szczelnie zamykając najwęższe nawet szczeliny.

Ciśnienie, jakie możemy otrzymać za pomocą prasy hydraulicznej, zależy od stosunku dolnych powierzchni tłoków *C* i *a*. Niechaj, naprzykład, pierwsza będzie 100 razy większą od drugiej, wtedy tłok *C* będzie doznawał od dołu do góry ciśnienia 100 razy większego niż to, jakie wywieramy z góry na dół na mały tłok *a*. Ciśnienie to możemy nadto powiększyć za pośrednictwem dźwigni *O;* jeżeli naprzykład ramię siły jest 5 razy dłuższem, aniżeli ramię oporu (1), wtedy ciśnienie wywierane na mały tłok jest również 5 razy większem i tyleż razy większem jest ciśnienie na duży tłok. Przy podanych stosunkach powierzchni obu tłoków i długości ramion drąga, robotnik uciskający koniec drąga z siłą 30 kilogramów, wywiera na duży tłok, a więc i na przedmioty pomieszczone na znajdującej się na nim płycie, ciśnienie 15,000 kilogr.

Fig. 55. Pierścień skórzany w prasie hydraulicznej.

Prasa hydrauliczna używa się do wyciskania oleju z nasion,— soku cukrowego z buraków, do gładzenia papieru, do prasowania sukna, bawełny i innych podobnych materyj, dalej do próbowania mocy łańcuchów, płyt pancerników i t. d., a także do wciskania powietrza w wielkie przestrzenie i przy wielu innych jeszcze robotach. Łatwo także pojąć, że po odjęciu górnej stałej płyty (patrz fig. 53) można za pomocą prasy hydraulicznej podnosić

(1) Patrz str. 64.

bardzo wielkie ciężary, naprzykład przy budowie mostów, przy wznoszeniu różnych budowli i t. d.

§ 3. Własności cieczy, wynikające z jednostajnego rozchodzenia się ciśnienia i z ich ciężaru.

Mówiac o kierunku spadku ciał, powiedzieliśmy (str. 17), że niewielka powierzchnia spoczywającej cieczy przedstawia płaszczyznę, prostopadłą do kierunku pionowego, czyli poziomą; obecnie możemy pokazać, dlaczego tak jest. Gdyby mianowicie powierzchnia ta nie była poziomą płaszczyzną, wtedy cząstka naprzykład *M* (fig. 56) znajdowałaby się jakby na równi pochyłej i, będąc łatwo ruchliwą, stoczyłaby się po niej wskutek własnego swego ciężaru; to samo dotyczy innych cząstek. Pojmujemy tedy, że równowaga cieczy nie pierwej się ustali, aż nie znikną wszelkie pochyłości jej powierzchni, innemi słowy, aż nie stanie się ona wszędzie prostopadłą do kierunku działania ciężkości, a więc poziomą; dlatego też najwyższą powierzchnię cieczy nazywamy krótko jej *poziomem*. Dla niewielkiej masy cieczy, pionowe, opuszczone z różnych jej punktów, są równoległe między sobą, powierzchnia jej stanowi przeto *płaszczyznę* poziomą; dla wielkich natomiast mas cieczy, jak dla mórz, a nawet większych jezior, pionowe te nie są już równoległe między sobą i powierzchnie ich stanowią część powierzchni kulistej—tylko taka bowiem powierzchnia jest wszędzie prostopadłą do kierunku pionowego.

Fig. 56. Powierzchnia spoczywającej cieczy nie może być pochyłą.

Zobaczmy teraz, co zachodzi we wnętrzu i na granicach spoczywającej cieczy. Ponieważ każda jej cząstka podlega działaniu ciężkości, ciśnie więc ona swym ciężarem na inne tak, że każda warstewka doznaje ciśnienia cieczy nad nią będącej i to tem większego, im głębiej jest położoną. Jakiż jest ogólny rezultat ciśnień wszystkich cząstek cieczy? Doświadczenie nam to pokaże. Weźmy walcowate naczynie, otwarte od dołu i, osadziwszy je

metalową oprawą w trójnogu (fig. 57), zamknijmy dolny otwór ruchomem dnem, utworzonem z dokładnie doń przystającej tafelki, którą za pomocą nici przyczepiamy do jednej szalki wagi, jak to pokazuje załączona figura. Na drugą szalkę połóżmy gwichty, dokładnie równoważące tafelkę, a oprócz nich jeszcze nadciężarek określonej wagi, dzięki któremu tafelka zostaje silnie przyci-

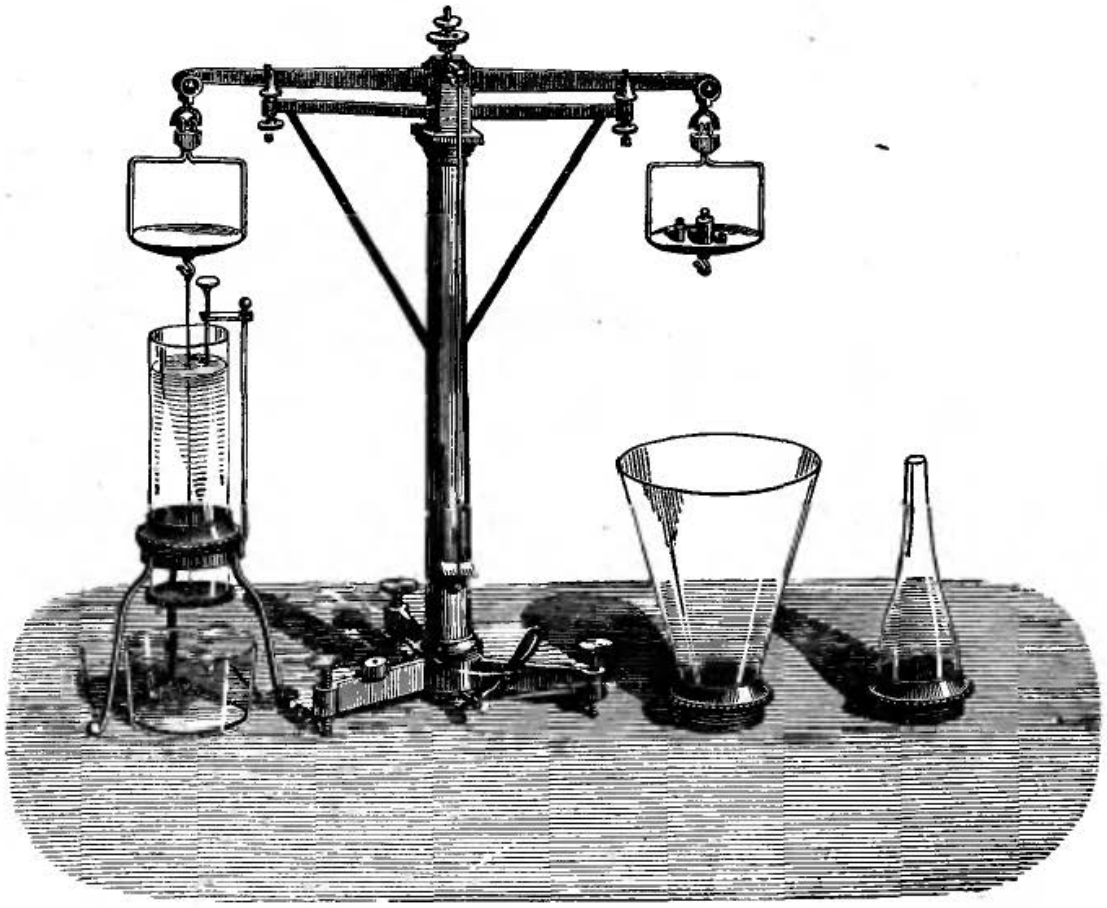


Fig. 57. Ciśnienie cieczy na dno.

śniętą do naczynia; następnie zaś ostrożnie lejmy wodę do tego ostatniego (1). Ciecz ta, nagromadzając się w naczyniu, coraz silniej uciska dno, aż nareszcie następuje chwila, w której ciężar jej ściśle równoważy nadciężarek, pomieszczony na drugiej szalce. Jeżeli dolejemy jeszcze więcej wody, wtedy tafelka, wskutek zwiększonego ciśnienia, obluźni się i woda zacznie wypływać

(1) Zamiast wody, do poniższych doświadczeń możemy użyć jakiejkolwiek innej cieczy; rezultat od tego się nie zmieni.

z naczynia; przez to jednak ilość wody, a więc i jej ciśnienie się zmniejszy tak, że po pewnym czasie tafelka znowu szczelnie będzie przylegała do naczynia. W ten sposób łatwo możemy znaleźć punkt, do którego woda powinna dochodzić w naczyniu wtedy, gdy nadciężarek dokładnie wystarcza do jej zrównoważenia; punkt ten oznaczamy za pomocą sztyfcika, który zeszrubowujemy aż do zetknięcia się jego z wodą. Zbierzmy teraz całą wodę w podstawione w tym celu naczyńko i zważmy ją, a przekonamy się, że ciężar jej jest ten sam, co i nadciężarka. Ciśnienie więc na dno cieczy, zawartej w walcowatem naczyniu, równa się jej ciężarowi.

Jeżeli teraz powtórzymy powyższe doświadczenie z naczyniami, rozszerzającemi lub zwężającemi się ku górze (fig. 57, na prawo od wagi), mającemi jednak takie same co i poprzednio dno, to przekonamy się, że ten sam nadciężarek utrzyma w nich w równowadze wodę, dochodzącą do takiej jak przedtem wysokości. Pierwsze jednak z tych naczyń zawiera, przy jednakowym poziomie cieczy, tak na wagę jak i na objętość, więcej wody, drugie zaś—mniej, aniżeli naczynie walcowate, mające takie same dno. Widzimy więc, że ciśnienie cieczy na dno nie zależy od kształtu i objętości naczynia, lecz tylko od powierzchni dna i od wysokości cieczy. Wielkość tego ciśnienia podlega tedy następującemu prawu: *Ciśnienie cieczy na dno równa się ciężarowi słupa tejże cieczy, którego podstawa równa się powierzchni dna, wysokość zaś—odległości dna od poziomu cieczy.*

Prawo to możemy także stwierdzić za pomocą przyrządu Haldat'a, polegającego na innej zasadzie. Przyrząd ten (fig. 58, str. 87) składa się z dwukolanowej rury, wypełnionej rtęcią, która w początku doświadczenia stoi w obu kolanach na jednakowej wysokości. Jedno kolano (na figurze—lewe) zakończone jest w górnej swej części metalową oprawą, opatrzoną z boku kranem; do kolana tego można doszrubowywać którekolwiek z naczyń, mających rozmaity kształt, lecz jednakowo wielki dolny otwór. Nalejmy do przyszrubowanego naczynia wody do pewnej wysokości, wskazanej przez ostrze sztyfcika, wtedy ciecz ta, cisnąc na górną powierzchnię rtęci, odgrywającej tu rolę dna

względem wody, podniesie ją w drugiem kolanie na pewną ilość podziałek. Wysokość podniesionego słupa rtęci daje nam miarę wielkości ciśnienia, wywieranego przez wodę na dno. Otóż wysokość ta będzie jednakową, niezależnie od tego, czy opisane doświadczenie wykonamy z naczyniem rozszerzonem ku górze (jak to pokazuje figura), czy z walcowatem, lub nareszcie z takiem, które zwęża się ku górze, jeżeli tylko woda będzie sięgała w nich do tej samej wysokości, t. j. do dolnego końca sztyfcika.

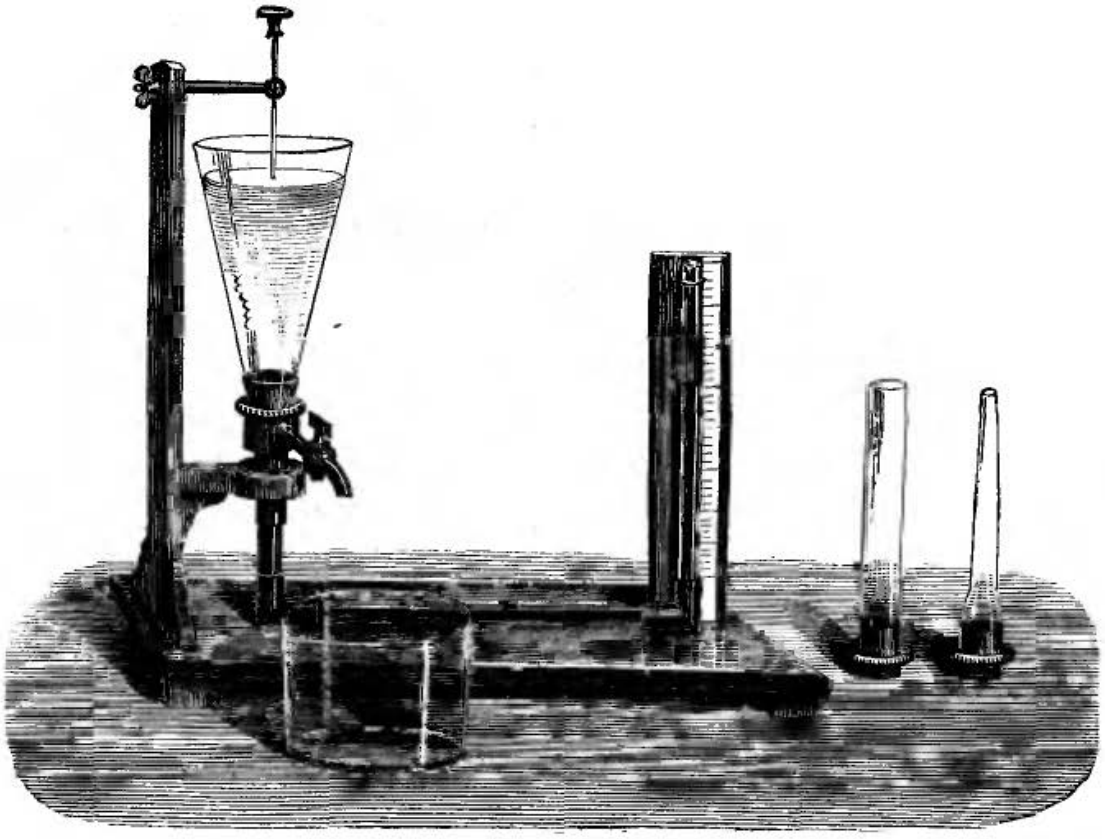


Fig. 58. Ciśnienie cieczy na dno, wykazane za pomocą przyrządu Haldat'a.

Ciśnienie, wywierane przez górne warstwy cieczy, rozpościera się nie tylko na wewnętrzne jej części i na dno naczynia, lecz także i na boczne jego ściany; kierunek tego *bocznego ciśnienia* jest przytem w każdem miejscu prostopadły do powierzchni ściany. Najłatwiej to wykazać za pomocą rurki, zakończonej pustą metalową kulą, w wielu miejscach posiadającą bardzo wązkie otwory. Jeżeli do takiej rury nalejemy wody, będzie ona wytryskiwała przez otwory w kierunku promieni kuli, a więc w kie-

runkach prostopadłych do jej powierzchni (fig. 59). Drogą rachunku daje się wykazać, że *ciśnienie boczne równa się ciężarowi słupa cieczy, którego podstawą jest rozważana część ściany podlegającej ciśnieniu, a którego wysokość równa się odległości środka ciężkości tej części ściany od poziomu cieczy.*

W zwykłych warunkach boczne ciśnienie w niczem się nie przejawia dlatego, że ciśnienie na jednę ścianę znosi się z równem ciśnieniem na ścianę przeciwległą; chcąc zaś boczne ciśnienie uwidocznić, należy je z jednej strony usunąć, albo przynajmniej zmniejszyć. Jeżeli mianowicie w jednej ścianie zrobimy otwór, wtedy powierzchnia ulegająca ciśnieniu, a więc i ono samo się zmniejszy; w takim zaś razie ciśnienie na przeciwległą ścianę nie jest już całkowicie równoważone i powstająca ztąd przewyżka może, w odpowiednich warunkach, wywołać ruch całego naczynia, jak to pokazują następujące przykłady: Jeżeli wyjmiemy zatyczkę z otworu, znajdującego się w bocznej ścianie kuli, wypełnionej wodą i zawieszonej na nitce, ta ostatnia wraz z kulą odchyli się od kierunku pionowego w stronę, przeciwną wypływowi wody. Jeżeli na wodzie pomieścimy korek, na tym zaś ustawimy naczynie z wodą, zaopatrzone w boczną rurkę, wtedy cały cały ten przyrząd pozostanie w spoczynku, dopóki rurka będzie zamkniętą; po otworzeniu jej natomiast, popłynie on w stronę, przeciwną kierunkowi wypływającej z rurki wody. Na tej samej zasadzie polega t. zw. koło wodne Segner'a. Składa się ono z naczynia, mogącego się obracać około pionowej osi i połączonego w dolnej swej części z poziomą rurką, zgiętą na końcach w kształcie litery S i z obu stron otwartą (fig. 60, str. 89). Jeżeli, zamknąwszy rurkę zatyczkami, nalejemy do naczynia wody i następnie wyjmiemy zatyczki, wtedy będzie się ono obracało w kierunku, przeciwnym wypływowi cieczy.

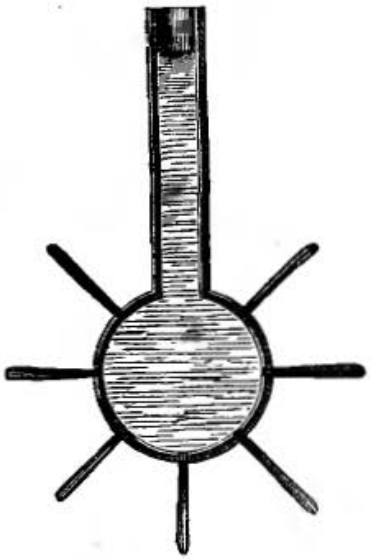


Fig. 59. Kierunek bocznego ciśnienia jest prostopadły do ścian naczynia.

W początku 2 § niniejszego rozdziału pokazaliśmy, że równowaga cieczy następuje tylko wtedy, gdy ciśnienia, działające na jakąś jej warstwę z dwóch stron przeciwległych, są równe. Z tego wynika, że każda warstewka we wnętrzu cieczy i każdy zanurzony w niej bardzo cienki przedmiot doznają jednakowego ciśnienia z góry na dół i z dołu do góry. Chcąc uwidocznić to ostatnie, należy (podobnie jak to uczyniliśmy przy ciśnieniu bocznem) ciśnienie ze strony przeciwległej usunąć, albo przynajmniej zmniejszyć; możemy zaś to zrobić w następujący naprzykład sposób:

Fig. 60. Koło wodne Segner'a.

Weźmy szklaną albo inną jakąś rurę i, zamknąwszy ją od dołu krążkiem, uczepionym do nici przesuniętej przez środek rury, wprowadźmy w naczynie, napełnione wodą. Krążek, pomimo iż puszczamy nić, nie spada (fig. 61, str. 90), co pokazuje, że działa nań z dołu do góry ciśnienie, równoważące albo nawet przewyższające jego ciężar.

Jeżeli teraz będziemy nalewali wody w rurę, ciecz ta będzie także cisnęła na krążek z góry na dół, gdy zaś dojdzie ona we-

wnątrz rury do tej samej prawie wysokości, co i zewnątrz, wtedy krążek odpadnie. Im głębiej zanurzymy rurę, tem więcej będzie można nalać w nią wody, zanim krążek odpadnie, a więc im głębiej, tem ciśnienie z dołu do góry jest większem. I gdyby krążek był nieważki, wtedy, niezależnie od tego, jak głęboko zanurzylibyśmy rurę, możnaby zawsze było nalać w nią tyle wody, że stałaby ona dokładnie na tym samym poziomie, co i w zewnętrznem naczyniu. Doświadczenie to dowodzi, że i *ciśnienie z dołu do góry* (tak samo jak ciśnienie z góry na dół) *równa się ciężarowi słupa cieczy, którego podstawę stanowi powierzchnia podlegająca ciśnieniu, wysokość zaś — odległość tej powierzchni od poziomu cieczy.*

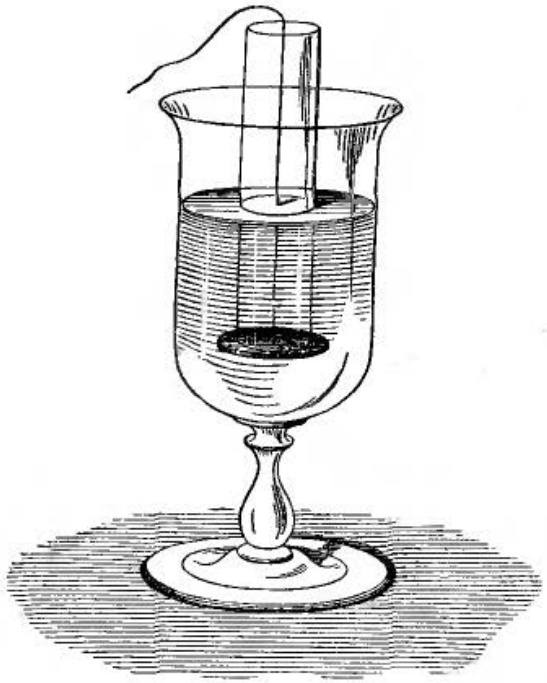


Fig. 61. Ciśnienie cieczy z dołu do góry.

Wyżej doświadczalnie wykazaliśmy, że, przy równej powierzchni dna i równej wysokości cieczy, ciśnienie na dno jest jednakowem dla naczyń najrozmaitszych kształtów, zawierających bardzo różne ilości cieczy. Fakt ten, jakkolwiek stwierdzony eksperymentalnie w sposób niewątpliwy, pozornie jednak jest niezrozumiałym; nieprawdopodobną zwłaszcza wydaje się nam okoliczność, aby ilości cieczy, które, będąc pomieszczone na wadze, wykazują różny ciężar, wywierały na dno naczynia jednakowe ciśnienie (fig. 62).

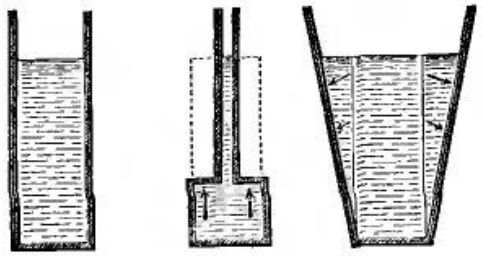


Fig 62. Paradoks hydrostatyczny.

Otóż teraz łatwo nam będzie fakt ten—nazwany, dla pozornego jego nieprawdopodobieństwa, *paradoksem hydrostatycznym* —

wytłómaczyć, jeżeli tylko uwzględnimy ciśnienie boczne, będące, jak widzieliśmy, prostopadłem do powierzchni ścian i ciśnienie z dołu do góry: W zwężającem się ku górze naczyniu (na fig. 62 środkowe) poziome ściany doznają ciśnienia w kierunku, wręcz przeciwnym kierunkowi działania ciężkości (jak to pokazują strzałki) i równającego się ciężarowi słupów cieczy, których brak jeszcze do uzupełnienia słupa, cisnącego na dno. Wskutek tego ciśnienia na poziome ściany, przeciwdziałającego ciężkości, ciecz, zawarta w tem naczyniu, będąc pomieszczona na wadze, wykaże ciężar mniejszy, niż ciśnienie na dno. Przeciwnie w naczyniu, rozszerzającem się ku górze, pochyłe ściany podtrzymują ciężar masy cieczy, leżącej na zewnątrz słupa, cisnącego na dno. Gdy więc naczynie to pomieścimy na szalce wagi, ciśnienie na pochyłe ściany, przenosząc się przez dolną powierzchnię dna na szalkę, działa na nią z siłą, równą różnicy między ciężarem całej cieczy i ciężarem walcowatego słupa, cisnącego na dno; o tyle też ciężar całej cieczy okaże się na wadze większym, niż ciśnienie na dno.

Z powyższego wynika, że można wywołać nadzwyczaj silne ciśnienie małą ilością cieczy, pomieszczając ją w bardzo wysokiem i wązkiem naczyniu, mającem obszerną podstawę, jak to za pomocą nader ciekawego doświadczenia po raz pierwszy pokazał Pascal: Wstawiwszy do beczki szczelnie przystającą wązką i bardzo długą rurę i wypełniwszy je wodą, rozsadził przez to beczkę (fig. 63, str. 92), co nie powinno nas dziwić, jeżeli rozważymy, że na ścianach jej ciążył słup cieczy, którego podstawa równała się powierzchni beczki, wysokość zaś była nieco większą od długości rury. Pojmiemy teraz, że 1 kilogramem wody możemy wywierać ciśnienie, równe ciężarowi tysięcy kilogramów.

§ 4. Prawo naczyń połączonych i jego zastosowania. Równowaga cieczy, nie mięszających się z sobą. Libella.

Nalejmy jednej i tej samej cieczy, naprzykład wody, do dwóch lub więcej naczyń, połączonych ze sobą u dołu kanałem, albo mających wspólne dno, a zobaczymy, że w każdem z tych naczyń woda dojdzie do tej samej wysokości, czyli innemi słowy,

we wszystkich stanie na tym samym poziomie (1) (fig. 64, str. 93). Wynika to wprost z nauki o bocznem ciśnieniu: każda bowiem

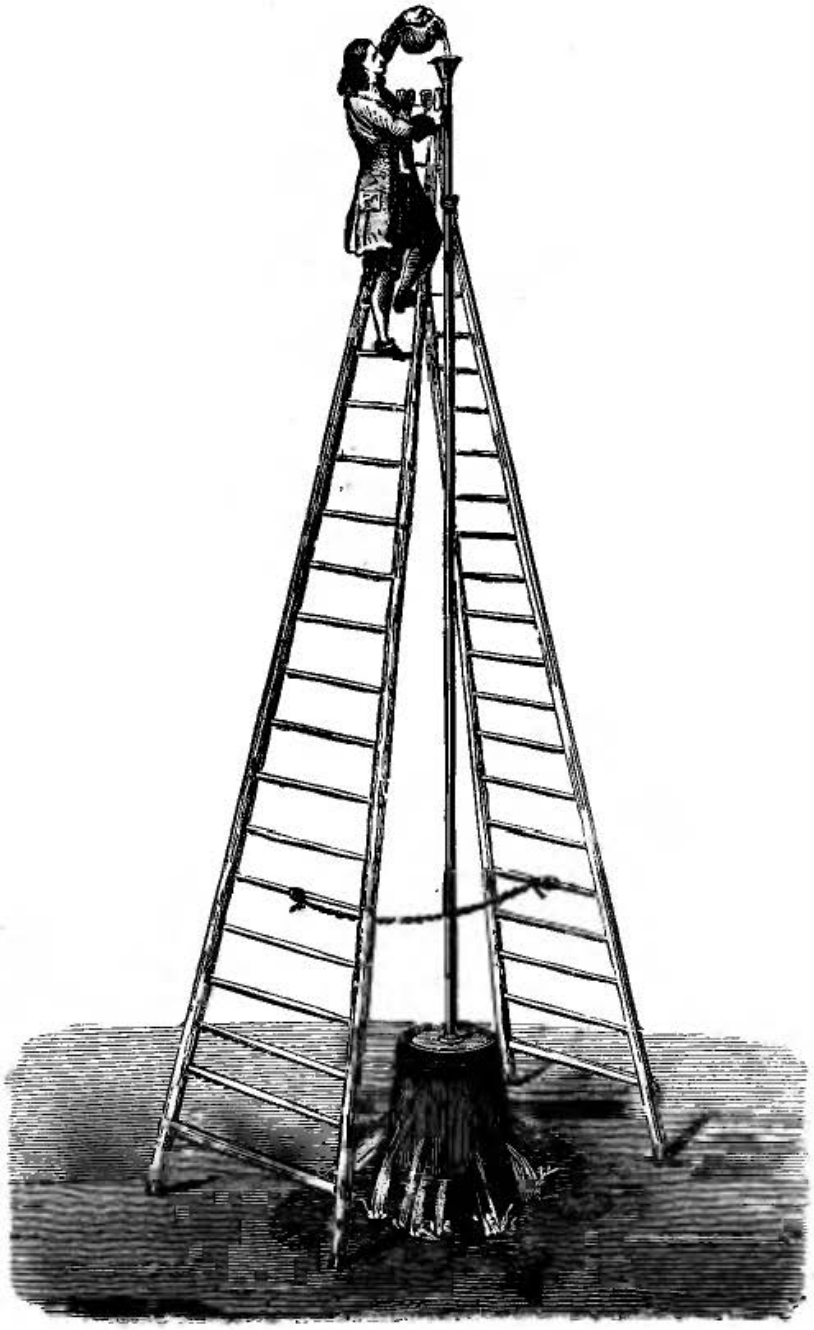


Fig. 63. Paradoks hydrostatyczny; doświadczenie Pascala.

warstewka wody, zajmująca poprzeczny przekrój dolnej, łączącej naczynia rury, tylko wtedy jest w równowadze, gdy z dwóch

(1) Pod warunkiem, że niema pomiędzy niemi naczynia bardzo wązkiego, wtedy bowiem rzecz się zmienia, jak to zobaczymy w nauce o włoskowatości.

stron przeciwległych cisną na nią słupy cieczy jednakowej wysokości.

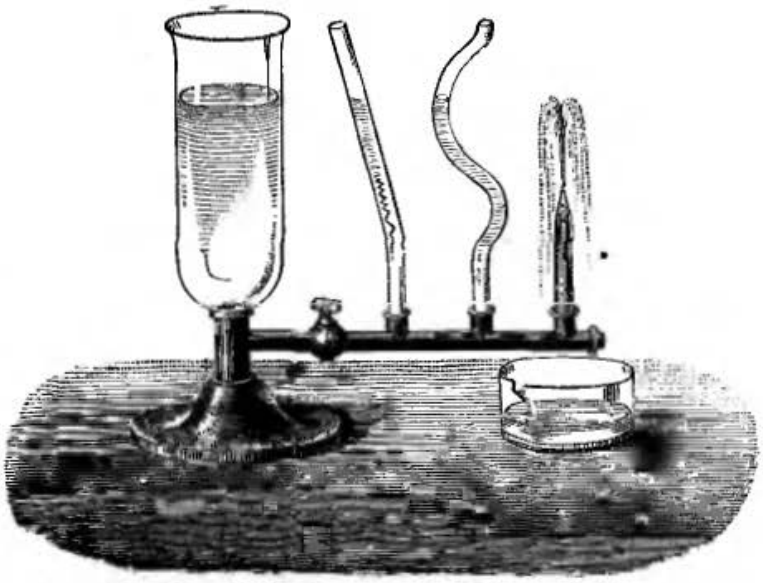


Fig. 64. Jednakowy poziom tej samej cieczy w naczyniach połączonych.

Jeżeli natomiast w połączonych naczyniach znajdują się dwie ciecze o rozmaitym ciężarze właściwym, to wysokości ich będą

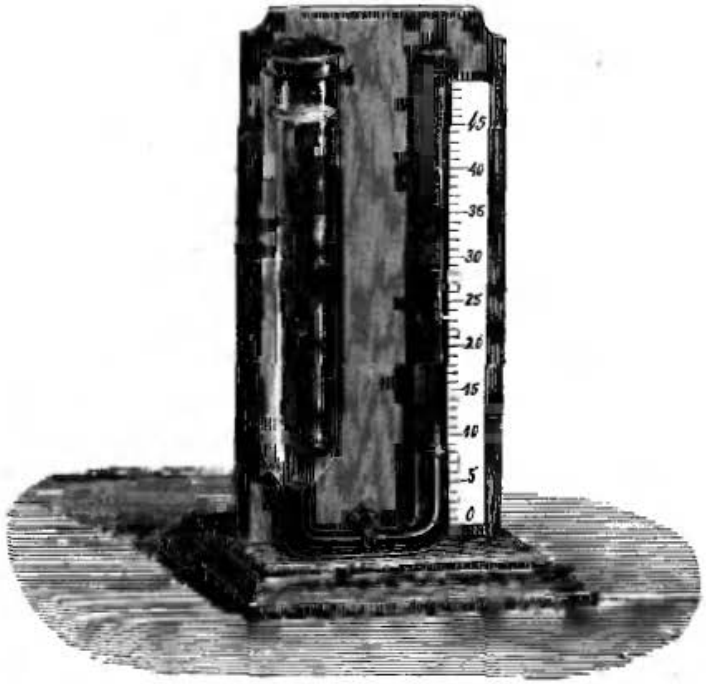


Fig. 65. Dwie różne ciecze w naczyniach połączonych.

różne. Nalejmy trochę rtęci do dwukolanowego naczynia (fig. 65), ciecz ta będzie dochodziła w obu kolanach do jednakowej wyso-

kości; jeżeli dolejemy następnie do lewej rury wody, rtęć, pod wpływem jej ciśnienia podniesie się w prawej rurze na wysokość, tyle razy mniejszą od wysokości wody, ile razy ta ostatnia jest lżejszą od rtęci, tylko w takim bowiem razie ciśnienie na każdą poprzeczną warstwę cieczy w dolnej wspólnej rurze będzie z obu stron jednakowe. Jeżeli naprzykład rtęć w prawem kolanie stoi o 3 milim. wyżej niż w lewem, to wysokość wody, 13,5 razy lżejszej od rtęci, będzie tyleż razy większą, a więc wynosić będzie 40,5 milimetr. Wszystkie te zjawiska uogólnione są w następującem prawie: *W naczyniach połączonych jedna i ta sama ciecz sięga w każdem z nich do równej wysokości, wysokości zaś różnych cieczy są odwrotnie proporcyonalne do ich ciężarów właściwych.*

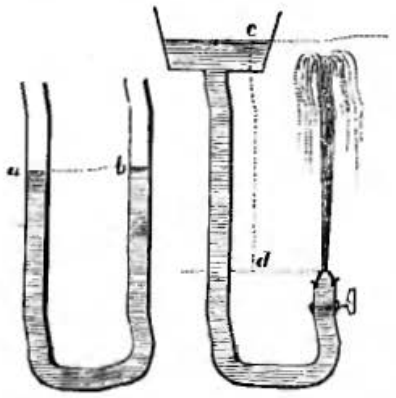


Fig. 66. Szemat wodotrysku.

Prawo naczyń połączonych, zwłaszcza zaś pierwsza jego część, znajduje bardzo liczne zastosowania. Gdy naprzykład w jakimś wysoko położonym punkcie znajduje się zbiornik wody, wtedy łatwo ją sprowadzić do każdego miejsca, leżącego nie wyżej od zbiornika; w tym celu należy tylko ten ostatni połączyć za pomoca rury z danem miejscem. Morza, źródła i rzeki przedstawiają naturalne systemy naczyń połączonych, w których woda bezustannie „dąży do poziomu". Na tej samej zasadzie polegają także pewnego rodzaju wodotryski i tak zwane studnie artezyjskie. Rozważmy z początku sposób działania pierwszych:

Jeżeli w kolano rurkowatego naczynia, mającego kształt litery U, nalejemy wody, podniesie się ona i w drugiem do tej samej wysokości, co w pierwszem (fig. 66). Weźmy teraz inne podobne naczynie, którego atoli jedno kolano jest znacznie krótszem i w górnej swej części zamkniętem przez kran; woda ciśnie na ten ostatni z dołu do góry z siłą, równą ciężarowi nadmiarowego słupa cieczy *c d*, a po odkręceniu krana swobodnie wytryskiwać będzie w górę. Podniosłaby się ona przytem dokładnie do wysokości poziomu wody (*c*) w drugiej rurze, gdyby nie przeszkody,

jakie napotyka w tarciu o ścianki otworu, przez który wytryskuje, dalej w oporze powietrza i w kroplach opadających, które przeszkadzają innym wznosić się do góry. Tę ostatnią zawadę możnaby usunąć, nadając krótszej rurze, zamiast pionowego, kierunek nieco pochyły Wymienione przeszkody sprawiają, że strumień wytryskującej wody jest o wiele niższym od poziomu cieczy w *c*, będzie on jednak zawsze sięgał do jednakowej wysokości, dopóki poziom wody w zbiorniku się nie obniży. Chcąc więc, ażeby wodotrysk przez dłuższy czas bił z jednakową mocą, należy go zasilać wodą z bardzo obszernego zbiornika, co najlepiej

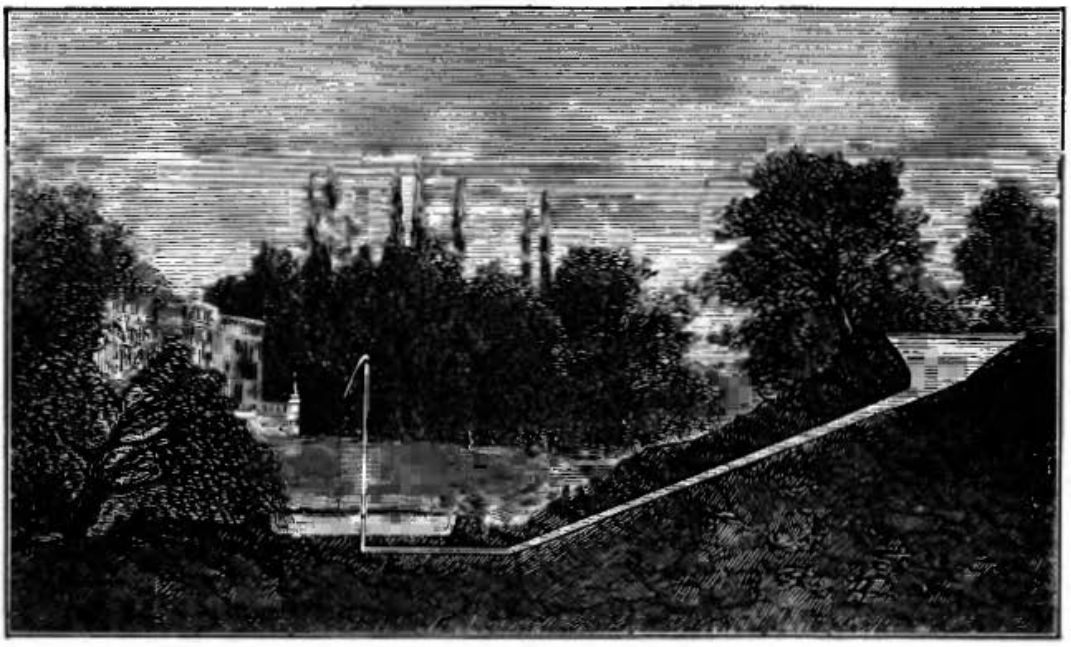


Fig. 67. Wodotrysk.

zostaje uskutecznione przez stały dopływ wody z jakiegoś wysoko położonego miejsca (fig. 67). Jeden z największych wodotrysków tego rodzaju znajduje się w parku, leżącym na wzgórzu Wilhelma (Wilhelmshöhe) przy Kassel: strumień jego ma około $^1/_2$ metra w średnicy i może sięgać do wysokości przeszło 60 metrów.

Przejdźmy teraz do studzien artezyjskich, nazwanych tak od starej prowincyi francuzkiej Artois, gdzie znajdują się w znacznej ilości i gdzie można napotkać takie, które, jak się zdaje, sięgają końca XII wieku. W epoce o wiele odleglejszej umiano już urządzać studnie tego rodzaju w Chinach i w Egipcie. Są to

pionowe wązkie przekopy w ziemi, dochodzące niekiedy do bardzo znacznej głębokości i łączące powierzchnię z jakąś podziemną warstwą, bogatą w wodę. Dla zrozumienia ich działania wypada nadmienić, że z warstw składających skorupę ziemską, jedne, jak naprzykład piaski, są przesiąkliwe dla wody, inne zaś, jak gliny, jej nie przepuszczają. Zauważywszy to, przypuśćmy, że w pewnej głębokości pod kotliną *H* (fig. 68) znajdują się dwie warstwy *A B* i *C D* nieprzesiąkliwe, oddzielone od siebie przesiąkliwą warstwą *K K*, rozpościerającą się na znacznej przestrzeni i dochodzącą aż do wysoko położonego miejsca na powierzchni ziemi między *A* i *C*. Woda deszczowa, przesiąkając do wnętrza, spływa po naturalnej pochyłości gruntu, zbiera się w warstwie *K K*

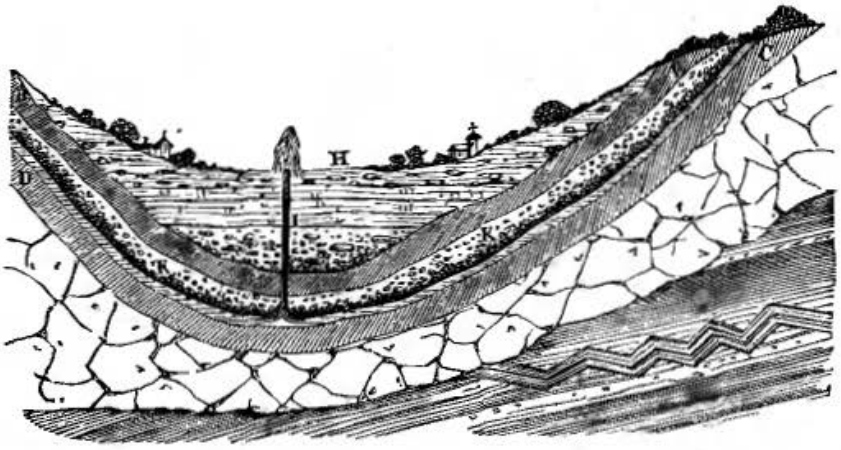


Fig. 68. Studnia artezyjska.

na całej jej długości i nagromadza pod kotliną; nie może ona atoli przedostać się do jej powierzchni dlatego, że przedziela ją od niej nieprzesiąkliwa warstwa *A B*. Jeżeli zaś w *H* wywiercimy pionowy otwór *I*, przecinający tę warstwę i sięgający aż do *K K*, otrzymamy system naczyń połączonych i woda, podnosząc się, będzie wytryskiwała przez otwór do wysokości tem większej, im wyżej położoną jest miejscowość między *A* i *C*.

Woda, zasilająca studnię artezyjską, dopływa niekiedy z odległości 20 do 30 mil i zbiera się w głębokości kilkudziesięciu lub kilkuset metrów pod powierzchnią ziemi, zależnie od mniejszej lub większej pochyłości warstwy przesiąkliwej. Studnia artezyjska w Passy jest głęboką na 587,5 metr., a wytryskująca

z niej woda, jako pochodząca z tak znacznej głębi, posiada względnie wysoką temperaturę 28° C.

Na zasadzie naczyń połączonych polega także często używany, acz nie bardzo dokładny przyrząd niwelacyjny, zwany *równowagą wodną*, pozwalający oznaczać wyniesienie danego punktu pewnej miejscowości nad innym. Składa się on z długiej rurki, blaszanej lub mosiężnej, na końcach której osadzone są pod kątem prostym dwie rurki szklane *D* i *E* (fig. 69). Przy posługiwaniu się tym przyrządem, ustawia się go tak, jak pokazuje figura i nalewa doń zabarwionej wody, dopóki ta nie wypełni rzeczonych rurek mniej więcej do $^3/_4$ ich wysokości. Gdy po kilku wahaniach równowaga się ustali, powierzchnie cieczy w obu rur-

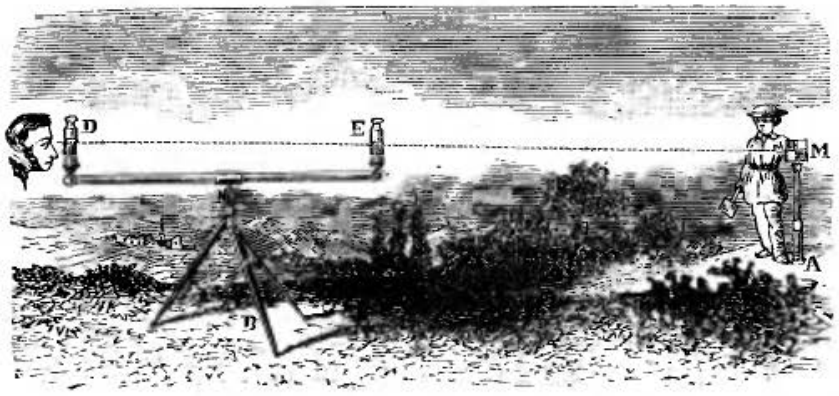


Fig. 69. Równowaga wodna.

kach będą leżały dokładnie w jednej i tej samej poziomej płaszczyznie. Przypuśćmy, że trzeba znaleźć, o ile punkt *A* leży wyżej albo niżej od innego jakiegoś punktu. W tym celu naprzeciw równowagi wodnej ustawia się w *A* pionowo pręt z naciętą na nim skalą; wzdłuż pręta daje się przesuwać deszczułka *M*, ułożona z 4 kwadratów, naprzemian białych i czarnych. Obserwator, patrząc na pręt wzdłuż linii poziomej *D E*, stycznej do powierzchni cieczy w obu rurkach, daje znak swemu pomocnikowi, aby przesuwał w górę lub na dół deszczułkę, dopóki środek jej, w którym schodzą się wszystkie 4 kwadraty, nie znajdzie się dokładnie na przedłużeniu linii *D E*. Następnie, skierowawszy w odpowiedni sposób równowagę wodną, powtarza się to samo względem owego drugiego punktu. Odczytana na skali różnica w po-

łożeniu deszczułki na pręcie, ustawianym kolejno w obu punktach, pokazuje wyniesienie jednego z nich nad drugim.

Na zakończenie niniejszego rozdziału, rozważmy jeszcze równowagę kilku cieczy, nie mięszających się z sobą. Nalejmy w słój rtęci, wody i oliwy; ciecze te ułożą się według swych gęstości: najcięższa z nich—rtęć zbierze się na spodzie, nad nią będzie się znajdowała woda, tę ostatnią zaś pokryje warstwa oliwy (fig. 70). Przytem graniczne powierzchnie tych cieczy będą poziomemi płaszczyznami—jak gdyby w słoju znajdowała się jedna tylko ciecz—jeżeli pominiemy tu wpływ ścian naczynia, o czem później będzie mowa. Gdy mamy dwie ciecze różnej gęstości, mięszające się z sobą, jak np. roztwór soli i czystą wodę, to i wtedy, lejąc ostrożnie tę ostatnią na pierwszą, możemy otrzymać dwie wyraźne warstwy, które w tym atoli wypadku przy wstrząśnieniu mniej lub więcej szybko mięszają się z sobą, tworząc jednę ciecz. Zjawisko podobne na wielką skalę obserwował Vogt w jednym z fiordów norweżskich, gdzie na wodzie morskiej,—z powodu zawartości soli cięższej, aniżeli woda rzeczna — spoczywała warstwa słodkiej (t. j. rzecznej) wody na 1,3 metr. gruba. Podobnie i na dnie Tamizy, w dosyć znacznej odległości od ujścia, znaleziono warstwę słonej wody, ustawicznie wznawianej przez przypływ morza. Rozumie się, że zjawiska tego rodzaju mogą zachodzić tylko w razie, gdy wody są bardzo spokojne, najlżejsze zaś wzburzenie morza szybko powoduje zmięszanie się wody słodkiej ze słoną.

Fig. 70. Równowaga kilku cieczy różnej gęstości, nie mięszających się z sobą.

To, cośmy wyżej powiedzieli o równowadze cieczy, nie mięszających się z sobą, stosuje się także do wypadku, gdy mamy ciecz i gaz: ten ostatni, jako lżejszy, zajmuje najwyższą część zawierającego je naczynia. Na tej zasadzie polega tak zwana *libella*, służąca do poziomego ustawiania różnych części wielu przyrzą-

dów fizycznych. Składa się ona z lekko wypuklonej ku górze i zakrzywionej nieco na obu końcach szklanej rurki $A\,B$ (fig. 71), prawie całkowicie wypełnionej wodą, albo lepiej alkoholem lub eterem tak, że pozostaje w niej tylko mały pęcherzyk powietrza, dążący do zajęcia najwyższego miejsca. Po wypełnieniu rurki cieczą i zalutowaniu obu końców, zamyka się ją w miedzianym futerale $C\,D$, otwartym u góry (jak to pokazuje fig. 72) i przymocowanym do starannie polerowanej płyty metalowej. Z całej rurki szklanej środek jej jest najbardziej oddalony od płyty metalowej tak, że gdy pomieścimy libellę na płaszczyznie poziomej P, pęcherzyk powietrza M zatrzyma się dokładnie pomiędzy dwoma punktami, jednakowo odległemi od środka skali, naciętej na rurze. Przy słabem nachyleniu badanej płaszczyzny, pęcherzyk M nie będzie się znajdował

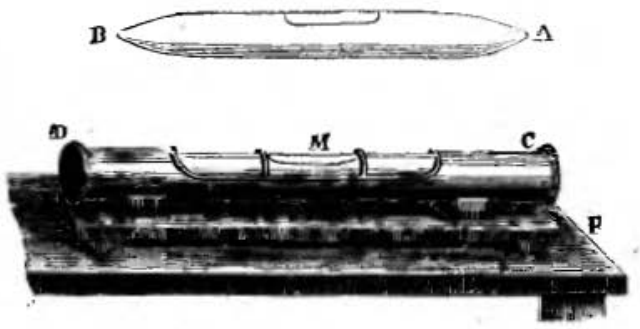


Fig. 71 i 72. Libella.

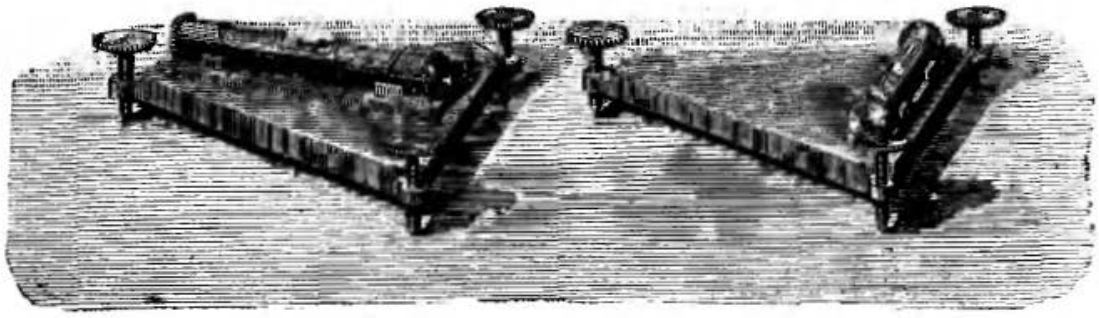


Fig. 73. Poziome ustawianie płaszczyzny za pomocą libelli.

dokładnie w środku rurki, lecz będzie sięgał z jednej strony do dalszej podziałki, niż z z drugiej; przy większem zaś nachyleniu płaszczyzny zajmie on jeden z końców rurki i skryje się pod futerałem.

Przypuśćmy, iż chcemy nadać jakiejś starannie wygładzonej płycie trójkątnej położenie dokładnie poziome; w tym celu przedewszystkiem zaopatrujemy ją w szrubki—dopasowane do

otworów, znajdujących się na jej rogach—które, za wkręcaniem lub wykręcaniem, zlekka podnoszą lub obniżają odpowiedni róg płyty. Libellę ustawiamy z początku wzdłuż którejkolwiek krawędzi i obracamy jednę ze szrubek, znajdujących się na jej końcach, dopóki pęcherzyk powietrza nie zajmie środkowego położenia w rurce; nastąpi to, według powyższego, wtedy, gdy dana krawędź przyjmie położenie poziome (fig. 73). Następnie libellę umieszczamy w kierunku wysokości trójkąta, prostopadłej do rzeczonej krawędzi i regulujemy położenie płyty za pomocą trzeciej szrubki, dopóki pęcherzyk powietrza znowu nie zajmie środka libelli.

ROZDZIAŁ VI.

Równowaga ciał, zanurzonych w cieczy.

§ 1. Parcie cieczy z dołu do góry. Prawo Archimedesa. Pływanie.

Wiemy wszyscy, że chcąc utrzymać pod wodą jakieś lżejsze od niej ciało, naprzykład korek lub kawałek drzewa, należy wywierać na nie pewne ciśnienie; gdy zaś ciała takie, po zanurzeniu, puszczamy, podnoszą się one w kierunku pionowym do góry i wypływają na powierzchnię cieczy, tak że część ich wystaje po nad jej poziom. Ale i ciała cięższe od wody, jak kamień lub metal, można łatwiej podnosić w górę, gdy znajdują się jeszcze w wodzie, niż wtedy, gdy się już z niej wynurzyły. A zatem każde ciało, zanurzone w wodzie, staje się lżejszem, traci coś ze swego ciężaru i jest podtrzymywane przez jakąś siłę, pomagającą nam dźwigać je do góry. Znane te powszechnie zjawiska znajdują wyjaśnienie w omówionem już w poprzednim rozdziale ciśnieniu cieczy z dołu do góry, którego istnienie wykazaliśmy za pomocą doświadczenia, przedstawionego na fig. 61, str. 90. Tamże powiedzieliśmy, że każdy przedmiot, na tyle cienki, że grubość jego możemy pominąć, będąc zanurzony w cieczy, doznaje w niej *jednakowego* ciśnienia z dołu do góry i w kierunku przeciwnym. Inaczej się dzieje, gdy zanurzone ciało—niechaj to będzie walec

metalowy—posiada pewną grubość, albo lepiej wysokość: rzeczone ciśnienia nie są wtedy równe. Ciśnienie bowiem, wywierane na walec przez ciecz z dołu do góry, równa się ciężarowi słupa cieczy, którego podstawą jest dolna powierzchnia walca, wysokością zaś—odległość jej od poziomu cieczy; natomiast ciśnienie z góry na dół równa się ciężarowi słupa cieczy, mającego tę samą podstawę, lecz niższego, niż tamten o wysokość walca. Mamy więc tu nadmiar pierwszego ciśnienia nad drugiem, równy

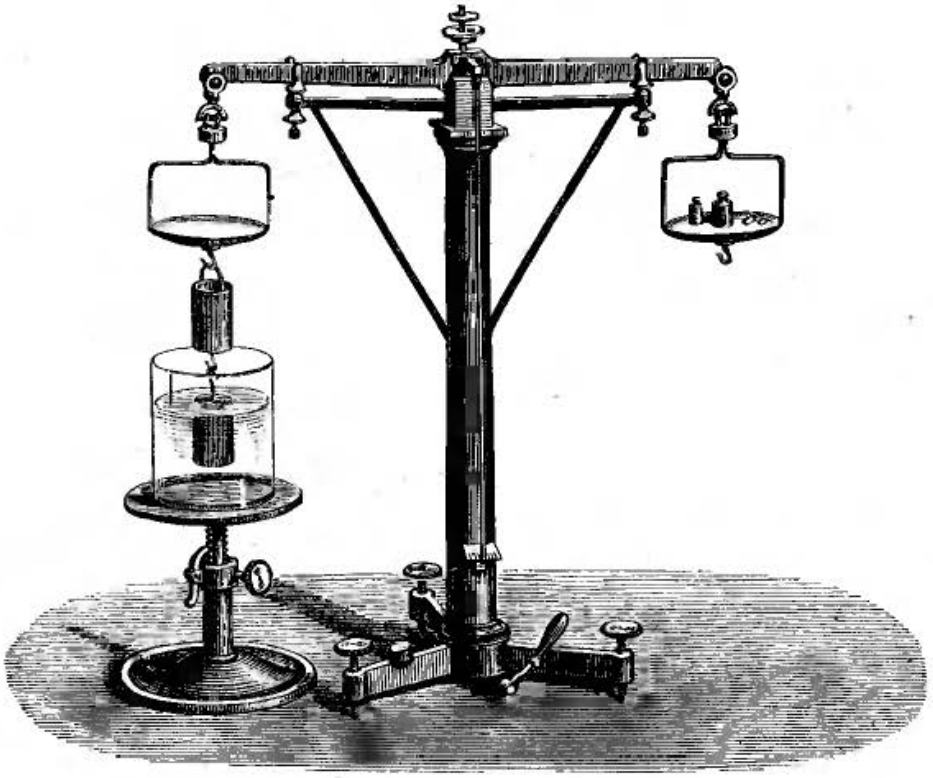


Fig. 74. Doświadczalny dowód prawa Archimedesa.

ciężarowi słupa cieczy, wypchniętego przez walec; ten nadmiar ciśnienia z dołu, a więc w kierunku przeciwnym kierunkowi działania ciężkości, podtrzymuje walec i czyni go o tyle lżejszym, ile waży równa objętość cieczy. Rozumowanie to stosuje się do wszelkich ciał, zanurzonych w jakiejkolwiek cieczy. W ten sposób dochodzimy do następującego prawa, odkrytego około 200 r. przed Nar. Chr. przez jednego z najznakomitszych matematyków i fizyków wszystkich czasów—Archimedesa:

Każde ciało, zanurzone w cieczy, traci pozornie tyle ze swego ciężaru, ile waży wypchnięta przez nie ciecz, albo innemi słowy— ile waży taka sama objętość cieczy.

Prawo to możemy sprawdzić za pomocą następującego doświadczenia. Weźmy dwa jednakowo wielkie walce metalowe: jeden pełny, drugi zaś pusty, mający więc postać wiaderka, tak, że pierwszy szczelnie go wypełnia i mieści się w nim jakby w futerale. Oba walce za pomocą przytwierdzonych do nich haczyków zawieszamy na jednej szalce wagi tak, ażeby pełny znajdował się pod wydrążonym (fig. 74, str. 101), na drugą zaś, dla zrównoważenia, kładziemy ciężarki, lub sypiemy śrót. Podstawmy teraz pod pełny walec szklankę z wodą, w którejby on zupełnie się zanurzył, wtedy równowaga zostaje naruszoną i szalka z ciężarkami się obniża. Dla przywrócenia równowagi należy na szalce z walcami położyć pewien ciężarek; zamiast tego, nalejmy w pusty walec wody, a zobaczymy, że w miarę zbierania się jej, drąg wagi wraca do położenia poziomego i gdy woda całkowicie wypełni wydrążony walec, wiszący pod nim zanurzy się i równowaga znowu się ustali. Pełny więc walec, przez zanurzenie w wodzie, traci pozornie tyle na ciężarze, ile waży woda, wypełniająca pusty walec, albo innemi słowy—tyle, ile waży wypchnięta przezeń ciecz. W ten sposób dowiedliśmy powyższego prawa.

Na pytanie—co się dzieje z pozorną stratą na ciężarze, jaką ponosi zanurzone w cieczy ciało—daje nam odpowiedź następujące doświadczenie: Postawmy na jednej szalce wagi szklankę z wodą i zrównoważmy ją przez nasypanie śrótu lub położenie ciężarków na drugą szalkę. Jeżeli następnie zanurzymy w wodzie pełny walec, przyczepiony do wiaderka takiej samej zawartości i zawieszonego z kolei na stojącym obok statywie (fig. 75, str. 103), równowaga się naruszy: szalka ze szklanką zacznie się obniżać, druga zaś podnosić; woda więc jakby zyskała coś na ciężarze wskutek zanurzenia w niej walca. Chcąc wiedzieć ile zyskała, ujmijmy ze szklanki część wody i lejmy ją do wiaderka; zobaczymy, że gdy to ostatnie całkowicie będzie napełnione wodą, równowaga znowu zostanie przywróconą. Jeżeli przeto, jakeśmy to wyżej pokazali, ciało zanurzone w cieczy pozornie

traci tyle na swym ciężarze, ile waży wypchnięta przez nie ciecz, to z drugiej strony o tyleż pozornie zwiększa się ciężar cieczy. Wszystko więc jedno, czy naprzykład położymy na szalce wagi kawałek żelaza obok szklanki z wodą, czy też umieścimy go w niej: w każdym wypadku, dla zrównoważenia, będziemy musieli jednakowo obciążyć drugą szalkę.

Prawo Archimedesa należy do najważniejszych praw przyrody, nietylko bowiem nogólnia ono bardzo liczne zjawiska, występujące przy zanurzaniu ciał w jakiejkolwiek cieczy, a nawet w jakimkolwiek płynie (stosuje się ono także, jak później zobaczymy, do gazów), lecz nadto dozwala rozwiązywać wiele pytań praktycznych. Rozważmy w tym celu kilka przykładów: Miedź jest 9 razy cięższą od wody; bryłka więc z tego metalu, ważąca dajmy na to 27 gramów, będąc zanurzona w wodzie, staje się pozornie lżejszą o 3 gr., innemi słowy traci $^1/_9$ swego ciężaru. Siarka, która jest tylko 2 razy lżejszą od wody, w tych samych warunkach traci $^1/_2$ swego ciężaru i t. d. Jednem słowem dane ciało, będąc zanurzone w wodzie, tem więcej traci na ciężarze, im jest od niej lżejszem. Znając przeto ciężar właściwy danego ciała, możemy z góry obliczyć, jaką część swej wagi straci ono w wodzie. Praktyczne zadanie podobnego rodzaju było właśnie powodem odkrycia powyżej wyłuszczonego prawa.

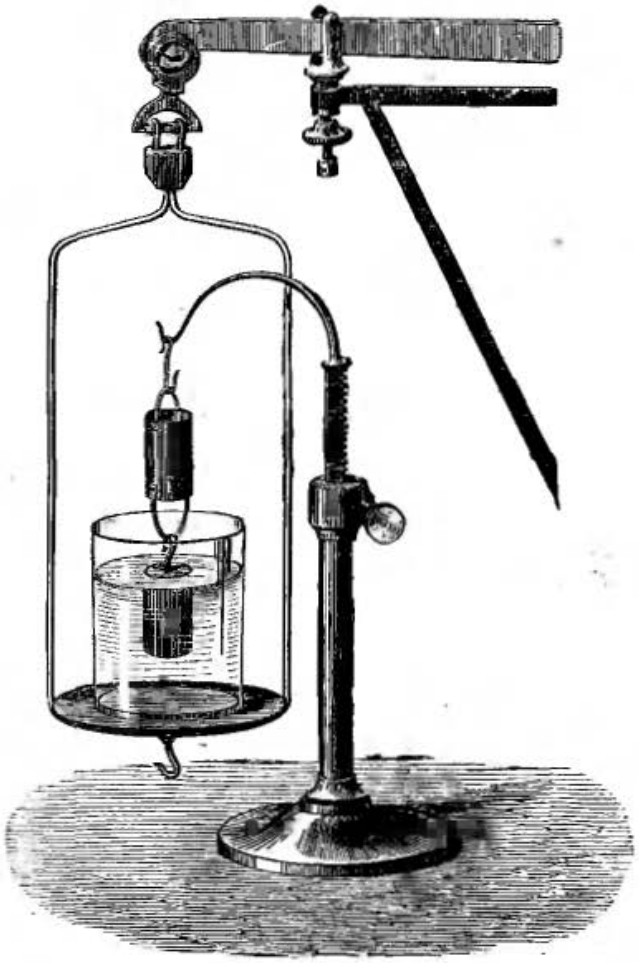


Fig 75. Pozorne zwiększanie się ciężaru cieczy wskutek zanurzenia w niej jakiegoś ciała.

Opowiadają mianowicie, że władca greckiej osady w Syrakuzach zamówił u złotnika koronę, na którą dał mu 20 funtów złota; złotnik po pewnym czasie doręczył też koronę ważącą dokładnie 20 f. Tymczasem rozeszła się wśród ludu pogłoska, że złotnik ukrył pewną część danego mu złota, zastąpiwszy ją jednakową ilością o wiele tańszego srebra. Gdy doszło to do wiadomości rzeczonego władcy, polecił on Archimedesowi rozstrzygnąć tę kwestyę, pod warunkiem jednak, aby korony nie uszkodził. Archimedes przez długi czas napróżno usiłował wywiązać się z tego zadania, aż pewnego razu, siedząc w wannie, zauważył, że ciało jego jest jakby unoszone przez wodę, staje się jakby lżejszem. To proste spostrzeżenie—które nie zwróciłoby uwagi ludzi, mniej zastanawiających się,—było dlań wystarczającem, aby wskazać mu drogę, na jakiej mógłby rozstrzygnąć wzmiankowane zadanie. Wielce uradowany tem odkryciem, wybiegł nago z kąpieli z głośnym okrzykiem: *eureka! eureka!* (co znaczy po grecku—znalazłem). Następnie drogą rozumowania i stosownych doświadczeń ustalił on prawo, noszące jego imię i dozwalające już rozstrzygnąć w mowie będące pytanie: Ponieważ złoto jest 20, srebro zaś tylko 10 (1) razy cięższe od wody, dwudziestofuntowa więc korona, gdyby była zrobiona z czystego złota, ważyłaby w wodzie tylko 19 funtów, gdyby zaś była tylko ze srebra, traciłaby w wodzie 2 f. Otóż strata na ciężarze owej korony okazała się nieco mniejszą niż $1\frac{1}{4}$ f., z czego łatwo już było obliczyć, że zawiera ona prawie 5 funtów srebra.

Zanurzmy jedno i to samo ciało, kolejno w różnych cieczach, jakoto: w wodzie, w kwasie siarczanym i w bromie, wtedy w każdej z nich wypycha ono jednakową objętość cieczy, a więc strata jego na ciężarze będzie tem większą, im więcej waży objętość danej cieczy. Niechaj ciałem zanurzonem będzie naprzykład walec z platyny—metalu, 22 razy cięższego od wody; kwas siarczany jest prawie 2, brom zaś—3 razy cięższy od tejże cieczy. Strata rzeczonego walca w wodzie wynosi oczywiście $\frac{1}{22}$ jego ciężaru,

(1) Bierzemy tu, dla uproszczenia rachunku, okrągłe liczby; w rzeczywistości zaś c. wł. złota równa się 19,26, a srebra—10,47.

w kwasie siarczanym—prawie $^2/_{22}$ czyli prawie $^1/_{11}$, w bromie zaś—$^3/_{22}$. Łącząc ostatnie rezultaty z temi, jakie otrzymaliśmy wyżej przy rozważaniu straty na ciężarze kilku różnych ciał, zanurzonych w tej samej cieczy, możemy wypowiedzieć następujące prawo, które stanowi prosty wynik z zasady Archimedesa: *Pozorna strata na ciężarze jednego i tego samego ciała, zanurzonego w różnych cieczach, jest wprost proporcyonalna do ich ciężarów właściwych; pozorna zaś strata na ciężarze różnych ciał o jednakowej objętości, pogrążonych w jednę i tę samą ciecz, jest odwrotnie proporcyonalna do ciężarów właściwych tych ciał.*

Zasada Archimedesa tłómaczy nam także zjawiska pływania. Wiemy już, że na każde ciało, zanurzone w cieczy, działa z dołu do góry ciśnienie, przewyższające ciśnienie w kierunku przeciwnym o wielkość, równą ciężarowi wypchniętej cieczy, z góry zaś na dół—własny jego ciężar. Otóż zależnie od stosunku dwu tych wręcz przeciwnych działań, ciało tonie, albo unosi się swobodnie we wnętrzu cieczy, albo też pływa po niej. Pierwszy wypadek ma miejsce, gdy dane ciało jest cięższem od cieczy; tak naprzykład bryłka miedziana, ważąca 9 gr., doznaje w cieczy, według poprzedniego (str. 103) ciśnienia z dołu do góry, równającego się ciężarowi 1 gr., a więc zawsze jeszcze ściąganą jest ku dołowi przez siłę, równą ciężarowi 8 gr. i dlatego spada na dno, czyli tonie. Drugi wypadek zachodzi, gdy dwa rzeczone działania są sobie równe, innemi słowy—gdy pogrążone ciało waży dokładnie tyle, ile taka sama objętość cieczy. Łącząc naprzykład w jednę całość kawałek drzewa (lżejszego od wody) z pewną ilością ciężkiego metalu, jak ołów, miedź i t. d., możemy otrzymać bryłkę, ważącą dokładnie tyle, co i równa jej objętość wody. Bryłka taka, będąc zanurzona w wodzie, swobodnie unosi się w jej wnętrzu, to jest nie spada na dół, ani też nie wznosi się do góry, lecz pozostaje w tem miejscu, w którem ją puszczamy. Nareszcie gdy ciśnienie z dołu do góry przewyższa ciężar zanurzonego ciała, albo, innemi słowy, gdy to ostatnie jest lżejsze od cieczy, ciało podnosi się i wypływa na powierzchnię. Korek jest przeszło 4 razy lżejszy od wody; jeżeli przeto zanurzymy w tej cieczy kawałek korka, ważący 1 gr., straci on w niej pozornie

przeszło 4 gr. (tyle bowiem waży równa mu objętość wody), a więc pchany będzie do góry siłą, równą ciężarowi 3 gr. i wypłynie na powierzchnię. Korek, lód, niektóre gatunki drzewa pływają po wodzie, żelazo, miedź i wiele innych metali—po rtęci; w ogóle *po danej cieczy pływają takie ciała, które są od niej lżejsze.*

Możemy atoli zdziałać, ażeby ciało z materyału, cięższego od danej cieczy, także po niej pływało; w tym celu należy tylko stosownie je wydrążyć i nadać mu dostatecznie wielką objętość: Wiemy już, że miedź jest 9 razy cięższą od wody—1 centymetr sześcienny miedzi waży 9 gr., wody zaś 1 gr.—w zwykłych przeto warunkach tonie w niej. Jeżeli jednak z kawałka blachy miedzianej, ważącego naprzykład 9 gr., sporządzimy pustą skrzynkę o objętości większej niż 9 cent. sześc., mającą dajmy na to 18 cent. sześc. i zanurzymy ją w wodzie, skrzynka wypchnie także 18 cent. sześc. cieczy, ważących 18 gr., a więc pchana będzie do góry siłą, równą ciężarowi 9 gr. i wypłynie na powierzchnię.

Ciało ludzkie jest przeciętnie o $^1/_{10}$ cięższem od równej objętości wody, tak że człowiek, ważący naprzykład 60 kilogramów, traci w wodzie tylko około $54^1/_2$ kilogr., a więc pchany jest na dół przez siłę, równą ciężarowi $5^1/_2$ kil. i poszedłby na dno, gdyby za pomocą stosownych ruchów nie umiał tego nadmiarowego, stosunkowo niewielkiego, ciężaru ($5^1/_2$ kil.) utrzymać na powierzchni. Widzimy z tego, że pływanie człowieka nie jest naturalnem, lecz sztucznem; tylko bardzo otyłe osoby pływają naturalnie, jak naprzykład pewien neapolitańczyk, który ważył 150 kilogr. i o 15 kilogr. mniej, niż równa objętość wody.

Budowa zwierząt czyni je już bardziej zdolnemi do pływania; są one przytem po największej części lżejsze od wody. Ciekawą ilustracyę tego, cośmy wyżej powiedzieli o wpływie objętości na pływanie, stanowią ryby. Posiadają one mianowicie w jamie ciała pęcherz, zwany pławnym; pęcherz ten zawiera gazy, i, wskutek odpowiednich ruchów ryby, może rozszerzać się lub kurczyć, przez co objętość jego staje się większą lub mniejszą; organ ten służy rybom do wypływania na wierzch lub zagłębiania się w wodzie. Pierwsze ma miejsce wtedy, gdy ryba

rozszerzając pęcherz, powiększa objętość swego ciała, a przez to także objętość wypchniętej wody, wskutek czego zwiększa się parcie z dołu do góry; drugie zaś następuje w wypadku przeciwnym, t. j. przy kurczeniu pęcherza.

Bardzo ciekawe doświadczenie, dotyczące wpływu objętości na pływanie, podaje Delaunay w swojej „Mechanice". Grono winne, wrzucone do kielicha z musującem winem szampańskiem, natychmiast wskutek swego ciężaru spada na dno. Wkrótce jednak na powierzchni grona zbierają się drobne pęcherzyki kwasu węglanego, wydzielającego się z wina, które nie zmieniając prawie wcale ciężaru grona, dosyć znacznie powiększają jego objętość; przez to zwiększa się objętość wypchniętej cieczy, a więc także parcie z dołu do góry i grono, podnosząc się, wypływa na powierzchnię. Jeżeli w tej chwili nadamy mu lekkie uderzenie, pęcherzyki gazu oddzielą się od niego i grono, stawszy się mniejsze, spadnie na dno; tam znowu pokryje się pęcherzykami gazu, wskutek tego wypłynie na powierzchnię i t. d. Doświadczenie to można powtarzać dopóty, dopóki z wina wydziela się jeszcze kwas węglany.

Zasada Archimedesa tłómaczy nam także fakt, że różne ciała, pływające po cieczy, pogrążają się w nią do różnej głębokości. Ciało lekkie podnosi się mianowicie w cieczy tak długo, dopóki siły, działające na nie z dołu do góry i w kierunku przeciwnym nie stają się równe, co następuje wtedy, *gdy ciecz, wypchnięta przez zanurzoną część ciała, waży tyle, co całe ciało.* Tak naprzykład walec korkowy 4 razy lżejszy od wody, pogrąży się w tę ciecz do $^1/_4$ swej wysokości, omówiona wyżej skrzynka miedziana, ważąca 2 razy mniej, niż równa jej objętość wody, zanurzy się w niej do połowy i t. d. Łatwo także zrozumieć, że ciało pogrąża się w daną ciecz tem głębiej, im jest ona lżejszą i naodwrót; tak naprzykład rzeczona skrzynka zanurzy się w cieczy, dwa razy cięższej od wody, tylko do $^1/_4$ swej wysokości, walec korkowy w cieczy dwa razy lżejszej od wody—do połowy, jeden i ten sam statek—w wodzie rzecznej głębiej, niż w morskiej i t. d.

Rozważmy teraz warunki równowagi ciała, całkowicie albo częściowo zanurzonego w cieczy. Jeżeli w wodzie swobodnie

unosi się ciało, ważące dokładnie tyle, co i wypchnięta przez nie ciecz, w którem jednak masa niejednostajnie jest rozmieszczoną— niechaj to będzie naprzykład walec korkowy z przymocowanym doń guzikiem ołowianym (fig. 76)—wtedy jego środek ciężkości g nie zlewa się ze środkiem ciężkości wypchniętej cieczy P. Dla równowagi koniecznem jest, ażeby dwa te punkty leżały na tej samej linii pionowej; jeżeli przytem środek ciężkości zanurzonego ciała leży niżej od środka ciężkości wypchniętej cieczy(fig. 76, 1) — to równowaga jest stałą, w przeciwnym razie—niestałą (fig. 76, 2). W tym ostatnim bowiem wypadku ciało, wyprowadzone ze swego położenia, będzie się coraz bardziej odeń oddalało i spocznie dopiero, gdy przyjmie położenie 1. Ciało takie (w położeniu 1) zachowuje się poniekąd jak wahadło, którego punkt zawieszenia znajdowałby się w P.

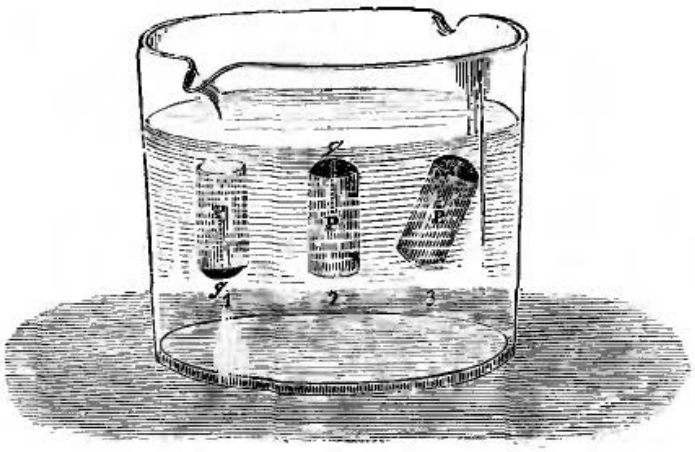


Fig. 76. Równowaga ciała, zanurzonego w cieczy tej samej co i ciało gęstości.

Gdy ciało waży mniej, niż równa objętość wody, czy to dlatego, że jest ono mniej od niej gęstem, czy też dlatego że jest wydrążone, wtedy, jak wiemy już, pływa ono po niej i pogrąża się tak długo, dopóki ciężar wody, wypchniętej przez zanurzoną jego część, nie staje się równym ciężarowi całego ciała Okręt naprzykład wraz z całym ładunkiem ważą tyle, ile objętość wody morskiej, równa objętości części okrętu, pogrążonej w wodę. I w tym razie, jeżeli równowaga ma być stałą (a jestto naturalnie koniecznem), powinien być spełniony wyżej omówiony warunek, t. j. wspólny środek ciężkości okrętu i ładunku powinien leżeć niżej od środka ciężkości wypchniętej wody. Dlatego też najcięższe towary kładzie się zwykle na sam spód okrętu, a w braku dostatecznie wielkiego ładunku, zabiera się z sobą balast, w celu obni-

żenia środka ciężkości. Lecz przy najspokojniejszem nawet morzu, statki nigdy nie znajdują się w stanie bezwzględnej równowagi, gdyż wciąż ulegają mniej lub więcej znacznym wahaniom. Należy przeto, uwzględniając ten fakt, nadać statkowi taki kształt i tak w nim rozmieścić ładunek, ażeby nawet w najgorszym wypadku parcie z dołu do góry i własny ciężar statku przyprowadzały go napowrót do stanu równowagi.

§ 2. Oznaczanie ciężaru właściwego ciał stałych i ciekłych.

Opierając się na prawie Archimedesa, możemy rozwiązać ważne praktyczne zadanie, mianowicie znaleźć ciężar właściwy różnych ciał stałych i ciekłych, a to za pomocą jednej z metod, które poniżej opiszemy.

Przedtem jednak jeszcze raz nadmienimy, że pod ciężarem właściwym danego ciała rozumieć należy stosunek bezwzględnego jego ciężaru do ciężaru równej mu objętości dystylowanej wody, mającej 4^0 Celsyusza. Trzymając się nadto francuzkiego systemu miar i wag, w którym ciężar masy dystylowanej wody rzeczonej temperatury, zawartej w jednostce objętości, stanowi jednostkę wagi—możemy także powiedzieć, że ciężar właśc. danego ciała jestto bezwzględny ciężar jednostki jego objętości. Tak naprzykład 1 cent. sześc. granitu waży 2,75 gram., a że 1 cent. sześc. wody, przy rzeczonych warunkach, waży 1 gr., przeto ciężar właściwy granitu równa się 2,75.

Jak już nadmieniliśmy na końcu IV rozdziału, *gęstością* danego ciała nazywamy stosunek jego masy do masy równej mu objętości wody; ponieważ zaś ciężary dwóch mas, oznaczone w jednem i tem samem miejscu na ziemi, są w takim samym stosunku jak te masy, liczba więc, wyrażająca ciężar wł. danego ciała, pokazuje zarazem jego gęstość.

Dla oznaczenia ciężaru wł. ciała, należy znać dwie rzeczy: bezwzględny jego ciężar i ciężar równej mu objętości wody; zamiast tego ostatniego zaś możemy także, według prawa Archimedesa, wziąć stratę na ciężarze, jaką ponosi dane ciało, gdy jest

zupełnie zanurzone w wodzie. Liczba, wyrażająca ciężar bezwzględny ciała, podzielona przez liczbę, pokazującą tę stratę, daje nam jego ciężar właściwy. Gdy chodzi o ciała stałe, postępujemy przytem według jednej z następujących metod:

Najprostszy sposób, prowadzący do celu, polega na bezpośredniem ważeniu za pomocą wagi, której jedna krótka szalka zaopatrzona jest w haczyk, służący do zawieszania na nim badanych ciał. Weźmy naprzykład kawałek żelaza i uwiązawszy go na bardzo delikatnej nitce, zawieśmy ją na haczyku jednej szalki, na drugą zaś, dla zrównoważenia, kładźmy ciężarki. Niechaj te ważą 246,5 gr., takim więc będzie bezwzględny ciężar danego kawałka żelaza. Podstawmy teraz pod nim naczynie z wodą tak, ażeby zupełnie się w niej zanurzył, wtedy krótka szalka podniesie się, druga zaś obniży; dla przywrócenia równowagi, na krótką szalkę trzeba będzie położyć ciężarki, ważące tyle, ile wynosi strata danego kawałka żelaza w wodzie; niechaj waga ich równa się 31,65 gram. Dzieląc 246,5 przez 31,65, otrzymamy 7,788 jako ciężar właściwy, a także jako gęstość żelaza; metal ten jest 7,788 razy cięższym i zawiera tyleż razy więcej masy, niż równa objętość wody.

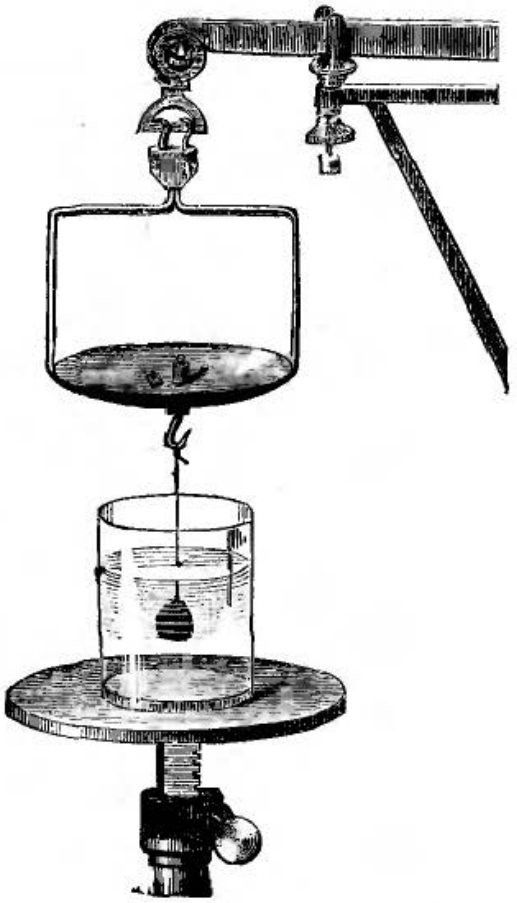


Fig. 77. Oznaczanie cięż. wł. ciał stałych. Metoda ważenia.

Przy drugiej metodzie posługujemy się aerometrem, którego urządzenie przypisują Nicholsonowi, jakkolwiek jeszcze dawniej

wynaleziony on został przez Charlesa. Przyrząd ten składa się z wydrążonego, zamkniętego z obu stron walca z mosiądzu, który wydłuża się ku górze w cienki pręcik, zakończony talerzykiem, od dołu zaś zakończony jest ciężkim metalowym koszykiem stożkowatego kształtu; środek ciężkości całego przyrządu leży bardzo nizko, tak że po wodzie pływa on w równowadze stałej. Ciężar

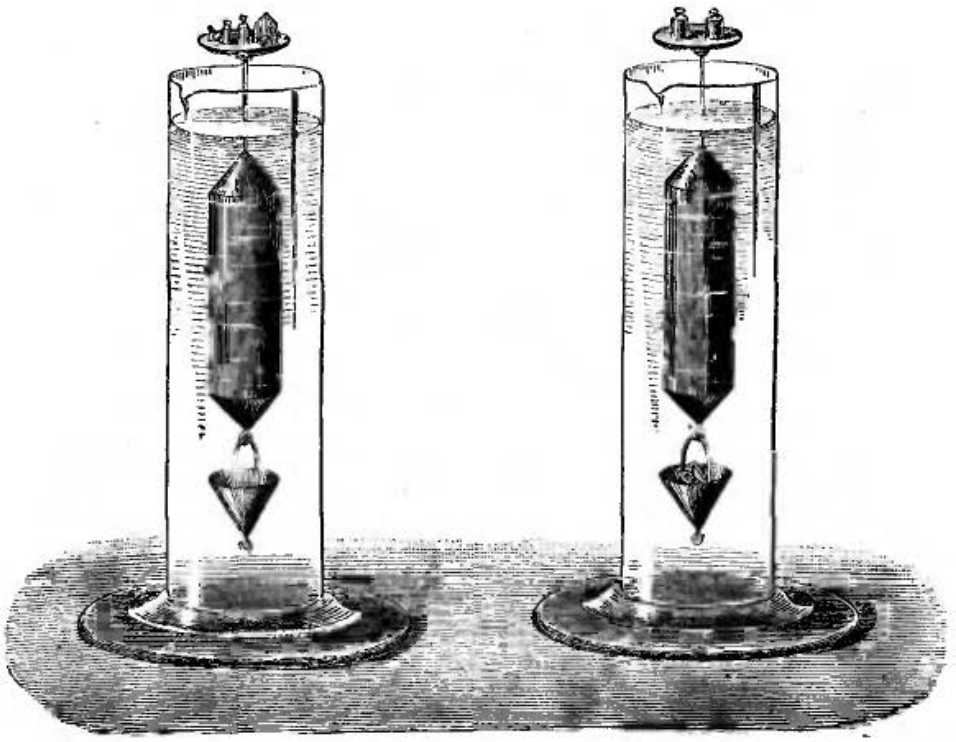


Fig. 78. Aerometr Charlesa albo Nicholsona.

aerometru jest tak dobrany, że będąc obciążony pewną ilością gwichtów,—dajmy na to 100 gr., leżących na talerzyku—zanurza się do pewnej kreski, naciętej na pręciku. Przypuśćmy, że chodzi tu o oznaczenie ciężaru właściwego siarki. W tym celu pomieszczamy kawałek tego ciała, ważący mniej niż 100 gr. na talerzyku i dokładamy tyle ciężarków, aby przyrząd zanurzył się do rzeczonej kreski (fig. 78); jeżeli trzeba dołożyć naprzykład 35,8 gr., to siarka waży tyle, ile brak do 100 gr., a więc w danym razie—64,2 gr. (Widzimy, że aerometr ten może służyć jako waga). Następnie zdejmujemy siarkę z talerzyka i kładziemy ją w koszyk, wtedy aerometr podnosi się nieco dlatego, że siarka traci część swej wagi; chcąc go zanurzyć znowu do tej

samej kreski, należy na talerzyku położyć pewną ilość ciężarków. Przypuśćmy, iż w tym celu trzeba było dodać 31 gr.—będzie to ciężar wody, wypchniętej przez siarkę, a więc ciężar wł. tej ostatniej równa się $\frac{64,2}{31}$ czyli 2,07.

Opisany przyrząd może także służyć do oznaczania ciężaru wł. ciała, lżejszego od wody; w tym celu należy tylko koszyk, znajdujący się na dolnym końcu aerometru, odwrócić wierzchołkiem do góry i rzeczone ciało, po zdjęciu go z talerzyka, wprowadzić w wydrążenie koszyka. W przeciwnym bowiem razie, t. j. gdyby koszyk był od góry otwarty, ciało, jako lżejsze od wody, wypłynęłoby na jej powierzchnię.

Fig 79. Flaszka z odszlifowanym korkiem, służąca do oznaczania ciężaru właściwego.

Przy trzeciej metodzie posługujemy się flaszką z dokładnie odszlifowanym korkiem szklanym, wchodzącym zawsze do tej samej głębokości w otwór flaszki, tak że wewnętrzna jej objętość jest stałą (jeżeli pominiemy tu wpływ temperatury). Flaszkę tę napełnia się wodą, stawia na jednej szalce wagi i pomieszcza obok niej ciało, którego ciężar wł. chcemy oznaczyć (fig. 79), na drugą zaś szalkę kładzie się ciężarki, aż do nastąpienia równowagi; następnie zdjąwszy flaszkę, rzuca się w nią ciało. Wtedy po nałożeniu korka, wypłynie z niej część wody, równa objętości zanurzonego ciała; usunąwszy wypłyniętą wodę i starannie otarłszy flaszkę, stawia się ją napowrót na szalce, na którą kładzie się ciężarki aż do przywrócenia równowagi. Ciężarki te pokazują nam wagę objętości wody, równej objętości badanego ciała; znając więc jego ciężar bezwzględny, mamy wszystko, co potrzebne do oznaczenia jego ciężaru wł. Dokładniejszym od opisanej flaszki jest t. zw. pyknometr—(od greckiego wyrazu: pyknos—gęsty) szklana kolbka z odszlifowanym korkiem szklanym, do którego przylutowany jest termometr, pogrążający się, przy nakładaniu korka, w ciecz, zawartą w kolbce. Używa się go zupełnie w ten sam sposób, jak wyżej.

Gdy dane ciało nasiąka wodą lub się w niej rozpuszcza, jak cukier, sól i t. d., wtedy za pomocą jednej z trzech opisanych metod oznaczamy jego ciężar wł. względem innej jakiejś cieczy, w której się nie rozpuszcza, naprzykład alkoholu lub oliwy i której ciężar wł. jest znany. Iloczyn obu liczb (wyrażających ciężar wł. danego ciała względem danej cieczy i ciężar wł. tej ostatniej względem wody), daje nam ciężar wł. badanego ciała.

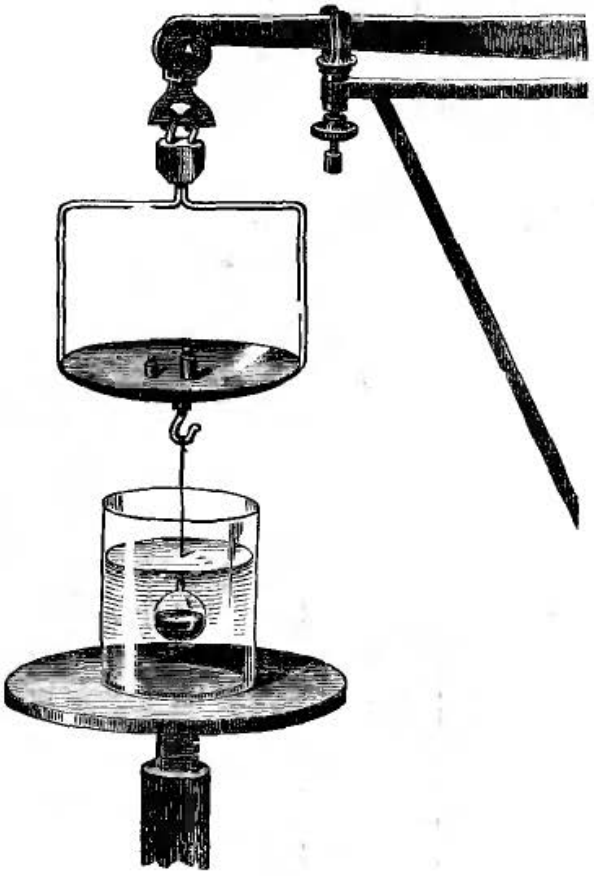


Fig. 80. Ciężar wł. cieczy, oznaczany za pomocą metody ważenia.

Jeżeli oznaczenie ciężaru wł. ma być bardzo dokładnem, jak to wymaganem jest dla celów naukowych, wtedy należy uwzględnić czystość wody, jej temperaturę, pęcherzyki powietrza, osiadające na zanurzonem w cieczy ciele, ciężar nici, na której je zawieszamy i tym podobne okoliczności.

Rozważmy teraz metody, służące do oznaczania ciężaru wł. ciał ciekłych.

Najprostszy sposób polega na oznaczeniu strat na ciężarze tego samego ciała stałego w danej cieczy i w wodzie, strat, przedstawiających, jak wiemy, ciężary równych objętości tych cieczy. Niechaj naprzykład kula szklana, częściowo napełniona rtęcią (fig. 80) traci w kwasie siarczanym $^9/_{10}$ grama, w wodzie zaś—$^1/_2$ grama, wtedy ciężar wł. kwasu siarczanego równa się oczywiście $^9/_{10} : {}^1/_2$, t. j. 1,8. Albo też waży się małą flaszeczkę z odszlifo-

Fig. 81. Ciężar wł. cieczy. Flaszeczka z odszlifowanym korkiem.

wanym korkiem (fig. 81, str. 113), z początku pustą, następnie napełnioną wodą, w końcu zaś napełnioną badaną cieczą. Do tego celu jeszcze lepiej się nadają omówione już wyżej pyknometry. Nareszcie ciężar właściwy cieczy można znaleźć za pomocą aerometru Fahrenheita, który różni się od poprzednio opisanego tem, że jest cały ze szkła i że, zamiast koszyka, posiada na dole stale przylutowaną kulkę szklaną, napełnioną rtęcią, tak że środek ciężkości aerometru, zanurzonego w wodzie, leży niżej od środka ciężkości wypchniętej przezeń cieczy. Oznaczywszy ciężar przyrządu, zanurza się go w wodzie i kładzie na talerzyk tyle gwichtów, ażeby pogrążył się w nią do pewnej stałej kreski (fig. 82): suma ciężarów aerometru i gwichtów daje nam wagę wypchniętej wody. Następnie powtarza się to samo względem badanej cieczy: suma ciężarów aerometru i gwichtów, jakie należy położyć na talerzyku, ażeby znowu zanurzył się do tej samej kreski, daje nam wagę objętości tej cieczy, równej objętości poprzednio wypchniętej wody. Liczba, wyrażająca tę drugą sumę, podzielona przez liczbę, pokazującą pierwszą sumę, daje ciężar wł. badanej cieczy.

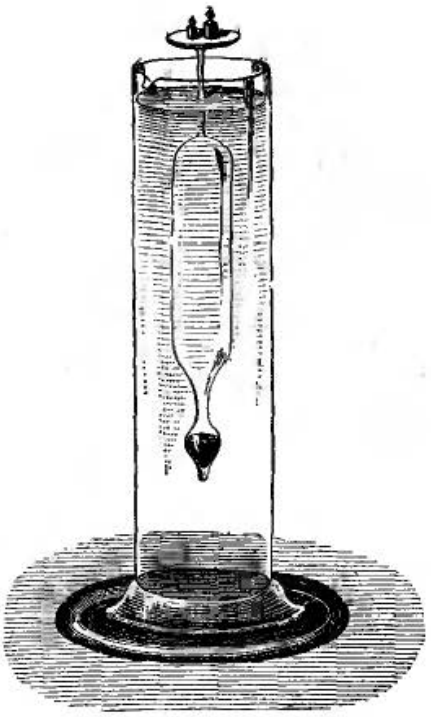


Fig. 82. Ciężar wł. cieczy. Aerometr Fahrenheita.

Aerometry Nicholsona i Fahrenheita, będąc stosownie obciążone, zanurzają się w różnych cieczach do tej samej wysokości, innemi słowy wypychają stałą objętość tychże, dlatego też nazywają się aerometrami *o stałej objętości*. Oprócz nich istnieją jeszcze inne, posiadające stały ciężar, lecz zanurzające się w różnych cieczach do rozmaitej wysokości — czyli do różnej podziałki naciętej na nich skali — są to tak zwane aerometry *o stałym ciężarze*, albo inaczej aerometry *podziałkowe*. Składają się one ze szklanego naczynia, przedłużającego się ku górze

w bardzo wązką, lecz możliwie walcowatą rurkę i wydętego od dołu w kulkę, którą wypełnia się taką ilością rtęci, ażeby aerometr w najlżejszej nawet badanej cieczy nie zupełnie się zanurzał, oraz ażeby, wskutek swego nizko położonego środka ciężkości, utrzymywał się w niej w położeniu pionowem. Aerometry podziałkowe polegają na tej zasadzie, że jedno i to samo ciało zanurza się w danej cieczy tem głębiej, im jest ona lżejszą, z czego wynika, że objętości różnych cieczy, wypchnięte przez ten sam aerometr, są w stosunku odwrotnym do ich ciężarów właściwych. Skale takich aerometrów są różne, zależnie od celu, do jakiego służyć mają; zawsze jednak za punkt wyjścia obiera się punkt, do którego przyrząd zanurza się w dystylowanej wodzie, mającej 4° C.

Rozważmy teraz sposób użycia kilku ważniejszych aerometrów tego rodzaju. Volumetr (objętościomierz) Gay-Lussac'a jestto szklany przyrząd, urządzony w sposób wyżej podany, który pokazuje, jaka objętość badanej cieczy waży tyle, ile cały przyrząd. Niechaj ten ostatni waży 200 gr.; wtedy wiemy, że, pływając po jakiejkolwiek cieczy, wypycha z niej 200 gr.; a że 1 gr. dystylowanej wody, mającej 4° C., zajmuje objętość 1 centymetra sześc.,—przeto objętość aerometru, aż do punktu do którego zanurza się on w takiej wodzie, równa się 200 cent. sześc.; punkt ten oznaczamy liczbą 200. Znając objętość całego aerometru, możemy po obu stronach owego punktu naciąć na nim taką skalę, ażeby objętość między dwiema następującemi po sobie podziałkami dokładnie wynosiła 1 cent. sześc.; kreski, leżące wyżej rzeczonego punktu, oznacza się po kolei liczbami 201, 202 i t. d.; niższe zaś—liczbami 199, 198, 197 i t. d. Wprowadziwszy taki aerometr do danej cieczy i zaznaczywszy podziałkę, do której się zanurza, wiemy, jaka objętość cieczy waży 200 gr.; ta ostatnia liczba, podzielona przez liczbę, stojącą przy danej podziałce, daje nam ciężar 1 cent. sześc. cieczy, a więc jej ciężar wł. Jeżeli naprzykład volumetr zanurza się w roztworze jakiejś soli do 180 podziałki, to ciężar wł. tej cieczy równa się $^{200}/_{180}$ czyli 1,11; albo jeżeli w spirytusie zanurza się do 210 podziałki, to jego ciężar wł. równa się $^{200}/_{210}$ czyli 0,95 i t. d. Widzimy, że zamiast

odpowiednich objętości, można przy oddzielnych podziałkach, stawiać liczby, otrzymane z powyższego dzielenia, wskazujące bezpośrednio ciężar wł. danej cieczy.

W praktyce jednak zwykle nie chodzi o znalezienie ciężaru wł. danej cieczy, lecz o zawartość w niej soli, kwasu, alkoholu lub innych ciał, przyczem pożądaną jest możność bezpośredniego odczytywania rzeczonej zawartości; aerometry podobne zaopatrzone są przeto w różne skale, po największej części dowolne, lecz dogodne dla danego celu. Tak naprzykład w aerometrze Beaumé'go, służącym do oznaczania stopnia stężenia różnych kwasów, syropów, roztworów soli i t. d., w ogóle cieczy cięższych od wody,—punkt, do którego przyrząd zanurza się w czystej wodzie (fig. 83, A), oznaczony jest liczbą 0, punkt zaś, do którego pogrąża się w roztwór 15 części wagowych soli kuchennej w 85 cz. wody—liczbą 15. Odstęp pomiędzy temi punktami podzielony jest na 15 równych części i skala taka przeprowadzoną jest mniej więcej do 70 podziałki. Aerometr ten, którego punkt, oznaczony 0-em, leży prawie przy samym górnym końcu przyrządu, zanurza się w bezwodnym kwasie azotnym do 36, w jednowodnym kwasie siarczanym do 66 podziałki i t. d.

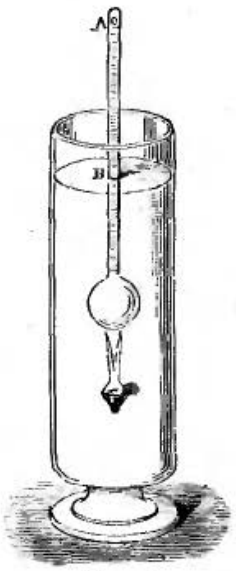


Fig. 83. Aerometr Beaumé'go.

Również dowolną jest skala, przyjęta przez Beaumé'go dla aerometrów, służących do badania cieczy, lżejszych od wody, naprzykład spirytusu. Zero tej skali stawia się w punkcie, do którego aerometr zanurza się w roztworze 10 części soli kuchennej w 90 częściach wody, liczbę zaś 10—w punkcie, do którego pogrąża się on w czystą wodę; odstęp pomiędzy temi punktami dzieli się na 10 równych części i skalę taką przeprowadza dalej aż do górnego końca przyrządu. Spirytus, mający dajmy na to 36° Beaumé'go, będzie to więc taka mięszanina alkoholu i wody, w której alkoholometr Beaumé'go zanurza się do 36 podziałki; co do właściwej zawartości alkoholu, przyrząd ten nie daje, jak widzimy, żadnej bezpośredniej wskazówki.

O wiele lepszym od ostatnio opisanego przyrządu jest alkoholometr Trallesa, którego zasadę podał był już dawniej Gay-Lussac i którego skala urządzona jest według wyników bardzo starannych badań nad ciężarem wł. różnych mięszanin alkoholu z wodą. Badania te doprowadziły, pomiędzy innemi, do ważnego i nader ciekawego rezultatu, że objętość mięszaniny alkoholu z wodą jest mniejsza, niż suma objętości składowych cieczy (1) i przez to jej ciężar wł. jest większym od tego, jaki wypada z obliczenia, uwzględniającego tylko objętości mięszanych z sobą cieczy. Alkoholometr Trallesa (fig. 84) bezpośrednio podaje procent na objętość alkoholu, zawartego w mięszaninie. Punkt, do którego zanurza się on w dystylowanej wodzie, oznaczony jest 0, zaś ten, do którego pogrąża się w absolutny (t. j. bezwodny) alkohol — liczbą 100. Jeżeli naprzykład alkoholometr ten zanurza się w danym spirytusie do 70 podziałki, to 100 jego cent. sześc. zawiera 70 cent. sześc. alkoholu. Inne alkoholometry, jak Richtera, bezpośrednio wskazują procent alkoholu na wagę.

Fig. 84. Alkoholometr Trallesa.

Ponieważ objętość oraz ciężar wł. cieczy zmienia się wraz z temperaturą, przeto każdy aerometr daje dokładne wskazówki tylko przy pewnej określonej temperaturze, normalnej dla danego przyrządu; dla alkoholometru Gay-Lussaca temperaturą tą jest 15° C., dla alkoholometru Trallesa 16° C. i t. d. Czyniąc zaś spostrzeżenia przy innej jakiejś temperaturze, należy do bezpośrednio odczytywanych wartości wprowadzić pewne poprawki według specyalnie do tego celu ułożonych tablic.

Podobnie urządzone są wszelkie inne aerometry, służące do badania różnych cieczy, jak syropów, piwa, wina, mleka i t. d., w szczegółowy opis których nie możemy się tu jednak wdawać.

---

(1) Patrz także str. 78.

ROZDZIAŁ VII.

Działania międzycząstkowe w cieczach.

§ 1. Napięcie powierzchniowe. Zjawiska włoskowatości.

Czytelnik przypomina sobie doświadczenia, opisane w początku V-go rozdziału (str. 75), dowodzące z jednej strony istnienia *spójności* pomiędzy cząstkami cieczy, z drugiej—*przylegania* ich do ciał stałych. Badając prawa równowagi cieczy, pominęliśmy chwilowo wpływ tych czynników, obecnie atoli należy, dla uzupełnienia nauki o cieczach, rozważyć pewne bardzo ciekawe zjawiska, będące rezultatem ich spójności i przylegania. Zobaczymy, że w pewnych warunkach czynniki te modyfikują nie-

Fig. 85. Napięcie powierzchniowe cieczy.

które z opisanych przez nas praw, dotyczących zachowania się cieczy. Zbadajmy najprzód te działania, jakim ciecze ulegają niezależnie od naczyń, w których są zamknięte. Spójność pomiędzy cząstkami cieczy warunkuje się ich wzajemną dążnością do zbliżania się, innemi słowy tem, że każda z nich przyciąga i jest przyciąganą przez sąsiednie cząstki, znajdujące się na niezmiernie małej od niej odległości. Wyobraźmy sobie, że wokoło cząstki m jakiejbądź cieczy (fig. 85) zakreśliliśmy kulę o promieniu, równym odległości, na jakiej cząstki mogą jeszcze przyciągać się wzajemnie; w takim razie, tylko te z nich, które leżą wewnątrz rzeczonej kuli, przyciągają cząstkę m oraz są przez nią przyciągane, kula ta przedstawia więc *sferę przyciągania* tejże cząstki. Masa cieczy, tworząca kulę, jest zupełnie jednostajnie w niej rozmieszczoną i przyciągania, wywierane na czą-

stkę m ze wszystkich stron, wzajemnie się równoważą tak, że cząstka ta zachowuje się, jak gdyby przyciągania, o których mówimy, wcale nie istniały. Inaczej się rzecz ma z cząstką m'', leżącą na samej powierzchni $M\ N$; widzimy, że tylko z jednej strony otaczają ją cząstki, leżące w sferze jej działania tak, że w tym wypadku przyciągania, wywierane na nią przez te cząstki, nie są zrównoważone przez przyciągania cząstek, leżących nad nią, tam bowiem niema już żadnej cieczy. Łatwo dowieść, że przyciąganie, wywierane na tę cząstkę przez całą masę cieczy, zawartej w dolnej, jedynie istniejącej tu, połowie jej sfery działania, wpływa tak samo, jak gdyby na cząstkę m'' działała tylko jedna siła, przyciągająca ją do wnętrza i prostopadła do powierzchni $M\ N$ cieczy. Siła ta więc działa podobnie jak ciężkość, wskutek czego ciśnienie cząstki m'' i wszystkich w ogóle cząstek, leżących na samej powierzchni cieczy, jest większem od tego, jakie wypadałoby z samego tylko ich ciężaru. Nareszcie rozważmy jakąbądź cząstkę, naprzykład m', leżącą pomiędzy warstwami $M\ N$ i $M'\ N'$, odległość pomiędzy któremi niechaj się równa promieniowi sfery przyciągania. Sfera ta dla cząstki m' niejednostajnie wypełniona jest cieczą, w dolnej bowiem jej połowie znajduje się warstwa, odcięta płaszczyzną st, której przyciągania nie równoważy przyciąganie takiejże warstwy od góry, niema tam bowiem już cieczy; dlatego też cząstka m' jest silniej przyciąganą ku dołowi, niż ku górze. Przyciąganie nadmiarowej tej dolnej warstwy działa na cząstkę m', jak jedna przyciągająca ją do wnętrza siła, również prostopadła do powierzchni cieczy, lecz mniejsza niż w poprzednim wypadku. To samo dotyczy wszystkich cząstek, leżących pomiędzy $M\ N$ i $M'\ N'$ tak, że tworzą one warstewkę, wywierającą ciśnienie z góry na dół, większe niż to, jakie wywypadałoby z samego tylko jej ciężaru. Wokoło kulistej naprzykład masy cieczy, cząstki te tworzą warstewkę, dającą się poniekąd porównać do rozciągniętego kauczuku, otaczającego ciecz ze wszech stron; warstewka ta działa jakby nieskończenie cienki i nieco rozciągnięty nabłonek, który dzięki swéj sprężystości, dąży do skurczenia się. Każda ciecz, zawarta w jakiembądź naczyniu, ulega wpływowi takiej warstewki, tworzącej się nietylko

na górnej powierzchni, ale także na powierzchniach, któremi ciecz graniczy ze ścianami i dnem naczynia. Ciśnienie tej warstewki rozchodzi się we wszystkich kierunkach, podług ogólnych praw, które wyżej poznaliśmy; nosi ono nazwę *napięcia powierzchniowego.*

Można łatwo dowieść, że wielkość tego napięcia zmienia się, zależnie od tego, czy powierzchnia cieczy jest płaską, czy krzywą. Niechaj naprzykład M (fig. 86) wyobraża cząstkę jakiejbądź cieczy, leżącą pod powierzchnią na odległości mniejszej, niż promień sfery przyciągania tejże cząstki, którą to sferę wyobraża cała kula o promieniu $M\ C$, przedstawiająca się na płaszczyznie papieru jako koło. Jeżeli ciecz kończy się płaską powierzchnią $A\ B$, to przyciąganie wywierane z dołu do góry na cząstkę M przez warstwę cieczy $P\ A\ B\ Q$ równoważy się z przyciąganiem warstwy $P\ Q\ B'\ A'$, działającem w kierunku wręcz przeciwnym. Ponieważ zaś, według założenia, nad powierzchnią $A\ B$ niema już cieczy, to przyciąganiu warstwy $A'\ B'\ C$ nic nie przeciwdziała od góry i cząstka M ulega napięciu powierzchniowemu. Przypuśćmy jednak, że ciecz nie jest ograniczona płaską powierzchnią, lecz wklęsłą $D\ H\ E$; wtedy przyciągania warstw cieczy $P\ Q\ E\ H\ D$ i $P\ Q\ E'\ H'\ D'$ wywierane na cząstkę M, znoszą się wzajemnie i pozostaje tylko niezrównoważony wpływ warstwy $D'\ C\ E'\ H'$, mniejszej niż w poprzednim wypadku, mniejszem więc także jest napięcie powierz-

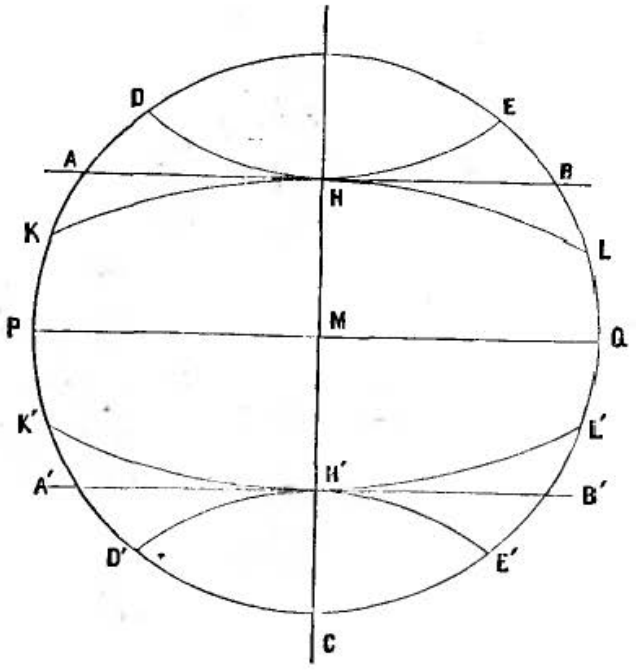


Fig. 86. Napięcie powierzchniowe cieczy na powierzchni płaskiej, wklęsłej i wypukłej.

chniowe cząstki *M*. Gdy nakoniec ciecz ograniczona jest powierzchnią wypukłą *K H L*, wtedy przyciągania warstw cieczy *P K H L Q* i *P Q L' H' K'* znoszą się i pozostaje niezrównoważone działanie warstwy *K' C L' H'*, większej niż w pierwszym z rozważanych tutaj wypadków, napięcie więc powierzchniowe cząstki *M* jest większem. Stosując podobne rozumowanie do wszystkich w ogóle cząstek, dla których sfery przyciągania nie całkowicie wypełnione są cieczą, dochodzimy do wniosku, że napięcie powierzchniowe zmienia się wraz ze zmianą kształtu powierzchni. Na powierzchniach wklęsłych jest ono mniejsze, na wypukłych— większe, niż na powierzchniach płaskich, przyczem różnice te są tem znaczniejsze, im większą jest krzywizna danych powierzchni, innemi słowy im są one bardziej wklęsłe lub wypukłe.

Napięcie powierzchniowe tłómaczy nam zjawisko dobrze znane, a mianowicie, że często cząstki gazu zawartego w cieczy zamiast wyjść na zewnątrz, zbierają się pod samą jej powierzchnią; gaz bowiem, pomimo dążności jego do rozprzestrzeniania się, zostaje zatrzymany przez warstewkę nabłonkową. Następujące doświadczenie, które każdy z łatwością może powtórzyć, dowodzi jeszcze lepiej istnienia takiej warstewki: nasypmy bardzo delikatnego piasku na powierzchnię rtęci i zagłębiajmy w nią powoli pałeczkę szklaną; zobaczymy, że ziarnka piasku poruszają się w kierunku zagłębienia, w miarę zaś wyjmowania pałeczki, napowrót wznoszą się do góry, dopóki znów nie znajdą się na powierzchni rtęci. Doświadczenie to—do którego można zamiast rtęci użyć jakiejbądź innej cieczy, byle tylko nie przylegała do danej pałeczki—dowodzi, że piasek istotnie leży tutaj jakby na nabłonku, który zagłębia się i podnosi wraz z pałeczką, nie ulegając przytem rozdarciu, lecz tylko rozciągając się i kurcząc naprzemian.

Widzieliśmy tedy, że wskutek spójności pomiędzy cząstkami cieczy, wpływ na nie siły ciężkości ulega pewnej modyfikacyi; obecnie zaś przekonamy się, że i zjawiska, występujące przy zetknięciu cieczy z ciałami stałemi, także nieco zmieniają rezultat działania tej siły. Przypomnijmy sobie, że przyleganie cieczy do ciała stałego może być większe lub mniejsze od spójności jej

cząstek i że w pierwszym razie ciało stałe zostaje zwilżone przez ciecz, w drugim zaś—nie; np. szkło i drzewo zostają zwilżone przez wodę, lecz nie przez rtęć; ta ostatnia natomiast zwilża miedź i złoto. Przy rozważaniu skutków jednoczesnego działania spójności cieczy i przylegania jej do ciała stałego, należy bardzo ściśle odróżniać dwa te wypadki, albowiem rezultaty, jak zaraz zobaczymy, w obu razach są zupełnie odmienne.

Wiemy już, że swobodna powierzchnia cieczy, znajdującej się w stanie spoczynku i podległej jedynie działaniu siły ciężkości, jest płaszczyzną poziomą. Lecz kształt taki ulega znacznym zmianom wtedy, gdy wchodzi w grę inny jeszcze czynnik, a mianowicie przyleganie cieczy do naczynia, w którem jest ona zamkniętą. Właściwie mówiąc, zdarza się bardzo rzadko, ażeby powierzchnia cieczy dokładnie zachowała swój kształt poziomy w blizkości ścianki naczynia; ma to mianowicie miejsce tylko wtedy, gdy przyleganie cieczy do ścianki jest zupełnie równe spójności jej cząstek, a więc gdy dwa te działania będąc równe i przeciwne, znoszą się wzajemnie. Rozważmy teraz drugi wypadek, gdy przyleganie cieczy do ścian jest większe, niż jej spójność. Cząstki cieczy, leżące bezpośrednio przy ścianie, podnoszą się wtedy wzdłuż niej; dalsze również się podnoszą, lecz na mniejszą wysokość i to tem mniejszą, im bardziej są od niej oddalone, albowiem przyciąganie owo słabnie w miarę odległości. Wreszcie dochodzimy do takich cząstek cieczy, leżących na powierzchni, na które przyciąganie ściany albo wcale już nie działa, albo działa tak słabo, że zachowują one położenie poziome; cząstek zaś takich będzie oczywiście tem więcej, im większą jest powierzchnia danej cieczy, czyli im bardziej ścianki są od siebie oddalone. W szerokiem tedy naczyniu, zawierającem ciecz, która zwilża jego ścianki, zmiana kształtu jej powierzchni mało jest widoczną; tylko wokoło ścianek jest ona nieco wzniesioną, jak naprzykład powierzchnia wody, zawartej w karafce. Przeciwnie w naczyniu o bardzo małej średnicy, naprzykład w rurce szklanej tak wązkiej, że można ją poniekąd porównać do włosa—ztąd nazwa rurek włoskowatych — kształt powierzchni zawartej w niej wody jest mocno zmieniony, widzimy bowiem (fig. 87),

że powierzchnia ta jest zupełnie wklęsłą; jestto tak zwany *menisk* wklęsły. *W podobny sposób zachowują się wszystkie ciecze, zawarte w rurkach włoskowatych i zwilżające ich ścianki.*

Trzeci nareszcie wypadek polega na tem, że spójność pomiędzy cząstkami cieczy jest większa, niż przyleganie ich do ścian naczynia; cząstki leżące najbliżej tych ostatnich, obniżają się, przez co ciecz dokoła ścianki wgłębia się. Wgłębienie to jest tem nieznaczniejsze, im dalej cząstki leżą od ściany; tutaj więc także znajdują się takie, które nie zmieniają swego położenia. Nalejmy naprzykład rtęci do szklanego naczynia, a zobaczymy, że wokoło jego ścianek obniża się ona i to tem bardziej, im mniejszą jest średnica naczynia, tak że w szklanej rurce włoskowatej, rtęć przedstawia powierzchnię zupełnie wypukłą, tworząc *menisk* wypukły (fig. 88). *Tak samo zachowują się wszystkie ciecze nie zwilżające ścianek naczynia.*

Fig. 87. Wklęsły menisk cieczy, zwilżającej ściany rurki

Te zmiany kształtu, jakim ulega powierzchnia cieczy wskutek zetknięcia ze ścianami naczyń, w połączeniu z napięciem nabłonkowem, w wysokim stopniu modyfikują warunki równowagi cieczy w naczyniach połączonych. Porównajmy naprzykład ciśnienia, wywierane przez ciecz na dwa jej elementy *b* i *c*, leżące w tej samej płaszczyznie poziomej *M' N'* (figury 89 i 90, str. 124), lecz znajdujące się, jeden—*b* pod powierzchnią krzywą, drugi zaś—*c* pod płaską. Ciśnienie na element *c*, leżący na zewnątrz rurki włoskowatej, równa się ciężarowi słupa cieczy, mającego za wysokość odległość (*c d*) tego elementu od poziomu cieczy, za podstawę zaś— powierzchnię tego elementu. W punktach *b*, leżących w tej samej płaszczyznie, lecz pod powierzchnią krzywą, ciśnienie słupa cieczy, mającego tę samą wysokość i podstawę, jest jednak mniejsze lub większe, niż w punktach *c*, zależnie od tego, czy słup ten kończy się powierzchnią

Fig. 88. Wypukły menisk cieczy, nie zwilżającej ścian rurki.

wklęsłą, czy też wypukłą. W pierwszym mianowicie razie (fig. 89) napięcie powierzchniowe cieczy w rurce włoskowatej, jest mniejsze, niż w naczyniu (patrz str. 120) i dlatego ciecz w rurce podnosi się tak długo, dopóki ciężar słupa cieczy, o wysokości równej różnicy *a b* i *c d*, niezrównoważy owej różnicy w natężeniu napięć powierzchniowych. W wypadku zaś, gdy powierzchnia cieczy w rurce włoskowatej jest wypukłą (fig. 90), a więc gdy jej napięcie powierzchniowe jest większe, niż na zewnątrz rurki, wtedy w tej ostatniej ciecz obniża się tak długo, dopóki ciężar słupa cieczy, o wysokości równej różnicy *c d* i *a b*, znowu nie zrównoważy różnicy w natężeniu napięć powierzchniowych. Figury 91 i 92 pokazują wpływ napięcia powierzchniowego na równowagę cieczy w rurkach włoskowatych. Widzimy tutaj dwa układy naczyń, utworzonych przez połączenie rurki o większej średnicy z rurką włoskowatą. W szerszych rurkach, gdzie powierzchnie cieczy są prawie poziome, wpływ ich krzywizny na wysokość cieczy jest bardzo nieznaczny; natomiast w rurkach włoskowatych, w których powierzchnie te są zupełnie krzywe, ciecz podnosi się (fig. 91) lub opuszcza (fig. 92, str. 125) i to tem bardziej, im większą jest wklęsłość lub wypukłość jej powierzchni.

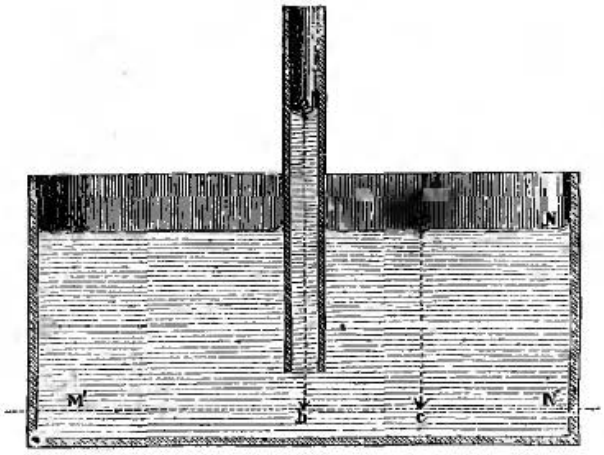


Fig. 89. Ciecze, ograniczone powierzchnią wklęsłą, podnoszą się w rurce włoskowatej wyżej, niż w otaczającem ją naczyniu.

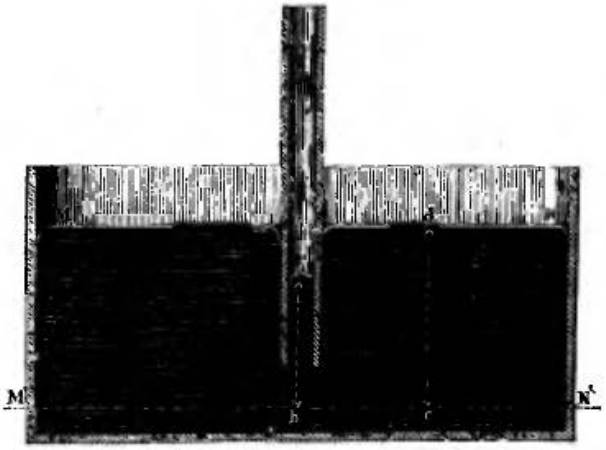


Fig. 90. Ciecze, ograniczone powierzchnią wypukłą, stoją w rurce włoskowatej niżej, niż w otaczającem ją naczyniu.

Podnoszenie lub obniżanie się cieczy w rurkach włoskowatych ulega następującemu prawu: *Dla jednej i tej samej cieczy i dla rurek z tego samego materyału, różnica w wysokości poziomów cieczy w rurce włoskowatej i na zewnątrz jest w stosunku odwrotnym do średnicy rurki* (dopóki wielkość tej średnicy nie przewyższa 2 milimetrów).

Zjawiska włoskowatości dają się także obserwować wtedy, gdy ciecz znajdnje się pomiędzy dwiema ściankami, bardzo zbliżonemi jedna do drugiej; jeżeli ciecz ta zwilża ścianki, podnosi się ona do pewnej wysokości w przestrzeni, oddzielającej je od siebie, w przeciwnym zaś razie ciecz spada tutaj poniżej poziomu zewnętrznego.

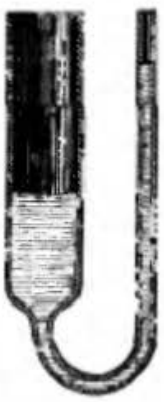


Fig. 91. Podnoszenie się wody w rurce włoskowatej (szklanej).

Fig. 92. Obniżanie się rtęci w rurce włoskowatej (szklanej).

Pomiędzy płaskiemi ściankami wysokość cieczy również jest w stosunku odwrotnym do odległości oddzielającej je od siebie w danym punkcie. Jeżeli więc ścianki te są równolegle, ciecz dochodzi pomiędzy niemi wszędzie do tej samej wysokości, lecz gdy tworzą z sobą niewielki kąt, ciecz podnosi się tem wyżej, im mniejszą jest odległość pomiędzy niemi (fig. 93).

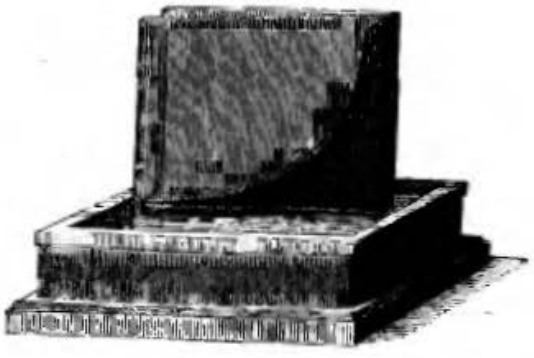


Fig. 93. Podnoszenie się wody pomiędzy dwiema szklanemi tafelkami, tworzącemi niewielki kąt.

Wyżej opisane prawa napięcia powierzchniowego tłómaczą także niektóre ciekawe zjawiska ruchu cieczy. Wprowadźmy kroplę cieczy do rurki stożkowatej. Jeżeli ciecz zwilża ścianki, kropla będzie się poruszała w stronę węższej części rurki, w przeciwnym razie ruch jej przyjmie kierunek odwrotny. W pierwszym bowiem wypadku powierzchnie kropli są wklęsłe, przyczem w szerszej części rurki wklęsłość jest mniejszą

(fig. 94), niż w węższej, a więc i ciśnienie powierzchniowe jest tam większe, niż po stronie przeciwnej i kropla porusza się w kierunku większego ciśnienia. Przeciwnie, gdy ciecz nie zwilża ścianek, powierzchnie jej są wypukłe; przyczem w szerszej części mniej niż w węższej (fig. 95), a więc i ciśnienie powierzchniowe jest tam mniejsze, niż po drugiej stronie i ciecz tak samo porusza się w kierunku ciśnienia większego (1).

Zjawiska włoskowatości są bardzo szeroko rozpowszechnione w przyrodzie, a uważny czytelnik znajdzie w codziennem życiu tysiączne ich przykłady. Wilgoć naprzykład w domach naszych powstaje w ten sposób, że woda podnosi się w wązkich szczelinach murów, belek, obić i t. d., podobnie jak w rurkach włoskowatych, a można temu zapobiedz, pokrywając przedmioty te substancyą, która czyni je niezwilżalnemi przez wodę. Wskutek

Fig. 94. Ruch wody w stożkowatej rurce szklanej.

Fig. 95. Ruch rtęci w stożkowatej rurce szklanej.

włoskowatości nafta lub olej podnoszą się wzdłuż włókienek knota od lampy, woda zaś wsiąka w drzewo, które wtedy znacznie powiększa swą objętość, tak, że będąc zmoczone wodą i wbite jako klin do skały lub kamienia, może służyć do ich rozłupania. Wełna, bawełna lub nici, z których zrobioną jest cała nasza odzież, składają się z włókienek, przedziały zaś pomiędzy niemi stanowią nadzwyczaj delikatne rurki. W rurki te wsiąkają wszelkie wyziewy naszej skóry, które wskutek włoskowatości przenoszą się aż na zewnętrzną powierzchnię odzieży, gdzie ulatniają się. W naszym organizmie znajduje się olbrzymia sieć krwionośnych naczyń włoskowatych, roznoszących krew do najdrobniejszych elementów ciała. Rośliny pobierają soki z ziemi za pomocą naczyń włoskowatych korzeni; soki te podnoszą się w naczyniach włoskowatych łodygi i dochodzą aż do liści i t. d.

---

(1) Patrz także str. 120.

§ 2. Doświadczenia Plateau. Zjawiska dyfuzyi i osmozy cieczy. Dializa.

Podobnie jak działanie cieczy na ciała stałe bywa, jak widzieliśmy wyżej, bardzo rozmaite, tak też i wpływ cieczy jednych na drugie *jest niejednakowy. Gdy do naczynia wprowadzimy* dwie ciecze, mające różny ciężar właściwy, wtedy albo ułożą się one według swych gęstości, albo też zmieszają ze sobą w jednę ciecz, jednostajnie wypełniającą naczynie. Tak np. woda z alkoholem mieszają się z sobą we wszelkich stosunkach, woda zaś z oliwą wcale się nie mięszają, lecz układają pierwsza pod drugą. Gdy natomiast w jednem i tem samem naczyniu znajdują się dwie ciecze, mające jednakowy ciężar właściwy, lecz nie mieszające się z sobą, *np. oliwa i od*powiednia mięszanina wody z alkoholem, wtedy ciecze te nie układają się warstwami jedna nad drugą, lecz oliwa przyjmuje postać kulistych kropel, unoszących się wewnątrz owej mieszaniny. Ponieważ w danym razie objętość wypchniętej przez oliwę cieczy waży tyleż, co i sama oliwa, ta ostatnia traci przeto cały swój ciężar i znajduje się jedynie pod wpływem przyciągającego działania cząstek alkoholu oraz działania spójności własnych cząstek. Przeważa tu spójność i oliwa musi przyjąć taką postać, ażeby napięcie powierzchniowe było we wszystkich punktach jednakowe; *warunkowi zaś* temu czyni zadosyć tylko kulista forma cieczy. Uczony belgijski

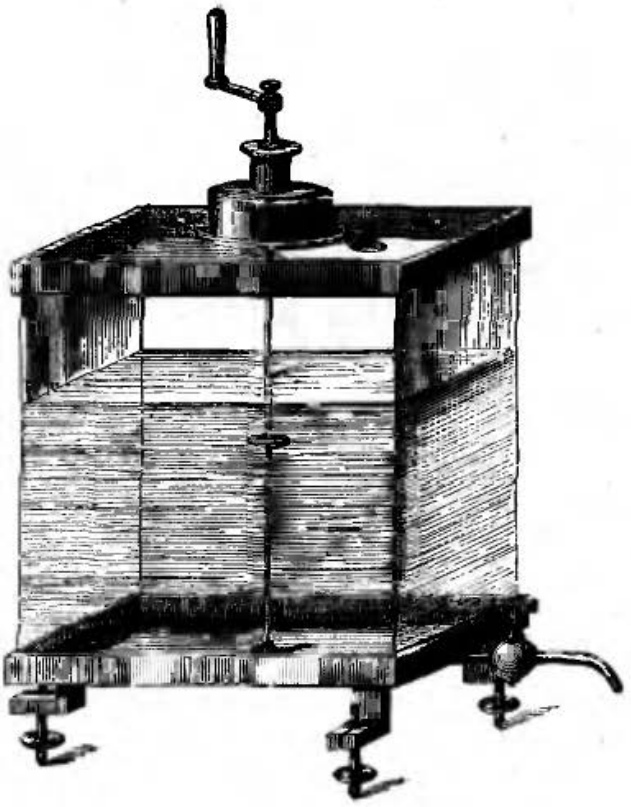


Fig. 96. Naczynie do doświadczeń Plateau.

Plateau przeprowadził liczne, znakomite doświadczenia, poświęcone badaniu kształtów, jakie przyjmują ciecze, gdy są zanurzone w cieczach o takim samym ciężarze właściwym, a więc gdy działanie siły ciężkości na nie zostaje zrównoważone parciem z dołu do góry. Przy tych doświadczeniach Plateau posługiwał się sześciennem naczyniem szklanem (fig. 96, str. 127), na dnie którego znajdował się kran do wypuszczania cieczy, w górnej zaś ściance porobione były rozmaite otwory, umożliwiające wprowadzanie cieczy oraz różnych, potrzebnych w danym razie, przedmiotów. Po napełnieniu sześcianu mięszaniną wody z alkoholem, wpuszczał do niej, za pomocą małej rurki, napełnionej lekko zabarwioną oliwą, kroplę tej cieczy, która po ostrożnem wyjęciu rurki, zostawała w spoczynku i przyjmowała postać dokładnej kuli (fig. 97), tak jak wymaga tego teorya.

Fig. 97. Kształt cieczy, znajdującej się pod wpływem działania przeważającej spójności swych cząstek.

Gdy taką kroplę wprowadzano w zetknięcie z drutem żelaznym, poprzednio zwilżonym oliwą, kropla przylegała do żelaza tak, że oprócz spójności oliwy, wchodziło jeszcze w grę przyleganie jej do tego metalu. Kształt jej powierzchni zmieniał się wtedy, albowiem napięcie powierzchniowe w niektórych punktach ulegało pewnym modyfikacyom. Przez użycie drucianych figur najrozmaitszych kształtów, Plateau nadawał cieczy postać dwuwypukłej soczewki, cylindra, sześcianu, ośmiościanu i t. p. figur, mających górne i dolne powierzchnie wypukłe, płaskie lub wklęsłe, zależnie od ilości oliwy, wprowadzanej w zetknięcie z siatką drucianą.

Bardzo ciekawe są rezultaty działania na takie krople oliwy innych jeszcze sił, oprócz spójności i przylegania. Dla zbadania tego wpływu Plateau umieścił wewnątrz wspomnianego naczynia (fig. 96) pręt metalowy, idący od dna do górnej ścianki i zakończony rączką, za pomocą której pręt mógł być obracany. Przez środek drutu przechodził krążek, na którym, przy zachowaniu odpowie-

dniej ostrożności, zdołano zupełnie symetrycznie umieścić kulę z oliwy, mającą 6 cm. w przecięciu (fig. 98). Przy powolnem obracaniu pręta można było widzieć, jak kula stopniowo spłasz-

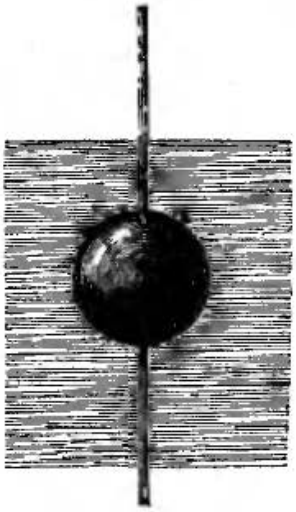


Fig. 98. Kula z oliwy, przylegająca do pręta metalowego.

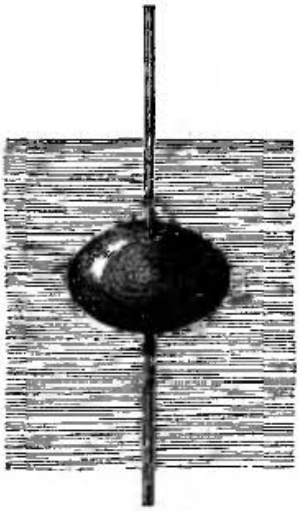


Fig. 99. Spłaszczenie kuli z oliwy, obracającej się naokoło osi.

czała się przy biegunach, przez które przechodził pręt, wypuklała się zaś na równiku (fig. 99). W miarę coraz szybszego ruchu obrotowego, kula stawała się coraz bardziej płaską, w końcu zupełnie oderwała się od krążka i przyjęła kształt prawidłowego pierścienia (fig. 100). W zjawiskach tych działa inna jeszcze siła, a mianowicie ta, która powstaje wskutek ruchu obrotowego pręta, a więc i kropli oliwy, przylegającej doń i do krążka. Dzięki temu ruchowi, cząstki oliwy starają się oddalić od osi obrotu i to z tem większą siłą, im większą jest prędkość obrotowa danej cząstki. Dążność do oddalania się jest największą na równiku kuli, tutaj bowiem cząstki jej opisują najdłuższą drogę, a więc mają największą prędkość obro-

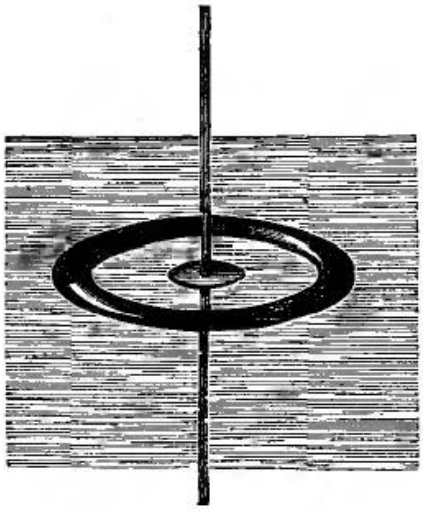


Fig. 100. Rezultat szybkiego ruchu obrotowego kuli z oliwy naokoło osi.

tową (1). Z początku dążności tej przeciwdziała napięcie powierzchniowe na powierzchni kuli, przy szybszym jednak ruchu dążność odśrodkowa bierze górę i cała masa oliwy odrywa się od osi. Plateau udało się także w taki sposób urządzić powyższe doświadczenie, że tylko część kuli z oliwy oderwała się jako pierścień, reszta zaś pozostała na krążku pod postacią spłaszczonego sferoidu. To ostatnie doświadczenie odtwarza w miniaturze proces, jaki niegdyś odbywał się na Saturnie; wiadomo bowiem, że planeta ta jest otoczoną pierścieniami, które, według hypotezy kosmogonicznej Laplace'a, oderwały się wskutek obrotowego ruchu od środkowej masy tejże planety.

Działania podobne do tych, jakie przejawiają się między cząstkami ciał stałych i ciekłych, mogą zachodzić także między cząstkami dwóch różnych cieczy. Nalejmy w naczynie wodnego, zabarwionego roztworu jakiegobądź ciała, a następnie ostrożnie dolejmy czystej wody tak, ażeby ta, nie poruszając roztworu, znalazła się nad nim. Zobaczymy, że pomimo zupełnego spokoju naczynia, roztwór zacznie się odbarwiać, woda zaś—zabarwiać, co dowodzi, że cząstki wody przechodzą do roztworu, cząstki zaś rozpuszczonego ciała—do wody. Proces ten, zwany *dyfuzyą*, trwa tak długo, dopóki obydwie ciecze nie zmieszają się zupełnie i nie wypełnią jednostajnie naczynia, co następuje po krótszym lub dłuższym upływie czasu, zależnie od rodzaju użytych cieczy i rozmiarów naczynia. Zjawisko dyfuzyi pokazuje, że cząstki jednej cieczy są przyciągane przez cząstki drugiej. Nie wszystkie jednak ciecze mają własność dyfundowania czyli mięszania się z sobą; woda np. dyfunduje do roztworu cukru lub soli, albo do alkoholu, lecz nie mięsza się z oliwą, z rtęcią i t. d. Chcąc oznaczyć natężenie siły, z jaką cząstki dwóch różnych cieczy wzajemnie się przyciągają, wprowadzamy je w zetknięcie i mierzymy czas, jakiego potrzebują do utworzenia zupełnie jednostajnej mięszaniny; otrzymujemy wtedy *szybkość dyfuzyi* danych cie-

(1) Doświadczenie powyższe przedstawia miniaturowy obraz procesu spłaszczania się ziemi, obracającej się naokoło osi,—w czasie, gdy znajdowała się jeszcze w stanie płynnym.

czy. Znaleziono np., że szybkość dyfuzyi między wodą i wodnemi roztworami różnych soli zmienia się znacznie, zależnie od natury rozpuszczonego ciała. Dla jednego zaś i tego samego ciała, szybkość dyfuzyi jest w stosunku prostym do stężenia roztworu tak, że, przy innych warunkach jednakowych, ilość np. soli, jaka w określonym czasie przechodzi z wodnego jej roztworu do czystej wody, jest proporcyonalna do stopnia jego stężenia. Pod względem zdolności do dyfuzyi, ciecze można podzielić na dwie grupy: jedna obejmuje takie, które mięszają się ze sobą we wszystkich stosunkach, jak woda z alkoholem; do drugiej grupy należą ciecze, mięszające się tylko w pewnych ilościowych granicach, jak np. woda z eterem, które dyfundują tylko wtedy, gdy ilość pierwszej znacznie przeważa (1 część eteru na 10 części wody).

Dyfuzya cieczy nie ogranicza się na wypadku, gdy są one bezpośrednio z sobą zetknięte, ma ona bowiem miejsce i wtedy, gdy obydwie ciecze są rozdzielone dziurkowatą (porowatą) ścianką. Taki wypadek mięszania się cieczy nazywamy *osmozą* (Graham). Nalejmy alkoholu do rury, zamkniętej od dołu błoną zwierzęcą i zanurzmy rurę w wodzie tak, ażeby ta dotykała błony; wtedy alkohol będzie przechodził do wody i woda do alkoholu. To samo powtarza się, gdy do rury wprowadzamy roztwór np. soli i zanurzamy rurę jak poprzednio: sól przechodzi do wody, woda zaś przesiąka przez błonę do rury tak długo, dopóki ciecze po obu stronach błony nie staną się jednakowe. W większości wypadków można przytem zauważyć przybór cieczy po jednej stronie błony, w doświadczeniu bowiem z alkoholem i wodą, więcej wody przechodzi do alkoholu, niż naodwrót; tak samo, jeżeli między wodą i roztworem soli umieścimy dziurkowatą przegrodę, zobaczymy, że zawsze więcej wody przenika do soli, niż soli do wody. Jeżeli tedy rura zawierą wodę, poziom jej obniża się, jeżeli zawiera sól, ulega on podwyższeniu. Ta zmiana poziomu dowodzi, że przegroda, rozdzielająca dwie mięszające się z sobą ciecze, wywiera znaczny wpływ i że nadaje procesowi dyfuzyi charakter bardziej złożony. Uwidocznia się to jeszcze lepiej przy użyciu rozmaitych błon. Jeżeli np. między wodą i alkoholem umieścimy błonę kauczukową, której woda nie zwilża, wtedy tyl-

ko alkohol będzie przechodził do wody; gdy natomiast te same dwie ciecze rozdzielimy błoną zwierzęcą, zwilżaną przez wodę, w takim razie i ta ostatnia ciecz będzie przechodziła do alkoholu. Błona zwierzęca, umieszczona między kwasem solnym i wodą, przepuszcza kwas w większej niż wodę ilości; w tym razie obydwie ciecze zwilżają błonę, lecz kwas jest mocniej przez nią przyciągany. Fakty te dowodzą, że osmoza zależy nietylko od wzajemnego przyciągania cząstek różnych cieczy, lecz także od wielkości przylegania każdej z nich do wewnętrznych ścianek porów, przedstawiających poniekąd system rurek włoskowatych.

Co do szybkości osmozy, gdy zachodzi ona między czystą wodą i roztworem jakiegoś ciała, naprzykład soli kuchennej, wtedy szybkość, z jaką cząstki soli przechodzą do wody, tutaj także, jak przy zwykłej dyfuzyi, jest tem większą, im bardziej stężony jest roztwór. To samo stosuje się do cząstek wody tak, że ilość tej cieczy, w danym razie przechodząca do roztworu, wzrasta w miarę jego stężenia. Wreszcie gdy osmozie ulegają dwa różne roztwory, rezultat zależy nietylko od stopnia ich stężenia, lecz także od chemicznej natury rozpuszczonych ciał, których wzajemne przesiąkanie odbywa się tem szybciej, im większe jest ich powinowactwo chemiczne. Zgodnie z tem, osmoza kwasu i zasady jest szybsza, niż osmoza dwóch zasad lub dwóch kwasów. Ciała, któremi błona przed rozpoczęciem osmozy została zwilżoną, okazują wpływ na przebieg tego procesu. Błona naoliwiona, umieszczona między wodą i alkoholem, nie przepuszcza wody, tylko alkohol; białko łatwiej przechodzi przez błonę zwilżoną alkaliami. Mechaniczna budowa błony również wywiera znaczny wpływ na osmozę cieczy. Doświadczenia pokazały, że błona wycięta z żołądka lub jelit zwierzęcia, nie przepuszcza kurary i jadu wężowego, podczas gdy skóra i błony śluzowe pochłaniają z łatwością te trucizny (1). W organizmie ludzkim osmoza odgrywa ważną rolę przy pochłanianiu produktów trawienia oraz wymianie materyj, służących do odżywiania tkanek. Przez ścianki naczyń limfatycznych i krwionośnych

(1) Daniell, Zasady fizyki.

może zachodzić osmoza, a proces ten w danym razie jest ułatwiony przez ruch cieczy w tych naczyniach. Limfa względem krwi zachowuje się tak, jak woda względem roztworów solnych, a osmoza, zachodząca w naszym organizmie, dąży do wprowadzenia cieczy jego do układu krwionośnego. Zjawiska osmozy są rezultatem dyfuzyi cieczy i ich przylegania do ciał stałych. Gdy mięszające się z sobą ciecze *A* i *B* rozdzielone są porowatą ścianką, przez którą jedna z cieczy, np. *A* jest silniej niż ciecz *B* przyciąganą, wtedy pierwsza przenika do otworów ścianki i przechodzi przez nie na drugą stronę, gdzie mięsza się z cieczą *B*. Następnie nowa ilość cieczy *A* przenika do otworów, zastępując tę część, która zmięszała się z cieczą *B* i tak dalej; w ten sposób powstaje ciągły prąd cieczy *A* ku cieczy *B*, płynący w blizkości ścianek otworów. Przez środkową zaś część każdego otworu dążą także w przeciwną stronę cząstki cieczy *B*, które jeszcze w otworze mięszają się z cząstkami cieczy *A* według praw zwyklej dyfuzyi. Powiadamy *zwykłej dyfuzyi* dlatego, że, w środkowej oddalonej od ścian części otworu, ciecze nie ulegają już ich przyciągającemu działaniu.

Znaczna ilość soli, kwasów, cukier, mocznik i t. p. ciał odznacza się wielką prędkością dyfuzyi, pewną trwałością chemiczną i zdolnością do przyjmowania formy krystalicznej; ciała takie zowią się *krystaloidami*. Inne zaś, jak guma, białko, żelatyna, krochmal, dyfundują powolnie, są niekrystaliczne czyli bezkształtne, klejowate; tworzą one grupę t. zw. *koloidów*. Jeżeli mięszaninę ciał koloidalnych i krystaloidalnych poddamy osmozie przez błonę dziurkowatą, wtedy pierwsze z tych ciał albo wcale nie przejdą przez błonę, albo przenikną przez nią w nader małej ilości; krystaloidy natomiast przejdą swobodnie. Jeżeli wprowadzimy do szklanej rury, dolny otwór której zamknięty jest pęcherzem, mięszaninę wodnych roztworów gumy i cukru i zanurzymy rurę dolnym jej końcem w naczyniu z wodą, tylko cukier przejdzie przez pęcherz do wody, guma zaś zostanie zatrzymaną. Opierając się na tym fakcie, Graham obmyślił nową metodę oddzielania koloidów od krystaloidów, zawartych w jednej mięszaninie. Mięszaninę taką wprowadza się do płaskiego drewnia-

nego naczynia, którego dno stanowi błona z odpowiednio przygotowanego papieru pergaminowego; naczynie to umieszcza się na czystej wodzie tak, ażeby po niej pływało. Tylko krystaloidy przechodzą przez błonę i to tak długo, dopóki wewnątrz i zewnątrz naczynia nie otrzymamy jednakowo stężonych roztworów krystaloidów. Następnie po wylaniu tej wody zastępujemy ją czystą, a wtedy nowa ilość krystaloidów przejdzie do niej; przez wielokrotne powtórzenie takiej operacyi możemy zupełnie usunąć krystaloidy z mięszaniny, zawartej w naczyniu. Taka metoda oddzielania ciał zowie się *dializą*, powyższe zaś naczynie *dializatorem*. Metoda ta nadaje się bardzo dobrze, między innemi, do oddzielania trucizn od pewnych materyj organicznych; w powyższych np. warunkach strychnina (krystaloid) przenika do wody, śluz zaś (koloid) pozostaje w naczyniu.

ROZDZIAŁ VIII.

Masowy ruch cieczy.

§ 1. Wypływ cieczy. Prawo Toricelli'ego.

Rozpatrzyliśmy dotychczas warunki równowagi cieczy oraz niektóre zjawiska ich ruchu, o ile one zależą od działania spójności cieczy i przylegania ich do ciał stałych. Rozważmy jeszcze wypadek, gdy całe masy cieczy poruszają się jedynie pod wpływem siły ciężkości.

Jeżeli w bocznej ścianie, lub na dnie naczynia, napełnionego cieczą, zrobimy niewielki otwór, ciecz będzie przezeń wypływała z prędkością tem większą, im głębiej dany otwór leży pod poziomem cieczy. Tę zależność między prędkością wypływu i odległością otworu od poziomu cieczy w naczyniu można łatwo objaśnić za pomocą następującego rozumowania: gdyby warstwa *a b c d* (fig. 101, str. 135), znajdująca się bezpośrednio nad otworem *a b*, spadła z wysokości *c a* sama jedna, nie będąc przytem uciskana przez leżący nad nią słup cieczy, wtedy, według praw spadku (str. 28), miałaby ona przy wyjściu z otworu prędkość,

proporcyonalną do pierwiastku kwadratowego z drogi przebytej, a więc—do pierwiastku kw. z $c\ a$. Lecz warstwa $a\ b\ c\ d$ ulega przyśpieszeniu, wynikającemu nietylko z jej własnego ciężaru, ale nadto z ciężaru całej, spoczywającej nad nią cieczy tak, że istotne przyśpieszenie wypływającej warstwy $a\ b\ c\ d$ jest o tyle większe od przyśpieszenia g w danem miejscu na ziemi, o ile wysokość $a\ f$ cieczy jest większa od wysokości $c\ a$ spadku. Rezultat więc jest tutaj taki sam, jak gdyby omawiana warstwa spadła z wysokości $a\ f$, innemi słowy, *prędkość wypływającej cieczy jest proporcyonalną do pierwiastku kwadratowego z odległości otworu od poziomu cieczy.* Prawo to nosi nazwę *zasady Toricelli'ego*, od imienia uczonego, który ją odkrył. Prędkość wypływu nie zależy od natury cieczy, ani od jej ciężaru właściwego tak, że przy jednakowej wysokości poziomów, woda naprzykład i rtęć będą wypływały z naczynia z jednakową prędkością.

Fig 101. Wypływ cieczy. Teoretyczny dowód prawa Toricelli'ego.

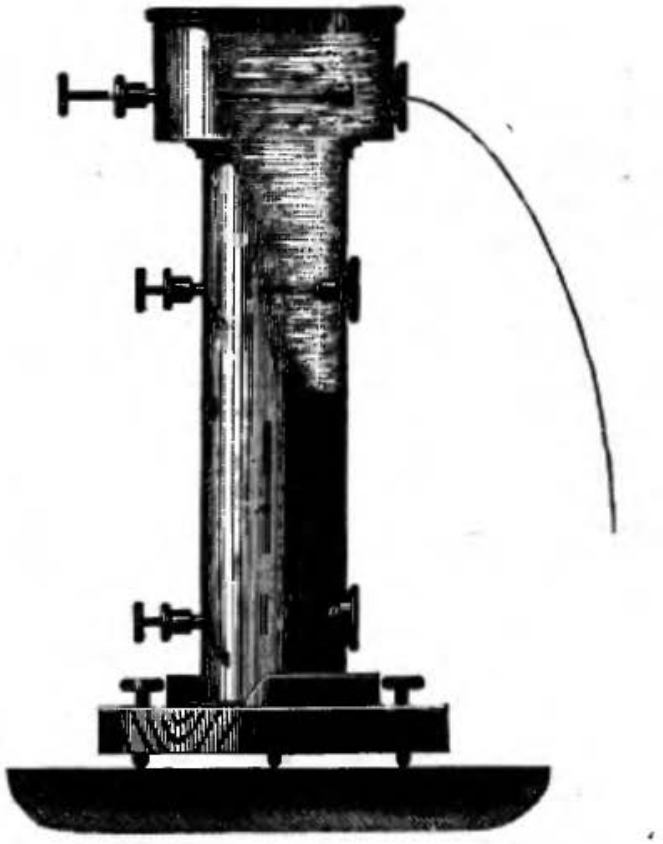


Fig. 102. Przyrząd do doświadczeń dotyczących prawa Toricelli'ego.

Zasadę Toricelli'ego można stwierdzić eksperymentalnie za pomocą naczyń, których objętość jest bardzo znaczną w stosunku do wielkości otworu tak, ażeby wypływ cieczy możliwie mało obniżał jej poziom. Same zaś otwory powinny być zrobione w nader

cienkich blaszkach metalowych, które przykłada się do odpowiednio wydrążonych części ściany bocznej lub dna; gdyby bowiem otwory znajdowały się w grubej ścianie, prędkość wypływu uległaby zmniejszeniu wskutek tarcia cieczy o wewnętrzne ścianki otworu. Figura 102 (str. 135) przedstawia właśnie przyrząd, nadający się dobrze do rzeczonego celu. W górnej części naczynia, na wewnętrznej jego ścianie, znajduje się kreska, do której dochodzi poziom cieczy. Na odległości jednego, czterech i dziewięciu decymetrów pod tą kreską znajdują się otwory, dające się zamykać przez małe tłoki, pokryte kauczukiem, które można dowolnie naciskać na otwory (otwór środkowy), lub też je od nich odsuwać (otwór górny). Zamiast otworów, przedstawionych na figurze, przez które ciecz wypływa w kierunku poziomym, naczynie może być zaopatrzone w krótkie rurki o otworach skierowanych do góry, co pozwala badać także własności wstępującego strumienia. W razie gdy chcemy, ażeby prędkość wypływającej cieczy przy wyjściu z otworu pozostawała przez dłuższy czas jednakową, musimy dbać o to, ażeby poziom jej się nie obniżał.

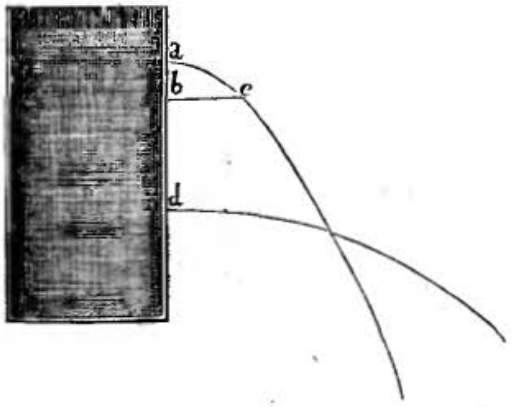


Fig. 103. Parabole, opisywane przez poziomo wypływające strumienie cieczy.

Doświadczenia nad strumieniami cieczy, wypływającemi poziomo z otworów w bocznej ścianie naczynia, dają rezultaty, dobrze zgadzające się z prawem Toricelli'ego. Przypuśćmy, że otwór *a* (fig. 103), przez który ciecz wypływa, znajduje się na odległości 1 decymetra od poziomu; wtedy prędkość wypływu, obliczona na podstawie przyśpieszenia dla danego miejsca (9,8) oraz na podstawie prawa Toricelli'ego, wynosi 1,4 metra na sekundę. Innemi słowy, gdyby cząstki cieczy, po wyjściu z otworu *a*, poruszały się jedynie z prędkością nabytą wskutek spadku, znalazłyby się po upływie jednej sekundy na odległości 1,4 metra od tegoż otworu, mierząc w kierunku poziomym; po upływie zaś $^1/_{10}$

sekundy—na odległości 10 razy mniejszej, t. j. równej 0,14 m.; po upływie $^2/_{10}$ sek. na odległości 0,28 m. i t. d. Cząstki owe poruszałyby się więc w kierunku poziomym z jednostajną prędkością, równą tej, jaką posiadają przy wyjściu z otworu. Lecz na wypływające cząstki cieczy nie przestaje działać siła ciężkości, wskutek czego spadają one także w kierunku pionowym tak, że po upływie jednej sekundy, licząc od początku wypływu, znalazłyby się na odległości 4,9 m. od otworu (1); po $^1/_{10}$ sekundy spadną one tylko na $^1/_{100}$ poprzedniej wielkości (2), t. j. na 0,049 metra, po $^2/_{10}$ sekundy—na 0,196 m. i t. d. Jeżeli przeto od otworu a (fig. 103) odłożymy długość $a\ b$ równą 0,049 m. (droga cząstki przebyta w ciągu $^1/_{10}$ sekundy w kierunku pionowym) i z punktu b poprowadzimy linię $b\ c$, ta ostatnia przetnie strumień cieczy na odległości 0,14 m. (droga cząstki przebyta w ciągu $^1/_{10}$ sek. w kierunku poziomym). Stosunek dróg pionowej do poziomej, przebywanych w jednym i tym samym czasie, pokazuje, że strumień wypływającej cieczy przedstawia krzywą, zwaną *parabolą*, której kształt, jak zaraz zobaczymy, zależy od prędkości wypływu. Gdy ciecz wypływa przez otwór d (fig. 103), leżący 4 razy głębiej pod poziomem, niż otwór a, wtedy prędkość wypływu jest 2 razy większa, niż w poprzednim wypadku, to znaczy, że każda cząstka przebywa w ciągu $^1/_{10}$ sekundy poziomą drogę, równą $2 \times 0{,}14$, t. j. 0,28 metra. Jeżeli tedy z punktu d opuścimy pionową, równą 0,049 metra i ze spodka tej pionowej poprowadzimy poziomą, ta ostatnia przetnie strumień dopiero na odległości 0,28 metra. Widzimy tedy, że parabola, opisywana przez poziomo wypływający strumień, jest tem bardziej płaską, im większą jest prędkość wypływu, a więc im głębiej dany otwór leży pod poziomem cieczy. Chcąc przekonać się, że wypływający strumień istotnie opisuje parabolę, zgodną z wymaganiami teoryi, należy narysować na papierze krzywą tę według obliczonej pręd-

---

(1) Taką bowiem drogę przebywa ciało, swobodnie spadające w ciągu pierwszej sekundy (patrz str. 27).

(2) Drogi bowiem, przebywane podczas spadku, są wprost proporcyonalne do kwadratów z czasu (patrz str. 27).

kości wypływu dla danej głębokości otworu i umieścić ten papier po za wypływającym strumieniem, a wtedy zobaczymy, że ten ostatni pokrywa narysowaną na papierze parabolę. Figura 104 przedstawia parabole, opisywane przez strumienie, znajdujące się pod ciśnieniem słupów cieczy, wysokich na 1 decymetr (parabola *R*) i na 4 decymetry (parabola *S*).

Co do strumieni, wypływających w kierunku pionowym, powinny one—na mocy prawa, że ciała spadając, nabywają takiej prędkości, iż mogą napowrót wznieść się do wysokości spadku—wznieść się aż do poziomu cieczy w naczyniu. Doświadczenie

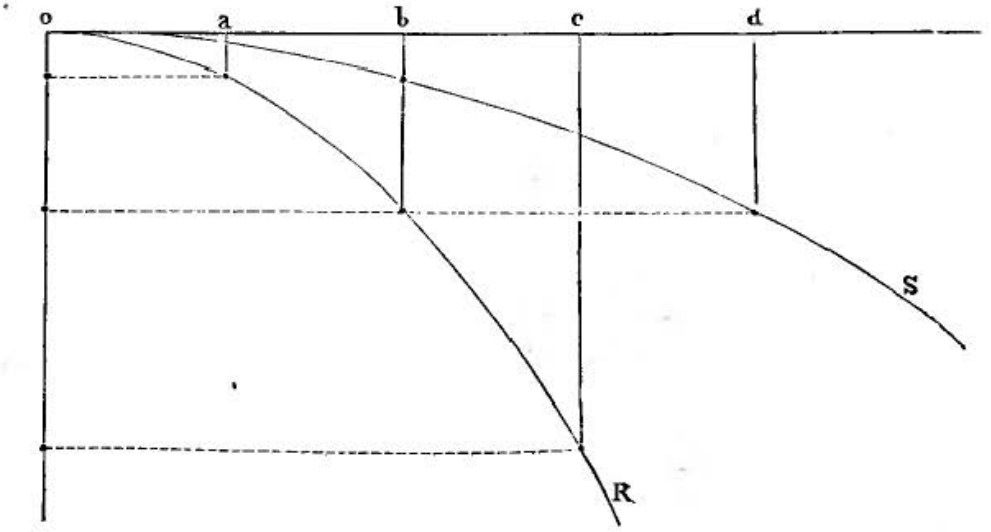


Fig. 104. Ilustracya prawa Toricelli'ego (parabole mają $^1/_{10}$ istotnej wielkości).

jednak przekonywa, że tak nie jest, a to dla powodów, wyłuszczonych już przy opisie naczyń połączonych (patrz str. 95).

Przy wyprowadzaniu wniosków z prawa Toricelli'ego przyjmowano, że cząstki cieczy, znajdujące się na zewnątrz słupa, leżącego bezpośrednio nad otworem, przenikają do tego słupa stopniowo i bez wszelkiego tarcia. W rzeczywistości jednak cząstki te, dążąc z boków ku otworowi, przeszkadzają ruchowi cząstek, spadających w kierunku pionowym, wskutek czego prędkość wypływu zmniejsza się i strumień ulega zwężeniu w miarę oddalania się od otworu tak, że w pewnej odeń odległości średnica strumienia wynosi tylko $^2/_3$ średnicy samego otworu. To zwężenie strumienia ma wielkie znaczenie przy obliczaniu t. zw. *ilości wy-*

pływu czyli objętości cieczy, wypływającej w ciągu jednostki czasu. Teoretycznie ilość ta jest proporcyonalną do średnicy otworu oraz do prędkości wypływu, na mocy czego łatwo jest obliczyć ilość wypłyniętej cieczy w ciągu określonego czasu. Praktycznie jednak objętość wypłyniętej cieczy nie zgadza się z teoretycznie obliczoną, jest bowiem od niej mniejsza, a to wskutek owego zwężenia strumienia. Należy dodać tutaj, że gdy ilość wypływu ma pozostać stałą, prędkość wypływu powinna być w stosunku odwrotnym do średnicy otworu, z czego wynika, że przy małym otworze, ilość wypływu może być nader nieznaczna, pomimo wielkiej prędkości strumienia; naodwrót możemy otrzymać znaczną ilość cieczy, wypływającej z małą wprawdzie prędkością, lecz przez duży otwór. Jeżeli otwór zaopatrzymy w krótką rurę walcowatą, mającą taką samą co i on średnicę, wtedy cząstki cieczy, leżące na zewnętrznej stronie strumienia, ulegają przyciąganiu wewnętrznych ścianek rury, zwilżanej przez daną ciecz. Cząstki te biegną równolegle do osi rury, nie przeszkadzając sobie wzajemnie, a wypływający strumień nie przedstawia zjawiska zwężenia. Dlatego też ilość wypływu jest większa wtedy, gdy do otworu dodaną jest rura walcowata, aniżeli gdy otwór jest swobodny. Znaleziono, że przy użyciu takiego dodatku, ilość wypływu jest tylko o $^1/_{10}$ mniejszą od tej, jaka wynika z prawa Toricelli'ego.

ROZDZIAŁ IX.

Działanie ciężkości na ciała gazowe.

§ 1. Własności gazów.

Stała ziemia, zamieszkana przez nas, przedstawia poniekąd dno obszernego oceanu, otaczającego całą kulę ziemską; ocean ten, którego głębokość jest co najmniej sto razy większa od średniej głębokości morza, jest utworzony przez bardzo ruchliwy i rzadki płyn. Ten ostatni, zwany atmosferycznem powietrzem, stanowi mięszaninę kilku ciał gazowych, pomiędzy któremi tlen i azot

zajmują najważniejsze miejsce. Oprócz nich, w powietrzu prawie zawsze znajduje się kwas węglany, para wodna, amoniak i inne gazy, lecz ilość tych ciał jest tutaj zwykle dość małą i bardzo zmienną. Natomiast stosunek ilości głównych składników, mianowicie tlenu i azotu jest stały: w 100 jednostkach objętości powietrza znajdujemy zawsze 21 jednostek tlenu i 79 azotu.

Wiadomo, że powietrze jest niezbędne dla wszystkich istot żyjących, u których ono podtrzymuje proces oddychania, mający pierwszorzędne dla życia znaczenie; nawet zwierzęta, zamieszkujące wody, nie mogą istnieć bez powietrza. Również i rośliny pobierają z powietrza znaczną część swego pożywienia, pod wpływem bowiem słońca rozkładają pochłonięty kwas węglany, przyczem zatrzymują węgiel, wydzielają zaś tlen, z kolei potrzebny do utrzymania życia zwierząt.

Ponieważ powietrze jest bardzo przezroczyste, nie możemy za pomocą wzroku przekonać się o jego obecności, z wyjątkiem gdy ono przedstawia bardzo grubą warstwę. Gdy spoglądamy na bardzo odległe przedmioty, naprzykład na góry, ograniczające nasz horyzont, wydaje nam się, jak gdyby przed niemi znajdowała się niebieska zasłona; to niebieskie zabarwienie staje się o wiele intensywniejszem, gdy patrzymy po przez atmosferę w przestrzeń wszechświata. Powietrze nadaje sklepieniu niebieskiemu jego przepyszny błękit, bez powietrza wydawałoby się ono nam bezbarwnem, albo raczej absolutnie czarnem i nawet podczas dnia gwiazdy przedstawiałyby się na tem ciemnem tle jako błyszczące punkty. Gdy dzienne światło gaśnie, powietrze jest oświecone tylko przez słabe światło księżyca i gwiazd, a wtedy barwa jego jest ciemno-niebieską.

Istnienie powietrza ujawnia się lepiej za pomocą zjawisk, dostępnych dla naszych zmysłów słuchu i dotyku. Gdy podczas zupełnego spokoju powietrza wykonywamy pewne ruchy, czujemy opór, jaki ono nam stawia; odczuwamy je również przy oddychaniu, dzięki prądowi wchodzącemu lub wychodzącemu, który muska nasze wargi i inne części ust. Nakoniec czujemy obecność powietrza wskutek ruchu, w jakim ono ciągle prawie się znajduje, ruchu polegającym bądź na lekkim przewiewie przez otwarte

okno, bądź na słabym wiaterku, zaledwie muskającym liście drzew, bądź w końcu na najgwałtowniejszej burzy lub najsilniejszym orkanie. Wreszcie drgania dźwięczącego ciała przenoszą się na powietrze, przez które dochodzą aż do naszego ucha, gdzie wywołują wrażenie dźwięku; zobaczymy w drugiej księdze, że przy odpowiednich warunkach, niewielka masa powietrza może być wprawiona w drgania, przyczem powstaje dźwięk.

Że powietrze, równie jak i inne gazy, jest istotnie ciałem fizycznem, dowodzi jego ciężar. Wkrótce poznamy bardzo ważny przyrząd, zwany pompą powietrzną, za pomocą którego można z danej przestrzeni częściowo przynajmniej wydalić powietrze, który *więc pozwala otrzymać przybliżoną próżnię*, tymczasowo zaś pokażemy, w jaki sposób przyrząd ten może pośrednio służyć do określenia ciężaru powietrza i innych gazów. Jeżeli za pomocą tego przyrządu wypompujemy powietrze z balonu, zaopatrzonego w odpowiednią rurkę z kranem (fig. 105), a następnie, po zamknięciu krana, zawiesimy balon na jednej szalce wagi, łatwo będziemy mogli dowieść ciężaru powietrza. W tym celu należy, po zrównoważeniu wagi, otworzyć kran i wpuścić napowrót powietrze do balonu; zobaczymy, że wtedy drąg wagi pochyli się w stronę balonu, co dowodzi, że ciężar jego się powiększył i to jedynie wskutek ciężaru powietrza, które doń weszło. Podobne doświadczenie, wykonane po raz pierwszy przez wynalazcę pompy powietrznej, Ottona von Guericke, pozwoliło obliczyć, że litr

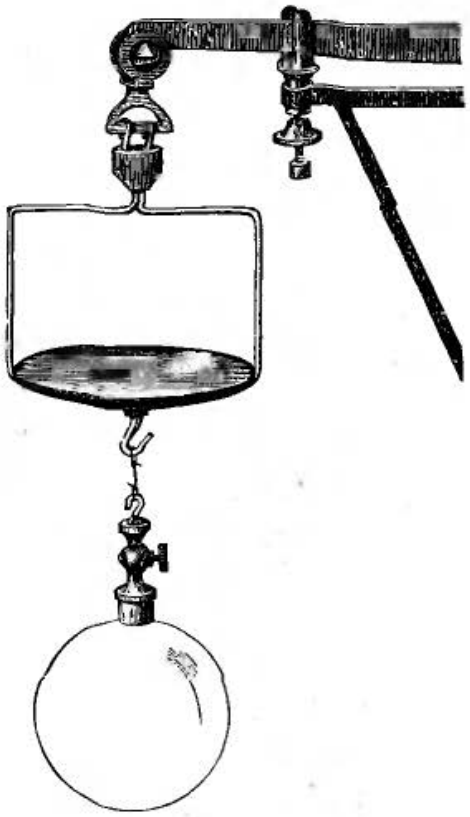


Fig. 105. Doświadczenie, służące do wykazania ciężaru powietrza.

powietrza, znajdującego się pod ciśnieniem 1 atmosfery (1), waży 1 gr., 293, a więc że gęstość jego jest 773 razy mniejszą od gęstości wody. Wpuszczając do balonu inne gazy, można w taki sam jak powyższy sposób określić ich ciężar.

Widzimy tedy, że powietrze i wszystkie podobne ciała ulegają, podobnie jak ciała stałe i ciekłe, działaniu siły ciężkości. Drugą własnością gazów, zbliżającą je do cieczy, jest wielka ruchliwość ich cząstek, dzięki której, z łatwością ulegają zmianie kształtu i nie przedstawiają znacznego oporu poruszającym się w nich ciałom. Powiedzieliśmy już, że niektóre prawa, wynikające z wielkiej tej ruchliwości cząstek, stosują się do wszystkich w ogóle płynów, tak do cieczy, jak i do gazów. Tu należy naprzykład prawo Pascala, które w zastosowaniu do gazów orzeka, *że ciśnienie, wywierane na zamknięty ze wszech stron gaz, rozchodzi się jednostajnie po przez całą jego masę.*

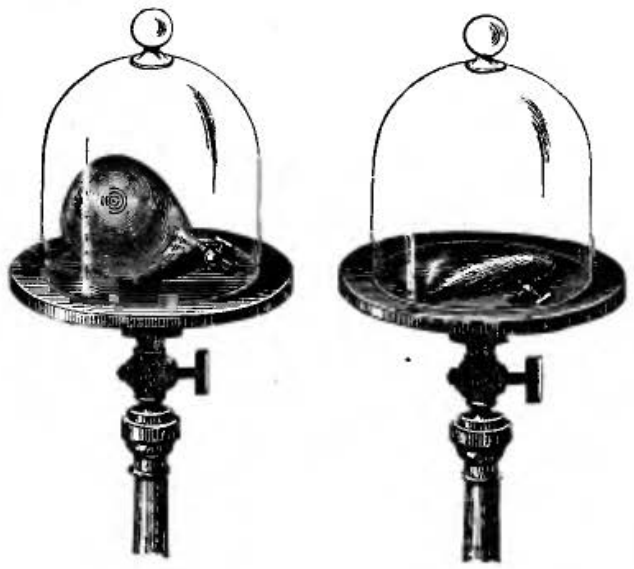


Fig. 106. Sprężystość gazów.

Własnościami, ściśle odróżniającemi gazy od cieczy, są: ich znaczna *ściśliwość* i *rozszerzalność;* innemi słowy, gazy są bardzo sprężyste. Wpuśćmy do pęcherza niewielką ilość powietrza, zamknijmy go szczelnie kranem i umieśćmy pod kloszem pompy powietrznej, wypełnionym przez powietrze; zobaczymy, że pęcherz ma wtedy postać skurczoną i zmiętą (fig. 106, strona prawa). W miarę jednak wypompowywania powietrza z klosza, powietrze, zawarte w pęcherzu rozszerza się stopniowo (albowiem ciśnienie

(1) Patrz niżej str. 147.

nań z zewnątrz słabnie coraz bardziej), przyczem sam pęcherz się wydyma i przyjmuje postać kulistą (fig. 106, strona lewa), a w końcu może nawet—jeżeli ścianki jego nie są dosyć wytrzymałe—pęknąć. Po otworzeniu krana pompy i wpuszczeniu powietrza do klosza, pęcherz przyjmuje pierwotną swą objętość. Stare zmarszczone jabłka, będąc umieszczone pod próżnym kloszem pompy powietrznej, odzyskują swój świeży wygląd, zwietrzałe zaś piwo poczyna w tych warunkach pienić się; powietrze, zawarte w jabłkach lub w piwie, rozszerza się, gdy ciśnienie zewnętrzne słabnie. Doświadczenie *z krzesiwem pneumatycznem* (fig. 107) również dowodzi sprężystości powietrza. Składa się ono z dokładnie wyszlifowanej, zamkniętej od dołu rury szklanej, w której może poruszać się szczelnie przystający tłok. Posuwając ten ostatni ku dołowi, ściskamy powietrze, zawarte w rurze, przez co możemy zredukować jego objętość do połowy, jednej trzeciej, czwartej i t. d. części; szybko i silnie ściśnięte powietrze rozgrzewa się dosyć mocno tak, że kawałek hubki, umieszczony na podstawie tłoka, zapala się. Przy spychaniu tłoka można zauważyć, że im mniejszą jest objętość ściśniętego powietrza, tem większy napotykamy opór przy dalszem ściskaniu, co dowodzi, że dążność do rozszerzania się gazu wzrasta w miarę zajmowania coraz mniejszej przestrzeni; gdy puszczamy tłok, powietrze rozszerzając się, pcha go do góry.

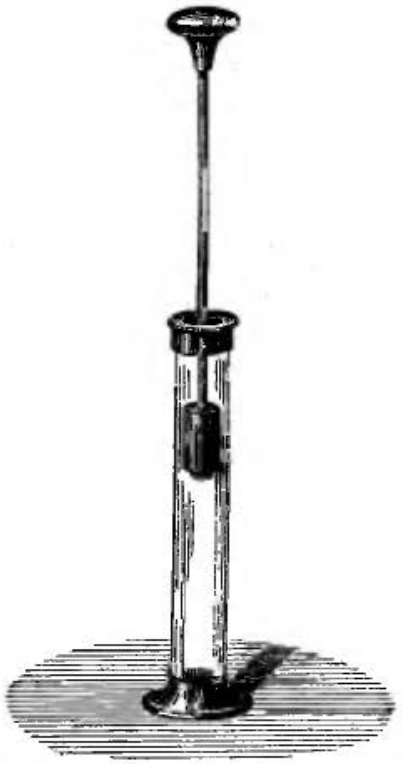


Fig. 107. Krzesiwo pneumatyczne.

W końcu gazy różnią się od cieczy pod względem swej gęstości; podczas gdy waga jednego litra (decymetra sześc.) cieczy waha się pomiędzy 715 gr. (eter) i 13596 gr. (rtęć), największa podobna wartość dla ciał gazowych dochodzi do 11 gr. (chlorek cyny), najniższa zaś spada do 0 gr, 09 (wodór).

§ 2. Ciśnienie powietrza.

Powróćmy obecnie do ciężaru powietrza i wynikającego ztąd ciśnienia.

W najdawniejszych już czasach znano pompy i używano ich do podnoszenia wody z głębszych warstw ziemi na jej powierzchnię; wiedziano również, że gdy otwartym końcem zanurzymy w wodzie rurę, w której tłok porusza się ku górze, wtedy woda wchodzi do rury. Lecz gdy przyszło do objaśnienia tego ostatniego zjawiska, nie umiano go sobie inaczej wytłómaczyć, jak tylko, że natura, nie cierpiąc próżni, stara się zawsze takową wypełnić. W roku 1640 zdarzyło się atoli, że we Florencyi miano urządzić dość głęboką studnię; pomimo iż robotnicy przygotowali rury, tłoki i klapy według wszelkich prawideł sztuki, nie udało im się wydobyć wody na powierzchnię ziemi, ciecz ta bowiem podniosła się tylko do wysokości około 32 stóp, wyżej zaś wznieść ją było niepodobieństwem. Jak objaśnić sobie to zadziwiające zjawisko? Czy wstręt natury do próżni sięga tylko do wysokości 32 stóp? Nadaremnie zwracano się z zapytaniem do uczonych z florenckiej Akademii—nikt nie umiał dać zadawalniającej odpowiedzi, a nawet sławny ze swej nauki Galileusz, wtedy już starzec siedemdziesięcioszścioletni, dał odpowiedź wymijającą. Lecz przedmiot ten interesował ślepego starca, który w najpóźniejszym wieku kusił się jeszcze o rozwiązanie zagadnień mechaniki; wkrótce też niepospolity badacz przyrody wpadł na myśl, że i powietrze zapewne ulega sile ciężkości i że dzięki ciśnieniu, jakie wskutek tego wywiera na wodę, ta ostatnia podnosi się w opróżnionej rurze studziennej. Chcąc dowieść ciężaru powietrza, starał się on wywołać próżnię we flaszce, w której gotował nieco wody i którą następnie mocno zakorkowywał; w taki sposób udało mu się wykazać, że flaszka, po wyjęciu korka, a więc po wpuszczeniu do niej powietrza, stawała się cięższą. Dalsze badania zmuszony był jednak pozostawić uczniowi swemu Toricelli'emu, któremu, w rok po śmierci Galileusza, udało się określić wielkość ciśnienia powietrza, a to za pomocą następującego

doświadczenia. Wychodząc z założenia, że ciśnienie powietrza powinno podnosić rtęć, trzynaście i pół razy cięższą od wody, do wysokości tyleż razy mniejszej, Toricelli napełnił rtęcią zamkniętą u dołu rurę szklaną, mającą około 30 cali długości i zatkawszy otwarty koniec palcem, odwrócił ją do góry (fig. 108). Następnie zatkany koniec zanurzył w naczyniu z rtęcią i ostrożnie odjąwszy palec, zatrzymał rurę w położeniu pionowem (fig. 109, str. 146). Poziom rtęci w rurze natychmiast się obniżył i po kilku wahaniach zatrzymał na wysokości, równej 28 calom czyli 76 centymetrom, licząc od poziomu rtęci w naczyniu. Przypuszczenie tedy Galileusza, że powietrze wywiera pewne określone ciśnienie, zostało w zupełności dowiedzione, doświadczenie bowiem Toricelli'ego wykazało, że istotnie słup podniesionej w rurze rtęci jest trzynaście i pół razy niższy od słupa podniesionej wody, który, jak wiemy, wynosił 32 stopy.

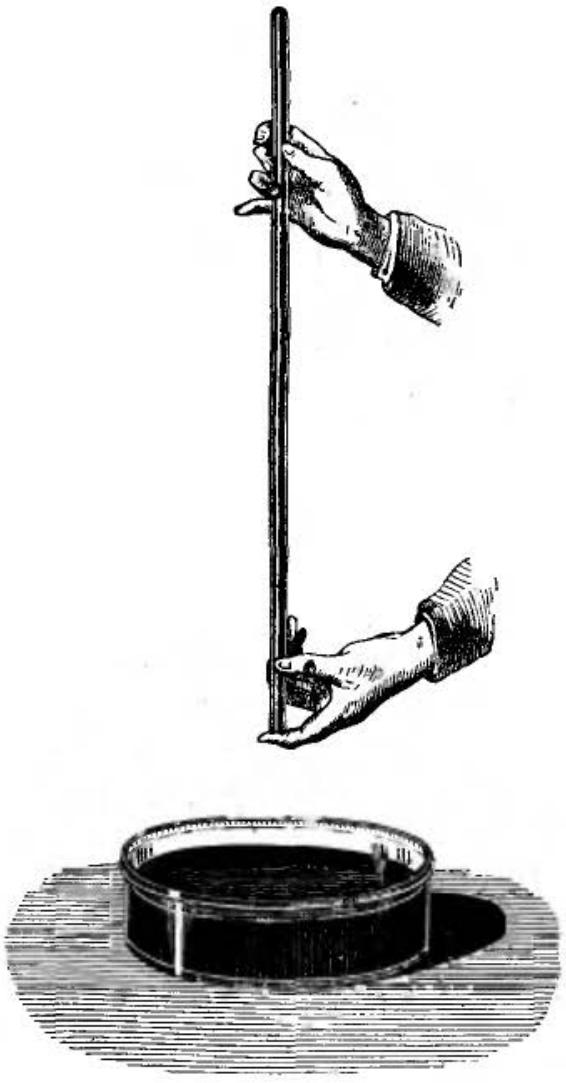


Fig. 108. Doświadczenie Toricelli'ego.

W ten sposób Toricelli wynalazł w roku 1643 najprostszą postać przyrządu, zwanego barometrem i służącego do oznaczenia ciśnienia powietrza czyli ciśnienia atmosferycznego. W trzy lata potem Pascal użył takiego samego przyrządu do obmyślonego przezeń doświadczenia, którego rezultaty nie pozostawiają żadnej wątpliwości. Jeżeli, sądził on, ciśnienie powietrza jest istotną przyczyną pod-

noszenia się rtęci w rurce barometrycznej, to słup tej cieczy powinien obniżyć się w razie, gdy udamy się z rurką do miejsca wyżej położonego, wtedy bowiem będzie ciążyła nad nami mniejsza ilość powietrza. W celu stwierdzenia słuszności tej myśli, Pascal i szwagier jego Perier jednocześnie obserwowali stan barometru u podstawy i na wierzchołku góry Puy de Dôme, mającej 4,700 stóp wysokości, a rezultaty tych obserwacyj okazały się najzupełniej zgodne z teoryą Galileusza i Toricelli'ego. W istocie bowiem słup rtęci w rurce barometrycznej obniżał się w miarę wznoszenia się do wyższych warstw atmosfery tak, że od podstawy góry do jej wierzchołka obniżenie to wynosiło trzy cale czyli osiem centymetrów. Doświadczenia te stanowiły punkt wyjścia dla bardzo ważnego zastosowania barometru, a mianowicie do *mierzenia wysokości gór*; do przedmiotu tego powrócimy jeszcze później.

Fig. 109. Doświadczenie Toricelli'ego. Wpływ ciśnienia powietrza.

Na podstawie prawa o jednostajnem rozchodzeniu się ciśnienia w cieczach, można łatwo dowieść, że wysokość rtęci w rurce Toricelli'ego nie zależy od szerokości tej ostatniej, z wyjątkiem gdy jest ona włoskowatą. Wiemy, że ciecz wtedy znajduje się w stanie równowagi, gdy ciśnienia, wywierane na każdy jednakowy element jej powierzchni, są równe. Warunkowi temu staje się zadosyć w doświadczeniu Toricelli'ego: na każdy element powierzchni rtęci, zawartej w naczyniu (fig. 109), równy poprzecznemu przekrojowi rurki,

działa albo ciśnienie powietrza atmosferycznego, albo też dokładnie równe mu ciśnienie słupa rtęci, zawartego w rurce. Gdyby ta ostatnia była dwa razy szersza, dwa takie elementy znajdowałyby się pod ciśnieniem słupa rtęciowego, lecz wysokość jego pozostałaby taką samą. Jak powiedzieliśmy wyżej, wyjątek zachodzi wtedy, gdy rtęć znajduje się w rurce włoskowatej: w warunkach takich obniża się ona nieco albo podnosi (patrz Roz. VII).

Ciśnienie atmosferyczne działa z jednakową mocą na każdy punkt powierzchni ziemi i wszystkich w ogóle ciał; działa ono tak samo, jak warstwa rtęci, gruba na 76 centymetrów. Ciśnienie to rozchodzi się po całej masie powietrza atmosferycznego i przenosi się do wszystkich przestrzeni, będących z niem w związku. Jeżeli tedy mieszkania nasze nie są hermetycznie zamknięte, lecz są w jakikolwiek sposób, naprzykład za pośrednictwem dziurki od klucza lub rury kominowej, połączone z otwartem powietrzem, ciśnienie jego w tych mieszkaniach jest tak samo wielkie, jak na zewnątrz nich. Innemi słowy, w tem samem miejscu na ziemi i w tym samym czasie, wysokość słupa rtęci w rurce barometrycznej,—bez względu na to, czy znajduje się ona w pokoju lub pod gołem niebem—jest jednakową. Obliczywszy wielkość ciśnienia atmosferycznego, wywieranego na metr kwadratowy powierzchni, otrzymujemy ciężar słupa rtęci, którego podstawa równa się 1 m. kw., wysokość zaś—76 centymetrom; objętość tego słupa równa się 760 decymetrom sześciennym czyli litrom, a że litr rtęci waży 13 kilogr., 596, przeto ciśnienie na każdy metr kwadratowy wynosi 10333 kilogr. (1) Jestto ciśnienie *jednej atmosfery.*

Ciśnienie to, jak widzimy, jest ogromne, a w obec tego słusznie zapytać możemy, dlaczego przedmioty, ulegające mu, nie załamują się pod niem? Oto poprostu dlatego, że powietrze ciśnie na nie ze wszech stron z jednakową mocą i przeto naprzykład ciśnienia, wywierane zewnątrz i wewnątrz wydrążonego przedmiotu, znoszą się wzajemnie. Nasze własne ciało, powierzchnia

(1) Ztąd łatwo już obliczyć wielkość tego ciśnienia na każdą inną jednostkę powierzchni: naprz. na 1 cent. kw. ciśnienie to wynosi 1 kilogr., 0333.

którego wynosi średnio $1^1/_2$ metra kwadratowego, ulega ciśnieniu atmosferycznemu, równemu ciężarowi 15,500 kilogramów, lecz ciśnienie to, będąc jednostajnie rozmieszczone po całej powierzchni ciała, znosi się wzajemnie tak, że nie jesteśmy przezeń popychani w żadnym kierunku. Pozostaje tylko pytanie, dlaczego my ciśnienia tego nie czujemy i dlaczego ciało nasze nie ulega ściśnieniu. Oto dlatego, że wewnętrzne jamistości naszego organizmu wypełnione są gazami lub cieczami, które cisną od wnętrza na zewnątrz i przeciwdziałają ciśnieniu powietrza atmosferycznego. Że takie wewnętrzne ciśnienie istnieje, widzimy to z działania baniek: gdy niewielkie te naczynia, po uprzedniem rozrzedzeniu w nich powietrza, przystawiamy do skóry, ta ostatnia wzdyma się pod niemi, małe jej naczyńka krwionośne pękają wypuszczając krew, której nie tamuje już ciśnienie powietrza zewnętrznego.

Fig. 110. Ciśnienie powietrza. Półkule magdeburskie.

Fig. 111. Ciśnienie powietrza. Pękanie błony.

Wpływ ciśnienia atmosferycznego można uwidocznić za pomocą licznych doświadczeń, z których przytoczymy kilka. Jedno z najdawniejszych zostało po raz pierwszy wykonane przez burmistrza magdeburskiego Ottona von Guericke w r. 1654. Polega ono na tem, że dwie wydrążone metalowe półkule, mogące bardzo szczelnie przystawać do siebie (fig. 110), składa się w ten sposób, ażeby stanowiły jednę kulę, z której następnie wypompowywa się powietrze. Po zamknięciu krana, przepuszczającego powietrze, potrzeba, nawet przy małej kuli, użyć dość znacznej siły, ażeby oderwać od siebie dwie jej połowy. Guericke złożył półkule, mające 65 centymetrów w średnicy i, po wypompowaniu z nich po-

wietrza, zaprzągł do każdej z nich po cztery silne konie, które jednak nie były w stanie oderwać półkuli jednej od drugiej, innemi słowy, nie mogły przezwyciężyć ciśnienia atmosferycznego, któremu w danym razie nie przeciwdziałało ciśnienie od wewnątrz.

Inne znowu doświadczenie polega na tem, że na podstawce pompy powietrznej ustawia się walcowate naczynie szklane, zamknięte u góry przez naciągniętą błonę (fig. 111, str. 148), która nie przepuszcza powietrza. Gdy następnie z naczynia wypompowywa się powietrze, błona wpukla się do wnętrza i w końcu pęka pod naciskiem atmosferycznego powietrza, które z ogromnym hukiem wpada do naczynia. Doświadczenie to można zmodyfikować w ten sposób, że na górnej zaostrzonej krawędzi podobnego, lecz nieco mniejszego naczynia, umieszcza się jabłko, które będąc wciskane przez powietrze atmosferyczne, zostaje przytem przekrojone. Następujące zaś doświadczenie uwidocznia wpływ ciśnienia atmosferycznego na powierzchnię wody. Wypompowywa się powietrze ze szklanego klosza, szczelnie przylutowanego do talerzyka, przez środek którego przechodzi rurka, zamknięta kranem (fig. 112); rurka ta ostrym górnym końcem wchodzi do wnętrza klosza, dolnym zaś zanurza się w naczyniu z wodą. Po otwarciu krana, woda z naczynia zostaje gwałtownie wciśnięta

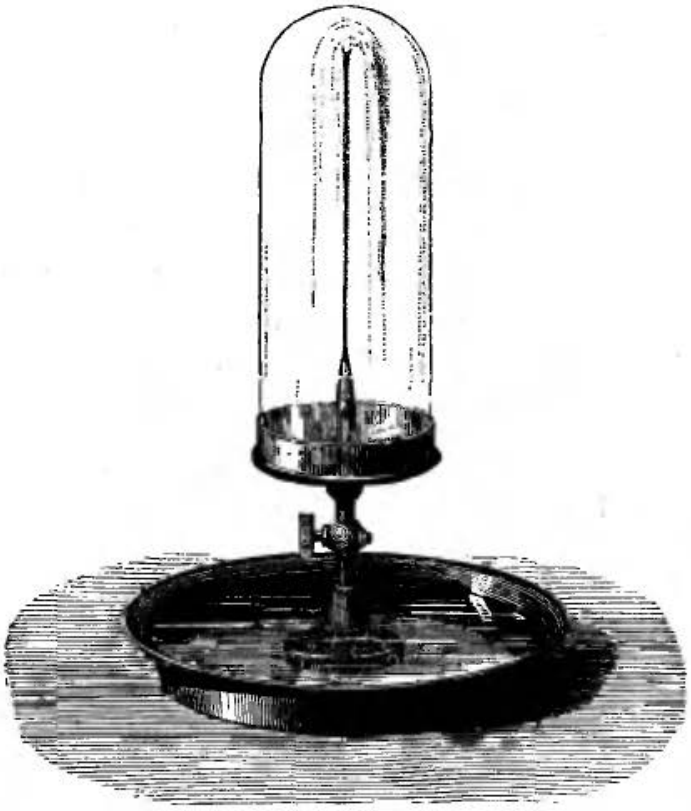


Fig. 112. Ciśnienie powietrza. Fontanna, bijąca w rozrzedzonem powietrzu.

do rurki i wytryskuje z niej w postaci strumienia, bijącego o sklepienie klosza. W końcu przytoczymy jeszcze pewne, bardzo proste doświadczenie, które każdy z łatwością może powtórzyć; jest ono o tyle odmienne od poprzednich, że dowodzi ciśnienia powietrza z dołu do góry. Napełnia się mianowicie szklankę wodą aż po brzegi, nakrywa tę ostatnią ćwiartką papieru, który należy silnie przycisnąć i odwraca szklankę dnem do góry; wtedy, nawet po odjęciu ręki od papieru, ten ostatni nie odpada, pomimo iż cały ciężar wody, zawartej w szklance, ciśnie nań z góry na dół,— ciężarowi temu bowiem przeciwdziała ciśnienie atmosferyczne, wywierane na papier z dołu do góry. W podobny zupełnie sposób działa ciśnienie powietrza na przyrząd, zwany *pipetą*. Jestto z obu stron otwarta szklana rurka (fig. 113), pośrodku dość szeroka, u dołu wązka, u góry zaś tak oszlifowana, że z łatwością daje się zamykać palcem. Chcąc za pomocą tego przyrządu wydostać nieco cieczy z naczynia, zanurza się w niej dolny jego koniec, przez górny zaś ustami wyciąga zeń powietrze tak długo, dopóki rurka nie napełni się dostatecznie; wtedy zamyka się górny otwór rurki palcem i wyjmuje przyrząd z naczynia. Ciecz zawarta w pipecie nie wypłynie aż po odjęciu palca, albowiem powietrze ciśnie na nią od dołu; wypływ zaś cieczy z rurki można dowolnie zatrzymać, przykładając napowrót palec do górnego jej otworu.

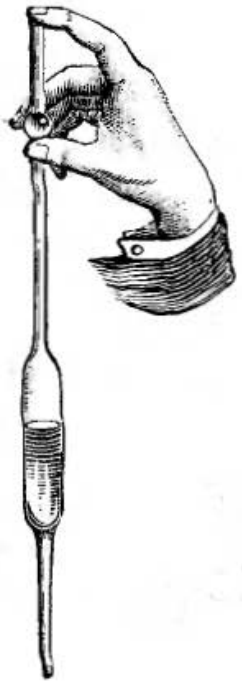


Fig. 113. Pipeta.

§ 3. Barometry.

Dotychczas przypuszczaliśmy, że ciśnienie powietrza jest wielkością stałą i że równa się ciśnieniu słupa wody, mającego $10^1/_3$ metra wysokości, albo słupa rtęci wysokości 76 centymetrów. Doświadczenie wszakże wykazało, że ciśnienie to zmienia się nietylko w różnych miejscach na ziemi, lecz także w jednem

i tem samem miejscu w różnych czasach. W ostatniej księdze niniejszego dzieła zajmiemy się bliższem zbadaniem związku, zachodzącego pomiędzy zmianami ciśnienia atmosferycznego a innemi zjawiskami powietrznemi, obecnie zaś zwrócimy się do opisu przyrządu, który pozwala oznaczać te wahania w wielkości ciśnienia; jestto tak zwany *barometr*, wynaleziony jeszcze przez Toricelli'ego. Zobaczymy, jakie kształty nadano temu przyrządowi w celu uczynienia go możliwie dla nas pożytecznym, oraz jakie zastosowano doń środki ostrożności, ażeby wskazówki jego były dokładne.

Najprostsza forma przyrządu, mianowicie taka, jaką się posługiwał Toricelli w swem doświadczeniu, pozostała zarazem formą typową. Wybiera się rurki szklane dość szerokie, mające 2 do 3 centymetrów w średnicy i możliwie proste; rurkę i naczynie przymocowuje się do płyty, którą zawiesza się w miejscu, wolnem od wszelkich wstrząśnień. Rtęć, użyta do barometru, musi być *bardzo czysta, dlatego też należy ją, za pomocą* rozcieńczonego kwasu azotnego, oczyścić starannie z zawartych w niej zwykle innych metali i tlenku rtęci. Oprócz tego, w rtęci nie powinny znajdować się pęcherzyki powietrza, ścianki zaś rurki muszą być wolne od wszelkiej wilgoci, albowiem gdyby powietrze i para wodna *zebrały się, wskutek swej lekkości, w górnej części* rurki po nad słupem rtęciowym, wywierałyby na ten ostatni ciśnienie tak, że zaobserwowana przez nas wysokość jego nie mogłaby służyć jako dokładna miara ciśnienia atmosferycznego. Zwykle tedy przed napełnieniem rurki, starannie się ją czyści i suszy, następnie zaś, po wprowadzeniu rtęci, poddaje silnemu ogrzewaniu tak, ażeby ciecz ta się zagotowała; pary rtęci uchodząc, porywają z sobą pęcherzyki powietrza, poczem sama rtęć przybiera wszędzie jednostajny blask metaliczny, co pokazuje, że jest ona już dostatecznie czysta i wolna od powietrza. Przez to, że rurka barometryczna jest dość szeroka, osiągamy tę korzyść, że zawarty w niej słup rtęciowy nie ulega obniżeniu wskutek włoskowatości i może być z całą dokładnością zmierzony.

Figura 114 przedstawia *barometr normalny*. Naczynie z rtęcią i rurka przymocowane są do drewnianej płyty; na dole

widać szrubkę, której dolny zaostrzony koniec, przed rozpoczęciem obserwacyi, wprowadza się w zetknięcie z powierzchnią rtęci w naczyniu. Odczytywanie wysokości barometrycznej odbywa się za pośrednictwem *katetometru*, to jest przyrządu, służą-

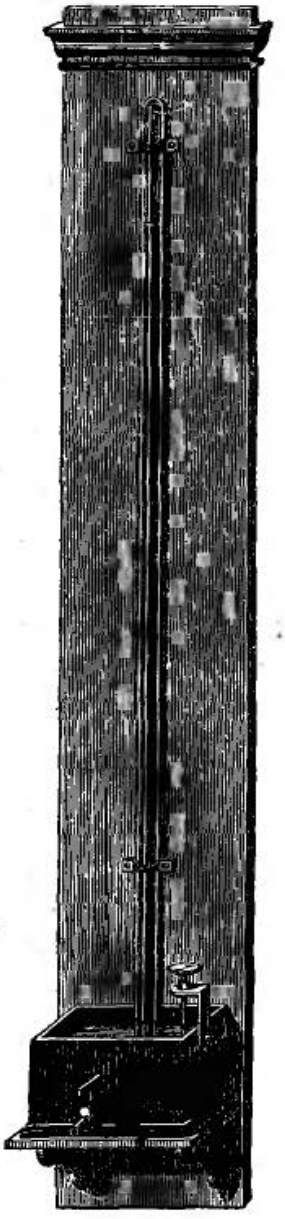


Fig. 114. Barometr normalny.

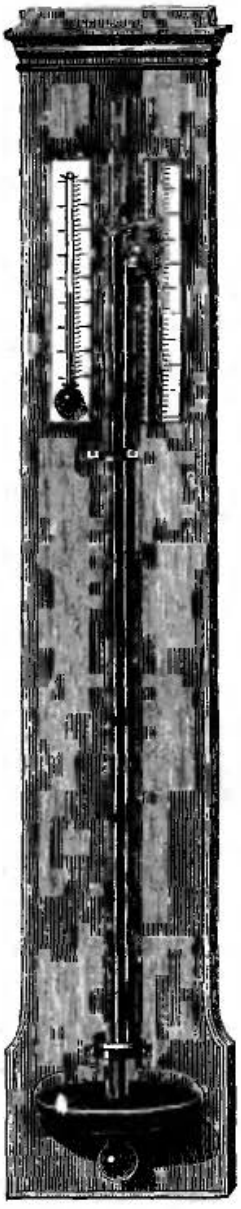


Fig. 115. Barometr naczyńkowy.

cego do bardzo dokładnego mierzenia pionowej odległości dwóch punktów; w zasadzie jestto pionowo stojący słup, podzielony na centymetry, wzdłuż którego przesuwa się luneta. Tę ostatnią skierowywa się najprzód na główkę szruby, a następnie na po-

ziom rtęci w rurce; ilość centymetrów, znajdująca się pomiędzy dwoma kolejnemi położeniami lunety, powiększona o długość samej szruby, t. j. o odległość główki od dolnego końca szrubki, stykającego się z rtęcią, daje nam wysokość barometryczną.

Barometr naczyńkowy (fig. 115, str. 152) różni się od poprzedniego pod dwoma względami. Po pierwsze, przymocowane do rurki szklane naczynie z rtęcią, jest tak szerokie, że pomimo wahań, jakim ulega słup rtęci w rurce, poziom tej cieczy w naczyniu możemy uważać za stały. Po drugie, na desce, podtrzymującej cały przyrząd, znajduje się skala, podzielona na milimetry; wzdłuż niej przesuwa się odpowiednio wydrążony kawałek metalu, do którego z kolei przymocowany jest pierścień, obejmujący samą rurkę. Pierścień ustawia się zawsze w ten sposób, ażeby górny jego brzeg znajdował się dokładnie na wysokości poziomu rtęci w rurce, ta zaś podziałka, naprzeciw której zatrzymuje się wtedy pierścień, odczytana na skali, daje nam bezpośrednio wysokość barometryczną. Rozumie się, że zero owej skali znajduje się na wysokości poziomu rtęci w naczyniu, który, jak powiedzieliśmy, uważany jest za stały. W istocie jednak poziom ten podnosi się nieco przy opadaniu rtęci w rurce, obniża się zaś przy jej podnoszeniu; oprócz tego, wskutek zmian temperatury, objętość naczynia i rurki oraz samej rtęci zmienia się tak, że przypuszczenie o stałości poziomu w naczyniu nie jest zupełnie słuszne. Dlatego też wskazówki barometru naczyńkowego nie są tak dokładne, jak wskazówki barometru poprzednio opisanego, szczególniej zaś baczną należy zwrócić uwagę na położenie zera skali, które od czasu do czasu poddawać trzeba ścisłej kontroli.

Barometr, zbudowany przez Fortin'a, jest wygodny z tego głównie względu, że daje się z łatwością przenosić z miejsca na miejsce, wskutek czego może być bardzo pożyteczny w podróży. W celu uczynienia go możliwie lekkim, Fortin musiał użyć rurki węższej, niż w normalnym barometrze, przez to jednak powiększa się wpływ włoskowatości tak, że do rezultatu każdej obserwacyi należy wprowadzić odnośną poprawkę. Figura 116 (str. 154) przedstawia w przecięciu walcowate naczynie barometru Fortin'a, zawierające rtęć; górna połowa ściany tegoż naczynia jest szklaną

tak, że można przez nią widzieć poziom rtęci. Od pokrywki naczynia schodzi do wnętrza metalowe ostrze i punkt, w którym dolny koniec ostrza styka się z rtęcią, stanowi zero skali barometrycznej, to znaczy, że do tej wysokości doprowadza się zawsze poziom rtęci w naczyniu, a to za pomocą bardzo dowcipnie obmyślonego sposobu: Mianowicie dno naczynia stanowi worek skórzany, którego położenie można regulować za pomocą szruby, przytwierdzonej do jego środka. Jeżeli wkręcamy szrubę, worek zostaje ściśnięty, przez co poziom rtęci w naczyniu podnosi się; przy przeciwnym zaś ruchu szruby, poziom ten się obniża. Przez środek pokrywki naczynia przechodzi rurka barometryczna ostro zakończona i zanurzona w rtęci; rurka i naczynie są połączone za pomocą skóry, mocno przywiązanej z jednej strony do przewężenia rurki, z drugiej zaś do wystającej ku górze części pokrywki. To połączenie, uniemożebniając wylanie się rtęci przy przewracaniu barometru, nie przeszkadza jednak działaniu ciśnienia atmosferycznego, które przenosi się bardzo dobrze po przez pory skóry na rtęć w naczyniu. Podczas podróży należy tak wkręcić szrubę, ażeby rtęć całkowicie wypełniła rurkę i naczynie; wtedy można barometr nachylać, albo nawet przewracać, nie obawiając się przytem, że wejdzie doń powietrze lub że rtęć, wskutek ruchu swego, stłucze rurkę. Cały przyrząd umieszcza się w futerale, to jest w rurze mosiężnej, chroniącej go od uderzeń; w miejscu gdzie znajduje się poziom rtęci w rurce barometrycznej, na rurze mosiężnej są zrobione dwie długie szpary, jedna naprzeciwko drugiej, ułatwiające obserwacyę. Na brzegach tych szpar wyrytą jest skala barometru. W czasie obserwacyi zawiesza się przyrząd na trójnogu, przyczem, dzięki własnemu ciężarowi, przyjmuje on położenie pionowe (fig. 117).

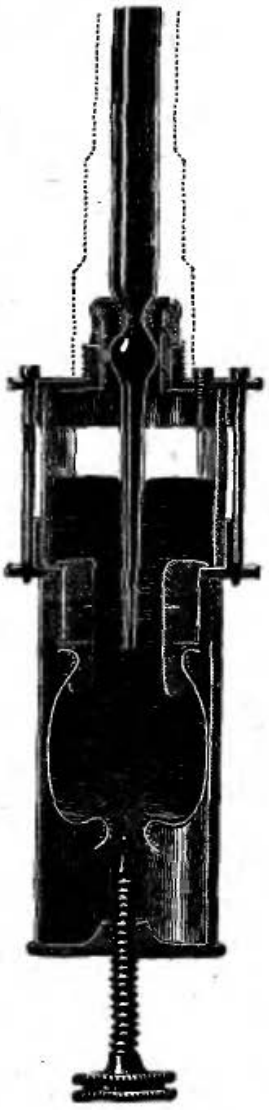


Fig. 116. Naczynie barometru Fortin'a.

Figura 118 przedstawia barometr, zbudowany przez Gay-Lussac'a. Składa się on ze szklanej rurki, zgiętej w dwa nierównej wielkości ramiona: jedno dłuższe, zamknięte u góry, napełnione jest rtęcią, jak w barometrze naczyńkowym, drugie za-—

Fig. 117. Barometr Fortin'a. Ustawienie w podróży.

krótkie, posiada z boku mały otwór i odgrywa rolę naczynia. Oczywiście, że wysokość barometryczna równa się pionowej odległości poziomów rtęci w obu ramionach. W celu łatwiejszego przenoszenia przyrządu, bez wpuszczania doń powietrza, Gay-

Lussac połączył oba jego ramiona za pomocą rurki włoskowatej (fig. 119). Przy przewracaniu barometru, rurka ta wskutek swej włoskowatości, pozostaje zawsze pełna i powietrze nie może przeniknąć przez nią do dłuższego ramienia. Gay-Lussac sądził, że, ponieważ oba ramiona rurki mają jednakową średnicę, wpływ obniżenia włoskowatego można pominąć, o ile bowiem rtęć w jednem ramieniu się obniża, o tyle też obniża się i w drugiem, pionowa więc odległość obu poziomów pozostałaby niezmienioną; niestety jednak przekonano się, że włoskowatość działa inaczej w przestrzeni, napełnionej powietrzem, a inaczej w próżni. Pomijając tę niedokładność, musimy przyrząd ten uważać za bardzo wygodny, zajmuje on bowiem mało miejsca i łatwo daje się przenosić, przyczem zawsze należy go zupełnie przewrócić.

Fig. 118. Barometr Gay-Lussac'a.

Fig. 119. Rurka w barometrze Gay-Lussac'a.

W końcu wspomnimy jeszcze o *barometrach aneroidach*, które w ostatnich latach znalazły bardzo szerokie zastosowanie i które polegają na wzajemnem działaniu ciśnienia atmosferycznego i sprężystości cienkich metalowych blaszek. Bourdon mianowicie znalazł przez obliczenie, że rurka z cienkiej blachy mosiężnej łatwo ulega wpływowi ciśnienia powietrza, gdy przecięcie jej przedstawia płaską elipsę i gdy, po wypompowaniu z niej powietrza, zegniemy ją w całkowite prawie koło. Rurkę taką, której powiększone przecięcie widać oddzielnie na rysunku (fig. 120 *S*, str. 157), Bourdon przymocował w jej środku, a obadwa końce połączył za pomocą dwu-

ramiennej dźwigni, której ruchy udzielają się łukowi, zaopatrzonemu w zęby. Te ostatnie wchodzą z kolei pomiędzy zęby kółka, do którego przytwierdzona jest wskazówka. Całość zamknięta jest w płytkiem pudełku, na pokrywce którego znajdują się wokoło podziałki, oznaczone liczbami, odpowiadającemi wskazaniom zwykłego barometru; przed temi podziałkami posuwa się wskazówka. Gdy ciśnienie powietrza wzrasta, rurka barometru zgina się, końce jej obracają dźwignię, której ruch przenosi się na wskazówkę, ta zaś ostatnia zatrzymuje się przed podziałką, oznaczoną taką samą cyfrą jak podziałka, przy której znalazłby się poziom rtęci w zwyczajnym barometrze. Gdy ciśnienie atmosferyczne słabnie, rurka rozgina się, a wskazówka porusza się w kierunku przeciwnym. Skonstatowano, że wahania barometru ściśle zależą od zmian w kierunku wiatrów: w ogóle barometr stoi najwyżej podczas wiatru północno-wschodniego, najniżej zaś, gdy wieje wiatr południowy lub południowo-zachodni. Z kolei zmiany wiatru pozostają w ścisłym związku ze zmianą pogody tak, że w środkowej np. Europie wiatr południowo-zachodni sprowadza deszcz; wiatr północno-wschodni zaś—piękną pogodę. A więc gdy barometr stoi wysoko, mamy pogodę, spadek zaś jego zwiastuje deszcz i wiatr; średnie położenie odpowiada stanowi przejściowemu. Barometr może tedy służyć do przepowiadania pogody i dlatego też często znajdujemy na nim, jak w barometrze Bourdon'a, obok podziałek, oznaczających wielkość ciśnienia atmosferycznego, napisy: piękna pogoda, zmiana, deszcz, burza, susza i t. d. W ogóle jednak te wskazówki meteorologiczne są prawdziwe tylko w pewnych bardzo niewielkich granicach. Podobnemi nazwami, przepowiadającemi stan pogody, oznaczone są podziałki innego barometru aneroidu,

Fig. 120. Barometr-aneroid Bourdon'a.

zbudowanego przez Vidi'ego (fig. 121). Rurka metalowa zastąpiona jest tutaj przez pudełko, zawierające rozrzedzone powietrze; pokrywka jego zrobiona jest z bardzo cienkiej karbowanej blachy miedzianej. Ażeby ciśnienie atmosferyczne, działając na pokrywkę pudełka, nie wcisnęło jej zupełnie, umieszcza się na niej dużą sprężynę, która przeciwdziała temuż ciśnieniu. Gdy to osta-

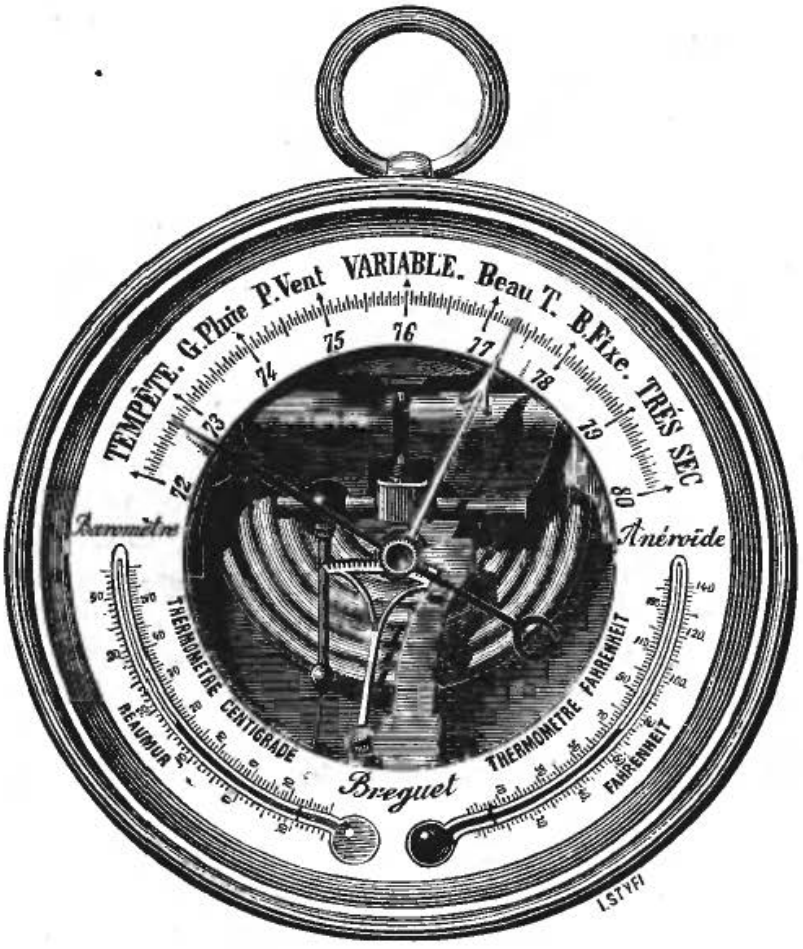


Fig. 121. Barometr-aneroid podług Vidi'ego.

tnie wzrasta, przezwycięża ono nieco elastyczność sprężyny i ściska silniej pudełko; przy zmniejszonem natomiast ciśnieniu, sprężyna pociąga pokrywkę napowrót do góry. Ruchy te przenoszą się za pośrednictwem systemu sprężyn i drążków, na wskazówkę, poruszającą się po cyferblacie.

Barometry-aneroidy przedstawiają tę wielką korzyść, że z największą łatwością dają się przenosić i są wygodne do użу-

cia. Najgorsza zaś ich strona jest ta, że sprężystość metali z czasem zmienia się nieco, wskutek czego trzeba koniecznie od czasu do czasu sprawdzać ich skale ze wskazaniami barometru normalnego.

Powiedzieliśmy wyżej, że Pascal, chcąc stwierdzić teoryę Galileusza i Toricelli'ego, wykonał doświadczenie z barometrem, które posłużyło za punkt wyjścia dla jednej z metod mierzenia wysokości gór. Otóż jeżeli wiadomo, jaki jest stosunek ciężaru właściwego powietrza w danym punkcie obserwacyjnym do ciężaru właściwego rtęci (1), można z tego obliczyć wysokość słupa powietrza, odpowiadającego słupowi rtęci, który równa się różnicy wysokości barometrycznych przy podstawie i na wierzchołku góry. Wiemy już, że litr powietrza przy temperaturze 0^0 i przy ciśnieniu 760 milimetrów (jedna atmosfera) waży $1^{gr.},23$, litr zaś rtęci—13596 gramów; rtęć tedy jest 10,500 razy cięższa od powietrza przy rzeczonych warunkach ciśnienia i temperatury. Jeżeli, przy ciśnieniu 760 milimetrów, to jest średniem ciśnieniu na poziomie morza i przy temperaturze 0^0, wzniesiemy się tak wysoko, że barometr obniży się o 1 milimetr, wtedy warstwa powietrza, przez którą przeszliśmy, musi tak cisnąć, że utrzymuje w równowadze słup rtęci, wysoki na 1 milim., to znaczy, że ona sama musi mieć 10,500 milim., czyli $10^{metra},5$ wysokości. W przytoczonych więc warunkach różnica stanów barometrycznych równa 1 milim., odpowiadałaby wysokości $10^{metr.},5$.

Lecz im wyżej wznosimy się w powietrzu, tem mniejszem jest ciśnienie, a więc tem mniejszy także jest ciężar właściwy powietrza, które rozszerza się w tym samym stopniu, w jakim ciśnienie się zmniejsza (2); w miarę tedy wznoszenia się, potrzeba coraz grubszej warstwy powietrza do zrównoważenia 1 milimetrowego słupa rtęci. Halley i Newton pierwsi wygłosili prawo matematyczne, według którego można obliczyć różnicę w wysokości dwu punktów z różnicy długości słupów barometrycznych w tychże punktach; odnośną wszelako używaną formułę, uwzględniającą

(1) Stosunek ten pokazuje, ile razy rtęć jest cięższa od badanego powietrza.

(2) O związku między objętością gazu i ciśnieniem patrz niżej Roz. X, § 1.

wszystkie warunki, zawdzięczamy Laplace'owi. Nie możemy wdawać się tutaj w bliższy rozbiór tej formuły, dla zrozumienia której trzeba posiadać więcej wiadomości matematycznych, niż mamy prawo u czytelników przypuszczać.

Oprócz ciśnienia, należy jeszcze, przy omawianych tutaj obserwacyach, uwzględniać temperaturę. Pod wpływem bowiem ciepła rtęć się rozszerza i jej ciężar właściwy zmniejsza się tak, że to samo ciśnienie powietrza równoważy wyższy słup ciepłej rtęci, niż zimnej, dlatego też przy barometrze znajduje się zwykle przyrząd do mierzenia temperatury czyli termometr, według wskazówek którego robi się odpowiednią poprawkę. Powietrze, będąc ogrzewane, rozszerza się daleko więcej, niż rtęć tak, że przy oznaczaniu jego ciężaru właściwego musimy uwzględnić temperaturę w danych dwóch miejscach obserwacyi. Wreszcie para wodna, zawarta w powietrzu, wywiera również ciśnienie na rtęć w barometrze; wielkość tego ciśnienia powinna także być uwzględniona przy dokładnem określeniu wysokości barometrycznej.

§ 4. Pompy. Syfon.

Historya odkryć powiada nam, że jakkolwiek fakt ciśnienia powietrznego poznano i objaśniono nie dalej jak 200 lat temu, to zastosowanie praktyczne tego ciśnienia sięga epoki o wiele odleglejszej. Galileusz i Toricelli podali teoryę ciśnienia atmosferycznego, pompę zaś czyli studnię wynalazł o wiele dawniej Ktezybiusz, sławny matematyk i fizyk, który żył w Aleksandryi na 130 lat przed Nar. Chr., a więc około 100 lat po Archimedesie.

Obecnie przystępujemy do opisu rozmaitych pomp, przyczem szczególną będziemy zwracali uwagę na samą zasadę ich urządzenia.

Jeżeli zanurzymy w wodzie wydrążony walec, na dnie którego znajduje się otwór i w którym porusza się szczelnie przystający tłok, zobaczymy, że przy całkowitem zepchnięciu tego ostatniego aż na dno walca i następnem podniesieniu go do góry, woda wejdzie do walca (fig. 122, str. 161). Wiemy już, że dzieje się to wskutek próżni, powstającej pod tłokiem oraz wskutek ci-

śnienia atmosferycznego, działającego na zewnętrzny poziom wody. Przypuśćmy, że wysokość walca wynosi więcej niż $10^1/_3$ metra i że jest podostatkiem wody w zewnętrznem naczyniu; ciecz podniesie się jednak tylko do wysokości $10^1/_3$ metra i zatrzyma na tym poziomie, pomimo iż będziemy dalej tłok podnosili do góry. Słup bowiem wody rzeczonej wysokości akurat równoważy ciśnienie atmosfery; dlatego też robotnicy florenccy

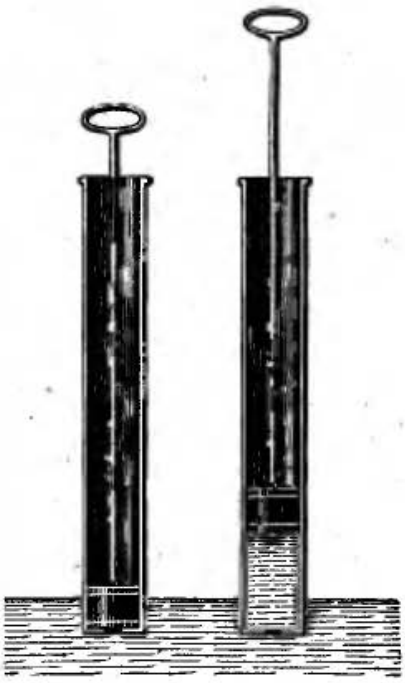


Fig. 122. Zasada pompy ssącej.

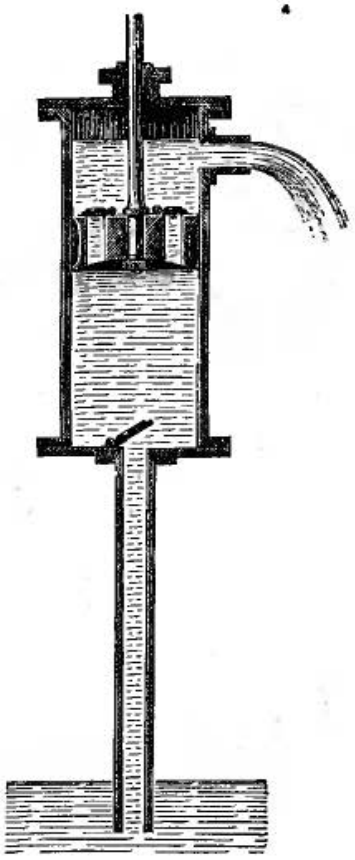


Fig. 123. Szemat pompy ssącej.

(patrz str. 144) nie mogli podnieść wody w studni na większą wysokość.

W sposób dopiero co opisany urządzone są zwykłe ręczne strzykawki; na tej samej także zasadzie polegają najbardziej używane pompy, które otrzymały nazwę *ssących* od tego, że podczas podnoszenia tłoka wsysają w siebie daną ciecz. Właściwy walec takiej pompy czyli trzon wydłuża się w węższą rurę, zwaną ssącą, którą zanurza się w wodzie (fig. 123); w miejscu, gdzie trzon i rura stykają się, znajduje się klapa, otwierająca się tylko

do góry; sam zaś tłok jest przedziurawiony w dwóch lub więcej miejscach, a każdy z otworów zaopatrzony jest w klapę, podnoszącą się również tylko do góry. Łatwo zrozumieć, co zachodzi przy kolejnem podnoszeniu i opuszczaniu tłoka: przy pierwszem podniesieniu, powietrze, znajdujące się pod tłokiem, rozszerza się i nie ciśnie tak silnie jak przedtem (1); dlatego też zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne wpędza nieco wody do rury ssącej, przez co znów powietrze zostaje wciśnięte do trzonu pompy. Gdy spuszczamy tłok, ściskamy powietrze w trzonie, wskutek czego dolna klapa zamyka się tak, że powietrze to może wyjść na zewnątrz tylko przez otwory tłoka, których klapy samo sobie odmyka. To samo powtarza się za każdem następnem podniesieniem i opuszczeniem tłoka tak, że w końcu woda dostaje się z rury do trzonu, poczem przechodzi przez otwory tłoka, zbiera się nad nim i wypływa wreszcie przez boczną rurę, znajdującą się w górnej części trzonu.

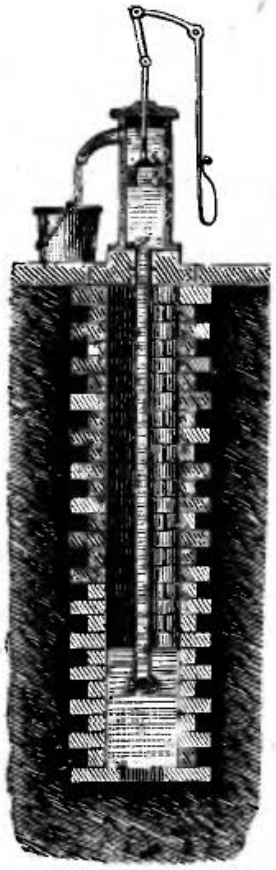


Fig. 124. Pompa ssąca.

Według teoryi należałoby przypuścić, że długość rury studziennej może wynosić $10\frac{1}{3}$ metr., doświadczenie jednak pokazało, że długość 7 do 8 metrów przedstawia największą wartość, możliwą do osiągnięcia w danym razie. Pochodzi to ztąd, że tłok i klapy nigdy nie przystają tak szczelnie, ażeby powietrze wcale do wnętrza pompy przedostać się nie mogło; oprócz tego, w wodzie znajdują się zawsze pęcherzyki powietrza, które zbierają się po nad nią i przeciwdziałają, jakkolwiek słabo, ciśnieniu atmosferycznemu. Dlatego też pompy ssące zakłada się tylko przy źródłach, nie leżących głębiej nad 7—8 metrów poniżej punktu, do którego należy podnosić wodę, inaczej bowiem ciśnienie powietrza nie wystarczyłoby do wpędzenia wody do pożądanej wysokości.

---

(1) Patrz niżej Roz. X, § 1.

Figura 124 (str. 162) przedstawia pompę ssącą, założoną przy takiem niezbyt głębokiem źródle.

W *pompie tłoczącej* (fig. 125) walec, w którym porusza się tłok, jest tak głęboko zanurzony w wodzie, że ta ostatnia wchodzi doń pod wpływem zewnętrznego ciśnienia samej cieczy, podobnie jak to ma miejsce w naczyniach połączonych; walec nadto u dołu jest zamknięty przez klapę, otwierającą się tylko do góry. Tłok jest pełny i przy podnoszeniu go do góry, woda wchodzi do trzonu pompy, przy obniżaniu zaś zostaje wciśnięta do bocznej rurki, przez którą wypływa na zewnątrz. Nakoniec w pompie *ssąco-tłoczącej* (fig. 126), łączącej w sobie obadwa systemy, woda zostaje wessana przez rurę ssącą i wprowadzona do trzonu pompy, zkąd znów tłok wtłacza ją do bocznej rurki. Pompy ssąco-tłoczące zakładane są przy głębokich źródłach, z których woda zostaje najprzód wessaną przez pompę ssącą do pewnej wysokości, zkąd dopiero za pomocą przyrządu tłoczącego wydostaje się ją na zewnątrz. Opisane pompy dają strumień przerywany, woda bowiem wypływa przez nie tylko przy spychaniu (fig. 126), albo tylko przy podnoszeniu (fig. 123) tłoka. W celu uniknięcia tej niewygody, zbudowano pompy podwójnie i jednocześnie działające, to jest takie, które zarówno przy podnoszeniu, jak

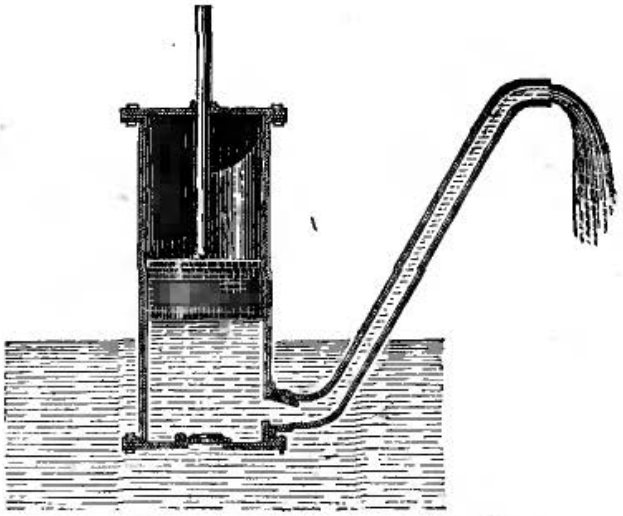


Fig. 125. Szemat pompy tłoczącej.

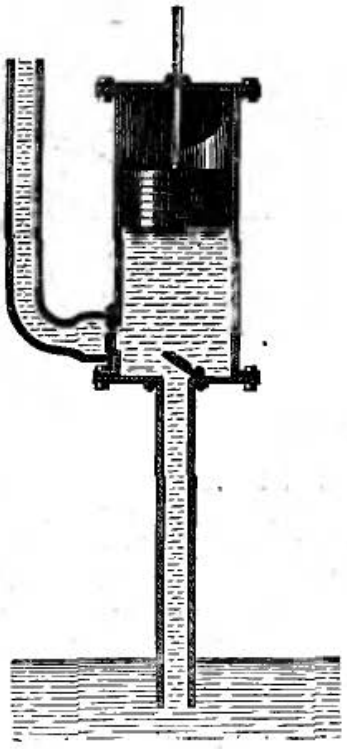


Fig. 126. Szemat pompy ssąco-tłoczącej.

i opuszczaniu tłoka, wsysają z jednej strony wodę, z drugiej zaś wtłaczają ją do trzonu.

Do przeprowadzania cieczy z jednego naczynia w drugie używa się bardzo często przyrządu, zwanego *syfonem*, również polegającego na działaniu ciśnienia powietrza. Syfon składa się z rurki, zgiętej w dwa nierównej długości ramiona (fig. 127); rurkę tę napełnia się daną cieczą i zanurza krótszem ramieniem w naczyniu, z którego ciecz ma być wylaną. Ta ostatnia wypływa wtedy przez otwór dłuższego ramienia, a ruch ten trwa tak długo,

Fig. 127. Syfon.

dopóki krótsze ramię zanurzone jest w cieczy. Ażeby zrozumieć sposób działania syfonu, należy zauważyć, że ciśnienie, wywierane na poziom $A\ B$ cieczy (fig. 128, str. 165) i zmuszające ją do wypływu w kierunku od C do F, równa się ciśnieniu atmosferycznemu, zmniejszonemu o ciężar słupa wody od tegoż poziomu do górnej ścianki rurki. Ciśnienie zaś, wywierane na ciecz w F, pchające ją w kierunku przeciwnym—od F do C, równa się ciśnieniu atmosferycznemu, mniej ciężar słupa wody od poziomu w F do górnej ścianki rurki. Otóż ten ostatni słup jest większy od po-

przedniego o długość $I K$, z czego wynika, że ciśnienie, działające w F jest mniejsze od ciśnienia w $A B$; ciecz też płynie w kierunku większego ciśnienia. Szybkość przepływu jest tem większa, im większa jest różnica wysokości poziomów przy otworze dłuższego ramienia syfonu i w naczyniu $A B$. Ponieważ ciśnienie powietrza, wywierane na poziom $A B$, wciska ciągle ciecz do rurki, wypływ z niej jest ciągły, lecz w miarę ubywania cieczy z naczynia, coraz to wolniejszy.

Zależnie od natury cieczy, mającej być przelaną, nadaje się syfonom rozmaite kształty oraz używa rozmaitych sposobów ich napełniania; jeżeli dane ciecze nie są dla nas szkodliwe lub nieprzyjemne, można koniec dłuższego ramienia rurki wziąć w usta, koniec zaś krótszego zanurzyć w naczyniu i napełnić syfon, wsysając ciecz ustami.

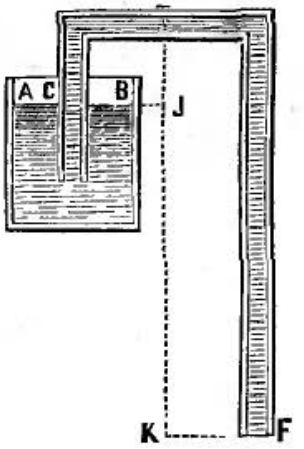


Fig. 128. Zasada syfonu.

Jamistości w ziemi zdają się niekiedy przyjmować kształt syfonów, co pozwala objaśnić niektóre zadziwiające zmiany stanu wód w jeziorach. Tak naprzykład w górach Karstu, w blizkości miasta Zyrknitz, leży jezioro, które od czasu do czasu dość szybko wysycha i następnie znów zostaje zasilone przez podziemne źródła. Przypuszczają, że dno tego jeziora jest połączone z rurowatemi jamistościami, wstępującemi najprzód do góry, a następnie znów obniżającemi się; jamistości te z kolei dochodzą do jakiegoś stałego zbiornika wody, z którego ta ostatnia przelewa się przez nie do jeziora tak długo, dopóki poziom w niem nie znajdzie się na tej samej wysokości, co najwyższy punkt rury podziemnej.

ROZDZIAŁ X.

Ściśliwość i rozprężliwość gazów.

§ 1. Prawo Boyle'a — Mariotte'a. Manometry.

Charakterystyczną cechą gazów, odróżniającą je od cieczy, jest ich dążność do zajmowania każdej wolnej przestrzeni, którą to własność nazywamy *rozprężliwością* gazów. Wskutek tej własności, której istotną naturę poznamy dopiero w końcu księgi o cieple, gazy wywierają ze wszech stron ciśnienie na ściany, ograniczające naczynie, w którem są zawarte, a gdy ściany te są ruchome, wtedy rozsuwają się one albo zbliżają tak długo, dopóki ciśnienie czyli *prężność* gazu, zamkniętego w naczyniu, nie wyrówna się z ciśnieniem zewnętrznem (patrz doświadczenie, przedstawione na fig. 106, str. 142). Gazy więc, w odróżnieniu od ciał stałych i ciekłych, nie posiadają samodzielnej objętości, ta ostatnia bowiem zależy od ciśnienia, pod jakiem się znajdują (jak to pokazują już doświadczenia, przedstawione na fig. 106 i 107). A że gęstość jednej i tej samej ilości wagowej danego ciała jest oczywiście tem większa, im mniejsza jest jego objętość i naodwrót, ta ostatnia zaś u gazów zależną jest od ciśnienia, przeto i gęstość danej masy gazu zmienia się wraz z ciśnieniem. Zachodzi teraz pytanie, jaką jest ta zależność objętości i gęstości gazu od ciśnienia, pod jakiem on się znajduje, innemi słowy, według jakiego prawa zmieniają się te trzy zależne od siebie wielkości. Odnośne prawo odkryte zostało prawie jednocześnie przez uczonego angielskiego Boyle'a w r. 1662 i przez fizyka francuzkiego Mariotte'a w r. 1679. Możemy je sformułować jak następuje: *Objętość gazu, przy stałej temperaturze, jest odwrotnie proporcyonalna do wywieranego nań ciśnienia, gęstość zaś jego—wprost proporcyonalna do tegoż ciśnienia.* Druga część tego prawa wprost wynika z pierwszej: jeżeli bowiem wskutek zdwojonego naprzykł. ciśnienia, objętość danej masy gazu zmniejszyła się 2 razy, wtedy w każdej jednostce jego objętości mamy 2 razy więcej masy, niż poprzednio, gaz więc ten jest teraz dwa razy gęściejszy.

Opiszemy tu doświadczenia Mariotte'a, które doprowadziły go do odkrycia rzeczonego prawa. Bardzo długą rurę szklaną zgiął on w dwa ramiona, z których jedno krótsze u góry zalutował, drugie zaś zostawił otwarte; wzdłuż obu ramion rury, przytwierdzonej do deski drewnianej, znajdowała się skala, dozwalająca odczytywać z jednej strony objętość zamkniętego w krótszem ramieniu powietrza, z drugiej zaś—wysokość słupa rtęci, służącego za miarę ciśnienia, pod jakiem znajdował się zamknięty gaz (fig. 129). Do rurki tej wlał z początku tyle rtęci, aby w obu ramionach sięgała do 0 skali, przez co zamknął w krótkiem ramieniu określoną objętość powietrza, w wypadku przedstawionym na figurze—25 centym. sześcien., pod ciśnieniem jednej atmosfery; zewnętrzne bowiem powietrze ciśnie na powierzchnię rtęci w otwartem ramieniu i, według prawa Pascala, przenosi się przez całą masę rtęci na powietrze, zawarte w krótszem ramieniu. Gdy następnie dolewał rtęci, poziom jej w obu ramionach się podnosił, lecz w krótszem ramieniu o wiele mniej, niż w długiem tak, że gdy w pierwszem doszła do $12\frac{1}{2}$ podziałki, a więc gdy zamknięte powietrze zajmowało tylko połowę pierwotnej objętości, poziom rtęci w długiem ramieniu stał o 76 cent., czyli o 760 milim. wyżej, niż w krótkiem. Wtedy jednak zamknięty gaz doznaje ciśnienia 2 atmosfer, oprócz bowiem ciśnienia zewnętrznego powietrza, podlega ono jeszcze ciśnieniu słupa rtęci na 760 milim. wysokiego, równającego się, jak już wiemy, ciśnieniu 1 atmosfery. Przy dalszem dolewaniu rtęci dopóty, dopóki różnica poziomów tej cieczy w obu ramionach nie stawała się równą 2, 3, 4 i t. d. razy wziętej wysokości barometrycznej, objętość zamkniętego w krót-

Fig. 129. Rurka do doświadczeń nad prawem Boyle'a—Mariotte'a dla ciśnień, większych od 1 atmosfery.

kiem ramieniu powietrza zmniejszała się do $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_5$ i t. d. pierwotnej objętości.

W celu sprawdzenia prawa Boyle'a—Mariotte'a dla ciśnień, mniejszych od jednej atmosfery, możemy użyć metody, jaką w zasadzie posługiwał się już sam Mariotte. Możliwie walcowatą rurkę barometryczną, zaopatrzoną w podziałki, napełniamy całkowicie rtęcią, jak to się czyni przy sporządzaniu barometru, zamykamy otwór palcem i, odwróciwszy ją zamkniętym końcem do góry, zanurzamy drugi koniec w rtęci, znajdującej się w długiem naczyniu *PM* ze szkła—albo lepiej jeszcze z lanego żelaza—tak, jak to pokazuje fig. 130. Do utworzonej próżni barometrycznej wprowadzamy za pomocą odpowiedniej rurki nieco suchego powietrza, przyczem rtęć w rurce natychmiast opada; spychamy wtedy rurkę w żelazne naczynie dopóty, dopóki rtęć w rurce i w naczyniu nie stanie na tym samym poziomie (patrz lewą stronę figury). Podziałka, przy której staje wtedy rtęć w rurce, pokazuje nam objętość zamkniętego w niej powietrza *A B*, znajdującego się pod ciśnieniem 1 atmosfery. Następnie wyciągamy rurkę,—tak jednak, aby koniec jej znajdował się jeszcze pod rtęcią,—wtedy objętość zamkniętego w niej powietrza się zwiększa, jednocześnie jednak rtęć podnosi się i staje wyżej niż w naczyniu. Różnica pomiędzy wysokością barometryczną a wysokością podniesionego w rurce słupa rtęci pokazuje nam ciśnienie, wywierane na zamknięty gaz: Na zewnątrz bowiem rurki rtęć doznaje ciśnienia atmosfery, równającego się ciśnieniu słupa rtęci

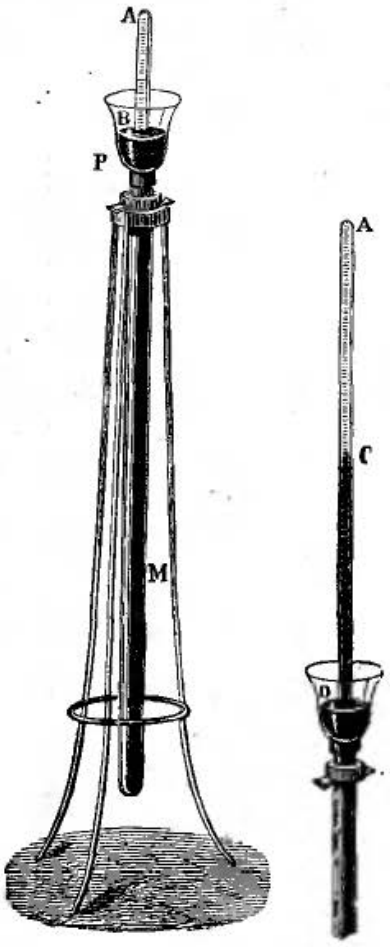


Fig. 130. Doświadczalny dowód prawa Boyle'a—Mariotte'a dla ciśnień mniejszych od 1 atmosfery.

o wysokości barometrycznej, które wewnątrz rurki zostaje częściowo zrównoważone przez ciśnienie podniesionego słupa rtęci; nadmiar przeto wysokości barometrycznej nad wysokością podniesionego w rurce słupa rtęci pokazuje ciśnienie, wywierane na zamknięty gaz; ten ostatni z drugiej strony, wywiera, wskutek swej rozprężliwości, takie same ciśnienie na ściany i na rtęć. Wyciągnąwszy rurkę tak wysoko, aby powietrze zajęło dwa razy większą objętość *A C*, niż w początku doświadczenia (t. j. wtedy, gdy rtęć w naczyniu i w rurce stoi na jednakowym poziomie), przekonamy się, że rtęć podnosi się w rurce na długość *D C*, o 380 milimetr. (1) wyżej, niż w naczyniu, a więc powietrze w rurce doznaje ciśnienia $^1/_2$ atmosfery (760—380). Tak samo przy powiększaniu objętości powietrza 3, 4, 5 i t. d. razy, zmniejszamy tyleż razy wywierane na nie ciśnienie oraz ciśnienie samego zamkniętego gazu, przez co powyższe prawo zostaje dowiedzione i w wypadku ciśnień mniejszych, niż 1 atmosfera.

Na objętość gazu, oprócz ciśnienia, wywiera jeszcze znaczny wpływ temperatura tak, że prawo Boyle'a—Mariotte'a, wyrażające jedynie związek pomiędzy objętością gazu a jego ciśnieniem, jeżeli w ogóle jest słuszne, to tylko przy niezmiennej temperaturze. Otóż przy powyższej metodzie eksperymentowania, bardzo trudno jest utrzymać badany gaz przy stałej temperaturze, czego Mariotte wcale nie uwzględnił tak, że opisane doświadczenia nie są dostatecznie dokładne. Oprócz tego, posługując się rzeczoną metodą, można tylko w ciasnych granicach zmieniać ciśnienie, wywierane na gaz. W obec wielkiej doniosłości omawianego tu prawa, ważną atoli jest rzeczą wiedzieć, czy jest ono słuszne dla wszystkich gazów i dla wszelkich ciśnień, a dalej czy jest ono ściśle, czy też tylko przybliżenie dokładne. Od czasów też Boyle'a i Mariotte'a kwestyą tą zajmowało się wielu fizyków, jak Oersted i Swendsen, Despretz, Arago i Dulong, Pouillet, Régnault, Natterer, Cailletet i inni; zwłaszcza zaś Régnault'owi, który posługiwał się ulepszoną metodą Mariotte'a

(1) Dla uproszczenia sobie zadania, przyjmujemy, że w czasie doświadczeń wysokość barometryczna wynosi 760 milimetrów.

i ściśle uwzględnił warunek, aby temperatura badanego gazu podczas doświadczenia się nie zmieniała, zawdzięczamy najrozleglejsze doświadczenia w tej mierze. Dla braku miejsca nie możemy się tu wdawać w szczegóły tych badań, dotyczących zachowania się powietrza oraz innych gazów, ograniczymy się więc tylko na podaniu ogólnych rezultatów.

Pod omawianym tu względem gazy można podzielić na dwie grupy: do pierwszej należą takie, które bardzo trudno dają się skroplić, jak powietrze, tlen, azot, wodór, tlenek węgla i niektóre inne; do drugiej zaś zaliczamy gazy, łatwo dające się skroplić, jak kwas węglany, amoniak, siarkowodór, dwutlenek siarki i t. d. Gazy, należące do pierwszej grupy, poddane ciśnieniu, nie przekraczającemu kilku atmosfer, tak mało zbaczają od prawa Boyle'a—Mariotte'a, że, bez popełnienia znacznego błędu, możemy prawo to dla rzeczonych gazów uważać jako ściśle dokładne. Jednakowoż wypada nadmienić, że podczas gdy, przy ciśnieniach aż do 30 atmosfer, powietrze, tlen, azot i tlenek węgla są nieco więcej ściśliwe, niż tego wymaga prawo—t. j. że naprzykład objętość ich zmniejsza się nieco więcej niż 2 razy, jeżeli podwajamy wywierane na nie ciśnienie,—jeden gaz—wodór, przeciwnie, jest nieco mniej ściśliwy. Rzecz się zmienia przy bardzo znacznych ciśnieniach, wtedy mianowicie, jak to wykazał Natterer, wszystkie gazy, należące do 1 grupy, zachowują się podobnie jak wodór: przy wzrastającem ciśnieniu, zostają one o wiele mniej ściśnione, niż tego wymaga prawo Boyle'a—Mariotte'a. Zupełnie inaczej zachowują się gazy, które zaliczyliśmy do 2 grupy: wszystkie one, nawet przy ciśnieniu kilku atmosfer, zostają silniej ściśnione, niż wypada z owego prawa. Dalej wykazano dla kwasu węglanego i kilku innych gazów, że zboczenia ich od prawa Boyle'a—Mariotte'a stają się tem mniejsze, im wyższą jest ich temperatura, a względy teoretycznej natury każą przypuszczać, że każdy gaz przy pewnej dostatecznie wysokiej temperaturze ściśle stosowałby się do tego prawa.

Zobaczymy w księdze o cieple, że wszystkie gazy dają się przeprowadzić w stan ciekły, innemi słowy że mogą być skroplone przez mniej lub więcej znaczne obniżenie temperatury

i zwiększenie ciśnienia; przeciwnie, im wyższa jest ich temperatura i im mniejsze wywierane na nie ciśnienie, a więc także im bardziej są rozrzedzone, tem bardziej oddalają się one od punktu swego skroplenia. Możemy więc, jak to wyraźnie pierwszy uczynił Régnault, ogólny wynik doświadczalny rozważanych tu badań sformułować w ten sposób, że *każdy gaz tem ściślej się stosuje do prawa Boyle'a—Mariotte'a, im więcej jest oddalony od punktu swego skroplenia*, t. j. im wyższa jest jego temperatura i im większy jest stan jego rozrzedzenia.

Dalton pierwszy wykazał prawo, że *ciśnienie, wywierane przez mięszaninę kilku gazów, równa się sumie ciśnień pojedyńczych jej części składowych.* Jeżeli naprzykład mamy mięszaninę z 1 części tlenu i 4 azotu pod ciśnieniem 1 atmosfery, to cząstkowe (parcyalne) (1) ciśnienie pierwszego gazu wynosi $^1/_5$, drugiego zaś—$^4/_5$ jednej atmosfery. Według tego więc prawa, każdy gaz wywiera takie same ciśnienie, niezależnie od tego, czy wprowadzamy go do przestrzeni, w której znajduje się już inny gaz, czy do próżni. Ciśnienie zewnętrznej atmosfery składa się tedy z oddzielnych ciśnień cząstkowych azotu, tlenu, pary wodnej, kwasu węglanego i t. d., i mówiąc o ciśnieniu, dajmy na to, tlenu atmosferycznego, mamy na myśli tę część ogólnego ciśnienia atmosfery, która przypada na ten gaz.

Przyrządy, służące do oznaczania prężności gazów i par, zowią się *manometrami.* We wszystkich tych przyrządach za jednostkę miary przyjęto jednę atmosferę, czyli ciśnienie powietrza, gdy barometr pokazuje 760 milimetrów, a wiemy, że ono równa się ciśnieniu, wywieranemu przez ciężar $1^{\text{kilogr.}},33$ na każdy centymetr kwadratowy. Jeżeli gaz jest w stanie utrzymać w równowadze słup rtęci, wysoki na 1, 2, 3 razy 760 milimetrów, powiadamy, iż prężność tego gazu jest równa ciśnieniu 1, 2, 3 atmosfer.

Manometr otwarty (fig. 131, str. 172) składa się z wysokiej rurki, której górny koniec swobodnie komunikuje z atmosferą, dolny zaś jest połączony z szerszym zbiornikiem *A;* z kolei ten

(1) Od łacińskiego wyrazu pars—część.

ostatni, za pomocą rurki C łączymy z naczyniem, zawierającem dany gaz lub parę, których prężność mamy oznaczyć. Zbiornik A jest napełniony rtęcią i wraz z rurką manometryczną przymocowany do długiej deseczki, zawieszonej pionowo. W celu nakreślenia podziałek na manometrze, wystawia się rtęć w zbiorniku na działanie atmosfery i w miejscu, gdzie zatrzymuje się rtęć w rurce wysokiej, stawia znak 1, wskazujący ciśnienie jednej atmosfery. Począwszy od tego punktu co każde 76 centymetrów, kreśli się na rurce cyfrę 2, 3, 4 i t. d., odpowiadającą ciśnieniu 2, 3, 4 . . . atmosfer; odległość pomiędzy dwoma następującemi po sobie znakami dzieli się na 10 części, co pozwala oznaczać ciśnienie w dziesiątych częściach atmosfery. Cyfry, nakreślone po lewej stronie rurki, dają nam wysokość słupa rtęci w centymetrach. Chcąc naprzykład wiedzieć, jaka jest prężność pary w kotle parowym, łączy się z nim rurkę C manometru i wtedy podziałka, przed którą zatrzymuje się poziom rtęci w rurce B D, wskazuje bezpośrednio szukaną prężność. Na rysunku manometr pokazuje ciśnienie 2 atmosfer, odpowiadających ciśnieniu słupa rtęci, wysokiego na 76 centymetrów oraz ciśnieniu atmosfery, działającej przez otwarty koniec D rurki na zawartą w niej rtęć. Opisany tutaj manometr używa się zwykle tylko do mierzenia ciśnień, nie przechodzących 5 do 6 atmosfer; przy jeszcze wyższem ciśnieniu należałoby rurkom manometrycznym nadawać zbyt wielką długość, co znacznie utrudniałoby obchodzenie się z niemi. Pomimo jednak wielkich trudności, wynikających z tego powodu, uczeni Dulong i Arago oraz Régnault, przy badaniach nad ściśliwością gazów, używali manometrów otwartych do oznaczania prężności, dochodzącej do 27 atmosfer. Cailletet zaś mierzył

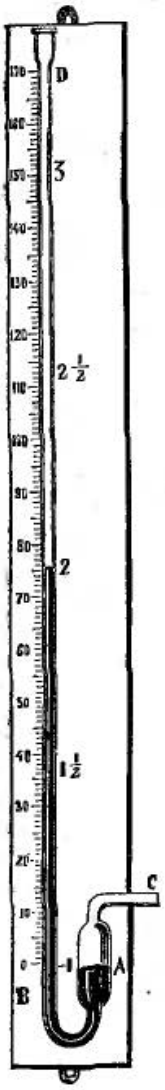


Fig. 131. Manometr otwarty.

jeszcze większe ciśnienie za pomocą podobnego manometru, utworzonego przez stalową rurkę, mającą 3 milimetry w średnicy i 250 metrów długości; rurka ta była nawinięta wzdłuż spiralnego wyżłobienia, wyciętego na powierzchni drewnianego walca, który mógł być obracany około swej osi. Zależnie od kierunku obrotu, rurka manometryczna odwijała się lub nawijała na walec, co znakomicie ułatwiało obchodzenie się z przyrządem.

W manometrze wyżej opisanym, prężność gazu mierzy się wysokością równoważonego słupa cieczy. W *manometrze zamkniętym* prężność mierzy się zmniejszeniem objętości, jakiemu ulega określona ilość powietrza; przyrząd ten stanowi więc bezpośrednie zastosowanie prawa Boyle'a — Mariotte'a. Rurka manometryczna, nie mająca więcej nad 60 do 80 centymetrów długości, zamknięta u góry i napełniona powietrzem, dolnym otwartym końcem zanurzona jest w naczyniu z rtęcią (fig. 132). Naczynie to zrobione z żelaza, z powodu wielkiego ciśnienia, jakiemu może ewentualnie uledz, posiada w górnej swej części otwór, służący właśnie do przepuszczenia rurki, mocno i szczelnie w tem miejscu przylutowanej. Z boku naczynia znajduje się jeszcze rurka *A*, łącząca manometr ze zbiornikiem, zawierającym gaz, którego prężność mamy oznaczyć. Figura 133 przedstawia szemat manometru zamkniętego. Podziałki na tym przyrządzie oznacza się empirycznie w sposób następujący: wprowadza się doń tyle powietrza, ażeby poziom rtęci w rurce i w naczyniu był jednakowy, co następuje przy ciśnieniu 1 atmosfery, następnie łączy przyrząd ze zbiornikiem, w którym powietrze ulega ściskaniu za pomocą pompy

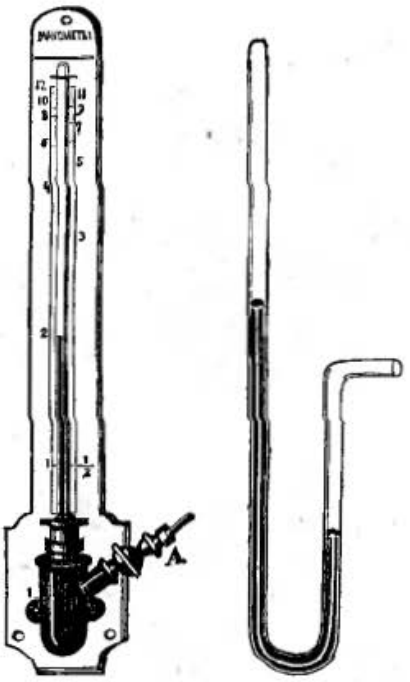


Fig. 132. Manometr zamknięty.

Fig. 133. Szemat manometru zamkniętego.

zgęszczającej. Oprócz tego, z tymże zbiornikiem komunikuje także manometr otwarty, już oznaczony podziałkami. W miarę ściskania powietrza rtęć jednocześnie podnosi się w obu przyrządach; gdy jeden z nich wskazuje 1, 2, 3 . . . atmosfer, pisze się te same cyfry na wysokości poziomów rtęci w manometrze nieoznaczonym, mianowicie na skali, idącej wzdłuż rurki.

W *manometrze metalowym* Bourdon'a, bardzo często używanym przy maszynach parowych, niema wcale rtęci. Polega on, podobnie jak barometr-aneroid, na zmianie kształtu, jakiej pod wpływem ciśnienia ulega skręcona rurka o ściankach giętkich, cienkich i lekko spłaszczonych: ciśnienie wewnętrzne rozkręca ją, ciśnienie zaś zewnętrzne skręca ją jeszcze bardziej. Przyrząd składa się z takiej rurki mosiężnej, długiej na $0^{metr.},70$ i skręconej spiralnie w jeden i pół obrotu (fig. 134). Poprzeczny jej przekrój przedstawia elipsę, której wielka oś równa się 11 milimetrom, mała zaś—4 milim. Otwarty koniec *a* jest połączony, za pośrednictwem rurki, dającej się zamykać kranem *m*, z kotłem parowym; przeciwny zaś koniec *b* jest zalutowany i zaopatrzony w długą strzałkę *e*. Jeżeli otworzymy kran *m*, ciśnienie pary z kotła, wywierane na wewnętrzne ścianki rurki, rozkręca ją, przez co koniec jej *b* wraz ze strzałką przesuwa się z lewa na prawo po cyferblacie. Podziałki tego ostatniego, oznaczające ciśnienie 1, 2, 3, 4 . . . atmosfer, kreśli się przez porównanie z manometrem otwartym (1).

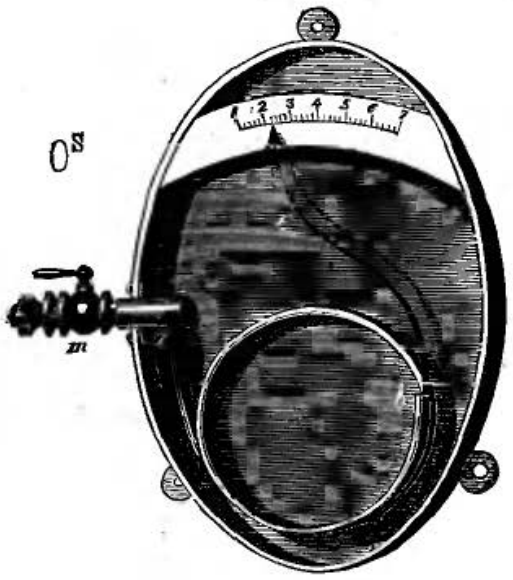


Fig. 134. Manometr Bourdon'a.

(1) A. Ganot. Traité de Physique.

§ 2. Rozprężliwość gazów.—Pompy powietrzne czyli maszyny pneumatyczne.

Na zasadniczej własności gazów—ich rozprężliwości, odróżniającej je od cieczy, polega jeden z najważniejszych przyrządów fizycznych—*pompa powietrzna* czyli *maszyna pneumatyczna*, za pomocą której możemy wydalić powietrze, lub jakikolwiek inny gaz, z danej przestrzeni. Wynalazek tej maszyny zawdzięczamy wspomnianemu już kilkakrotnie burmistrzowi magdeburskiemu Otonowi von Guericke, który za jej pomocą pierwszy wykonał ciekawe doświadczenia, opisane już przez nas w rozdziale o ciśnieniu gazów; do udoskonalenia zaś tego przyrządu przyczynili się różni fizycy.

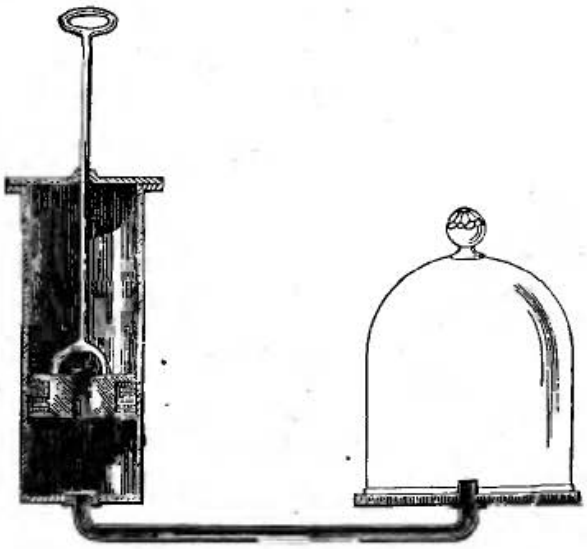


Fig. 135. Sposób działania tłoka i klap w maszynie pneumatycznej.

Najprostsza maszyna pneumatyczna (fig. 135) składa się z walcowatej rury czyli trzonu, ze spodu którego wychodzi wązki kanał, kończący się pośrodku doskonale wypolerowanego talerza, służącego do umieszczania klosza szklanego lub w ogóle naczyń, z których chcemy wypompować powietrze. Składowe części przyrządu mogą być oddzielone lub połączone ze sobą, jako też z zewnętrznem powietrzem, za pomocą odpowiednio urządzonych klap. Dla prostoty wykładu przypuśćmy, że tylko kanał łączący trzon z kloszem oraz otwór w tłoku, są zaopatrzone w klapy, otwierające się tylko do góry tak, jak pokazuje figura 135.

Wyobraźmy sobie, że w chwili, gdy tłok zajmuje najniższe położenie, t. j. gdy dotyka dna trzonu, umieszczamy na talerzu pompy klosz, który zawiera wtedy powietrze o zwykłem ciśnie-

niu atmosferycznem. Jeżeli teraz podniesiemy tłok do góry, powstanie pod nim próżnia tak, że powietrze, zawarte w kloszu, nie znajdując oporu przy rozszerzaniu się, otworzy klapę kanału i wejdzie do trzonu; ponieważ zajmuje ono obecnie większą niż przedtem objętość, jest więc rozrzedzone. Dajmy na to, że objętość trzonu od podstawy do dolnej powierzchni tłoka, w chwili, gdy ten ostatni zajmuje najwyższe położenie, równa się objętości klosza oraz kanału łączącego; wtedy, podług prawa Boyle'a—Mariotte'a, po pierwszem całkowitem podniesieniu tłoka, ciśnienie powietrza pod kloszem i w pompie zostaje zredukowane do połowy pierwotnego ciśnienia, a więc w danym wypadku do ciśnienia $^1/_2$ atmosfery. Przy opuszczaniu tłoka, dolna klapa natychmiast się zamyka dlatego, że zawarte w trzonie powietrze, mające przedtem takie same ciśnienie jak powietrze z pod klosza,— teraz, będąc zgęszczane, silniej ciśnie na klapę z góry na dół; od tej chwili więc ciśnienie powietrza pod kloszem już się nie zmienia. Natomiast powietrze, zawarte w trzonie, coraz silniej jest ściskane i gdy tłok dochodzi do połowy wysokości trzonu, ciśnienie tego powietrza równa się 1 atmosferze. Przy jeszcze dalszem opuszczaniu tłoka, ciśnienie powietrza w trzonie coraz bardziej przewyższa ciśnienie zewnętrznej atmosfery, wskutek czego górna klapa się otwiera i powietrze z pod tłoka wychodzi na zewnątrz tak długo, dopóki tenże nie dosięgnie dna trzonu. Przez powtarzanie takiego ruchu, przy podanej objętości klosza i trzonu, ciśnienie powietrza przy drugiem całkowitem podniesieniu tłoka zostaje zredukowane do $^1/_4$, przy trzeciem—do $^1/_8$, przy czwartem—do $^1/_{16}$ atmosfery i t. d.

To, cośmy powiedzieli o zmniejszaniu ciśnienia powietrza pod kloszem, stosuje się, według prawa Boyle'a—Mariotte'a, także w równej mierze do jego gęstości tak, że po czwartem, naprzykład, całkowitem podniesieniu tłoka, gęstość ta zredukowana zostanie do $^1/_{16}$ pierwotnej gęstości.

Jeżeli stosunek objętości klosza i trzonu jest inny, inny także jest, rozumie się, stosunek, według którego odbywa się zmniejszanie ciśnienia i gęstości powietrza pod kloszem, przy oddzielnych poruszeniach tłoka.

Przy powyższem jednak urządzeniu maszyny pneumatycznej, rozrzedzenie powietrza pod kloszem wkrótce dosięgłoby maksymalnej granicy, powietrze bowiem dopóty tylko przechodzi z klosza do trzonu, dopóki jeszcze może podnosić dolną klapę. Gdy więc po kilku poruszeniach tłoka, ciśnienie powietrza pod kloszem na tyle się zmniejszy, że nie będzie już w stanie podnieść klapy, wtedy przestanie przechodzić do trzonu i dalsze podnoszenie tłoka będzie bezskuteczne.

Dla usunięcia tej niedogodności, ulepszono maszynę pneumatyczną w ten sposób, że sam tłok przy podnoszeniu otwiera kanał, łączący trzon z kloszem, przy opuszczaniu zaś zamyka takowy. Fig. 136 przedstawia urządzenie tłoka w takiej udoskonalonej pompie: tłok jest przedziurawiony, otwór zaś zamknięty przez małą blaszkę *a*, którą przyciska niezbyt mocna sprężyna tak, że nawet słabe ciśnienie, wywierane od dołu, odmyka blaszkę. Kanał, łączący trzon z kloszem, jest zamknięty przez stożek *b*, przytwierdzony do pręta *T*, nieco niższego od samego trzonu i ze znacznem tarciem przesuwającego się wzdłuż wnętrza tłoka *C C*. Przy podnoszeniu tłoka, stożek wychodzi z otworu i komunikacya między trzonem i kloszem zostaje przywrócona; lecz stożek od otworu zbytnio oddalić się nie może, albowiem pręt, wskutek przymocowanego doń poprzecznego pręcika, wkrótce zostaje zatrzymany przez pokrywkę trzonu; przy opuszczaniu tłoka, otwór kanału łączącego natychmiast zostaje zamknięty przez stożek *b* pręta *T*. Urządzenie takie przedstawia tę korzyść, że przez same poruszenia tłoka naprzemian przywraca się i przerywa komunikacya między kloszem i trzonem tak, że powietrze może bez przeszkody przechodzić z pierwszego do drugiego.

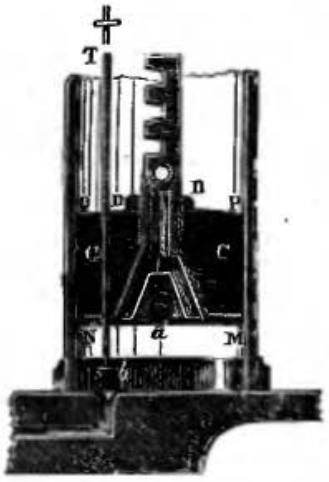


Fig. 136. Urządzenie tłoka w udoskonalonej maszynie pneumatycznej.

W opisanej pompie jednotrzonowej, powietrze, znajdujące się pod kloszem, zostaje rozrzedzone tylko przy podnoszeniu tłoka,

przy opuszczaniu bowiem tego ostatniego wydalamy jedynie powietrze z trzonu, nie zaś z klosza, połowa więc wszystkich poruszeń tłoka dla właściwego celu maszyny jest stracona. Oprócz tego, pompa taka przedstawia jeszcze jednę ważną niedogodność: gdy mianowicie powietrze zostało już prawie zupełnie wypompowane, wtedy przy podnoszeniu tłoka należy przezwyciężać nietylko tarcie jego o ścianki trzonu, lecz nadto ciśnienie zewnętrznego powietrza, uciskającego tłok z góry na dół, a nie równoważonego już wtedy przez ciśnienie w kierunku przeciwnym. Ciśnienie rzeczone, wynoszące dla tłoka, którego poprzeczny przekrój równa się 1 decymetrowi kw., przeszło 100 kilogr., z początku nie daje się uczuć dlatego, że jest równoważone przez ciśnienie powietrza, znajdującego się pod tłokiem; w miarę jednak coraz większego rozrzedzania tego powietrza, podnoszenie tłoka staje się coraz trudniejsze, a przy tłokach większych rozmiarów i wyciąganych ręką— prawie niemożebne. Dla usunięcia obu tych braków, zbudowano maszyny dwutrzonowe, w których dwie obok siebie stojące pompy rozrzedzające połączone są za pomocą wspólnego kanału z kloszem. Tłoki *C C* obu pionowo stojących trzonów są przytwierdzone do zazębionych drągów (fig. 137), których zęby wchodzą pomiędzy zęby jednego i tego samego koła *P;* przy obracaniu koła za pomocą korby, jeden z tłoków podnosi się, drugi zaś opuszcza. Korzyści z takiego urządzenia są następujące: po

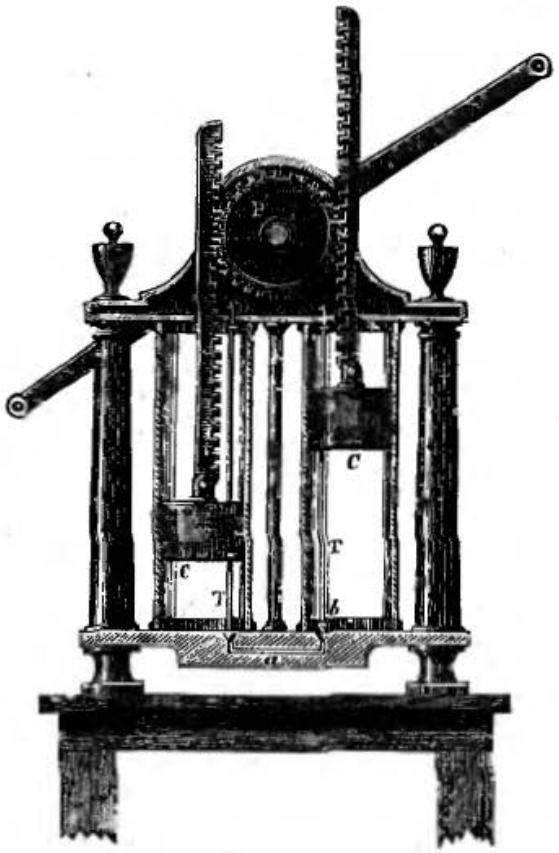


Fig. 137. Pionowy przekrój dwutrzonowej maszyny pneumatycznej.

pierwsze, żadne poruszenie korby nie jest stracone, podczas bowiem gdy opuszczający się tłok wydala powietrze z odnośnego trzonu, jednocześnie drugi podnoszący się tłok wypompowuje powietrze z klosza. Powtóre, ciśnienie zewnętrznego powietrza nie stanowi już przeszkody, jeżeli bowiem utrudnia ono, przy znacznem rozrzedzeniu powietrza w kloszu, ruch podnoszącego się tłoka, to o tyle też ułatwia ruch drugiego opuszczającego się

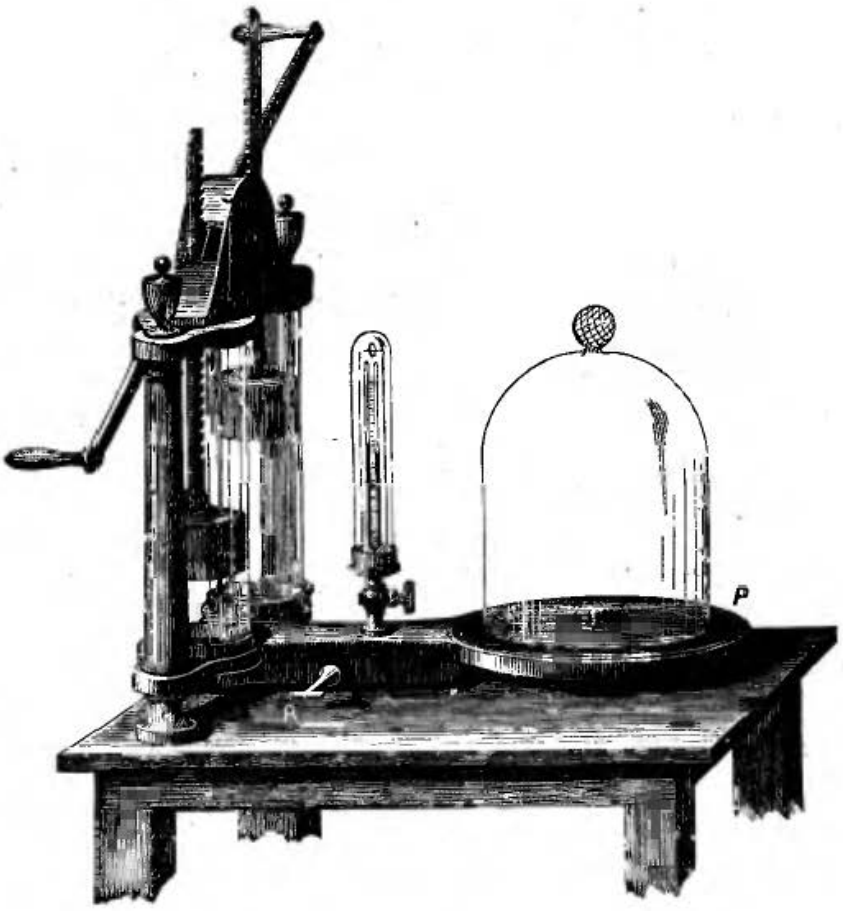


Fig. 138. Zewnętrzny widok dwutrzonowej maszyny pneumatycznej.

tłoka tak, że cały proces rozrzedzania przy końcu doświadczenia dokonywa się również łatwo, jak w początku. Figura 138 przedstawia dwutrzonową maszynę pneumatyczną w całości. Kanał, łączący oba trzony, również jak i odnoga tego kanału, kończąca się pośrodku talerza, ukryte są we wnętrzu podstawy pompy. Na talerzu, jak powiedzieliśmy, dokładnie wypolerowanym, umieszcza się klosz, po uprzedniem powleczeniu jego brzegów tłustością, a to w celu uniemożliwienia dostępu powietrza. Gdy naczynia,

z których chcemy wypompować powietrze lub inny gaz, mają kształt rur, balonów i t. p., wtedy mogą one być bezpośrednio przyszrubowane nad otworem kanału.

Stopień rozrzedzenia powietrza pod kloszem mierzy się za pomocą skróconego barometru, czyli tak zwanej *próbki barometrycznej*, znajdującej się w szklanem, zakończonem mosiężną oprawą naczyńku, które można przyszrubować do kanału przewodniego, łączącego klosz z trzonami (patrz fig. 138) tak, że powietrze jednocześnie wypompowuje się z klosza i z naczyńka. Rtęć z początku wypełnia całkowicie zamknięte ramię próbki barometrycznej, mniej więcej 20 centym. wysokiej, przez drugie zaś otwarte ramię działa ciśnienie powietrza z klosza. Rtęć zaczyna spadać w zamkniętem ramieniu dopiero wtedy, gdy ciśnienie powietrza pod kloszem i w naczyńku zostaje zredukowane do $^1/_4$ atmosfery; różnica w wysokości poziomów rtęci w zamkniętem i otwartem ramieniu, wskazuje wielkość ciśnienia pozostałego jeszcze pod kloszem powietrza. W miarę działania pompy, słupy rtęci w obu ramionach dążą do jednakowego poziomu, ponieważ jednak, przy najlepiej nawet urządzonej pompie, nie można w kloszu wytworzyć absolutnej próżni, rtęć w ramieniu zamkniętem stoi zawsze nieco wyżej, niż w otwartem.

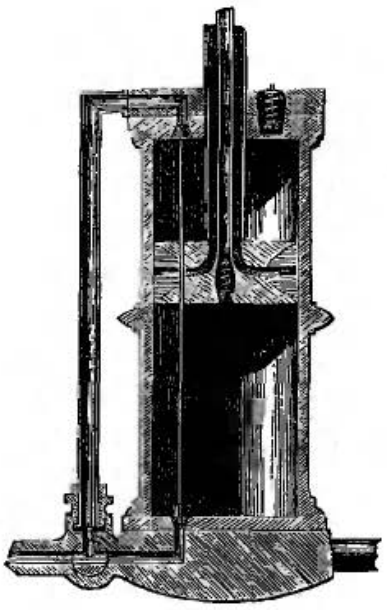
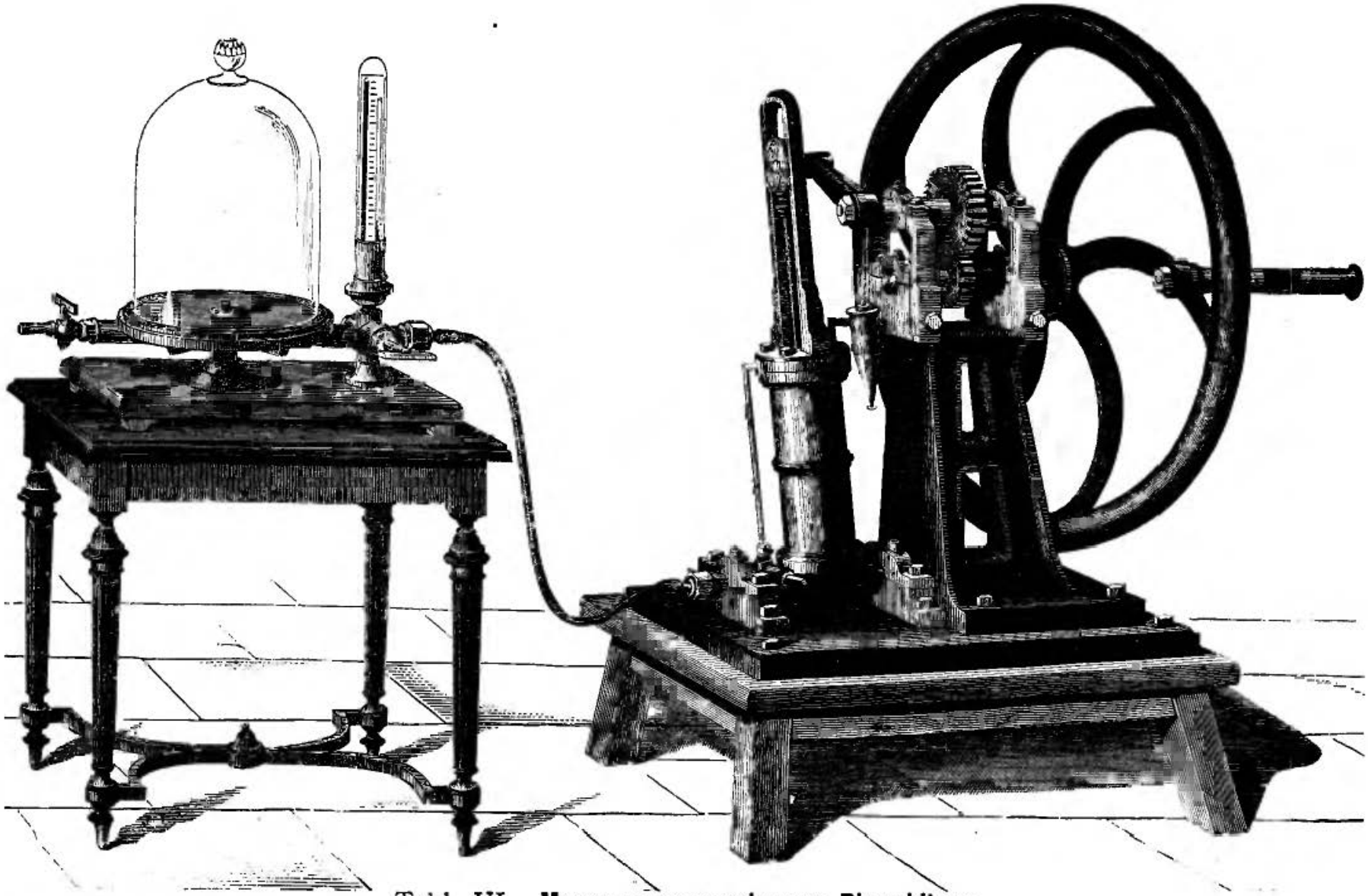


Fig. 139. Pionowy przekrój trzonu w maszynie pneumatycznej Bianchi'ego.

Istnieją także maszyny o jednym trzonie, w których powietrze zostaje wyciągnięte nietylko przy podnoszeniu tłoka, lecz także przy jego obniżaniu, a to dzięki bardzo dowcipnemu urządzeniu, zastosowanemu po raz pierwszy przez Bianchi'ego. Podajemy tu opis najbardziej używanej maszyny tego rodzaju, zbudowanej przez tego ostatniego. Trzon tej maszyny (fig. 139) jest zamknięty z obu stron i podzielony przez sam tłok na dwie



Tabl. VI. **Maszyna pneumatyczna Bianchi'ego.**

części (jedna nad, druga —pod tłokiem), komunikujące z kloszem za pomocą dwóch rurek, kończących się jedna w górnej, druga zaś—w dolnej połowie trzonu. Jeden i ten sam pręt, przechodzący przez tłok i poruszający się wraz z nim, zamyka oba otwory za pomocą korków stożkowatych; w pokrywce trzonu oraz w samem wnętrzu tłoka znajdują się otwory z klapami, przyciskanemi przez sprężyny i otwierającemi się tylko ku górze. Figura 139 przedstawia wnętrze trzonu w chwili, gdy tłok podnosi się ku górze. Otwór górnej rurki zostaje wtedy zamknięty przez górny stożek, powietrze zaś znajdujące się nad tłokiem, będąc zgęszczane, podnosi w końcu klapę w górnej pokrywce trzonu i wychodzi na zewnątrz tak długo, dopóki tłok nie zajmie najwyższego położenia. Jednocześnie przez otwartą, wskutek podniesienia się pręta z korkami stożkowatemi, dolną rurkę, powietrze z klosza przechodzi do próżni, powstającej pod podnoszącym się tłokiem. Przeciwnie, przy opuszczaniu tłoka, otwór dolnej rurki się zamyka, a powietrze, znajdujące się pod tłokiem, będąc zgęszczane, podnosi klapę w tłoku i wychodzi na zewnątrz; jednocześnie zaś, przez otwartą teraz górną rurkę, powietrze z klosza przechodzi do przestrzeni po nad tłokiem. Widzimy tedy, że maszyna Bianchi'ego, jakkolwiek tylko jednotrzonowa, przedstawia te same korzyści co i maszyny dwutrzonowe; jest ona nadto wygodniejszą od nich z powodu lepszego mechanizmu, poruszającego tłok. Mianowicie trzon tej maszyny (patrz tablicę, przedstawiającą maszynę Bianchi'ego w całości) przytwierdzony jest do mogącej się obracać poprzecznej osi, tłok zaś połączony jest za pomocą systemu kół zębatych z kołem rozpędowem, obracanem przez korbę. Przy obracaniu koła rozpędowego, tłok podnosi się i obniża, przechylając się jednocześnie, wraz z ruchomym trzonem, ruchem wahadłowym to w jednę, to w drugą stronę. W ten sposób niewygodny ruch korby w zwykłej maszynie dwutrzonowej jest tu zastąpiony przez prostszy ruch obrotowy, który nadto, wskutek znacznego ciężaru koła rozpędowego, jest bardziej jednostajny. Pompa Bianchi'ego pozwala w krótkim czasie rozrzedzić powietrze w bardzo wielkiem nawet naczyniu.

Powiedzieliśmy wyżej, że nawet za pomocą najlepiej zbudowanej pompy pneumatycznej nie można wywołać zupełnej próżni w danej przestrzeni, a to dla następujących powodów: 1) Działanie maszyny pneumatycznej polega na kolejnem rozrzedzaniu. Otóż przypuśćmy, dla prostoty rachunku, że objętość trzonu od dna do powierzchni tłoka w chwili, gdy ten ostatni zajmuje najwyższe położenie, równa się wewnętrznej objętości klosza i kanału łączącego; wtedy, jak już wiemy, po 1-szem podniesieniu tłoka, powietrze w kloszu zostaje rozrzedzone do $^1/_2$, po 2-iem—do $^1/_4$, po 3-iem—do $^1/_8$, po 4-em—do $^1/_{16}$ i t. d. W ten sposób gęstość powietrza staje się wprawdzie coraz mniejsza, lecz nigdy nie staje się równą O, mogłoby to nastąpić tylko po *nieskończenie wielu* poruszeniach tłoka; za pomocą najdoskonalszej więc pompy nie możemy otrzymać zupełnej próżni, możemy tylko mniej lub więcej zbliżyć się do niej. Dotyczy to zarówno tych maszyn, które już opisaliśmy jak i tych, których opis poniżej podajemy. 2) Klapy lub stożki nigdy nie zamykają hermetycznie, co przy daleko już posuniętem rozrzedzeniu działa bardzo szkodliwie. 3) Materyał, używany do smarowania różnych części przyrządu, pochłania powietrze, wchodzące, przy podnoszeniu tłoka, do przestrzeni o rozrzedzonem już powietrzu. Niedogodność tę udało się za pomocą rozmaitych sposobów zmniejszyć, lecz nie zupełnie usunąć. 4) W najlepiej nawet zbudowanej maszynie z tłokiem, ten ostatni nigdy nie przylega szczelnie do dna trzonu, a ponieważ przy obniżaniu się tłoka, znajdująca się w nim klapa, prowadząca na zewnątrz, otwiera się, przeto przy najniższem położeniu tłoka, przestrzeń pomiędzy dolną jego powierzchnią a dnem trzonu—zwana *przestrzenią szkodliwą*—wypełnia się zewnętrznem powietrzem o ciśnieniu 1 atmosfery. Przypuśćmy, że objętość przestrzeni szkodliwej wynosi tylko $^1/_{1000}$ objętości całego trzonu (od dna do powierzchni tłoka w chwili, gdy ten ostatni zajmuje najwyższe położenie), wtedy przy całkowitem podniesieniu tłoka, powietrze, wypełniające szkodliwą przestrzeń, rozszerza się 1000 razy, ciśnienie więc jego spada do $^1/_{1000}$ atmosfery. Otóż łatwo zrozumieć, że jeżeli powietrze w kloszu dosięgło tego samego stopnia rozrzedzenia, to przy otwartej nawet komunikacyi między klo-

szem i trzonem, nie będzie ono już przechodziło z pierwszego do drugiego, zachodzi to bowiem tylko dopóty, dopóki ciśnienia w obu tych przestrzeniach są różne; od chwili więc wyrównania się ciśnień dalsze pompowanie będzie zupełnie bezskuteczne. I tę trudność udało się w części przynajmniej usunąć.

Z powodów wyżej wymienionych, za pomocą najlepszej nawet maszyny pneumatycznej nie można ciśnienia powietrza albo innego gazu, zawartego w jakiemś naczyniu, zredukować bardziej, niż do ciśnienia 1 milimetrowego słupa rtęci, t. j. do $^1/_{760}$ atmosfery. W przemyśle, gdzie pompy pneumatyczne bywają używane do takich naprzykład celów, jak rozrzedzenie powietrza pod filtrem, przez który ma być przeciśnięty roztwór cukru, tak wielka ścisłość nigdy nie jest konieczna, dlatego też odnośne pompy są bardziej wygodne, niż dokładne.

Zupełnie odmienną budowę mają t. zw. pompy rtęciowe. Próżnia, jaka się tworzy w rurce barometrycznej przy wykonywaniu doświadczenia Toricelli'ego, jest o wiele dokładniejsza od tej, jaką można otrzymać za pomocą tłoka, poruszającego się w trzonie pompy. Mając to na względzie, niemiecki mechanik Geissler podjął na nowo myśl zbudowania pompy pneumatycznej, w której rtęć, kolejno podnoszona i opuszczana, pełniłaby rolę tłoka i wytwarzała próżnię, do którejby można następnie wprowadzać powietrze, wydalane z klosza lub innego naczynia. Oto opis takiej pompy, urządzonej podług modelu Geisslera i udoskonalonej przez Alvergniat'a. Przyrząd, prawie całkowicie szklany, składa się z dwóch zbiorników A i B (fig. 140 i 141, str. 184), połączonych ze sobą za pomocą rurki barometrycznej T, długości mniej więcej 1 metra oraz rurki kauczukowej C. Zbiornik B i rurka T są stale przymocowane do pionowej deski; zbiornik zaś A, swobodny i otwarty, może być podnoszony lub opuszczany na 1 metr. Tę zmianę położenia osiąga się za pośrednictwem długiego sznura, przymocowanego z jednej strony do zbiornika A, następnie przerzuconego przez blok a i dalej nawiniętego na takież kółko b, które można obracać za pomocą korby. Nad zbiornikiem B znajduje się kran n o trzech kanałach (przedstawiony oddzielnie na figurze w 3 różnych położeniach X, Y i Z,)

z którego wychodzi rurka *d;* na lewo zaś widać zwyczajny kran *m*, przez otworzenie którego zbiornik *B* może być połączony z naczyniem rtęciowem *v* i z atmosferą. Rurka *d* nie komunikuje bezpośrednio z naczyniem, w którem chcemy wywołać próżnię, lecz z naczyniem *o*, w części napełnionem kwasem siarczanym,

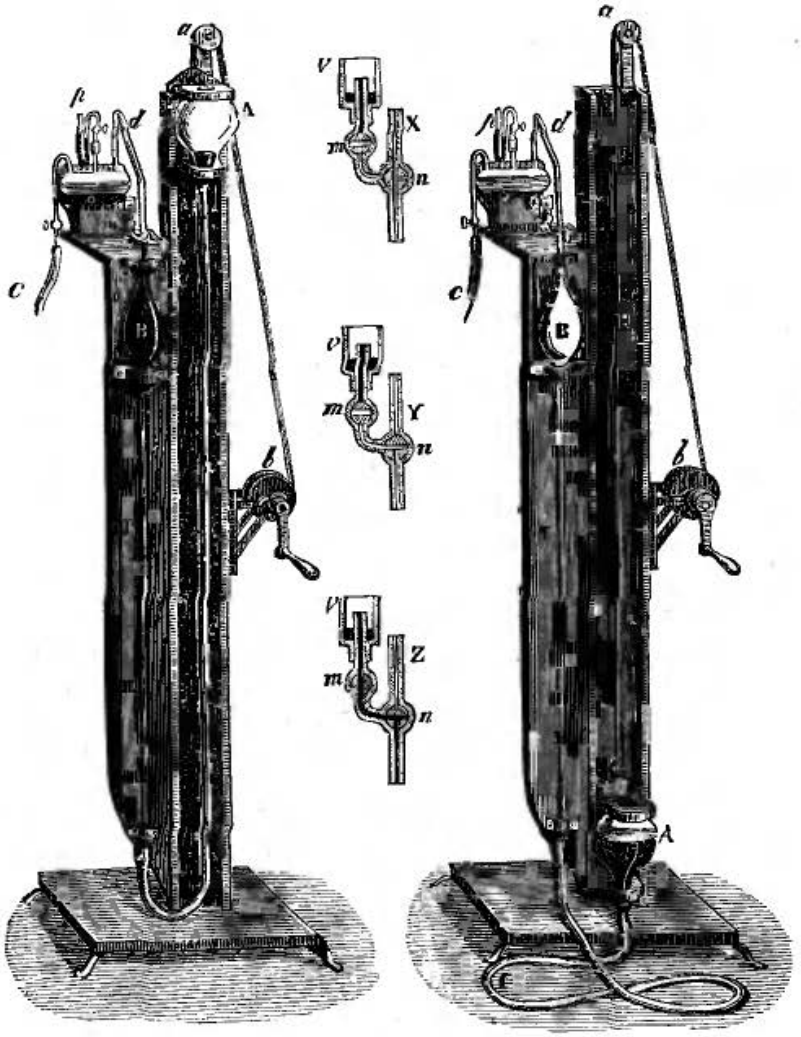


Fig. 140. Fig. 141. Rtęciowa maszyna pneumatyczna.

służącym do wysuszania powietrza lub innych gazów, wchodzących do przyrządu. Dopiero rurka kauczukowa *c* ustanawia komunikacyę pomiędzy kloszem a naczyniem *o*, do którego przyszrubowana jest próbka barometryczna *p*, wskazująca stopień rozrzedzenia.

Gdy zbiornik A zajmuje najwyższe położenie (fig. 140) i gdy przytem kran m jest otwarty, a kran n obrócony tak, jak widzimy w Z, *wtedy rurki C i T, cały zbiornik B i naczynie v są napełnione* rtęcią. Po zamknięciu krana m, obróceniu krana n, jak to widzimy w Y oraz po opuszczeniu zbiornika A (fig. 141), rtęć obniża się w zbiorniku B i w rurce T tak długo, dopóki różnica poziomów w rurce T i w zbiorniku A nie staje się równą wysokości barometrycznej, wskutek czego w zbiorniku B tworzy się próżnia. Wtedy obraca się kran n tak, jak widzimy w X, a powietrze lub inny gaz z klosza przechodzi przez rurkę c, naczynie o i rurkę d do zbiornika B, obniżając jeszcze bardziej poziom rtęci w rurce T. Wreszcie po sprowadzeniu kranów do pierwotnego położenia (fig. Z) i podniesieniu zbiornika A, rtęć znów wypełnia rurkę T i zbiornik B, wypychając przytem, przez krany n i m, powietrze lub inne gazy, które tutaj dostały się z klosza. Powtarzając tę samą operacyę po wiele razy, dochodzimy do tego, że próbka barometryczna p nie wskazuje żadnej prawie różnicy poziomów w obu ramionach.

Opisana przez nas pompa rtęciowa pozwala rozrzedzić gaz do $^1/_{10}$ milimetra ciśnienia, pod warunkiem, aby rtęć była zupełnie sucha. Lecz, jak czytelnik z powyższego może się przekonać, *działanie tej pompy jest bardzo powolne* i dlatego też bezpośrednio używa się jej tylko do wytworzenia próżni w małej przestrzeni. Gdy ma się do czynienia z wielkiemi naczyniami, wtedy za pomocą zwykłej pompy pneumatycznej rozrzedza się gaz, zawarty w nich, do 10 milimetrów ciśnienia, a następnie dopiero, w celu dalszego rozrzedzenia, używa pompy rtęciowej.

Pompa rtęciowa Sprengl'a,—polegająca na zupełnie odmiennej zasadzie, której nie możemy tu wyłuszczyć,—ma tę wyższość nad opisaną wyżej pompą Geisslera, że nie wymaga krana o trzech kanałach czyli drogach, który trudno jest zbudować i odpowiednio nastawiać oraz, że działanie jej w rozrzedzaniu gazu jest ciągłe.

Przez pewien czas używano pompy pneumatycznej do poruszania wagonów kolei żelaznej bez udziału lokomotywy. Zasada tego jest bardzo prosta, a zastosowanie praktyczne polega na tem,

że na całej długości ulicy układa się rurę metalową, wszędzie jednakowo szeroką, w której porusza się szczelnie przystający tłok. Gdy za pomocą pompy pneumatycznej powietrze po jednej stronie tłoka zostaje rozrzedzone i gdy druga jego strona ulega ciśnieniu atmosferycznemu, to ostatnie pcha tłok przed sobą; wraz z tłokiem może się poruszać, bez udziału innych motorów, szereg wagonów, których koła biegną po szynach, ułożonych wzdłuż rury.

Myśl o spożytkowaniu ciśnienia atmosferycznego jako motoru jest już dawna, być może tak dawna, jak wynalezienie pompy pneumatycznej i prawdopodobnie Otto von Guericke, wykonywując swoje doświadczenia, miał podobne cele na widoku. Lecz dopiero w roku 1810 pewien szwedzki inżynier Medhurst podał projekt przesyłania towarów, pakietów i listów przez rury, w których rozrzedzano powietrze; nieco później tenże inżynier próbował, z niezupełnie zadawalniającym skutkiem, przenosić ruch tłoka na wagony, biegnące na zewnątrz rury, w której tłok się poruszał. W roku 1824 pewien anglik, nazwiskiem Wallance wpadł na pomysł, żeby pozwolić ciśnieniu atmosferycznemu działać bezpośrednio na same wagony, pomieszczone wewnątrz rury, w której poruszał się tłok. Wreszcie angielscy inżynierowie Clegg i Samuda, porzuciwszy ostatni projekt, powrócili do systemu Medhurst'a i im też udało się urzeczywistnić myśl atmosferycznej kolei żelaznej: pod ich kierownictwem zbudowano w r. 1838 w Irlandyi, pomiędzy Kingstown i Dalkey, na długości 5 kilometrów, taką kolej, przez dłuższy czas będącą w ruchu. Po udatnej tej próbie zbudowano jeszcze kilka innych linii w Anglii i Francyi, obecnie wszakże zupełnie zarzucono ten sposób transportowania wagonów, nie dlatego, ażeby stanęły mu na przeszkodzie jakiekolwiek mechaniczne trudności, lecz jedynie z powodu, że koszta okazały się zbyt wysokie. Koleje żelazne atmosferyczne nie mogą rywalizować z kolejami parowemi, szczególniej po wynalezieniu lokomotywy górskiej, pozwalającej wagonom wspinać się pod górę; dlatego też ciśnienie atmosferyczne spożytkowywa się najwyżej przy przesyłaniu listów i małych pakietów.

§ 3. Ściśliwość gazów. Pompy zgęszczające.

Widzieliśmy w poprzednim paragrafie, w jaki sposób można rozrzedzić powietrze lub inny gaz w danej przestrzeni. Przeciwnie, chcąc zgęścić w jakiemś naczyniu powietrze lub inny gaz, używa się do tego przyrządu, zwanego *pompą zgęszczającą*, której budowa może być taka sama, jak i budowa pompy pneumatycznej, z warunkiem, ażeby wszystkie klapy otwierały się w kierunku przeciwnym, to jest tylko ku dołowi. Fig. 142 pokazuje przecięcie trzonu pompy zgęszczającej. Przy podnoszeniu tłoka, stożek *a*, zwrócony podstawą ku dołowi, zamyka otwór kanału, łączącego trzon z kloszem pompy, natomiast zewnętrzne powietrze cisnąc na klapę *b*, otwiera ją i wchodzi pod tłok. Przy opuszczaniu natomiast tłoka, ściskane powietrze zamyka klapę *b*, spycha zaś nieco stożek *a* i dostaje się przez kanał do klosza. Widzimy tedy, że istotnie zwyczajna pompa pneumatyczna, lecz o odwrotnym ruchu klap, może służyć jako pompa zgęszczająca, przyczem klosz powinien posiadać bardzo mocne ścianki, ażeby mógł wytrzymać wewnętrzne ciśnienie zgęszczanego powietrza lub innego gazu. Zbudowano także podobną pompę o dwóch trzonach, którą można jeszcze napotkać w starych zbiorach. Lecz w tym wypadku ciśnienie atmosferyczne, jakie trzeba przezwyciężać przy podnoszeniu jednego z tłoków, nie zostaje zrównoważone, jak w pompie pneumatycznej, przez ciśnienie na drugi tłok; owszem opór jest tutaj podwójny tak, że przyrząd jest jedno-

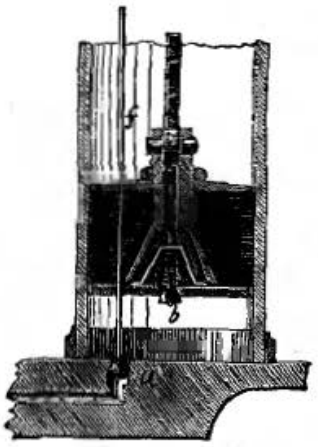


Fig. 142. Pompa zgęszczająca. Przecięcie trzonu.

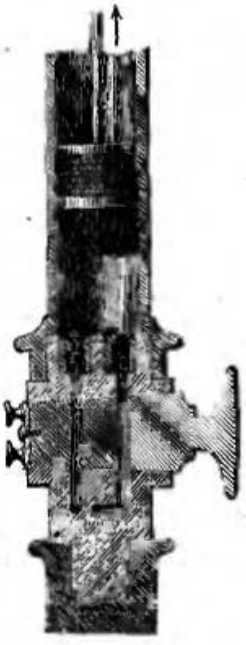


Fig. 143. Pompa zgęszczająca Silbermana. Przecięcie trzonu.

cześnie kłopotliwy, duży i nie dość wytrzymały. Zarzucono go też zupełnie i zastąpiono pompą o jednym trzonie. Najczęściej używaną jest jednotrzonowa pompa Silbermana, której wewnętrzne urządzenie łatwo zrozumieć można z fig. 143 (str. 187). Tłok nie jest przedziurawiony, lecz u spodu jego znajdują się dwa kanały, przechodzące w rurki; jeden kanał (na rysunku lewy) jest zamknięty przez klapę, otwierającą się tylko ku górze, drugi zaś (na rysunku prawy) — przez klapę otwierającą się tylko ku dołowi. Lewy kanał łączy się ze zbiornikiem powietrza lub jakiegokolwiek innego gazu, prawy zaś — z naczyniem, w którem chcemy zgęścić powietrze lub dany gaz. Przy podnoszeniu tłoka, gaz ze zbiornika wchodzi do pompy, otwiera lewą klapę i napełnia trzon; przy opuszczaniu tłoka, wspomniana klapa się zamyka, prawa zaś otwiera i gaz przechodzi do naczynia. Pompa Silbermana, przedstawiona w całości na fig. 144, może być także użyta jako pompa pneumatyczna, przyczem lewy kanał łączy się z kloszem, prawy zaś, w tym wypadku otwarty, prowadzi wprost do zewnętrznej atmosfery. Lecz

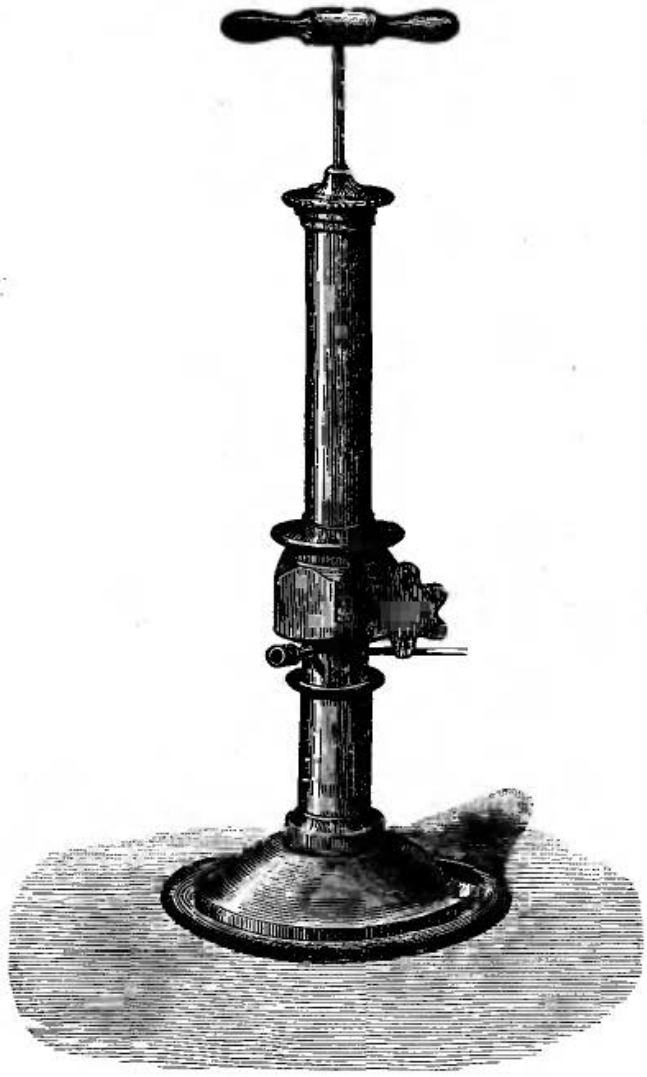
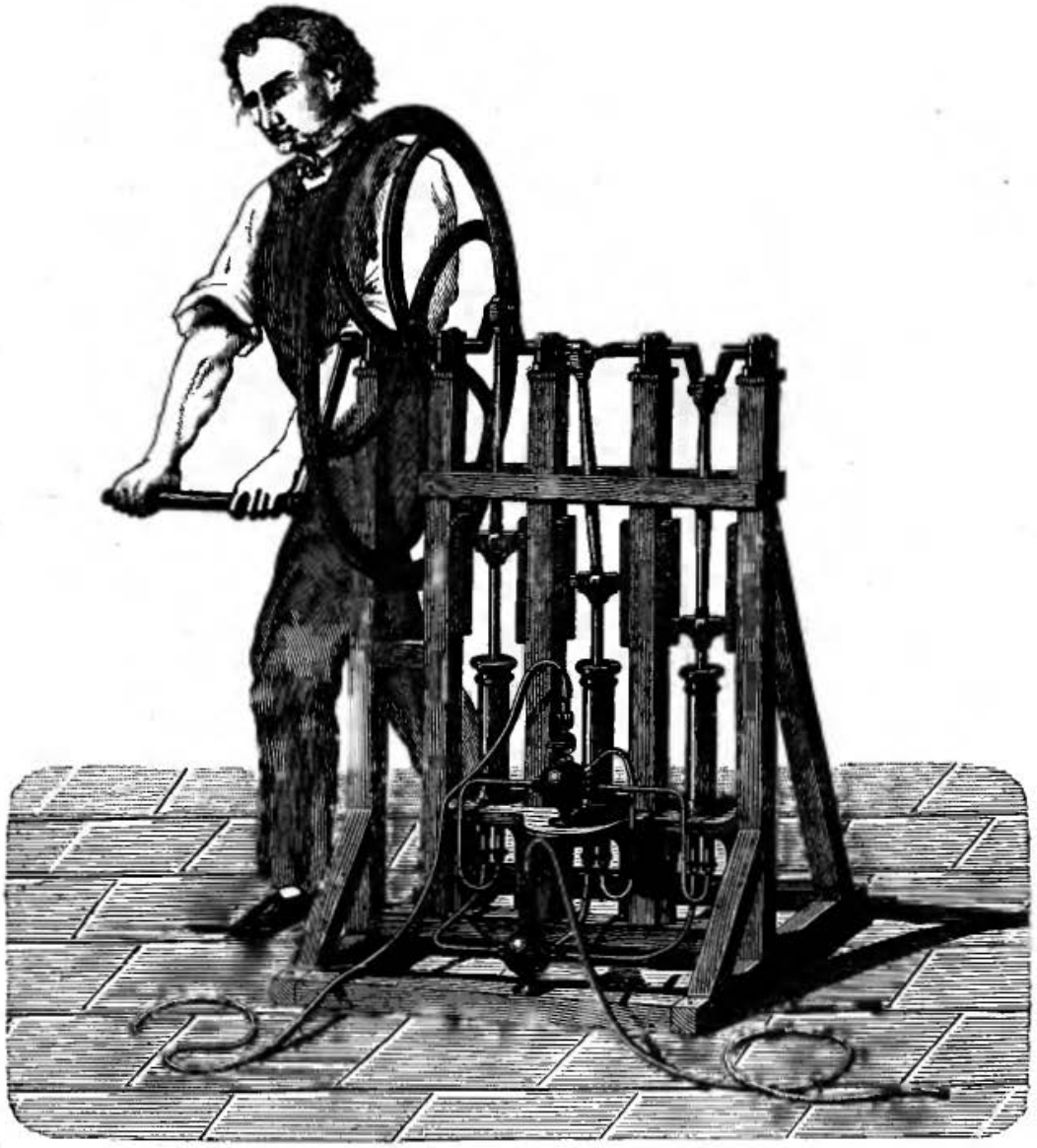


Fig. 144. Pompa Silbermana. Wygląd zewnętrzny.

rozrzedzenie za pomocą tego przyrządu nie może być bardzo daleko posunięte z powodu szkodliwych przestrzeni przy klapach.

Przy doświadczeniach nad prawem Boyle'a— Mariotte'a, uczony francuzki Regnault posługiwał się przyrządem, który pozwolił mu zgęścić gaz do 30 atmosfer; przyrząd ten składał się



Fig, 145. Połączone pompy Silbermana.

z trzech pomp Silbermana, połączonych tak, jak pokazuje fig. 145. Drągi trzech tłoków dochodzą do trzech odpowiednio zgiętych części, stanowiących jednę wspólną oś, przechodzącą przez duże koło, obracane za pomocą korby. Przewody, wsysające gaz z jednej strony i przewody, wypuszczające go z drugiej, otwierają się

do okrągłych naczyń, które są bezpośrednio połączone, jeden z gazometrem napełnionym danym gazem, drugi—ze zbiornikiem, w którym gaz ma uledz zgęszczeniu.

Zwróćmy się obecnie do opisu kilku ważniejszych zastosowań zgęszczonego powietrza.

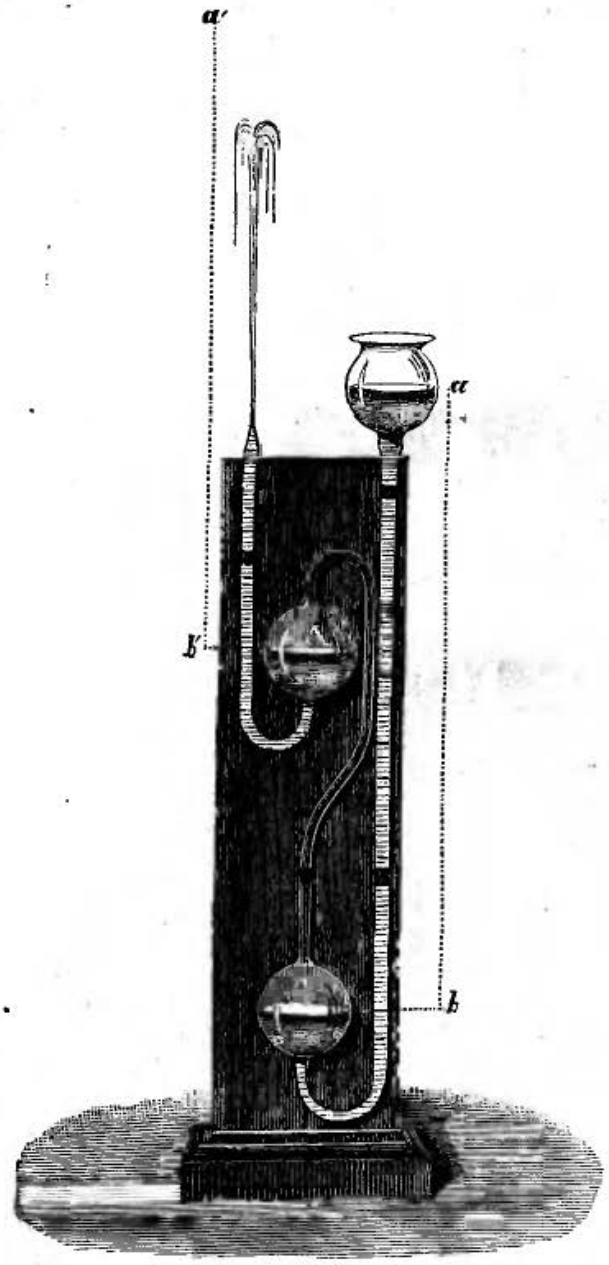


Fig. 146. Fontanna Herona.

Fontanna Herona (fig. 146) polega właśnie na działaniu takiego powietrza. Składa się ona z naczynia *A*, z dna którego wychodzi ku górze rurka, zakończona maleńkim otworem; druga rurka, otwierająca się do górnej części naczynia *A*, łączy je z naczyniem *C*, głębiej leżącem. To ostatnie wreszcie komunikuje z wstępującą rurką, rozszerzoną u góry w kształcie otwartej kolby. Jeżeli w *A* znajduje się woda i jeżeli wstępującą rurkę również będziemy napełniali wodą, która spływa do naczynia *C*, wtedy w rurce pomiędzy *A* i *C* znajduje się uwięzione powietrze, będące pod ciśnieniem 1 atmosfery, powiększonem o ciśnienie słupa wody *a b* i zgęszczone pod wpływem tegoż ciśnienia. To zgęszczone powietrze, cisnąc z kolei na poziom wody w naczyniu *A*, powoduje podnoszenie się jej w rurce, z której woda wytryskuje jak z fontanny; wysokość, na jaką woda wznosi się po nad poziom w *A*, byłaby równą wysokości nadmiarowego cisnącego słupa *a b*

cieczy, gdyby nie znany nam już wpływ oporu zewnętrznego powietrza oraz kropel opadających.

Pompa pożarna (fig. 147) przedstawia przyrząd, w którym prawidłowość i ciągłość wypływu wody osiąga się przez jednoczesne działanie masy zgęszczonego powietrza oraz dwóch pomp tłoczących. Dwie te pompy, poruszane za pomocą wspólnego poziomego drąga, do którego naraz może przystąpić ośmiu ludzi, są zanurzone w obszernym zbiorniku, napełnionym wodą przez cały czas działania przyrządu. Klapy są tak urządzone, że gdy jedna pompa wsysa wodę ze zbiornika do trzonu, druga wtłacza ją

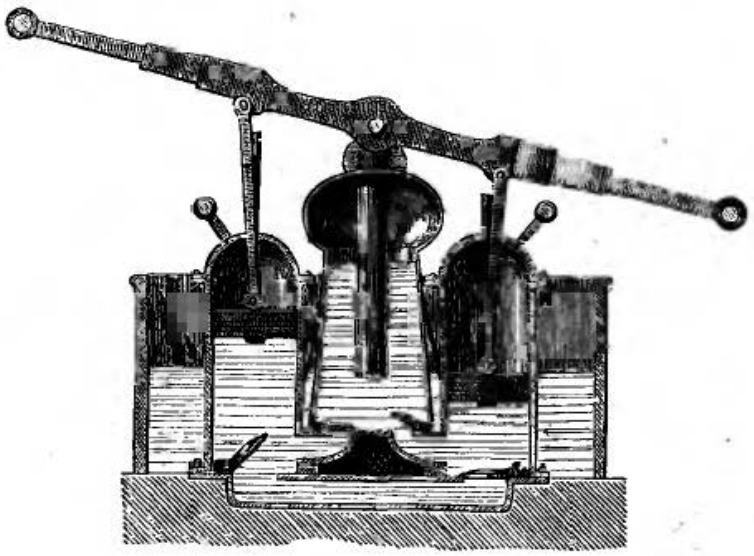


Fig. 147. Pompa pożarna.

do środkowego rezerwoaru, w którym znajduje się zgęszczone powietrze; ztąd woda zostaje wtłoczona do długiej rury skórzanej, którą skierowywa się na płomień. Ponieważ tłoki poruszają się jednocześnie w taki sposób, że gdy jeden się podnosi, drugi się opuszcza, to woda ciągle przybywa do rezerwoaru środkowego i strumień, wypływający z rury, jest ciągły. Pompa pożarna może być tak urządzona, ażeby tłoki były poruszane przez niewielki motor parowy. Pompa taka, dość często używana, wyrzuca w przeciągu minuty 900 litrów wody i daje strumień, mający 43 metry wysokości.

Do najwspanialszych dzieł, jakie wiekowi naszemu, dzięki umiejętności zastosowywania wyników nauki do potrzeb życio-

wych, udało się wykonać, należy bez wątpienia przebicie ogromnych mas skalistych, czyli budowa tunelów w twardym kamieniu, nad któremi góry wznoszą się na tysiące jeszcze stóp. Pierwszem z takich olbrzymich dzieł jest przebicie tunelu przez górę Cenis, łączącego Francyę z Włochami; drugiem, jeszcze trudniejszem — przeprowadzenie tunelu przez górę św. Gotarda, łączącego Szwajcaryę z Włochami. Przy budowie pierwszego, posługiwanie się prochem lub parą, jako motorami maszyny wiercącej, przedstawiało wielkie trudności, a nawet niebezpieczeństwo, ze względu na szybkość, z jaką powietrze zużywałoby się wskutek spalania prochu lub węgla, oraz ze względu na jednoczesną niemożność urządzenia niezbędnej w takim razie wentylacyi, któraby pozwoliła zepsute powietrze zastępować świeżem. Dlatego też powrócono do myśli, wypowiedzianej przez Colladon'a, następnie także przez Caligny'ego, żeby użyć powietrza jako motoru do maszyn wiercących. Przez urzeczywistnienie tej myśli, technicy Sommeillier, Grandis i Grattone zdobyli sobie niespożytą sławę.

Pompy zgęszczające, użyte do tego z początku, wprawiane były w ruch przez uderzenia spadającej i w swym spadku zatrzymywanej wody, która przypływała z kilku górskich strumieni o znacznym spadku. Później pompy takie zastąpiono pompą zgęszczającą o podwójnem działaniu, która pozwoliła spożytkować na większą daleko skalę siły wodne, znajdujące się w pobliżu. Na jednej ze stacyj, niedaleko góry Cenis, ustawiono dwanaście pomp zgęszczających, poruszanych przez sześć kół wodnych, na które bezpośrednio działała spadająca woda z rzeczki Arc. Pompy te pozwalały w przeciągu 24 godzin zredukować przeciętnie 116000 metrów sześciennych zwyczajnego powietrza do jednej siódmej pierwotnej objętości tak, że w maszynach wiercących wywierały one na tłoki ciśnienie 7-miu atmosfer. Taka znaczna ilość powietrza nie byłaby potrzebna, gdyby chodziło jedynie o podtrzymanie ruchu maszyn, lecz rura, przeprowadzająca zgęszczone powietrze z pomp do wnętrza góry, służyła nietylko jako pośredniczka w przenoszeniu siły mechanicznej z wodospadów na świdry, wiercące skałę, ale także przynosiła do galeryj świeże powietrze, niezbędne dla oddychania robotników oraz dla palenia lamp, przyświecających ich robocie.

W danym razie próby zastosowania zgęszczonego powietrza jako siły poruszającej w wypadkach, w których użycie pary napotkałoby na nieprzezwyciężone trudności, uwieńczone zostały tak pomyślnym rezultatem, że zaczęto coraz bardziej przemyśliwać nad tem, czyby nie można było z korzyścią spożytkować tej samej siły przy innych jeszcze robotach. I tak naprzykład w okolicach, bogatych w wodospady i wartkie rzeki, możnaby użyć naturalnych sił wodnych do zgęszczania powietrza, następnie zgęszczone to powietrze przeprowadzać przez rury do oddzielnych domostw rzemieślniczych, gdzie służyłoby jako motor. Podobnie więc jak w większych miastach, woda lub gaz oświetlający są rozprowadzane z centralnego punktu do pojedyńczych domów, tak też być może, że w przyszłości motory warsztatów będą poruszane zgęszczonem powietrzem, rozprowadzanem po mieście z jednej głównej stacyi.

Wspomnimy wreszcie o jednem jeszcze zastosowaniu zgęszczonego powietrza. Wiele lat temu zarząd telegrafu w Paryżu urządził pomiędzy dwiema stacyami miejskiemi komunikacyę przez rurę, w której za pomocą zgęszczonego powietrza przesyła się z jednej stacyi do drugiej listy i niewielkie pakiety. Rura ta, mająca długość 1100 metrów, średnicę zaś równą $6^1/_2$ centymetrom, rozszerza się na każdej z dwóch stacyj w skrzynkę, w którą wprowadza się lub też z niej wyciąga tłok, zawierający w swem wnętrzu dane posyłki. Chcąc wysłać napełniony niemi tłok, łączy się za pomocą kranu skrzynkę stacyi wysyłającej z pompą zgęszczającą, podczas gdy na stacyi odbierającej skrzynka ta komunikuje tylko z atmosferą. Zgęszczenie powietrza przy tej *poczcie pneumatycznej* osiąga się przez ciśnienie wody z miejskich wodociągów, działające na każdej stacyi prawie z taką siłą, jak gdyby woda spadała z wysokości 15 metrów. Powietrze nagromadza się w odpowiednio urządzonych zbiornikach i doprowadza do takiej gęstości, że w ciągu 90 sekund popycha ono tłok wzdłuż całej rury tak, że tenże porusza się ze średnią prędkością 12 metrów na sekundę. W Londynie istnieje poczta pneumatyczna, mająca 500 metrów długości; tutaj jako motory działają naprzemian zgęszczone i zwyczajne atmosferyczne powietrze.

Pomimo wielkich kosztów, system ten przedstawia znaczne korzyści dla rozległych i licznie zaludnionych miast, w których komunikacya pomiędzy oddzielnemi, bardziej oddalonemi od siebie częściami wymaga coraz więcej środków. Lecz inne, oprócz poczty pneumatycznej, próby zastosowania ciśnienia powietrza, jako środka lokomocyi, należy uważać obecnie tylko za ciekawe eksperymenty, które na małą skalę udaje się wprawdzie wykonać bez trudności, chcąc je jednak urzeczywistnić w większym zakresie, napotyka się na nieprzezwyciężone przeszkody.

ROZDZIAŁ XI.

Prawo Archimedesa w zastosowaniu do gazów.

§ 1. Pozorna strata na ciężarze ciała, znajdującego się w atmosferze gazowej. — Baroskop.

Na str. 150 opisaliśmy już mimochodem doświadczenia, dowodzące istnienia w gazach parcia z dołu do góry; obecnie wypada nam rzecz tę nieco bliżej rozważyć.

Wskutek wielkiej ruchliwości cząstek, wspólnej dla cieczy i gazów, niektóre prawa, dotyczące zachowania się pierwszych, stosują się także do ostatnich; tak gazy, oprócz prawa Pascala o jednostajnem rozchodzeniu się ciśnienia, podlegają także prawu Archimedesa, które w zastosowaniu do nich brzmi jak następuje: *każde ciało, znajdujące się w atmosferze jakiegoś gazu, pozornie traci ze swego ciężaru tyle, ile waży wypchnięty przez nie gaz.* Łatwo to wykazać za pomocą t. z. *baroskopu* [1]), wynalezionego przez Ottona von Guericke. Przyrząd ten składa się z krótkiego drąga wagowego, zaopatrzonego w strzałkę, która przy poruszeniach drąga posuwa się wzdłuż skali, naciętej na łuku. Na końcach drąga wiszą dwie kule — jedna duża i wydrążona, druga zaś mniejsza, lecz pełna — równoważące się w powietrzu (fig. 148).

---

[1]) Od greckiego wyrazu *barys* — ciężki.

Jeżeli umieścimy baroskop pod kloszem maszyny pneumatycznej, to w miarę wypompowywania z pod niego powietrza, duża kula, dokładnie poprzednio zrównoważona przez małą, będzie się coraz bardziej obniżała, stawała jakby cięższą. Proste to doświadczenie pokazuje, że w rzeczywistości duża kula waży więcej, niż mała: pod opróżnionym bowiem kloszem kule nie doznają już ciśnienia powietrza, a więc i parcia, wywieranego przez to ostatnie z dołu do góry i podlegają jedynie działaniu ciężkości. Jeżeli zaś, pomimo różnych ciężarów, kule te w powietrzu się równoważą, pochodzi to ztąd, że większa z nich, wypychając znaczniejszą objętość powietrza, więcej też pozornie traci ze swego ciężaru, niż mała. Różnica ta w stratach na ciężarze obu kul oczywiście równa się różnicy w ciężarze wypychanych przez nie objętości powietrza, i gdyby kule, równoważące się w powietrzu, posiadały jednakową objętość, to, będąc pomieszczone pod opróżnionym kloszem maszyny pneumatycznej, równowagi tej by nie utraciły.

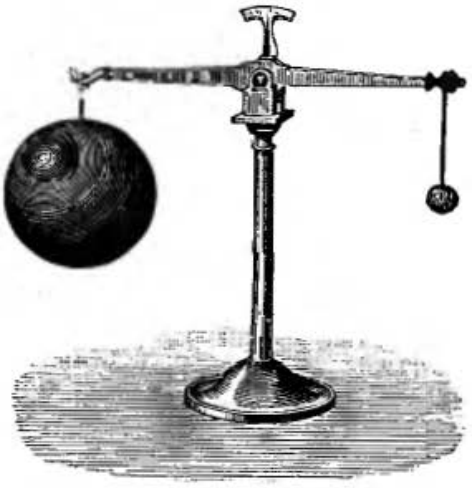


Fig. 148. Baroskop.

Z powyższego łatwo zrozumieć, że przy ważeniu, uskutecznianem zwykle w powietrzu, otrzymujemy nie rzeczywisty ciężar ważonego ciała, t. j. nie ciężar, jaki posiadałoby ono w próżni, lecz pozorny, mianowicie zmniejszony o ciężar równej mu objętości powietrza. To samo dotyczy wprawdzie gwichtów, za pomocą których ważymy, te jednak, jako specyficznie cięższe od większej części ważonych ciał, posiadają mniejszą od nich objętość, a więc wypychają mniej powietrza i tracą przeto mniej na ciężarze tak, że strata ich wynosi tylko część straty, jaką ponoszą ciała odważane.

Ponieważ 1 litr powietrza, przy ciśnieniu 1 atmosfery i przy temperaturze 0^0 waży tylko 1 gr., 293, a przy 15^0 C. — zwykłej temperaturze pokojowej — jeszcze mniej, błąd więc, jaki naprzykład popełniamy, przyjmując pozorny ciężar ważonego cia-

ła, objętości 1 litra, za jego ciężar rzeczywisty, jest tak nieznaczny, że w życiu praktycznem możemy go pominąć. Tam jednak, gdzie chodzi o bardzo dokładne ważenie, naprzykład dla celów naukowych, należy koniecznie uwzględnić ciężar wypchniętego powietrza, który łatwo obliczyć, znając ciężar ciał, pomieszczonych na szalkach, stan barometru i temperaturę, przy której odbywa się ważenie.

Z prawa Archimedesa w stosunku do gazów wynika dalej, że w wypadku, gdy objętość wypchniętego gazu waży tyleż,

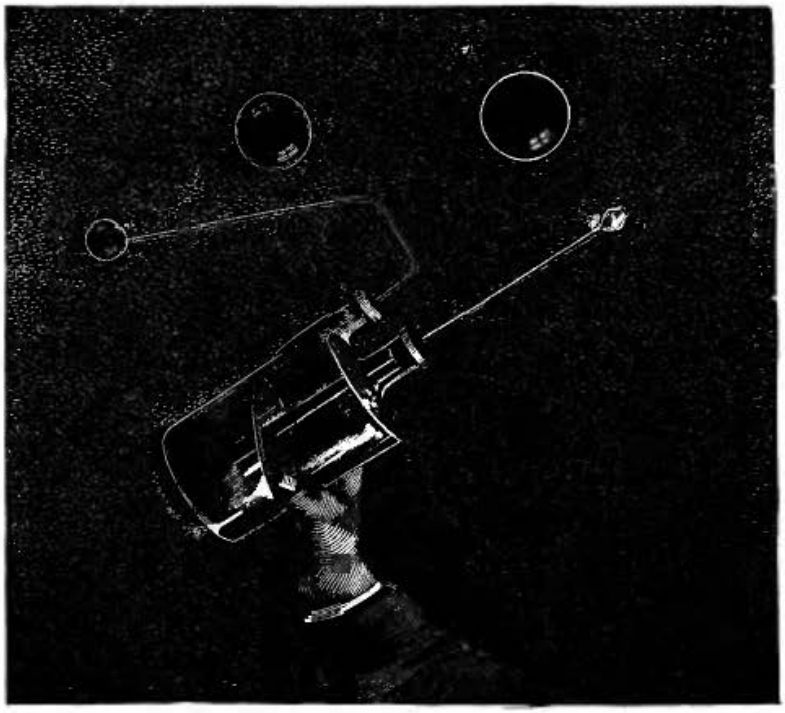


Fig. 149. Bańki mydlane, napełnione wodorem, podnoszą się w powietrzu.

co i zanurzone w nim ciało, innemi słowy, gdy gęstość tego ostatniego jest taka sama co i gazu, wtedy unosi się ono w nim swobodnie, t. j. nie spada na dół, ani też wznosi do góry; z góry bowiem na dół działa na nie własny jego ciężar, z dołu zaś do góry — równe temu ciężarowi parcie gazu.

Nareszcie w razie, gdy ciało waży mniej, niż równa objętość gazu, wtedy podnosi się ono w nim do góry, podobnie jak to czyni korek, zanurzony w wodzie. Black, profesor fizyki w Edynburgu, podczas wykładów mianych w 1767, r. głosił już, że pęcherz

napełniony wodorem, podnosiłby się zapewne w powietrzu; nie wykonał on jednak nigdy podobnego doświadczenia, uważając takowe za zabawkę. Dopiero w r. 1782 Cavallo zakomunikował towarzystwu królewskiemu w Londynie rezultaty doświadczeń, wykonanych z bańkami mydlanemi, wypełnionemi wodorem, które same przez się podnosiły się w powietrzu (fig. 149), dla tego, że bańka taka wraz z zawartym w niej wodorem waży mniej, niż równa objętość powietrza.

§ 2. Balony. Podróże nadpowietrzne.

Na omówionej w końcu poprzedniego paragrafu zasadzie polegają t. z. balony. Są to od spodu otwarte, wydrążone kule z lekkiej i nieprzenikliwej dla gazów materyi, które, będąc wypełnione ogrzanem powietrzem, wodorem, gazem oświetlającym lub jakimkolwiek innym gazem, lżejszym od zwykłego powietrza, wznoszą się w niem dzięki stosunkowej swej lekkości.

Wynalazek balonów zawdzięczamy braciom Montgolfier, fabrykantom papieru w małem miasteczku francuzkiem Annonay, gdzie 5 czerwca 1783 r. po raz pierwszy puszczono balon, napełniony powietrzem, ogrzewanem przez spalanie słomy, znajdującej się pod otworem balonu. Bracia Montgolfier wiedzieli już prawdopodobnie o wyżej wzmiankowanem doświadczeniu Cavallo, do pierwszych bowiem swych prób używali wodoru, przekonawszy się jednak, że gaz ten nader łatwo przenika przez powłokę balonu, zastąpili go ogrzanem powietrzem; od ich imienia też balony, napełnione tym ostatnim gazem, nazwano *montgolfierkami*.

Charles, profesor fizyki w Paryżu, zbudowawszy balon z jedwabnej materyi, przesiąkniętej kauczukiem, rozpuszczonym we wrzącym olejku terpentynowym, zdołał uczynić balon ten nieprzenikliwym dla wodoru i mógł użyć tego gazu zamiast ogrzanego powietrza. 27 sierpnia 1783 r. pierwszy taki balon, nazwany „Globe“, wzniósł się wobec tłumnie zebranych widzów, z pola Marsowego pod Paryżem i spadł po upływie niespełna godziny pod Gonesse, dosięgłszy wysokości przeszło 1000 metrów. Od

imienia Charles'a, balony napełnione wodorem, po raz pierwszy przezeń do tego celu użytym, nazwano *charlierkami.*

Podczas pierwszych prób puszczano balony bez pasażerów, myśl jednak, że za pomocą tych przyrządów ludzie także mogą wzbijać się w górne warstwy atmosfery była tak naturalną, że niedługo czekała na urzeczywistnienie. To też jeszcze w tym samym roku (1783) Pilâtre de Rozier i d'Arlandes odważyli się na taką podróż nadpowietrzną. Wzniósłszy się uprzednio kilka

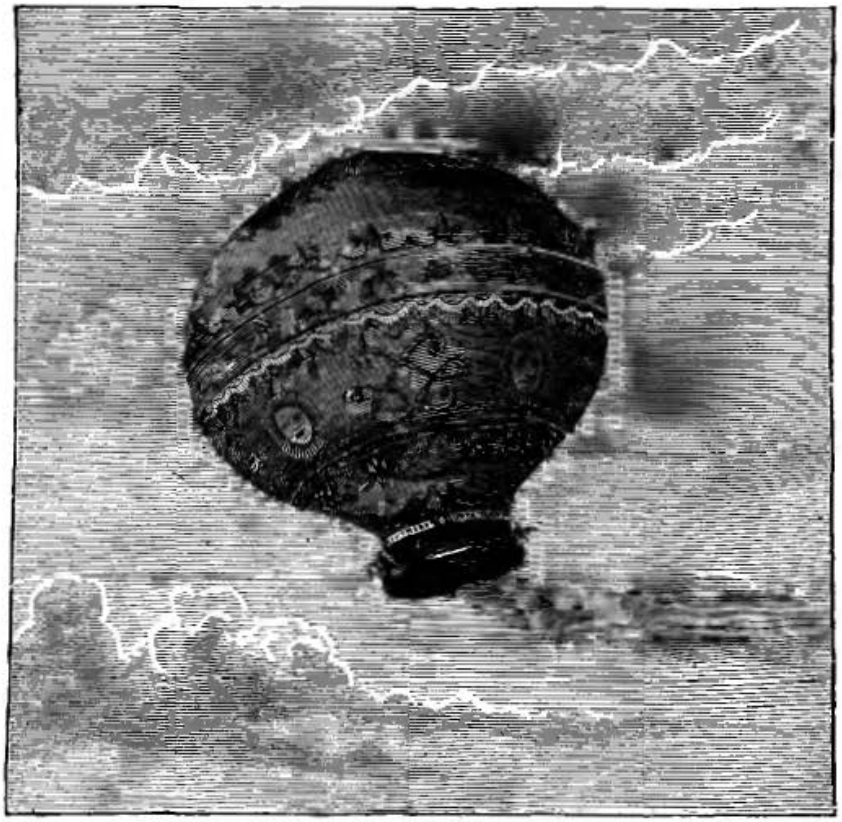


Fig. 150. Montgolfierka, użyta przez Pilâtre de Roziera i d'Arlandesa do pierwszej podróży nadpowietrznej, 21 listopada 1783 r.

razy t. z. balonem uwięzionym (ballon captif), t. j. połączonym z ziemią za pomocą rozwijającej się liny, odbyli oni w końcu podróż w wolnej montgolfierce (fig. 150); wzbiwszy się na wysokość przeszło 2 kilometrów, przelecieli po nad Paryżem i szczęśliwie znowu spuścili się na ziemię w odległości 2 mil od miejsca wyjazdu. W ten sposób pierwsza próba zdobycia państwa atmosfery uwieńczona została pomyślnym skutkiem, a przykład ten rychło znalazł licznych naśladowców, pragnących zbadać wyższe

warstwy atmosfery i ewentualnie poczynić tam obserwacye naukowe. Niezawsze jednak podobne podróże przebiegały tak pomyślnie i niejeden aeronauta (pływak nadpowietrzny) przypłacił swą śmiałość życiem, jak to się stało naprzykład z samym Pilâtre de Rozierem, który chcąc przelecieć balonem ponad kanałem La Manche, oddzielającym Francyę od Anglji (co już przed nim inni szczęśliwie uskutecznili), wpadł wraz z balonem w morze i utonął.

Balon, unoszący się w powietrzu, znajduje się pod wpływem działania dwóch wręcz przeciwnych co do kierunku sił: własnego swego ciężaru, działającego nań z góry na dół i parcia z dołu do góry, równego ciężarowi wypchniętego przez balon powietrza. *Siła więc, z jaką balon wznosi się do góry, równa się nadmiarowi* ciężaru, wypchniętego przezeń powietrza nad ciężarem samego balonu; niechaj ten ostatni wraz z zawartym w nim gazem i wszelkiemi przynależytościami waży ~~100~~ 25 kilogr., wypchnięte zaś powietrze ~~25~~ 100 kil., wtedy pchany on jest przez siłę, równą ciężarowi 75 kilogr. Jeżeli przytem weźmiemy pod uwagę jedynie ciężar gazu, zawartego w balonie, pominiemy zaś wagę powłoki i balastu, to siła wznoszenia balonu, dopóki nie zostanie on całkowicie rozdęty przez zawarty w nim rozszerzający się gaz, pozostaje przybliżenie stałą, niezależnie od wysokości, na jakiej się znajduje. W samej rzeczy, gdy w górnych warstwach atmosfery, ciśnienie zewnętrznego powietrza zmniejszy się naprzykład do $^1/_2$, wtedy, według prawa Boyle'a-Mariotte'a, podwoi się także objętość zawartego w balonie gazu, a więc 2 razy większą też będzie objętość wypchniętego przez balon powietrza. Jednocześnie atoli i gęstości obu gazów (t. j. zewnętrznego powietrza oraz gazu, wypełniającego balon) będą, według tegoż prawa, 2 razy mniejsze, tak, że ani ciężar balonu, ściągający go ku dołowi, ani ciężar wypchniętego przezeń powietrza, pchający go do góry, a więc i siła wznoszenia balonu, równająca się nadmiarowi tego ostatniego ciężaru nad pierwszym, się nie zmienią. Gdy jednak powłoka balonu została już ostatecznie rozdęta tak, że objętość jego już więcej wzrastać nie może, wtedy przy dalszem jego wzbijaniu się w górę, siła wznoszenia zmniejsza się dlatego, że *odtąd wypycha on stale jednakową objętość powietrza coraz to*

rzadszego, a więc coraz to lżejszego. W końcu przeto musi nastąpić moment, w którym parcie z dołu do góry, przewyższające początkowo ciężar całego balonu, stanie się równem temu ciężarowi, wtedy zaś balon nie może się już wyżej wznosić, lecz unoszony przez prądy powietrzne, posuwa się w kierunku poziomym.

Zastosujmy teraz powyższe uwagi do poszczególnych rodzajów balonu i zacznijmy od montgolfierek. Dla ocenienia siły ich wzlotu, zauważmy, iż ciężar 1 metra sześc. powietrza, przy ciśnieniu dokładnie 1 atmosfery, wynosi:

Dla temperatury 0° — 1293 gramów
„ 10° C. — 1247 „
„ 50° C. — 1093 „
„ 100° C. — 946 „

Niechaj temperatura otaczającego powietrza będzie 0°, wtedy siła wznoszenia balonu dla każdego metra sześc. zamkniętego w nim powietrza równa się przy 50° C. — 200 gramom, przy 100° C. — 347 gr. (pomijamy tu ciężar powłoki i balastu). Siła ta jeszcze się zwiększa przy wyższej temperaturze, trudno jednak powietrze, wypełniające balon, stale przy niej utrzymywać.

O wiele lepszemi pod omawianym tu względem są charlierki — balony, napełniane wodorem. 1 metr sześc. tego gazu przy ciśnieniu 1 atmosfery i temperaturze 0° waży tylko 96 gramów, dla każdego więc metra sześc. wodoru, przy podanych warunkach temperatury i ciśnienia i przy temperaturze 0° otaczającego powietrza, siła wznoszenia balonu równa się ciężarowi prawie 1200 gramów.

Do napełniania balonów bardzo często używają o wiele tańszego od wodoru gazu oświetlającego, po raz pierwszy zastosowanego do tego celu przez sławnego aeronautę angielskiego Greena. Siła jednak wznoszenia dla tego gazu jest o wiele mniejsza, niż dla wodoru, gęstość jego bowiem może wynosić aż do $^5/_8$ gęstości powietrza atmosferycznego. Glaisher radzi przeto używać jedynie gazu, wywiązującego się przy końcu destylacyi smoły z węgla kamiennego (z której otrzymuje się gaz oświetlający), jako lżejszego, niż gaz, wydzielający się w początku tegoż procesu. W czerwcu 1862 r., rzeczony badacz odbył podróż nadpo-

wietrzną balonem, napełnionym gazem oświetlającym, którego gęstość w stosunku do powietrza jako jedności, wynosiła tylko 0,36 i dla którego siła wznoszenia dla każdego metra sześc. wynosiła 830 gr., a więc przeszło $^2/_3$ siły wznoszenia dla wodoru.

Co się tyczy kształtu balonów, to montgolfierkom, jakoteż i charlierkom najlepiej jest nadawać postać walcowato lub stożkowato ku dołowi zaostrzonej kuli dlatego, że ze wszystkich brył o jednakowej objętości kula posiada najmniejszą powierzchnię: wybierając postać kulistą, sprawiamy więc, że ciężar powłoki, podtrzymywanej przez daną masę gazu, jest możliwie mały. Do tego przyłącza się jeszcze i ta okoliczność, że ciśnienie gazu, zamkniętego w powłoce, wtedy tylko jednostajnie rozmieszcza się po całej jej powierzchni, gdy powłoka ta jest kulistą tak, że zamknięty w balonie gaz już wskutek swej prężności usiłuje mu nadać tę postać. W montgolfierkach dolny otwór pozostaje niezamkniętym, podczas gdy w charlierkach należy takowy, po napełnieniu balonu, hermetycznie zamknąć, ażeby, o ile to jest możliwe, zapobiedz wypływowi gazu.

Powłoka balonu składa się z oddzielnych skrawków, rozszerzonych pośrodku i z obu stron ostro zakończonych, które zszywa się w ten sposób, że szwy biegną nakształt południków kuli, przyczem baczyć należy, aby nie pozostała szpara lub otwór, przez które gaz mógłby wypływać; rozumie się, że powłoka musi być wyrobiona z materyi nieprzenikliwej dla gazów, najlepiej z materyi jedwabnej, pokrytej stosownie przygotowanym werniksem. Balon obciągnięty jest siecią sznurów, szczelnie przylegających do górnej jego części i odstających od niego dopiero poniżej koła, przechodzącego w kierunku poziomym przez środek kuli; wszystkie sznury zbiegają się znów pod balonem, gdzie przyczepione są do mocnej drewnianej obręczy, na której wisi łódka dla aeronautów, balastu i t. d. (fig. 151, str. 202). Takie urządzenie przedstawia tę korzyść, że cały ciężar jednostajnie się rozkłada po powierzchni balonu, otoczonego sznurami, przez co najlepiej staje się zadość warunkom równowagi dla łódki i jej zawartości.

Zwróćmy się teraz do środków, jakiemi rozporządza aeronauta dla podnoszenia lub opuszczania balonu; dalej bowiem nie sięga jego władza, zwłaszcza zaś kierowanie balonem w kierunku poziomym, jak dotąd, wymyka się jeszcze z pod jego wpływu.

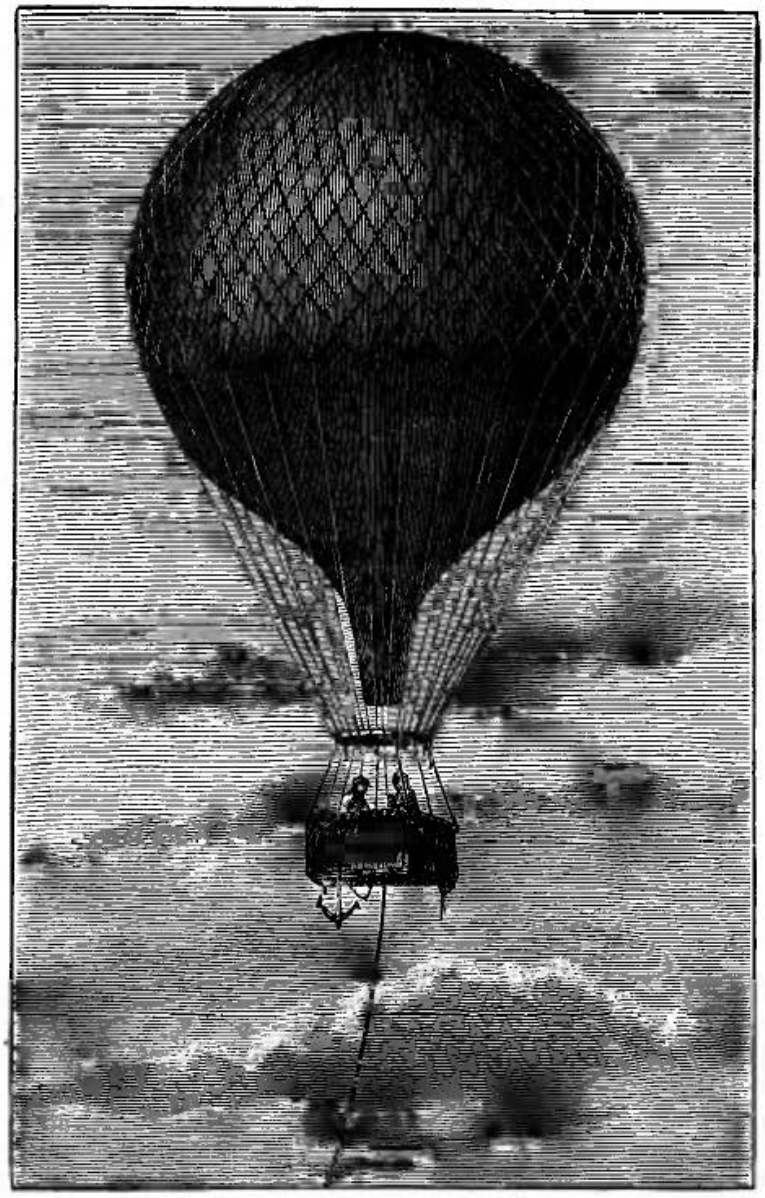


Fig. 151. Kształt balonu, napełnionego gazem.

Panujący w danej warstwie atmosfery prąd powietrzny unosi z sobą znajdujący się tam balon, nadając mu takąż prawie szybkość, z jaką porusza się sama masa powietrza tak, że siedzący w łódce nie czują prawie wiatru. Otóż jedyny środek nadawa-

nia balonowi ruchu w odpowiednim kierunku, polega na tem, aby pozwolić mu wznieść się lub spaść do takiej warstwy, w której panuje prąd powietrzny pożądanego kierunku. Widzimy, że i ten środek tylko wtedy może być zastosowany, gdy na jakiejś wysokości, do której balon dotrzeć jeszcze może, panuje w ogóle pożądany prąd powietrzny.

W montgolfierkach regulacya wznoszenia i spuszczania balonu połączona jest z wielkiemi trudnościami i w ogóle tylko wtedy jest możliwa, jeżeli balon zabiera z sobą przyrząd, służący do ogrzewania powietrza, jak lampy naftowe. Wzmagając płomienie lamp, sprawiamy, iż powietrze zawarte w balonie silniej się rozgrzewa i rozszerza, powiększając jego objętość, przez co balon wznosi się wyżej; przeciwnie, przy zmniejszaniu płomieni, powietrze wewnętrzne oziębiając się, kurczy się i balon zaczyna spadać. Cała jednak manipulacya jest tak niepewna, niebezpieczeństwo pożaru — tak wielkie, z drugiej zaś strony siła wznoszenia — stosunkowo tak nieznaczna, że oddawna już zarzucono montgolfierki, jako statki nadpowietrzne dla ludzi; przygotowują je jeszcze tylko na małą skalę, używając ich jako zabawek, które atoli nieraz już stały się przyczyną pożaru.

Daleko łatwiej kierować charlierkami, napełnionemi wodorem lub gazem oświetlającym. Chcąc wznieść się do znaczniejszej wysokości, należy zmniejszyć ciężar balastu, składającego się zwykle z worków piasku, umieszczonych w łódce; piasek ten powinien być bardzo drobny, aby, spadając ze znacznej wysokości na ziemię, nie wyrządzał szkody. W miarę potrzeby wysypuje się ten piasek, zawsze jednak w niewielkiej tylko ilości, wyrzucenie bowiem garści piasku może już spowodować nowe znaczne wzniesienie balonu; należy także oszczędzać ten szacowny materyał i nie powinno się nigdy całkowicie go zużyć, aby zawsze zachować możność wzniesienia się w wypadku, gdy dana miejscowość na ziemi okazuje się nieodpowiednią dla zarzucenia kotwicy. Podczas podróży nadpowietrznej nieraz już się zdarzało, że aeronauci, po wyczerpaniu całego balastu, wyrzucali żywność, odzież, a nawet przyrządy naukowe, byle tylko utrzymać balon w powietrzu i uchronić go od zbyt nagłego spadku. Chcąc się spuścić,

wypada otworzyć klapę, pomieszczoną w górnej części balonu i hermetycznie zamykającą znajdujący się pod nią otwór; dokonywa się zaś to przez pociągnięcie sznurka, idącego od klapy wzdłuż balonu aż do łódki. Przez swobodny otwór, część gazu wypełniającego balon, wypływa na zewnątrz, przez co ten ostatni zaczyna opuszczać się ku dołowi (fig. 152). Spadek balonu powinien odbywać się powoli i ostrożnie; gdyby chciano odrazu ze znacznej wysokości spuścić się na ziemię, wtedy, przy wciąż wzrastającej szybkości spadku, uderzenie o ziemię byłoby tak gwałtowne, że zagrażałoby życiu aeronautów. Zbliżanie do ziemi odbywa się, dla wymienionego powodu, przerwami; opuszcza się balon na jakie 500 metrów, następnie przez wyrzucenie balastu podnosi się go na 100 metrów, znowu opuszcza i t. d., aż dopóki balon nie znajdzie się na nieznacznej odległości od powierzchni ziemi. Wtedy rzuca się specyalnego rodzaju sznur, mniej więcej 50 metrów długi, przyczepiony do łódki i zaopatrzony w mnóstwo grubych węzłów. Gdy część tego sznura leży na ziemi, ciężar balonu o tyleż się zmniejsza tak, że unosi się on jeszcze w powietrzu, dopóki dalszy wypływ gazu znowu go nie obniży; sznur ten służy więc także jako balast, który jednak zawsze w razie potrzeby napowrót można wciągnąć. W końcu zarzuca się jednę lub dwie kotwice, aby uwięzić balon.

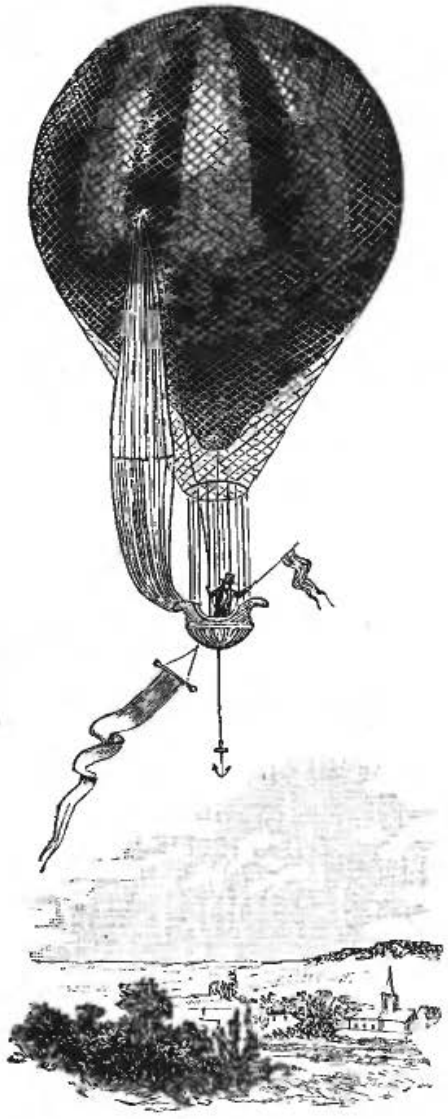


Fig. 152. Charlierka z przyczepionym do niej spadochronem.

Aeronauta sądzi o wznoszeniu lub spadaniu balonu ze wskazówek barometru: w pierwszym wypadku słup rtęci w barome-

trze spada, w drugim zaś — podnosi się; za pomocą tegoż przyrządu ocenia on wysokość, na jakiej w danej chwili się znajduje. Długa chorągiew przyczepiona do łódki, powiewając po nad tą ostatnią lub też pod nią, także pokazuje, czy balon spada czy też się wznosi (ten ostatni wypadek przedstawiony jest na fig. 152).

Wkrótce po wynalezieniu balonów, usiłowano zbudować przyrząd, za pomocą którego aeronauta, w razie niebezpieczeństwa, dotyczącego samego balonu, mógłby się uchronić od zbyt szybkiego spadku. Przez długi czas sądzono, że zadaniu temu dobrze odpowiada wynaleziony wówczas spadochron. Przyrząd ten składa się z obszernej okrągłej kapy, mającej mniej więcej 5 metrów w średnicy i zeszytej z oddzielnych pasów bardzo mocnej materyi, na wzór pokrywy parasola. Do brzegów kapy przymocowane są dokoła sznury, zbiegające się w jeden wspólny węzeł, do którego przyczepiona jest mała łódka. Na fig. 152 z lewej strony widać taki zwinięty w postaci zamkniętego parasola spadochron, którego górna część przyczepiona jest do środka balonu za pomocą sznurka, przesuniętego przez sieć sznurów balonu i zwieszającego się aż do łódki tegoż, dolna zaś — węzeł i mała łódka — umieszczone są w większej łódce balonu. W razie niebezpieczeństwa aeronauta, przecina sznurek, łączący spadochron z balonem i przechodzi do małej łódki. W tej chwili rozpoczyna się spadek i szybkość jego stałaby się wkrótce bardzo wielką, gdyby nie to, że spadochron coraz bardziej się roztwiera, przez co wzrasta także znacznie opór powietrza tak, że w końcu spada on bardzo wolno na ziemię.

Garnerin pierwszy odważył się w r. 1802 za pomocą takiego przyrządu spuścić na ziemię z wysokości około 1000 metrów. Spadochron, jakiego użył śmiały ten aeronauta, nie posiadał pośrodku otworu tak, że powietrze zgęszczane pod spadającą kapą mogło odpływać tylko z boków, przez co spadochron ulegał silnym wstrząśnieniom, które groziły Garnerin'owi poważnem niebezpieczeństwem. Brak ten łatwo daje się usunąć, jeżeli pozostawić zgęszczonemu powietrzu wolne ujście przez otwór pośrodku kapy tak, jak to pokazuje fig. 153. W nowszych czasach zupełnie zarzucono spadochrony, przekonano się bowiem, że pewność jaką

przedstawiają podczas spadku, bynajmniej nie jest większa od tej, jaka wypływa z dobrej konstrukcyi balonu i umiejętnego nim kierowania; wobec tego stanowiły one tylko niepotrzebny balast, bardziej szkodliwy, niż pożyteczny.

Nie o wiele lepszy skutek odniosły liczne usiłowania w celu wynalezienia sposobu poziomego kierowania balonami, podejmowane głównie przez aeronautów francuzkich, z których wyszczególnić należy Giffarda, Dupuy de Lôme'a, a w ostatnich latach — Krebsa i Renard'a. Brak miejsca nie pozwala nam wejść w szczegóły tych ciekawych prób, do zrozumienia których potrzebna jest gruntowniejsza znajomość praktycznej mechaniki; powiemy więc tylko, że, jak dotychczas, o właściwem poziomem kierownictwie balonami nie ma mowy i można tylko, co najwyżej, nadawać im kierunek, zbaczający nieco od kierunku panującego w danej warstwie wiatru, lecz nie więcej jak o 15°.

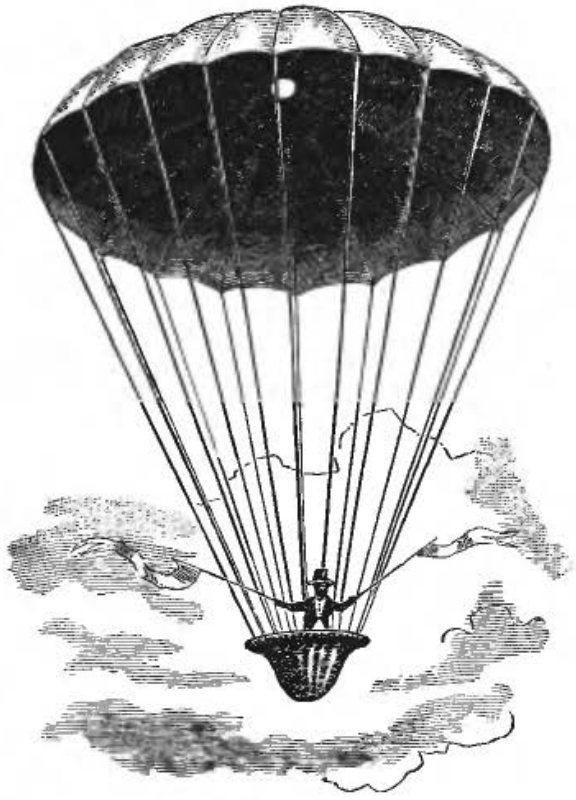


Fig. 153. Spadochron podczas spadku.

Cała przyszłość balonów jako środka lokomocyi zależy od mniej lub więcej skutecznego rozwiązania powyższego zadania, dotychczasowe zaś takie zastosowanie, głównie z powodu wymienionego wyżej braku, jest bardzo małe. Już w kilkanaście lat po wynalezieniu balonów, znakomity matematyk Carnot zrozumiał korzyści, jakie mogą one oddać sztuce wojennej i z jego inicyatywy w r. 1794 przyłączono do wojska francuzkiego legiony aeronautów, którzy jeszcze w czerwcu tegoż roku uczestniczyli w bitwie pod Fleurus: wzniósłszy się na znaczną wysokość uwięzionym balonem, wyśledzili oni pozycye wojska austryackiego i przez to niemało się przyczynili do wygrania bitwy przez

francuzów. Często używano uwięzionych balonów do tego samego celu podczas wojen rzeczypospolitej i Napoleona i jeszcze w r. 1814 Carnot posługiwał się tymże środkiem przy obronie Antwerpii; również często korzystano z uwięzionych balonów podczas wojny pomiędzy północnemi i południowemi Stanami Ameryki Północnej. Nieco inne zastosowanie znalazł balon w ostatniej wojnie francuzko-niemieckiej: gdy Paryż został ze wszech stron otoczony przez wojska nieprzyjacielskie i pozbawiony w ten sposób wszelkiej komunikacyi z pozostałą Francyą, wpadnięto na pomysł, aby wysyłać z miasta listy, depesze, a nawet ludzi za pomocą balonów, które puszczano naturalnie tylko wtedy, gdy wiatr wiał w stronę kraju, wolną od wojsk niemieckich. Przez cały czas oblężenia Paryża puszczono 54 balonów z $2^1/_2$ milion. listów, z których jednak nie wszystkie dotarły do pożądanego celu; niektóre, wskutek nagłej zmiany wiatru, wpadły w ręce nieprzyjaciół, inne zaś zagnane zostały aż do wnętrza Niemiec, a jeden nawet — aż do Norwegii.

Częstokroć także przedsiębrano podróże nadpowietrzne w celach czysto naukowych, które niejednym już przyczynkiem zbogaciły nasze wiadomości, dotyczące zmian, zachodzących w atmosferze. Aeronauci w takich razach zaopatrują się w odpowiednie przyrządy, jak barometry, termometry, hygrometry (te ostatnie służą do mierzenia stopnia wilgoci), przyrządy do mierzenia natężenia magnetyzmu ziemskiego, elektryczności i t. d., przez co łódka balonu przyjmuje postać małej spostrzegalni meteorologicznej. Do najciekawszych pod tym względem należą podróże, jakie odbył w r. 1804 uczony francuzki Gay-Lussac z początku wespół z Biot'em, później zaś sam. Sławny ten fizyk wzniósł się na 7016 metrów nad poziom morza; na tej wysokości barometr spadł do 320 milimetrów, termometr zaś, który na powierzchni ziemi wskazywał 31° C. wyżej zera, spadł do 9,5° C. niżej zera. Powietrze w górnych sferach było tego dnia (działo się to w lipcu) tak suche, że substancye hygroskopiczne, jak papier lub pergamin, zupełnie wysychały i skręcały się, jak gdyby były wystawione na działanie ognia. Oddech i obieg krwi były nadzwyczaj przyśpieszone z powodu znacznego rozrzedzenia powietrza; Gay-Lussac

skonstatował u siebie 120 uderzeń pulsu, podczas gdy normalnie mógł ich naliczyć tylko 66.

Podczas pierwszej podróży, odbytej wspólnie z Biot'em, uczeni ci zmierzyli natężenie magnetyzmu ziemskiego w różnych odległościach od powierzchni ziemi, podczas drugiej zaś Gay-Lussac zebrał powietrze na wysokości przeszło 7000 metrów i poddawszy je następnie analizie, otrzymał nader ważny dla nauki rezultat, że i na tej wysokości skład powietrza, pod względem jego zawartości azotu i tlenu, jest ten sam co i na powierzchni ziemi.

Ciekawe są także podróże, odbyte przez Barrala i Bixio w r. 1850, oraz przez Glaishera i Coxwella, pomiędzy 1862 a 1865 r., przedsiębrane na zlecenie Brytańskiego Towarzystwa postępu nauk. Podczas jednej z podróży, ci ostatni aeronauci napotkali, a było to w lipcu, na chmurę prawie 4 kilometry grubą, utworzoną całkowicie z drobnych igieł lodu i gdy dotarli do wysokości 7050 metrów, temperatura spadła do 39° C. niżej zera tak, że rtęć w barometrach i termometrach zaczynała zamarzać.

Nadmieniliśmy już przedtem, że podróże nadpowietrzne nie zawsze mają szczęśliwy przebieg: tak niedalej jak w 1875 r. dwóch aeronautów Crocé-Spinelli i Sivel na wysokości 8600 metrów znalazło śmierć przez uduszenie, pomimo przedsiębranych ostrożności i tylko trzeci uczestnik wyprawy—Tissandier—ocalał.

Gdyby się kiedykolwiek udało wynaleźć sposób utrzymywania uwięzionych balonów przez dłuższy czas na tej samej wysokości, wtedy możnaby poustawiać w nich samozapisujące przyrządy meteorologiczne (o których będzie mowa w końcu niniejszego dzieła) i w ten sposób otrzymywać systematyczny szereg obserwacyj. Teraz zaś musimy się zadawalniać pojedyńczemi spostrzeżeniami, dokonywanemi podczas jednej podróży, trwającej zwykle przez stosunkowo krótki przeciąg czasu. Od urzeczywistnienia powyższej myśli, jesteśmy atoli, jak się zdaje, jeszcze bardzo daleko.

ROZDZIAŁ XII.

Zjawiska, zachodzące przy stykaniu się gazów z ciałami stałemi, ciekłemi i lotnemi.

§ 1. Pochłanianie gazów przez ciała stałe. Błonka gazowa. Obrazy Mosera.

Jeżeli do przestrzeni, wypełnionej jakimś gazem, wprowadzamy ciało stałe, wtedy przyciąga ono najbliższe cząstki gazu, wskutek czego następuje zgęszczenie tego ostatniego na powierzchni ciała stałego i tworzy się tak zwana *błonka* zgęszczonego gazu. Im większa jest powierzchnia ciała stałego w stosunku do jego objętości, tem więcej punktów styka się z gazem i przyciąga cząstki tegoż, który przytem nietylko skupia się na powierzchni ciała stałego, lecz przenika przez pory i przestrzenie międzycząstkowe do jego wnętrza i pozostaje tam wskutek przyciągania. To ostatnie zjawisko, zwane *pochłanianiem* gazu, możemy łatwo uwidocznić za pomocą bardzo prostego doświadczenia. Jeżeli szklaną rurkę, zamkniętą u góry i dolnym otworem zanurzoną w rtęci, napełnimy kwasem węglanym i następnie do tej rurki wprowadzimy kawałek świeżo wyprażonego węgla, zobaczymy, że objętość gazu się zmniejsza i rtęć w rurce się podnosi, co dowodzi, iż gaz zostaje pochłonięty przez węgiel. Tak samo zachowują się inne ciała stałe względem różnych gazów.

Najrozleglejsze doświadczenia nad pochłanianiem gazów przez ciała stałe zawdzięczamy de Saussure'owi. Uczony ten wykazał przedewszystkiem, że do badań podobnych nadają się jedynie wyprażone i świeżo ugaszone ciała, a to dlatego, że ciała, które przez dłuższy czas leżały na powietrzu, skupiły już na swej powierzchni powietrze atmosferyczne oraz parę wodną. Saussure wprowadzał wyprażone ciała pod dzwon, w którym poprzednio zebrał nad rtęcią zmierzoną objętość danego gazu i następnie mierzył zmniejszenie objętości tegoż. Z licznych jego doświadczeń okazuje się, że jedno i to samo ciało pochłania różne gazy w rozmaitym stopniu, oraz że różne ciała pochłaniają rozmaite objęto-

ści jednego i tego samego gazu. Kawałek świeżo wyprażonego węgla drzewnego, jeżeli objętość jego przyjmiemy równą 1, pochłania 90 objętości amoniaku, 55 siarkowodoru, 35 kwasu węglanego, 9,5 tlenku węgla, 9,25 tlenu, 1,75 objętości wodoru; pianka morska pochłania 15 objętości amoniaku, 11,7 siarkowodoru, 5,3 kw. węgl., 1,1 tlenku węgla, 1,5 tlenu, 0,5 wodoru. Widzimy, że dla dwu wymienionych ciał stałych pochłonięte ilości różnych gazów następują po sobie w tym samym porządku; *w ogóle gazy tem silniej zostają pochłonięte, im łatwiej dają się skroplić pod wpływem ciśnienia*, jak tego dowodzi powyższy wykaz. Podobnie jak węgiel zachowują się wszystkie ciała, posiadające znaczną powierzchnię w stosunku do swej objętości, naprzykład ciała zproszkowane, gąbka platynowa i t. d., przyczem w stanie wilgotnym pochłaniają one z każdego gazu znacznie mniej, niż gdy są starannie wysuszone. Co się tyczy wpływu ciśnienia, pod jakiem znajduje się gaz, tyle tylko daje się powiedzieć, że wraz ze zmniejszeniem tego ciśnienia, zmniejsza się także objętość gazu, lecz nie w tym samym stosunku. Co się tyczy wpływu natury ciała pochłaniającego na ilość pochłoniętego gazu, to zdaje się wynikać z doświadczeń Quincke'go, że ilość ta wzrasta nietylko wraz z powierzchnią, lecz i z gęstością ciała stałego. Pewne względy każą nadto przypuszczać, że w zjawiskach tych obok działań czysto fizycznych odgrywają także pewną rolę wpływy chemiczne.

Z omawianej tu własności niektórych ciał korzysta się niekiedy w praktyce; tak naprzykład miałki węgiel drzewny, który najlepiej w tym celu wsypać do woreczka z rzadkiego muślinu, doskonale pochłania z otoczenia niektóre gazy, jak siarkowodór, amoniak, pewne węglowodory i t. d. zanieczyszczające powietrze i przyczynia się w ten sposób do oczyszczenia takowego. W związku także z pochłanianiem gazów znajduje się prawdopodobnie tak dziwna na pozór własność samozapalności niektórych ciał zproszkowanych, jak miałkiego węgla, które w stanie masywnym nie zapalają się przy zwykłej temperaturze, lecz czynią to dopiero przy ogrzaniu. Pochłanianie mianowicie gazów połączone jest z ich zgęszczeniem, temu zaś ostatniemu procesowi,

jak to w następstwie zobaczymy, zawsze towarzyszy wydzielanie się ciepła, które, w razie łatwej palności ciała pochłaniającego, może przyczynić się do jego zapalenia.

Istnienie błonki zgęszczonych gazów na powierzchni ciał stałych, które przez dłuższy czas były z niemi w zetknięciu, tłómaczy nam także ciekawe obrazy, powstające przez chuchanie, t. zw. obrazy Mosera. Każdy zna zjawisko tych obrazów. Gdy piszemy palcem albo lepiej drewnianą pałeczką na suchej szybie lub wypolerowanej płycie metalowej, wtedy nie znać śladów pisma; te jednak natychmiast występują, gdy chuchniemy na szybę lub płytę i jeszcze wyraźniej się uwydatniają, gdy wystawimy ją na działanie par rtęci, a to dlatego, że pary wodne lub rtęciowe inaczej się osadzają na miejscach zapisanych, niż na niezapisanych. Moser pokazał dalej, że jeżeli na jakiejkolwiek suchej płycie położymy pieczątkę z głoskami wypukłemi lub wklęsłemi, monetę, lub inne podobne przedmioty i po odjęciu ich chuchniemy na płytę lub wystawimy ją na działanie par rtęciowych, to wyraźnie wystąpi na niej obraz pieczątki lub monety i t. d. Co więcej, to samo zachodzi nawet w razie, gdy pieczątka nie dotyka bezpośrednio płyty, lecz utrzymywana jest na bardzo blizkiej od niej odległości przez podłożenie z boków cienkich blaszek miki.

Moser, który pierwszy dokładniej obserwował te zjawiska, poczytywał je błędnie za skutek utajonego światła, właściwego jakoby wszystkim ciałom. Dopiero Waidele w 1843 r. przez szereg licznych doświadczeń wykazał, że źródła tych zjawisk szukać należy w omówionej wyżej błonce gazowej, pokrywającej ciała stałe i składającej się zwykle z cienkiej warstewki mocno zgęszczonego powietrza, pary wodnej i nader delikatnego pyłu. Przez pisanie albo stawianie pieczątki na płycie, wywołujemy zmianę w jej atmosferze gazowej w punktach zetknięcia tak, że przy następnem chuchaniu pary niejednakowo się osadzają w różnych miejscach płyty. Pisząc na płycie, usuwamy właśnie ową błonkę z miejsc, których się dotykamy, gdy zaś następnie chuchamy albo wystawiamy płytę na działanie rtęci, pary zgęszczają się w tych miejscach w większej ilości, niż w miejscach niezapi-

sanych, wskutek czego pierwsze nabierają innego wyglądu, niż drugie. Waidele podał także bardzo łatwy sposób, za pomocą którego możemy dowoli pozbawiać płytę błonki gazowej, albo powlec ją świeżą atmosferą gazową. W pierwszym wypadku posypuje się płytę świeżo wyprażonym i ostudzonym w próżni trypłem (pył węglowy), który, jako silny pochłaniacz gazów, odbiera jej błonkę, następnie zaś ściera się starannie trypel kawałkiem czystej waty. W drugim wypadku przeciwnie, posypuje się świeżo wypaloną i ostudzoną w próżni płytę trypłem, który przez dłuższy czas pozostawał w zetknięciu z jakimś gazem i następnie ściera trypel jak wyżej. Jeżeli na oswobodzonej od gazów płycie postawimy pieczątkę, to w punktach zetknięcia błonka powietrzna tej ostatniej przejdzie, częściowo przynajmniej, na płytę, przez co w miejscach tych przy chuchaniu para będzie się zgęszczała słabiej, niż w innych i powstanie obraz pieczątki. Z drugiej strony, możemy tę ostatnią pozbawić atmosfery gazowej, jeżeli ją ogrzejemy, wyczyścimy szczoteczką, zwilżoną spirytusem i starannie wytrzemy. Taka świeżo oczyszczona pieczątka, będąc postawiona na płycie, pokrytej warstewką jakiegoś gazu, pozbawia ją takowej w punktach zetknięcia; w tych przeto miejscach, przy następnem chuchaniu więcej się zgęści pary, niż w innych, tak, że i w tym wypadku otrzymamy obraz pieczątki. Jeżeli natomiast obie, płyta i pieczątka, świeżo są wytarte, albo jeżeli obie opatrzone są jednakowemi błonkami gazowemi, to obraz albo nie powstaje wcale, albo też występuje bardzo słabo. Gdy zaś płyta i pieczątka przez dłuższy czas leżały na powietrzu i nie były ścierane, mają one błonki gazowe niejednakowej gęstości, (różne bowiem ciała w różnym stopniu zgęszczają gazy na swej powierzchni) w miejscach ich zetknięcia albo samego nawet zbliżenia nastąpią zmiany w gęstości ich atmosfer gazowych, wskutek czego przy następnem chuchaniu powstanie odpowiedni obraz. Doświadczenia te i inne podobne dowodzą słuszności powyższego sposobu tłómaczenia obrazów Mosera.

§ 2. Pochłanianie gazów przez ciecze.

Nietylko ciała stałe, lecz i ciecze przyciągają i mniej lub więcej silnie pochłaniają gazy. Jeżeli naprzykład szklaną rurę, zamkniętą u góry i dolnym otworem zanurzoną w rtęci, napełnimy amoniakiem i następnie wprowadzimy do niej, powyżej rtęci, nieco wody, zobaczymy, że rtęć w rurze szybko się podnosi, co dowodzi, że gaz rzeczony zostaje pochłonięty przez wodę. Jedna i ta sama ciecz, przy jednakowych warunkach temperatury i ciśnienia, pochłania rozmaite ilości różnych gazów; tak samo różne ciecze pochłaniają niejednakowe ilości jednego i tego samego gazu.

Od czasów Priestley'a, który pierwszy badał ten przedmiot, wielu fizyków i chemików zajmowało się zjawiskami pochłaniania i starało się oznaczyć ilości różnych gazów, pochłanianych przy danych warunkach temperatury i ciśnienia przez różne ciecze, oraz znaleźć stosunek, zachodzący pomiędzy ilością pochłoniętego gazu a ciśnieniem, pod jakiem on się znajduje. Doświadczenia Henry'ego, wykonane w 1803 r. wykazały, że *objętość gazu, pochłanianego przy stałej temperaturze przez daną objętość cieczy, jest niezależna od jego ciśnienia.* Tak naprzykład dana objętość wody pochłania przy temperaturze 15° C. prawie taką samą objętość kwasu węglanego, niezależnie od tego, czy gaz ten znajduje się pod ciśnieniem jednej, lub więcej atmosfer. Ponieważ zaś gęstość gazu, według prawa Boyle'a-Mariotte'a, jest wprost proporcyonalna do wywieranego nań ciśnienia, z tego więc wynika, że ilość wagowa gazu, pochłanianego przez daną objętość cieczy przy niezmiennej temperaturze jest wprost proporcyonalna do ciśnienia, pod jakiem znajduje się gaz. Znając przeto ilość wagową gazu, pochłanianego przez pewną ciecz przy danem ciśnieniu, można łatwo obliczyć ilość tegoż gazu, pochłanianą przy jakiemkolwiek innem ciśnieniu. Ilość ta, przy stałem ciśnieniu, zmniejsza się, gdy temperatura się podnosi; związek jednak, jaki zachodzi między wzrostem temperatury i zmniejszeniem ilości pochłoniętego gazu, jest bardzo zawikłany.

Z powyższego wynika, że ciecz, która została nasycona gazem przy pewnem ciśnieniu, musi częściowo go tracić, jeżeli zmniejszymy ciśnienie, jak to w istocie widzimy w szumowaniu, musowaniu niektórych gatunków wina, wody sodowej lub selcerskiej, wód mineralnych i t. d. Przy ogrzewaniu ciecze także tracą pochłonięty gaz; dla uwolnienia naprzykład wody od zawartego w niej powietrza, najlepiej jest dobrze ją przegotować. Należy jednak zauważyć, że ciecze tylko wtedy przy ogrzewaniu lub zmniejszeniu ciśnienia całkowicie tracą pochłonięty gaz, gdy nie wchodzą z nim w połączenie chemiczne; nie można naprzykład z kwasu solnego—rozczynu gazu chlorowodorowego w wodzie—przez gotowanie całkowicie wypędzić chlorowodoru.

W nowszych czasach omawianym tu przedmiotem zajmował się wiele Bunsen. Uczony ten za pomocą specyalnie w tym celu zbudowanego przyrządu—absorbcyometru—dokładnie oznaczył t. zw. *współczynniki pochłaniania* różnych gazów dla różnych cieczy, t. j. te objętości gazów, które przy 0° i ciśnieniu 1 atmosfery zostają pochłonięte przez jednostki objętości danych cieczy. Litr wody przy temper. 0° i ciśnieniu 1 atmosfery pochłania 727,2 litrów amoniaku, 43,6 litra kwasu siarkowego (dwutlenku siarki), 3,3 l. siarkowodoru, 1,002 l. kwasu węglanego, 0,0299 l. tlenu, 0,0179 l. powietrza atmosferycznego i t. d. Podane tutaj cyfry przedstawiają współczynniki pochłaniania wymienionych gazów dla wody; w alkoholu te same gazy rozpuszczają się w daleko większych ilościach. W ogóle gazy, łatwo dające się skroplić, silniej zostają pochłonięte przez ciecze, niż te, które trudno skroplić, przyczem jednak wpływy natury chemicznej odgrywają tu jeszcze większą rolę, niż przy pochłanianiu gazów przez ciała stałe.

Jeżeli nad cieczą znajduje się mięszanina kilku gazów, nie działających chemicznie na ciecz, to każdy z nich rozpuszcza się w niej tak, jak gdyby sam jeden wypełniał całą przestrzeń, zajmowaną przez mięszaninę. Innemi słowy, objętość jakiegoś gazu, pochłanianego przez daną ciecz, jest niezależna od tego, czy w tej samej przestrzeni ponad cieczą znajduje się jeszcze inny gaz, czy też nie. Pochłonięta zaś ilość wagowa każdego z gazów

mięszaniny jest, jak to wynika z prawa Henry'ego, wprost proporcyonalna do jego parcyalnego ciśnienia (patrz str. 171), t. j. do tej części całkowitego ciśnienia mięszaniny, która przypada na dany gaz. Przykład lepiej to wyjaśni. Litr powietrza atmosferycznego zawiera przybliżenie $^1/_5$ litra tlenu i $^4/_5$ azotu; jeżeli powietrze to wywiera ciśnienie 1 atmosfery, to $^1/_5$ tego ciśnienia przypada na tlen, $^4/_5$ zaś na azot. Woda, stykająca się z takiem powietrzem, pochłania tyle tlenu, ileby go pochłaniała, gdyby całe powietrze składało się wyłącznie z tlenu o ciśnieniu $^1/_5$ atmosfery i tyle azotu, ileby go się w niej rozpuściło, gdyby całe powietrze składało się wyłącznie z azotu o ciśnieniu $^4/_5$ atmosfery. Łatwo także obliczyć ilości wagowe tych gazów, pochłoniętych przez wodę, stykającą się z powietrzem o ciśnieniu 1 atmosfery. Litr tlenu przy 0^0 i ciśnieniu 1 atmosfery waży 1 gr. 4336, współczynnik pochłaniania tego gazu dla wody równa się 0,02989; każdy litr wody pochłonąłby tedy $1{,}4336 \times 0{,}02989$, t. j. 0,04285 gram. tlenu, gdyby gaz ten znajdował się pod ciśnieniem 1 atmosfery, ponieważ zaś parcyalne jego ciśnienie w powietrzu wynosi tylko $^1/_5$ atmosf., każdy litr wody pochłonie przeto tylko $\frac{0{,}04285}{5}$ t. j. 0,00857 gr. tlenu. W podobny sposób obliczamy, że ilość wagowa pochłoniętego azotu równa się $1{,}2544 \times 0{,}01478 \times \frac{4}{5}$ t. j. 0,0158 gram. Stosunek wagowy azotu do tlenu w powietrzu, pochłoniętem przez wodę, jest więc jak 0,0158 do 0,00857, czyli nieco większy, niż 2 do 1, podczas gdy w zwykłem powietrzu atmosferycznem stosunek ten jest nieco mniejszy, niż 4 do 1. Powietrze, rozpuszczone w wodzie—którem oddychają zwierzęta i rośliny wodne—jest tedy prawie 2 razy bogatsze w tlen, niż zwykłe powietrze atmosferyczne, co pochodzi ztąd, że tlen znacznie więcej się rozpuszcza w wodzie, niż azot (porównaj współczynniki pochłaniania tych gazów).

§ 3. Wypływ gazów. Porywanie gazu przez strumień płynu.

Jeżeli w ścianie naczynia, napełnionego gazem o jakiemkolwiek ciśnieniu, znajduje się otwór, prowadzący do przestrzeni, zawierającej ten sam gaz o mniejszem ciśnieniu albo do próżni,

wtedy gaz wypływa z otworu i to tem szybciej, im większe jest ciśnienie, pod jakiem się znajduje i im mniejsza jest prężność zewnętrznego gazu. Wskutek wielkiej ruchliwości cząstek, wspólnej dla cieczy i gazów, wypływ tych ciał musi także podlegać podobnym prawom.

Prędkość wypływu cieczy, jak już wiemy, jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z wysokości jej poziomu nad otworem (patrz str. 135), t. j. z wysokości słupa cieczy, który cisnąc na cząstki, znajdujące się przed otworem, powoduje ich wypływ. Miarę ciśnienia gazu daje nam wysokość słupa rtęci, równoważonego przez ten gaz, możemy atoli ciśnienie to wyrazić także w wysokości słupa jakiegokolwiek innego ciała, naprzykład gazu, mającego tę samą gęstość, co i dane ciało lotne; wysokość takiego słupa będzie jednak tyle razy większa od wysokości słupa rtęci, ile razy gaz jest lżejszy od tej cieczy. Otóż *prędkość wypływu gazu do próżni jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z ciśnienia, wyrażonego za pomocą wysokości słupa ciała lotnego, mającego tę samą gęstość, co i wypływający gaz.* Jeżeli naprzykład w naczyniu znajduje się powietrze o ciśnieniu 1 atmosfery, ciśnienie to mierzy się za pomocą słupa rtęci, wysokości 760 milimetr., a więc za pomocą słupa powietrza, mającego 760×10500 milim., czyli 7980 metrów wysokości, ponieważ powietrze o zwykłej gęstości jest 10500 razy lżejsze od rtęci. Oprócz tego prędkość wypływu gazu jest także wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z podwójnego natężenia siły ciężkości w danem miejscu, t. j. z 2 g, albo przyjmując $g = 10$, z 20. W ten sposób obliczona prędkość wypływu powietrza o ciśnieniu 1 atmosfery do próżni wynosi 396 metrów. Lecz taką prędkość powietrze posiada tylko w pierwszej chwili wypływu, wkrótce bowiem w próżni znajduje się już pewna ilość powietrza, które wywiera ciśnienie wprost przeciwne i ciągle wzrastające, wskutek czego prędkość wypływu staje się coraz mniejsza i nakoniec, przy ciśnieniu równem z obu stron otworu, staje się równa zeru. Właściwie więc w każdej chwili prędkość wypływu jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z różnicy wysokości słupów powietrza, wyrażających wielkość ciśnienia wewnątrz i zewnątrz naczynia.

Jeżeli zamiast powietrza weźmiemy inny, lżejszy od niego gaz, lecz przy tem samem ciśnieniu, wtedy wysokość słupa, dającego miarę tego ciśnienia, będzie tyle razy większa od wysokości słupa powietrza, ile razy dany gaz jest odeń lżejszy. Innemi słowy wysokość ta jest odwrotnie proporcyonalna do gęstości gazu; dla wodoru naprzykład o ciśnieniu 1 atmosfery równa się ona $7980 \times 14{,}5$ czyli 115710 metrów, wodór bowiem jest 14,5 razy lżejszy od powietrza, przy jednakowych warunkach temperatury i ciśnienia. W ten sposób z powyższego prawa wynika, że *prędkości wypływu różnych gazów, znajdujących się pod jednakowem ciśnieniem, są w stosunku odwrotnym do pierwiastków kwadratowych z ich gęstości.* Gęstości naprzykład tlenu i wodoru mają się do siebie jak 16 do 1, pierwiastki kwadr. tych liczb są 4 i 1, otóż wodór wypływa, przy jednakowych warunkach ciśnienia, 4 razy prędzej, niż tlen. Znając stosunek gęstości dwóch gazów, możemy, na mocy ostatniego twierdzenia, obliczyć stosunek prędkości ich wypływu i naodwrót: ze znanych prędkości wypływu dwóch gazów możemy obrachować ich gęstości. Na tej ostatniej zasadzie polega bardzo ciekawa metoda Bunsena, służąca do oznaczenia gęstości gazów i par.

Omówione powyżej prawa stosują się tylko do wypływu gazów przez otwór w cienkiej ścianie albo przez rurki, których średnica jest dosyć znaczna w stosunku do ich długości. Jeżeli natomiast gazy wypływają przez włoskowate rurki, wtedy prędkości wypływu, jak to wykazały rozległe doświadczenia Grahama, stają się mniejsze, co dowodzi, że i u gazów, podobnie jak u cieczy, ma miejsce tarcie jednych warstw gazu o inne i o ścianki rurek, przez które gazy wypływają. Wypływ gazu przez włoskowate kanały zatyczki gipsowej zbadał ponownie 30 lat temu Bunsen. Znalazł on, pomiędzy innemi, że prędkości wypływu różnych gazów przy jednakowem ciśnieniu nie znajdują się do siebie wtedy w odwrotnym stosunku pierwiastków kwadratowych z ich gęstości. Tak naprzykład prędkości wypływu tlenu i wodoru w rzeczonych warunkach mają się do siebie jak 1 do 2,73, podczas gdy odwrotny stosunek pierwiastków kwadratowych z gęstości tych gazów jest jak 1 do 4.

Z tego wynika, że przepływ gazów przez gipsową przegrodę zostaje zwolniony wskutek tarcia, którego wielkość zależy od natury gazu, że więc puste przestrzenie gipsu zachowują się względem przepływającego przez nie gazu nie jak system otworów w cienkiej ścianie (wtedy bowiem prędkości wypływu różnych gazów musiałyby być odwrotnie proporcyonalne do pierwiastków kwadratowych z ich gęstości), lecz jak system włoskowatych kanałów. To samo dotyczy innych dziurkowatych przegród o wązkich porach.

Jeżeli strumień płynu—cieczy lub gazu—szybko przepływa przez powietrze, wtedy porywa z sobą przylegające dokoła cząstki tego ostatniego; do rozrzedzonej w ten sposób przestrzeni wpływa nowe powietrze, wchodzi w zetknięcie ze strumieniem i zostaje przezeń porwane i t. d. Tak samo zachowuje się względem szybko przepływającego strumienia płynu każdy inny gaz. Na tej zasadzie polega *pompa pneumatyczna Sprengla*, o której napomknęliśmy na str. 185. Składa się ona z długiej na 1 metr i ustawianej pionowo rurki szklanej, do górnej części której przylutowana jest boczna rurka, prowadząca do naczynia, z którego chcemy wyciągnąć powietrze albo inny gaz. Jeżeli przez pionową rurkę przepływa rtęć, wtedy porywa ona z sobą gaz, znajdujący się w bocznej rurce i w połączonem z nią naczyniu; gaz ten wypływa wraz z rtęcią przez dolny otwór pionowej rurki, zanurzony również w rtęci. Na tej samej zasadzie polega także powszechnie używany przyrząd, zwany *pulweryzatorem*. Składa się on z dwóch rurek, nachylonych ku

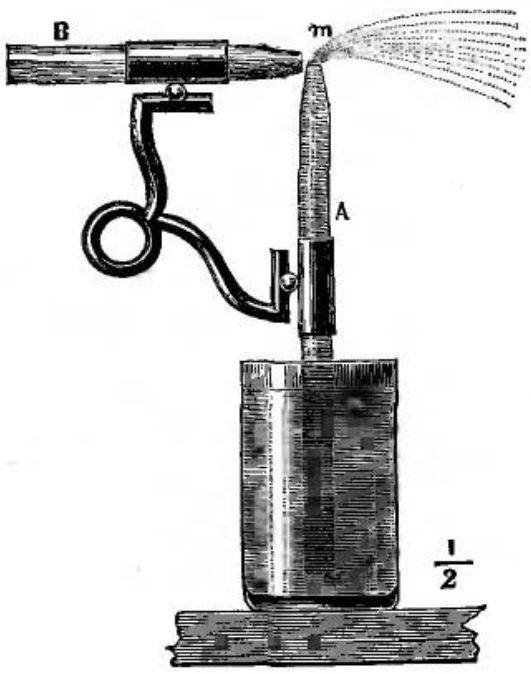


Fig. 154. Pulweryzator.

sobie pod kątem prostym, z których jedna zanurzona jest w cieczy (fig. 154). Jeżeli dmuchamy przez poziomą rurkę, to przepływający przez nią strumień gazu porywa z sobą powietrze z pionowej rurki; wskutek powstającego przez to rozrzedzenia ciecz podnosi się w tej rurze aż do górnego jej końca, gdzie przez napływający nowy strumień powietrza zostaje rozpryśnięta na wszystkie strony w postaci nadzwyczaj drobnych kropel. Podobne przyrządy służą do wstrzykiwania wody do kotła za pomocą strumienia pary (injektor Giffarda), do rozpryskiwania ciekłego paliwa, naprzykład nafty, przez co ta dokładniej się mięsza z powietrzem, lepiej się spala i daje więcej ciepła i t. d.

§ 4. Dyffuzya gazów.

Mówiąc o wypływie ciał lotnych, przyjmowaliśmy, że dany gaz wpływa do przestrzeni próżnej albo napełnionej tym samym gazem. Widzieliśmy, że przy ciśnieniu jednakowem z obu stron otworu (t. j. wewnątrz i zewnątrz naczynia) prędkość wypływu jest równa zeru. Rzecz się zmienia, gdy w komunikujących ze sobą przez otwór przestrzeniach znajdują się różne gazy: wtedy następuje po upływie pewnego czasu dokładne zmięszanie się obu gazów.

Różne gazy, pozostające ze sobą w zetknięciu, nie oddzielają się od siebie, jak naprzykład woda i oliwa, lecz, wskutek swej rozprężliwości, przenikają się wzajemnie, jak woda i alkohol, tworząc po upływie mniej lub więcej krótkiego czasu jednostajną mięszaninę gazów. Zjawisko to mięszania się z sobą różnych ciał lotnych wbrew działaniu ciężkości, zwane *dyffuzyą* gazów, po raz pierwszy zostało zbadane w roku 1802 przez sławnego uczonego angielskiego Daltona. Użył on do tego dwóch balonów o jednakowej objętości, zaopatrzonych w metalowe oprawy z kranami i dających się przyszrubowywać jeden do drugiego. Jeden balon napełnił on kwasem węglanym, drugi zaś powietrzem przy tej samej temperaturze i ciśnieniu i umieścił ten ostatni nad pierwszym (fig. 155, str. 220). Przy takiem urządzeniu nie mogło nastąpić zmięszanie się gazów wskutek ich ró-

żnych ciężarów właściwych, cięższy bowiem kwas węglany znajdował się pod lżejszem odeń powietrzem. Po otworzeniu kranów i ustaleniu swobodnej komunikacyi między obu gazami, ciśnienie wewnątrz balonów pozostało niezmienione, oba jednak gazy po kilku godzinach jednostajnie się rozprzestrzeniły w obu balonach wbrew działaniu ciężkości (1). Z tego wynika, że każdy z gazów jednostajnie wypełnił całą przestrzeń obu balonów tak, jak gdyby się znajdował w niej sam jeden. Objętość każdego gazu przytem się podwoiła, ciśnienie więc jego musiało się, według prawa Boyle'a-Mariotte'a, dwa razy zmniejszyć Fakt przeto, że pomimo to wewnętrzne ciśnienie w obu balonach po otworzeniu kranów się nie zmienia, potwierdza omówione na str. 171 prawo Daltona, według którego ciśnienie mięszaniny gazów równa się sumie oddzielnych ciśnień, jakieby wywierały one, gdyby same jedne zajmowały całą przestrzeń, zajętą przez mięszaninę, albo innemi słowy równa się sumie ich ciśnień *parcyalnych*.

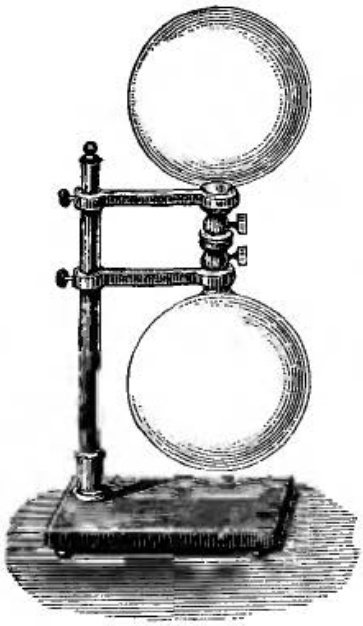


Fig. 155. Dyffuzya gazów.

Tak samo jak kwas węglany i powietrze, zachowują się także inne gazy, jeżeli nie zachodzą pomiędzy niemi reakcye chemiczne.

W r. 1834 Graham dokładniej zbadał zjawiska dyffuzyi gazów i odkrył zasadnicze prawo tych zjawisk, według którego *prędkości dyffuzyi, a więc i objętości dyffundujących w jednym i tym samym czasie gazów, są przy jednakowych warunkach ciśnienia odwrotnie proporcyonalne do pierwiastków kwadratowych z ich gęstości.* Prędkości więc dyffuzyi różnych gazów są te same, co i prędkości ich wypływu przez otwory w cienkich ścianach (patrz wyżej str. 217). Gaz, 4, 9, 16 razy lżejszy od innego, dyfunduje 2, 3, 4 razy prędzej od niego; gęstości naprzy-

(1) Niektórzy sławne to doświadczenie przypisują Berthollet'owi.

kład tlenu i wodoru mają się do siebie jak 16 do 1, pierwiastki kwad. tych liczb są 4 i 1, otóż wodór przy jednakowych warunkach dyfunduje 4 razy prędzej, niż tlen. Powyższe prawo Graham wyprowadził z doświadczeń, w których gazy nie stykały się z sobą bezpośrednio, lecz były oddzielone za pomocą sztucznych przegród gipsowych. W takich jednak warunkach prawo to, jak później wykazał Bunsen, nie jest ścisłe, lecz tylko przybliżenie prawdziwe, ponieważ wtedy prędkość dyffuzyi się zmniejsza wskutek działania włoskowatości dziurkowatego gipsu (patrz badania Bunsena nad wypływem gazów przez włoskowate rurki, str. 217).

Wodór, jako najlżejszy ze wszystkich gazów, posiada też, zgodnie z powyższem prawem, największą zdolność dyffundowania i nader łatwo przenika przez powłoki, jeżeli te są tak dziurkowate, że nie przeszkadzają przenikaniu gazu; ztąd to pochodzą trudności przy napełnianiu balonów wodorem. Dzięki dyffuzyi gazów, atmosfera nasza, stanowiąca, jak już wiemy, mięszaninę głównie azotu i tlenu, posiada wszędzie ten sam skład procentowy obu składników. W największych głębokościach, jako też na najbardziej wyniosłych miejscach, (1) w napełnionych salach i w najbardziej przewietrzanych przestrzeniach, powietrze zawiera na 79 objętości azotu 21 obj. tlenu. Dzięki tejże własności ciał lotnych, kwas węglany, wydychany przez zwierzęta, przechodzi do roślin, uwalniany zaś przez te ostatnie tlen przechodzi napowrót do powietrza, które wskutek tego zawsze zawiera tylko nieznaczną ilość kwasu węglanego. W ogóle dyffuzya gazów znakomicie się przyczynia do podtrzymywania czystości powietrza w wolnej atmosferze i w naszych mieszkaniach, rozpraszając daleko dokoła gazy, szkodliwe dla życia organizmów.

Musimy się w tem miejscu zadowolnić powyższym krótkim opisem zjawisk dyffuzyi, obszerniej i głębiej rzecz tę traktować możemy dopiero w nauce o cieple.

---

(1) Patrz naukowe wyniki podróży nadpowietrznej Gay-Lussac'a, str. 208.

Mięszanie się z sobą różnych gazów następuje nietylko wtedy, gdy te bezpośrednio się z sobą stykają lub komunikują przez szeroki otwór, lecz także wtedy, gdy oddzielone są za pomocą dziurkowatych przegród, jak tabliczki gipsowe, błony roślinne lub zwierzęce i t. d. Takie mięszanie się ciał lotnych poprzez przegrody nazywamy *osmozą gazów*, analogicznie do osmozy cieczy. Według doświadczeń Grahama i Bunsena, dotyczących tego przedmiotu, prędkości przenikania gazów przez takie przegrody są, przy jednakowych warunkach ciśnienia, prawie te same, co i prędkości ich wpływu przez włoskowate rurki, mniejsze zaś od prędkości wypływu przez otwory w cienkiej ścianie. Przytem jednak wielki wpływ wywiera także rodzaj przegrody, zarówno jak i natura przenikających gazów. Prawdopodobnie zachodzi tu z początku pochłanianie gazu przez oddzielającą ścianę, następnie zaś ulatnianie jego po drugiej jej stronie.

Osmoza gazów w połączeniu z ich rozpuszczalnością w cieczach odgrywa nader ważną rolę w procesie oddychania u zwierząt. Tlen atmosferyczny wprowadzony do płuc przy wdychaniu rozpuszcza się w śluzie, pokrywającym błonę płuc; pomiędzy śluzem tym, nasyconym tlenem, a krwią, krążącą w płucnych naczyniach krwionośnych i zawierającą kwas węglany, odbywa się proces, dzięki któremu powstają dwa przeciwne prądy: jeden przenosi tlen do krwi, drugi—sprowadza kwas węglany na powierzchnię błony płucnej.

KSIĘGA DRUGA.

D Ź W I Ę K.

ROZDZIAŁ I.

Powstawanie i rozprzestrzenianie się dźwięku.

§ 1. *Zjawiska dźwięku w przyrodzie.*

Brak wszelkiego dźwięku, wszelkiego szmeru, jednem słowem absolutne milczenie jest dla nas jednoznaczne z nieruchomością i martwotą. Jesteśmy tak przyzwyczajeni słyszeć jakikolwiek dźwięk, chociażby to był tylko szmer, spowodowany przez nas samych, że zaledwie możemy sobie wyobrazić świat zupełnie milczący i głuchy, jakim naprzykład ma być, według zdania astronomów, księżyc.

Na ziemi nie upływa ani jedna chwila bez dźwięku, jakkolwiek zachodzi pod tym względem znaczna różnica pomiędzy wielkiemi miastami z ich ogłuszającym szumem, a samotnością pól, równin i gór, gdzie uszu naszych dochodzi tylko cichy, przytłumiony szmer. Jakżeż różną dalej jest cisza, panująca na szczytach alpejskich lub w okolicach podbiegunowych, od szumu wzburzonego morza! Tam milczenie bywa przerywane tylko przez odgłos staczających się lawin lub pękającego lodu, a niekiedy także przez poświst wiatru. Grzmoty tak donośnie rozlegające się na równinie lub w dolinach, prawie nie istnieją na

najwyższych szczytach; zamiast okropnego, długotrwałego huku, cechującego te zjawiska, mamy tam tylko urwany dźwięk, podobny do tego, jaki słyszymy przy wystrzale z broni palnej. Przeciwnie, na morzu ogłusza nas bezustanny szum fal, rozbijających się o skały i przytłumiony nieco, jednostajny dźwięk, który, na podobieństwo uroczystego basa, akompaniuje ostrzejszym dźwiękom, powstającym przy uderzaniu fal o piasek lub kamienie. Zupełnie odmienne znowu wrażenie odbieramy, znajdując się na polu lub w lesie: Szelest liści, poruszanych przez wiatr, brzęk różnych owadów, głosy ptaków, dźwięk, wydawany przez gałęzie drzew pod działaniem lekkiego wiatru i tysiące innych, zaledwie uchwycić się dających szmerów—wszystko to składa się na łagodną harmonię, niekiedy wesołą, czasami zaś smutną, lecz zawsze różną od nieharmonijnego zgiełku, jakiego pełne są ulice wielkich miast.

Rzeki, strumienie i potoki dodają swe swoiste dźwięki do tego ogólnego koncertu przyrody, a w okolicach górskich dołącza się niekiedy szmer kaskady łagodnie spadających wód, a czasami także straszny łoskot obrywających się skał.

Najgłośniejsze jednak i najbardziej długotrwałe dźwięki naturalne powstają wtedy, gdy wielkie masy powietrza zostają wprawione w gwałtowny ruch, jak to się dzieje naprzykład podczas huraganów: masy te, pędząc w szalonym biegu, uderzają o napotykane przeszkody—nierówności gruntu, góry, skały, budowle lub drzewa, albo też przeciskają się pomiędzy niemi z niepohamowaną siłą. Działanie to jeszcze bardziej się potęguje, gdy towarzyszy mu wyładowanie elektryczności, manifestujące się hukiem grzmotów, wobec których milkną wszelkie inne głosy przyrody. Nieliczne tylko zjawiska są połączone z jeszcze donośniejszym dźwiękiem: tu należą wybuchy wulkanów i trzęsienia ziemi. Przed gwałtowną katastrofą, która 4 lutego 1797 r. zniszczyła Riobambę, słyszano olbrzymi huk podziemny w miastach Quito i Ibarra, którego dziwnym sposobem nie zauważono wcale w Tacunga i Hambato—punktach, leżących o wiele bliżej miejsca katastrofy. Tak samo wzniesienie się wulkanu Jorullo, dnia 28 września 1759 r. zpośród równiny, było poprzedzone

już na dwa miesiące przedtem przez długotrwały huk podziemny.

Dla uzupełnienia opisu dźwięków, wydawanych przez przyrodę bez udziału istot żyjących, wspomnijmy jeszcze o detonacyach, towarzyszących spadkowi meteorów, aerolitów i bolidów. Eksplozye te, zachodzące na znacznej wysokości, są jednakowoż słyszane na wielkiej odległości od miejsca spadku, a odnośne dźwięki bywają porównywane przez świadków owych zadziwiających zjawisk bądź do salwy armatniej, bądź do przeciągłego rozlegania się grzmotów.

Zpomiędzy wszystkich jednak dźwięków najciekawszemi dla nas są te, które wydają człowiek i zwierzęta za pomocą oddzielnych narządów, a mianowicie głos ludzki—ten niezbędny tłómacz naszych myśli i uczuć, oraz głosy zwierząt, wyrażających w grubszy nieco sposób swe radości i żale. Dalej najpotężniejsza prawie ze sztuk pięknych—muzyka, wydoskonalona przez człowieka z zaczątkowych darów naturalnych, dozwala mu uzewnętrzniać owe subtelne uczucia, których mowa ludzka nie jest w stanie wyrazić. Sztuce tej służą liczne instrumenty muzyczne, które później poznamy; jakkolwiek od czasu ich wprowadzenia człowiek coraz bardziej zbogaca zasób i brzmienia dźwięków, *pozwalających mu uzewnętrzniać wzruszenia* duszy, to jednak najszlachetniejszy instrument muzyczny posiada on we własnym swym organie głosowym.

I przemysłowa działalność człowieka zdradza się różnorodnemi dźwiękami, nie bardzo wprawdzie melodyjnemi, wyraziście jednak znamionującemi różne rodzaje pracy. Turkot kół, zgrzyt pił, świst lokomotyw, nieustające częstokroć dniem i nocą, nie sprawiają nam wprawdzie zazwyczaj wielkiej rozkoszy, ale nie jestże ta „muzyka przemysłu“ dla człowieka myślącego o wiele przyjemniejszą od huku dział i strzelb na polu wojny, nie zdradzaż ona wyników pracy i nauki, donioślejszych i niezrównanie szlachetniejszych od zdobyczy brutalnej siły?

Jakkolwiek różnorodnemi są wyszczególnione wyżej dźwięki, to jednak wszystkie one dają się sprowadzić do pewnego rodzaju ruchu, którego naturę i prawa rozważymy właśnie w tej księdze.

Rozpoczynamy zaś od opisu różnych sposobów powstawania dźwięku i rozchodzenia się jego w ciałach stałych, ciekłych i gazowych.

§ 2. Różne sposoby powstawania dźwięku.

Przy spotkaniu się dwóch ciał stałych zwykle powstaje, wskutek ich uderzenia o siebie, dźwięk. Tak naprzykład słyszymy uderzenie młota o kowadło,—języczka o dzwon,—pałeczek drewnianych o błonę bębna i t. d. Przy przewracaniu młota wodnego—t. j. szklanej rury, częściowo wypełnionej wodą, po nad którą znajduje się próżnia—słyszymy dźwięk, wywołany przez uderzenie wody o dno rury; tak samo przy nachylaniu barometru rtęć, uderzając o rurę, wydaje swoisty dźwięk.

Z kolei jako jeden ze sposobów wytwarzania dźwięku, wymienimy tarcie: naprzykład wyprężone struny, dzwon, płyty szklane lub metalowe, potarte smyczkiem, który dla zwiększenia tarcia pociąga się pewną żywicą, t. z. kalafonią—wydają pewne *tony*. Tak nazywamy dźwięki, odznaczające się prawidłowością i sprawiające mniej lub więcej przyjemne wrażenie. Ale tarcie może spowodować także bardzo nieprawidłowy i nieprzyjemny dźwięk, naprzykład gdy przesuwamy krzesło, gdy piszemy ostrym jakimś przedmiotem na tablicy, lub wreszcie gdy naciągamy hamulec na koło wozu i t. d. Koła jadących wozów wydają niemiły dźwięk po części wskutek tarcia, po części zaś wskutek uderzania o kamienie. Tak samo działają obie przyczyny, t. j. tarcie i uderzanie przy tych instrumentach muzycznych, których struny poruszamy palcem albo oddzielnym przyrządem; tu należą: lira, arfa, cytra, gitara; w pianinie zaś działa tylko uderzenie młotka o strunę. I przy spotkaniu się ciał ciekłych powstaje, wskutek uderzenia lub tarcia, dźwięk, jak naprzykład przy spadaniu kropel deszczu na powierzchnię stawu lub rzeki, lub przy poruszaniu się mas wodnych, wzdymanych przez wiatr i t. d. Nareszcie i ciała gazowe mogą wydawać dźwięki, jeżeli naprzemian szybko się zgęszczają i rozszerzają, jak to później szerzej wyłuszczymy; ruchy takie mogą także być

wywoływane przez uderzenie lub tarcie. Poruszając szybko w powietrzu spicrutą lub batem, słyszymy świst lub trzask; wielkie masy poruszającego się powietrza wytwarzają potężne dźwięki, gdy zmuszone są przeciskać się pomiędzy gałęziami drzew, albo szczelinami murów, albo wreszcie gdy uderzają z wielką mocą o stałe przeszkody. Jęczenie wiatru w kominie pochodzi od szczególnych ruchów powietrza, które bliżej poznamy, gdy w następstwie rozważymy ruchy gazów w rurach, to jest gdy rozpatrzymy procesy, zachodzące w instrumentach dętych, należących do tej samej kategoryi, co i narządy głosowe człowieka i zwierząt. Huk przy wybuchach, szum przy wyładowaniach elektryczności, grzmot i podobne zjawiska dźwiękowe bywają powodowane przez nagłe zmiany objętości—przez rozszerzanie się i kurczenie mas gazowych.

Jeden z najbardziej zadziwiających sposobów wytwarzania dźwięku polega na stykaniu z sobą dwóch metali o różnej temperaturze; zjawisko podobne po raz pierwszy zauważył w r. 1805 Schwartz, inspektor jednej z kopalni saskich. Mianowicie gdy położył on gorącą jeszcze sztabę srebrną na zimnem żelaznem kowadle, usłyszał nagle ostry ton, który trwał tak długo, dopóki sztaba nie oziębiła się do dosyć nizkiej temperatury. To samo spostrzeżenie przy podobnej okoliczności przypadkowo zrobił w r. 1829 Artur Trevelyan; wynalazł on różne przyrządy do uwidocznienia przyczyny powstawania dźwięku w takich wypadkach, przyrządy—które poznamy, gdy będzie mowa o drganiach dźwiękowych.

Wymienimy tutaj jeszcze szczególny dźwięk, powstający przy pewnym procesie magnetycznym: gdy pręt z miękkiego żelaza zawieszamy w ten sposób, że dolny jego koniec znajduje się we wnętrzu cewki indukcyjnej, wtedy słyszymy szczególny trzask w chwili, gdy prąd elektryczny wstępuje do zwojów cewki, a więc w chwili, gdy żelazo zaczyna się magnetyzować.

Nareszcie możemy wywołać dosyć muzykalne tony, spalając różne gazy we wnętrzu rur. Jeżeli jakiś palny gaz, najlepiej wodór, wypływa z wązkiej rurki, to po zapaleniu go i otoczeniu płomienia dostatecznie szeroką, z obu stron otwartą rurą szklaną

(fig. 156), słyszymy przeciągły ton, zmieniający się wraz z długością, szerokością, grubością ścianek i materyałem rury. Jeżeli ustawimy obok siebie kilka takich przyrządów z rurami o różnych przecięciach i długościach, otrzymamy cały szereg tonów muzykalnych; ztąd pochodzi nazwa „harmoniki chemicznej;“ nadawana takiemu przyrządowi. Badanie tych zjawisk doprowadziło Schaffgotscha i Tyndalla do odkrycia t. z. „śpiewających płomieni“—długich płomieni gazowych, rytmicznie drgających, gdy w *bliskości ich* wywołujemy pewne dźwięki.

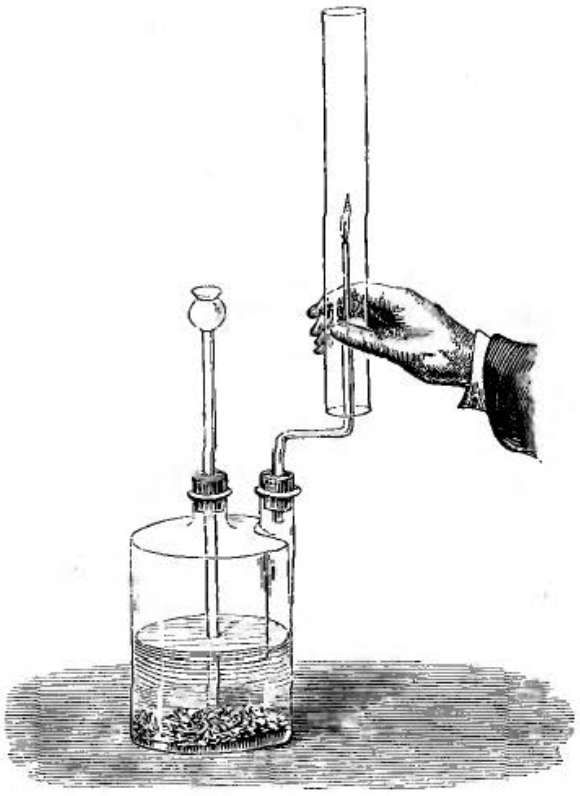


Fig. 156. Harmonika chemiczna.

Rozważyliśmy tedy powstawanie dźwięku w samych ciałach dźwięczących, stałych, ciekłych lub gazowych; pozostaje nam jeszcze zbadać, jaką drogą dźwięk od ciała dźwięczącego, naprzykład od uderzanego dzwonu, dochodzi naszych uszu. Możemy się o tem dowiedzieć za pomocą obserwacyi i bardzo prostych doświadczeń, zanim jeszcze poznamy właściwą naturę zjawisk dźwiękowych.

§ 3. Rozchodzenie się dźwięku w ciałach stałych, ciekłych i gazowych.

Jestto powszechnie znany fakt, że dźwięk wymaga pewnego dostrzegalnego czasu dla dojścia od ciała dźwięczącego do naszego organu słuchu: Jeżeli na pewnej od nas odległości kowal naprzykład uderza młotem o kowadło, wtedy pierwej spostrzegamy spadający młot, zanim odbieramy wrażenie dźwięku; podobnie wcześniej spostrzegamy dym, buchający z komina zbliżającej

się lokomotywy, niż słyszymy świstawkę; ogień, towarzyszący wystrzałowi z broni palnej obserwujemy wcześniej, niż sam wystrzał i t. d. i to tem wcześniej, im bardziej oddalonem jest ciało dźwięczące. Odstęp czasu, obserwowany w podobnych wypadkach, stanowi, ściśle biorąc, tylko różnicę pomiędzy czasem, wymaganym przez dźwięk na przebieżenie przestrzeni, oddzielającej od nas ciało dźwięczące, a czasem, którego potrzebuje światło na odbycie tej samej drogi. Ponieważ szybkość rozprzestrzeniania się światła jest, jak w następstwie zobaczymy, prawie milion razy większa od szybkości rozchodzenia się dźwięku, możemy więc czas, jakiego wymaga światło dla przebieżenia nawet znacznych odległości na ziemi, zupełnie pominąć i obserwowaną różnicę uważać za czas, w którym dźwięk przebiega odnośną przestrzeń.

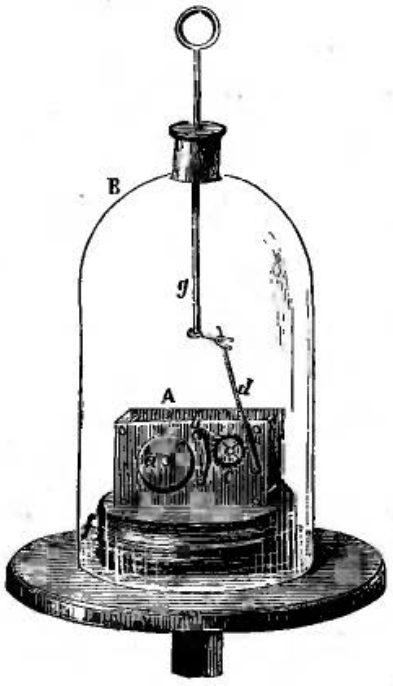


Fig. 157. Dźwięk nie rozchodzi się w próżni.

W następnym § zobaczymy, jak wielką jest prędkość dźwięku w różnych materyalnych środkach, oraz poznamy sposoby, za pomocą których określamy tę szybkość, tutaj zaś zbadamy tylko kwestyę, czy w ogóle do rozchodzenia się dźwięku koniecznym jest jakikolwiek materyalny środek, czy też dźwięk może także od ciała dźwięczącego przechodzić do nas przez próżnię. Na pytanie to odpowie nam bardzo proste doświadczenie:

Umieśćmy pod kloszem maszyny pneumatycznej mechanizm zegarkowy (fig. 157), tak urządzony, że młotek jego możemy dowoli zatrzymywać albo poruszać za pomocą części pręta *g*, wystającej z klosza. Przed wyciągnięciem powietrza z pod klosza, słyszymy wyraźnie dźwięk z powodu uderzania młotka; w miarę jednak rozrzedzania powietrza, dokonywanego w przestrzeni pod kloszem przy pomocy maszyny pneumatycznej, natężenie

dźwięku coraz bardziej się zmniejsza i nareszcie, przy możliwie zupełnej próżni, widzimy jeszcze poruszenia młotka, lecz nic już nie słyszymy. Przy powyższem doświadczeniu mechanizm zegarowy powinien spoczywać nie na samym talerzu maszyny pneumatycznej, lecz na podkładce z korka, waty lub innej jakiejś miękkiej i nieelastycznej materyi. Jeżeli teraz wprowadzimy pod klosz—zamiast powietrza, jak to było przed rozpoczęciem doświadczenia—inny gaz, naprzykład wodór, kwas węglany, tlen, pary eteru siarczanego i t. d., wtedy znowu usłyszymy dźwięk i to tem wyraźniej, im większą będzie ilość wprowadzonego pod klosz gazu. Gdy znajdujemy się w przestrzeni, wypełnionej zgęszczonem powietrzem, ucho nasze jest o wiele czulsze na wszelkie dźwięki, niż w zwykłem powietrzu, jak to mogą poświadczyć ci, którzy znajdowali się kiedyś pod dzwonem nurkowym na dnie morza.

Opisane wyżej doświadczenie dowodzi, że w próżni dźwięk się nie rozchodzi, dalej—że, pomiędzy innemi, ciała gazowe mogą być środkami dla rozprzestrzeniania się dźwięku. Nie wszystkie jednak gazy posiadają tę własność w równej mierze, tak naprzykład wodór—jak to wykazał Tyndall—przy jednakowem ciśnieniu, jest o wiele gorszym przewodnikiem dźwięku, niż powietrze, chociaż szybkość dźwięku w wodorze jest prawie 4 razy większa, niż w powietrzu.

I ciała stałe są przewodnikami dźwięku, lecz w bardzo różnym stopniu, a to zależnie od ich sprężystości. Jeżeli naprzykład w powyżej opisanem doświadczeniu, po osiągnięciu możliwie zupełnej próżni, zbliżymy ucho do klosza, to usłyszymy słaby dźwięk uderzającego młotka, przenoszący się przez poduszkę i talerz maszyny pneumatycznej na otaczające powietrze. Gdybyśmy zaś zupełnie usunęli poduszkę i ustawili zegar bezpośrednio na talerzu, to nawet po osiągnięciu całkowitej prawie próżni, odnośny dźwięk przeszedłby prawie wcale nieosłabiony przez masę talerza do otaczającego powietrza, a następnie do naszego ucha.

Woda jak i wszelkie inne ciecze są również dobremi przewodnikami dźwięku, rozchodzi się on nawet w nich z większą

szybkością i natężeniem, niż w powietrzu. Nurek naprzykład, znajdujący się pod wodą, słyszy tak lekki szmer, jakiegoby nie zauważył w powietrzu.

Następujące doświadczenie pokazuje, że dźwięk lepiej się rozprzestrzenia przez ciała stałe, niż przez powietrze: Jeżeli położymy zegarek kieszonkowy na jednym końcu nawet bardzo długiej belki drewnianej albo sztaby metalowej, do drugiego zaś jej końca przyłożymy ucho, wtedy wyraźnie usłyszymy bicie zegarka, jakkolwiek ci, którzyby stali w bliższej odeń odległości, lecz z boku belki, nicby nie słyszeli. „W celu bliższego zbadania tych warunków, Hassenfratz—jak opowiada Haüy—udał się do kamieniołomów pod Paryżem i polecał tam towarzyszowi swemu uderzać młotkiem o kamienną ścianę podziemnego korytarza. Sam on oddalał się coraz bardziej od miejsca uderzeń i przykładał w różnych punktach ucho do ściany; w ten sposób udało mu się znaleść punkt, w którym słyszał podwójnie każde uderzenie: raz przez ścianę, drugi raz—przez powietrze. Dźwięk dochodził przytem do jego ucha prędzej przez kamień, niż przez powietrze; natomiast natężenie dźwięku malało wraz z odległością w pierwszym wypadku szybciej, niż w drugim: podczas gdy dźwięk poprzez kamień zamilkał już w odległości 134 kroków, to przez powietrze natomiast mógł być jeszcze słyszany na odległości 400 kroków.“ Podobne doświadczenia, częstokroć wykonywane z belkami drewnianemi i sztabami metalowemi, potwierdziły powyższy rezultat, tak pod względem zwiększonej szybkości, jak i zmniejszonego natężenia dźwięku.

Stała skorupa ziemska także przeprowadza na znaczną odległość niezbyt donośne nawet dźwięki, nie bez racyi przeto indyanin amerykański przykłada ucho do ziemi, aby śledzić ruchy oddalonego jeszcze nieprzyjaciela i usłyszeć tentent kopyt końskich. Na wielką zwłaszcza odległość rozchodzi się po powierzchni ziemi dźwięk, towarzyszący eksplozyom, salwie armatniej, trzęsieniom ziemi lub wybuchom wulkanów. Pozwolimy sobie przytoczyć tutaj słowa Aleksandra Humboldt'a: „W Caracas, na równinach Calabozo i nad brzegami Rio Apure—rzeczki, wpadającej do Orinoco—na przestrzeni, obejmującej około 130,000 ki-

lometrów kwadratowych, słyszano wszędzie dnia 30 kwietnia 1812 r., okropny huk podziemny—a nie było wtedy w okolicy żadnego trzęsienia ziemi—w chwili, gdy wulkan Św. Wincentego, leżący o 12,000 kilometrów ku północo-wschodowi na jednej z wysp Antylskich, wyrzucał ze swego krateru potężny strumień lawy. Pod względem odległości znaczy to tak samo, jak gdyby wybuch Wezuwijusza słyszano w północnej Francyi. W r. 1744, podczas gwałtownego wybuchu wulkanu Cotopaxi, słyszano w Honda nad rzeką Magdaleną jakby podziemną salwę armatnią. Otóż szczyt rzeczonego wulkanu leży nietylko o 5,500 metrów wyżej nad poziomem morza, niż Honda i znajduje się odeń na odległości 810 kilometrów, lecz nadto dwa te punkty przedzielone są olbrzymiemi masami gór Quito, Pasto i Popayan, jako też niezliczonemi dolinami i przepaściami. *Dźwięk ten z pewnością został przeprowadzony nie przez powietrze, lecz przez ziemię i to na znacznej głębokości.* Podczas gwałtownego trzęsienia ziemi w Nowej Granadzie (w lutym 1835 r.) słyszano podziemny huk jednocześnie w Popayan, Bogota, Santa Marta i Caracas (tu przez 7 godzin z rzędu, przyczem nikt nie czuł żadnego wstrząśnienia), w Haiti, na wyspie Jamajce i wokoło jeziora Nicaragua.“

Widzieliśmy, że rozprzestrzenianie się dźwięku odbywa się przy pomocy jakiegoś środka stałego, ciekłego lub gazowego; zwykle jednak środkiem tym jest powietrze. Z tego ostatniego faktu wynika, że państwo dźwięku rozpościera się tylko tak daleko, dokąd sięga nasza atmosfera: najgwałtowniejszy wybuch jakiegoś wulkanu na ziemi nie mógłby naprzykład być słyszany przez ewentualnego mieszkańca księżyca. Z drugiej strony mieszkańcy ziemi, jakkolwiek mogliby przy sprzyjających okolicznościach widzieć katastrofę, dotyczącą jakiegoś ciała niebieskiego, nie mogliby jednak słyszeć przytem żadnego dźwięku. Detonacye aerolitów dowodzą tedy, że ciała te w chwili eksplozyi znajdują się już w granicach naszej atmosfery, inaczej bowiem nie moglibyśmy ich słyszeć. Nawet już na szczytach wysokich gór, gdzie powietrze jest o wiele rzadsze, niż w równinach, natężenie dźwięku znacznie się zmniejsza. Według

de Saussure'a i innych, wystrzał z pistoletu na szczycie Mont-Blanc brzmi nie głośniej, jak w równinie—eksplozya drobnego kapiszonu. Ch. Martins, opisując burzę, jaka go zaskoczyła na rzeczonej wysokości, powiada, że „grzmot tam wcale się nie rozlega, lecz daje krótki urwany dźwięk, podobnie jak w dolinie—wystrzał z broni palnej."

Inny ciekawy szczegół, dotyczący tej kwestyi, podaje Gay-Lussac: gdy podczas jednej ze sławnych podróży nadpowietrznych wzniósł się balonem na wysokość 7,000 metrów, wtedy pomimo wszelkiego wysiłku płuc, nie mógł wymówić słów, któreby mu się wydały głośniejszemi od przytłumionego szeptu.

§ 4. Prędkość dźwięku w powietrzu i w innych środkach.

Wspomnieliśmy już o tem, że rozprzestrzenienie się dźwięku wymaga pewnego czasu: otóż teraz opiszemy metody, za pomocą których oznaczono prędkość dźwięku w różnych środkach, przedewszystkiem zaś w powietrzu.

Różni uczeni, jak Boyle, Newton, Laplace, Mersenne, Flamsteed oraz wielu innych, usiłowali rozwiązać to zadanie, bądź na drodze teoretycznej, bądź też za pomocą odpowiednich doświadczeń; wartości jednak, przez nich otrzymane, okazały się zbyt duże lub za małe. Pierwsze dokładne pomiary w tym względzie zawdzięczamy paryzkiej Akademii nauk z r. 1738. Później, w r. 1822 kilku uczonych z paryzkiego *Bureau des longitudes* połączyło się w celu dokładnego zmierzenia prędkości dźwięku w powietrzu za pomocą metody, proponowanej już dawniej przez rzeczoną Akademię we wskazanym roku i która to metoda w ich ręku dopiero wydała pożądane rezultaty.

Obrano dwie stacye w bliskości Paryża—Montlhéry i Villejuif, leżące na wzgórzach, pomiędzy któremi nie znajduje się żadna przeszkoda, mogąca zasłonić widok z jednej z nich na drugą. Podzielono się na dwie grupy, z których jedna—Gay-Lussac, Humboldt i Bouvard—udała się do Montlhéry, druga zaś—Prony, Arago i Mathieu—do Villejuif. Na każdej stacyi znajdowały się armaty jednakowego kalibru, naładowywane równemi

ilościami prochu oraz możliwie dokładne chronometry. Doświadczenia rozpoczęły się o 11 wiecz. przy pogodnem niebie i dosyć spokojnem powietrzu przy temperaturze 16° C. Z każdej stacyi dano 12 strzałów w odstępach 10-minutowych i każda grupa obserwatorów starannie zaznaczała liczbę sekund, upływających od pojawienia się światła przy wystrzale aż do usłyszenia dźwięku (fig. 158). Przeciętna wszystkich otrzymanych w ten sposób

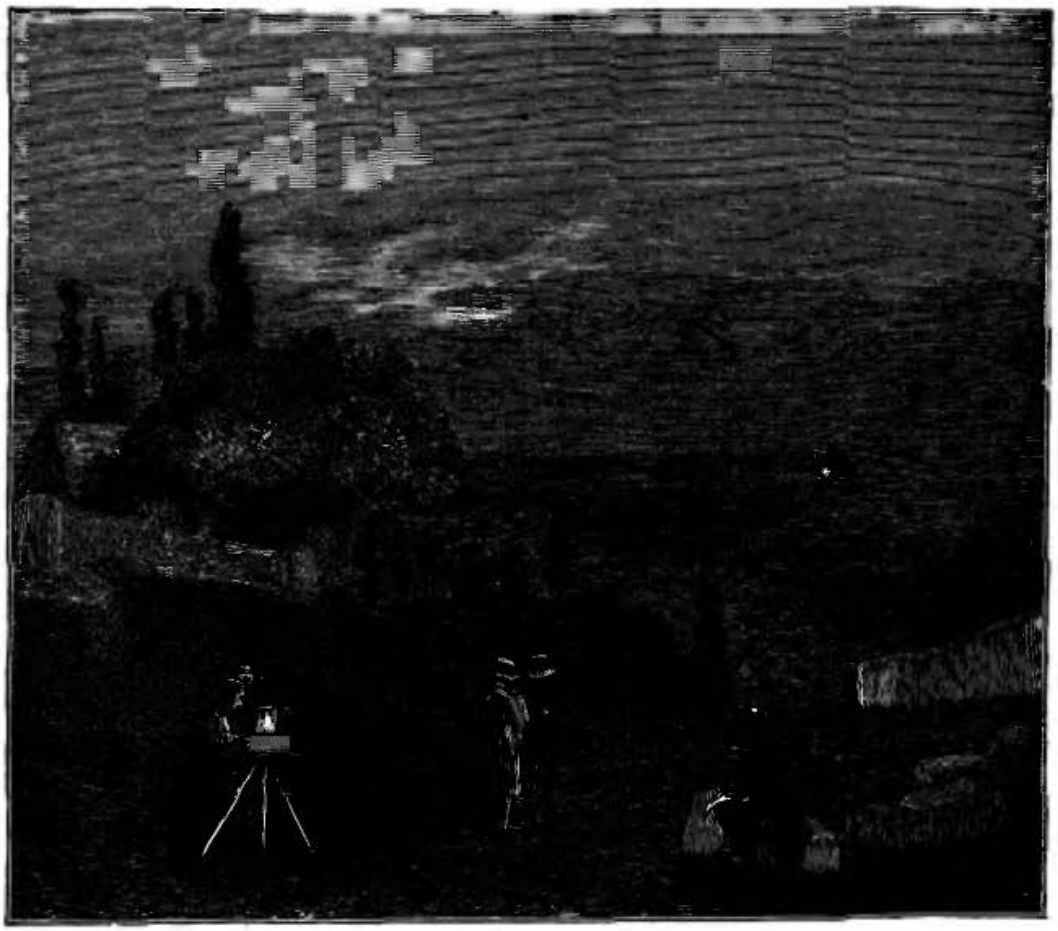


Fig. 158. Oznaczenie prędkości dźwięku w powietrzu między stacyami Montlhéry i Villejuif w r. 1822.

wartości wynosiła 54,6 sekundy, a że odległość pomiędzy rzeczonemi punktami, na podstawie pomiarów trygonometrycznych, równa się 18613,5 metra, z tego więc wypada, że dźwięk w powietrzu przy temperaturze 16° C. rozchodzi się z prędkością 340,9 metra na sekundę. Ponieważ temperatura, jak wykazały teorya i doświadczenie, wpływa na prędkość dźwięku, która zwiększa się mianowicie wraz z podnoszeniem się temperatury

i naodwrót, to chcąc otrzymać prędkość dźwięku w powietrzu dla temperatury topniejącego lodu, t. j. 0°, należy powyższą wartość nieco zredukować. Przez strzelanie naprzemian z każdej stacyi, miano na celu zrównoważenie ewentualnego wpływu wiatru: każdy bowiem prąd powietrza zwiększa prędkość dźwięku w kierunku samego prądu, zmniejsza zaś ją w kierunku przeciwnym.

Oprócz wymienionych, kwestyą prędkości dźwięku w powietrzu, zajmowali się jeszcze: Benzenberg w r. 1811, Goldingham w 1821, Moll, Van Beck, Stämpfer i Myrbach—w 1822, Bravais i Martins—w 1844 i inni. Jeżeli obliczymy otrzymane przez nich prędkości dla 0° i dla zupełnie suchego powietrza, to otrzymamy przeciętną wartość 332 metr. na sekundę, nieco większą od tej, jaka wypada z doświadczeń powyżej opisanych.

Nietylko jednak temperatura, lecz także stopień wilgoci powietrza wywiera znaczny wpływ na prędkość dźwięku, oznaczenia więc, czynione w swobodnem powietrzu, zawierają błędy nie dające się sprostować; warstwy bowiem atmosfery, przez które przechodzi dźwięk, nie są wszędzie jednorodne i trudno oznaczyć stopień ich wilgoci. Dla uniknienia tych błędów, Le Roux oznaczył prędkość dźwięku w walcowatej rurze, 72 metr. długiej, którą napełnił zupełnie suchem powietrzem i którą przez okładanie lodem utrzymywał stale przy temperaturze 0°, przyczem oba końce rury zamknięte były przez silnie naciągnięte błony kauczukowe. Dźwięk wywoływano przez jednorazowe uderzenie drewnianym młotkiem o jednę z błon; moment, w którym to następowało, oraz ten, w którym dźwięk napotykał drugą błonę, zapisywane były na jednostajnie obracającym się walcu pokrytym papierem, przez automatyczny przyrząd, będący w związku z błonami; czas zaś, jaki upływał od jednego momentu do drugiego, mierzono za pomocą specyalnego rodzaju chronoskopu. Z szeregu starannie wykonanych w ten sposób doświadczeń Le Roux otrzymał dla temperatury 0° prędkość dźwięku równą 330,6 metr., która to wartość jest prawie identyczna z tą, jaka wypada dla tej samej temperatury 0°, z doświadczeń uczonych z Bureau des Longitudes w r. 1822.

Wysokie i nizkie, silne i słabe dźwięki rozchodzą się w powietrzu z jednakową prędkością, czego dowodzi fakt, że charakter jakiegoś utworu muzycznego, wykonywanego przez orkiestrę, nie zmienia się pod względem rytmu i czystości akordów, niezależnie od tego, czy słuchamy utworu z blizka, czy też z większej odległości. Im bardziej oddalamy się od źródła dźwięku, tem więcej słabnie natężenie wszystkich dźwięków, lecz w jednakowej mierze, a jestto jedyna zmiana, którą możemy przy tem zauważyć. Gdyby prędkość dźwięku była dla różnych tonów niejednakowa, wtedy najlepiej wykonany utwór muzyczny musiałby w pewnej odległości wywierać na nas wrażenie chaosu.

Nadmienić tu także wypada, że prędkość dźwięku jest taka sama w kierunku pionowym, jak w poziomym lub pochyłym; dowodzą tego doświadczenia, wykonane w r. 1844 przez Martins'a i Bravais'go pomiędzy szczytem a podstawą góry Faulhorn w Alpach Berneńskich oraz doświadczenia, poczynione przez Stämpfera i Myrbacha pomiędzy dwoma punktami, leżącemi na różnej wysokości nad poziomem morza.

Z porównania prędkości światła, dźwięku i pocisków z broni palnej wynikają niektóre ciekawe wnioski. Tak naprzykład żołnierz, ugodzony kulą armatnią, może jeszcze przedtem widzieć ogień, towarzyszący wystrzałowi, lecz nie może słyszeć tego ostatniego dlatego, że prędkość kuli armatniej jest większa, niż prędkość dźwięku. Rzecz się zmienia w wypadku znacznej odległości: opór bowiem powietrza na tyle zmniejsza wtedy prędkość kuli, że żołnierz może słyszeć wystrzał, zanim zostaje ugodzony. Weźmy jeszcze inny przykład: Wyobraźmy sobie, że w punkcie tak położonym, iż wskutek ruchu obrotowego ziemi około osi, posuwa się on naprzód z prędkością 331 metr. na sekundę, oznajmiają południe przez wystrzał armatni, wtedy dźwięk ten będzie usłyszany we wszystkich miejscach, leżących na zachód od rzeczonego punktu, dokładnie w chwili, gdy i dla nich nastąpi południe.

W cieczach dźwięk rozchodzi się daleko prędzej, niż w gazach; prędkość dźwięku w wodzie jest około $4^1/_2$ razy większa,

niż w powietrzu, jak to wykazały doświadczenia, wykonane w r. 1827 przez Colladona i Sturma na jeziorze Genewskiem. Badacze ci umieścili się w łódkach, z których jedna znajdowała się około Thonon, druga zaś—blizko przeciwległego brzegu jeziora i dawali sobie sygnały za pomocą dzwonu, zanurzonego w wodzie i uderzanego tamże młotkiem. Na przeciwległej stacyi dźwięk przejmowany był przez tubę, której szeroki otwór

Fig. 159. Oznaczenie prędkości dźwięku w wodzie.

również był zanurzony w wodzie i zamknięty cienką blaszką metalową; obserwator na tej stacyi mierzył, za pomocą dokładnego chronometru, czas, jakiego potrzebował dźwięk dla przeniesienia się od jednej łódki do drugiej poprzez wodę. Do młotka, uderzającego o dzwon, przytwierdzona była poruszająca się wraz z nim dźwignia z zapalonym lontem, który w chwili uderzenia zapalał pewną ilość prochu, co było znakiem dla obserwatora, znajdują-

cego się w drugiej łódce, że w tym momencie następowało uderzenie. Cały sposób urządzenia doświadczeń pokazują figury 159 i 160, nie wymagające dalszego objaśnienia. Odległość pomiędzy obydwiema stacyami wynosiła 13487 metrów, drogę tę dźwięk przebiegał przez wodę przy temperaturze 8° C. w ciągu 9,4 sekund, ztąd prędkość dźwięku w wodzie wypada równą 1435 metrów na sekundę.

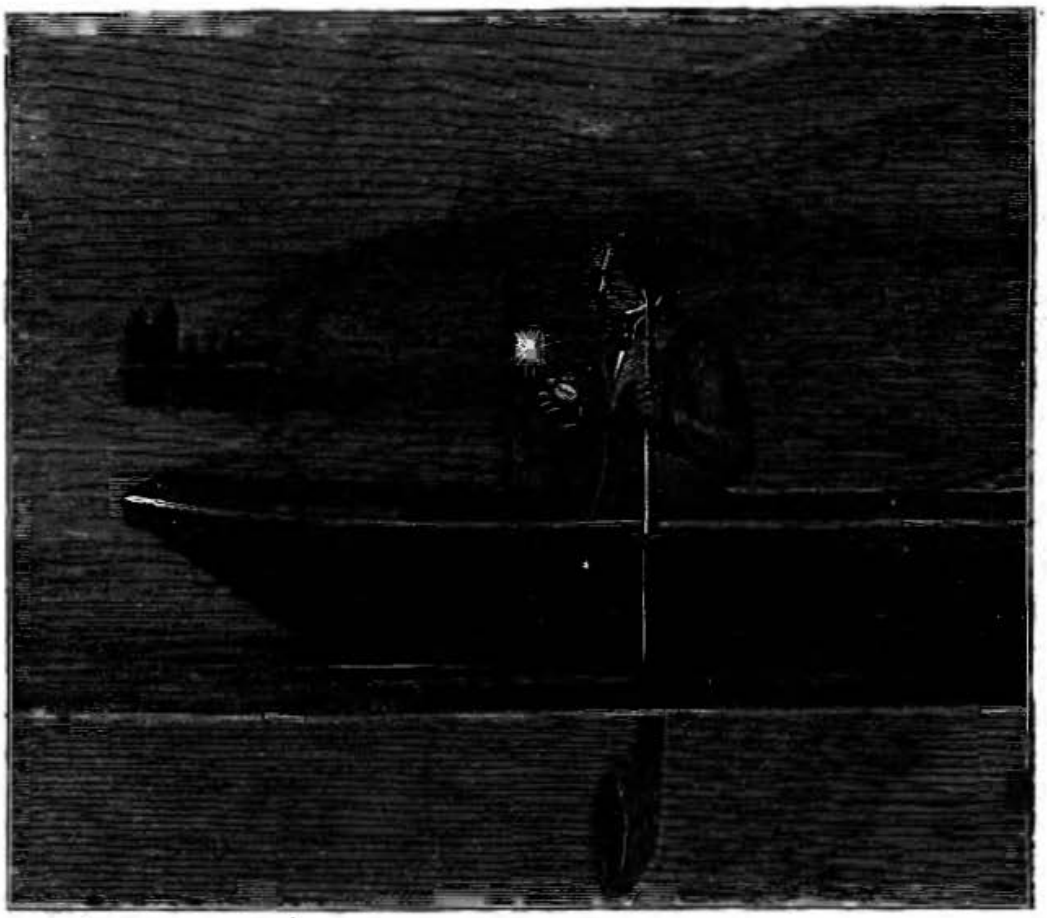


Fig. 160. Doświadczenia Colladona i Sturma, wykonane na jeziorze Genewskiem.

Prędkość dźwięku w ciałach stałych także niejednokrotnie była oznaczana na drodze doświadczalnej przez Chladni'ego, Biot'a, Wertheima i innych. Przy użyciu sztaby z lanego żelaza, mającej 951 metrów długości, Biot znalazł, iż dźwięk rozprzestrzenia się w niej z prędkością 3250 metrów na sekundę, a więc z prędkością, przeszło $9\frac{1}{2}$ razy większą, niż w powietrzu. Następująca tabliczka podaje prędkość dźwięku w różnych ciałach stałych, ciekłych i gazowych:

Prędkość dźwięku w gazach przy 0°:

w wodorze	1270	metr. na sek.
w amoniaku	407	„ „ „
w powietrzu	331	„ „ „
w tlenie	317	„ „ „
w kwasie węglanym . . .	262	„ „ „

Prędkość dźwięku w cieczach:

w wodzie rzecznej (Sekwana)	1437	metr. na sek.
w wodzie morskiej przy 20°	1453	„ „ „
w absolutnym alkoholu przy 23°	1160	„ „ „
w eterze siarczanym przy 0°	1159	„ „ „

Prędkość dźwięku w ciałach stałych:

w cynie	2498	metr. na sek.
w srebrze	2684	„ „ „
w stali	5030	„ „ „
w miedzi	3716	„ „ „
w szkle	5438	„ „ „
w drzewie dębowem . . .	3440	„ „ „

§ 5. Odbijanie i załamywanie się dźwięku.

Dźwięk od ciała dźwięczącego rozchodzi się na wszystkie strony z jednakową prędkością i po liniach prostych, jeżeli środek, w którym się rozprzestrzenia, posiada wszędzie jednakową gęstość. Na granicy natomiast dwóch środków różnej gęstości, naprzykład powietrza i wody, dźwięk w części się *odbija* od powierzchni, oddzielającej oba środki, w części zaś przenika dalej ze zmienioną prędkością i zbacza od pierwotnego swego kierunku, czyli, jak mówimy, ulega *załamaniu*. Jeżeli zaś dźwięk pada na stałą przeszkodę, to prawie całkowicie zostaje od niej odbity.

Nazwijmy linie proste, wychodzące z punktu wytwarzania dźwięku, *promieniami* tegoż. Niechaj dźwięk pada w kierunku promienia $f n$ na powierzchnię $s\ ś$, oddzielającą dwa środki o różnej gęstości, naprzykład powietrze i wodę, wtedy po części

przenika on do wody, po części zaś odbija się od niej i przyjmuje kierunek promienia *n d*. Poprowadźmy w punkcie *n* prostopadłą *n p* do powierzchni *s ś;* kąt, jaki tworzy promień *n f* z tą prostopadłą, nazywamy kątem *padania*, zaś ten, jaki tworzy z nią promień *n d*, nazywamy kątem *odbicia* (fig. 161).

Otóż odbijanie się dźwięku, częściowe czy całkowite, zawsze podlega następującemu prawu: *Promienie padający i odbity leżą w jednej płaszczyznie z prostopadłą, poprowadzoną w punkcie padania; kąt padania równa się kątowi odbicia.* Obserwator więc, znajdujący się w jakimkolwiek punkcie na linii *n d*, słyszy dźwięk tak, jak gdyby ten wychodził z punktu *n*, albo z innego punktu, leżącego na przedłużeniu linii *n d*. Odbijanie się dźwięku zachodziłoby według tego samego prawa i wtedy, gdyby *s ś* przedstawiała powierzchnię odgraniczającą dwa różne gazy, albo dwie warstwy tego samego gazu, lecz różnej gęstości, albo nareszcie—powierzchnię ciała stałego, tylko że w tym ostatnim wypadku odbity dźwięk byłby o wiele silniejszy. Z powyższego prawa wynika, że jeżeli dźwięk pada prostopadle na jakąś ścianę, to odbija się od niej w tym samym kierunku.

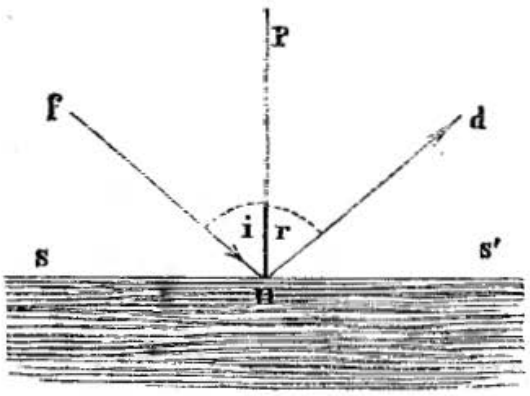


Fig. 161. Odbijanie się dźwięku.

Do doświadczalnego stwierdzenia słuszności rzeczonego prawa używają wklęsłych metalowych zwierciadeł parabolicznych, t. j. zwierciadeł, których powierzchnie możemy sobie wyobrazić jako powstałe przez obracanie paraboli naokoło osi. Mówiąc o maszynie Morina (patrz str. 29), wymieniliśmy już niektóre własności paraboli, tutaj zaś dodamy do tego jeszcze co następuje. Jeżeli na powierzchnię paraboliczną (fig. 162, str. 243) padają promienie, biegnące równolegle do jej osi, wtedy odbijają się one od tej powierzchni tak, że wszystkie następnie znowu się zbiegają w jednym wspólnym punkcie *F*, zwanym *ogniskiem* paraboli dlatego, że, jak to się dowodzi w geometryi, linie te, naprzy-

kład $Z\,M$ i $M\,F$, tworzą z prostopadłą w punkcie padania kąty równe. Naodwrót: wszystkie promienie, wychodzące z ogniska, padając na powierzchnię paraboliczną, odbijają się od niej tak, że przyjmują kierunek równoległy do osi. Jeżeli przeto ustawimy naprzeciw siebie dwa paraboliczne zwierciadła w ten sposób, ażeby ich osie leżały na jednej prostej linii (fig. 163, str. 244) i w ognisku jednego z nich umieścimy zegarek, wtedy wychodzące zeń promienie dźwięku, padając na zwierciadło, zostają odeń odbite równolegle do osi, a więc padają na drugie zwierciadło także równolegle do osi i po powtórnem odbiciu zbierają się w jego ognisku. Gdy więc w tem ostatniem ognisku umieścimy koniec tuby, drugi zaś jej koniec przyłożymy do ucha, to wyraźnie usłyszymy bicie zegarka, czego nie moglibyśmy zauważyć w punktach, o wiele bliżej niego leżących.

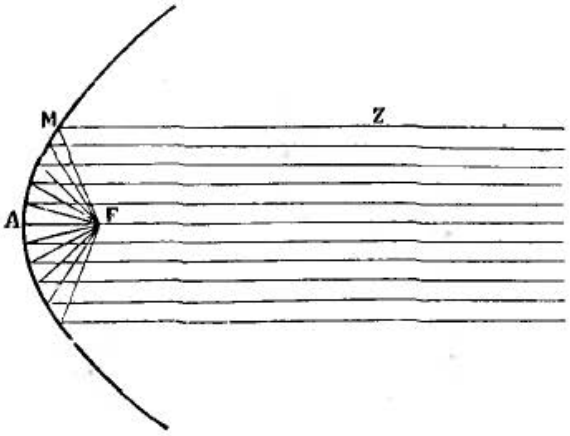


Fig. 162. Własność paraboli.

Podobną własność posiada także krzywa linia, zwana *elipsą*, tylko że w niej znajdują się dwa odniska, pozostające w takim z sobą związku, że promienie, wychodzące z jednego z nich, zbierają się w drugiem. Odbijanie się dźwięku od powierzchni elipsoidalnej, t. j. takiej, która powstaje przez obracanie się elipsy naokoło osi, następuje w podobny sposób, jak od dwóch ustawionych naprzeciw siebie zwierciadeł parabolicznych. Słabe dźwięki, wytwarzane w jednem ognisku elipsoidalnego sklepienia, łatwo więc mogą być usłyszane w drugiem, trudno zaś je zauważyć w punktach, położonych między obu ogniskami. Sala z takiem sklepieniem znajduje się, pomiędzy innemi, w muzeum starożytności w Paryżu (fig. 164, str. 245). Na odbijaniu się dźwięku polega wiele przyrządów wzmacniających go, jak np. t. zw. trąbki akustyczne, tuba, stetoskop i t. p.

Na tem samem polegają także znane powszechnie zjawiska odgłosu i echa. Gdy mówimy w dostatecznie dużym pokoju, którego ściany nie są pokryte kobiercami lub innemi przedmiotami, przytłumiającemi dźwięk, wtedy łatwo możemy zauważyć wzmocnienie naszego głosu, o wiele też donośniej rozlegają się wtedy kroki chodzących osób, uderzenia o twarde przedmioty i t. d. (odgłos). Znajdujący się na pewnej odległości mur, las lub góra powtarzają oddzielnie wymawiane przez nas zgłoski lub całe słowa (echo). Pochodzi to ztąd, że dźwięki odbite zlewają się

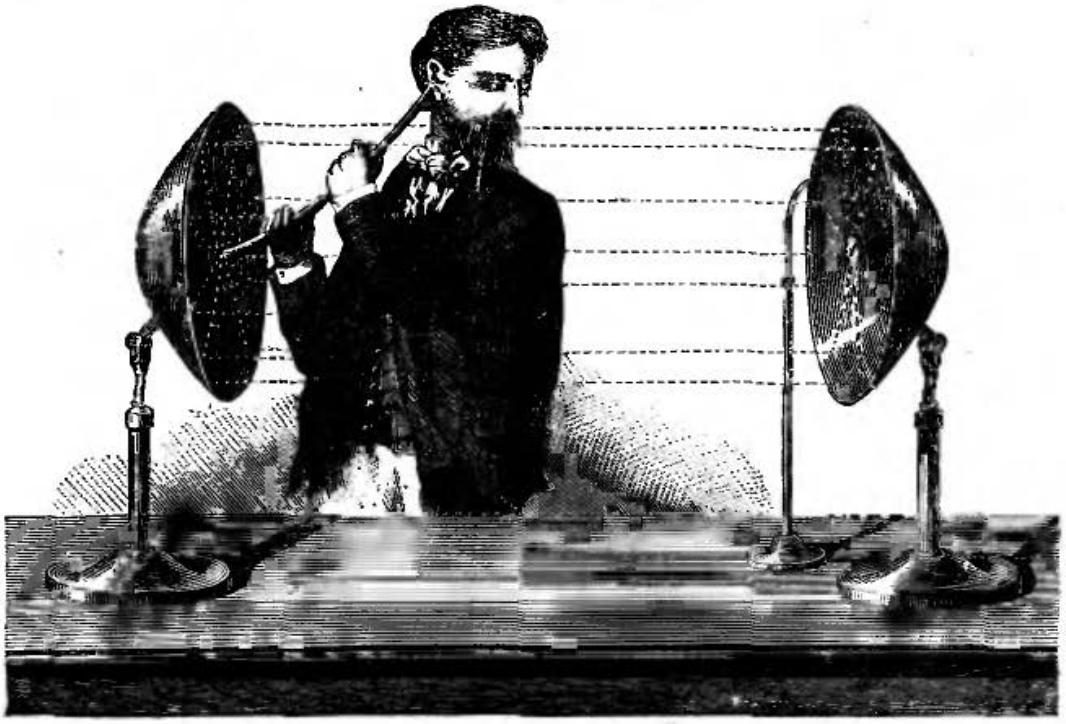


Fig. 163. Odbijanie się dźwięku od zwierciadeł parabolicznych.

z bezpośrednio wydawanemi; zależnie od czasu, jaki ubiega pomiędzy drugiemi a pierwszemi, powstaje odgłos, albo jedno—lub wielozgłoskowe echo.

Należy mianowicie zauważyć, że wrażenie, wywołane w nas przez jakiś dźwięk, nie znika wraz z jego ustaniem, lecz trwa jeszcze nadal przez pewien czas, oceniany zwykle na $^1/_{10}$ sekundy. W tym jednak czasie, jak już wiemy, dźwięk przebiega drogę, przybliżenie równą 34 metr. (w ciągu bowiem 1 sekundy

dźwięk w powietrzu przebywa drogę, równą w okrągłych cyfrach 340 metr.). Jeżeli więc znajdujemy się na odległości, mniejszej niż $^{34}/_{2}$ czyli 17 metr. od ściany odbijającej (fig. 165, str. 246), wtedy dźwięk wymówionej przez nas zgłoski ma dosyć czasu dla przebycia drogi od nas do ściany i napowrót—*O A* i *A O*—zanim jeszcze ustanie wrażenie, spowodowane przez usłyszenie danej zgłoski. Dźwięk odbity zlewa się przeto z bezpośrednio wytworzonym, wskutek czego przedłuża się tylko czas, podczas którego słyszymy wymówioną zgłoskę, oraz wzmacnia się jej brzmienie,

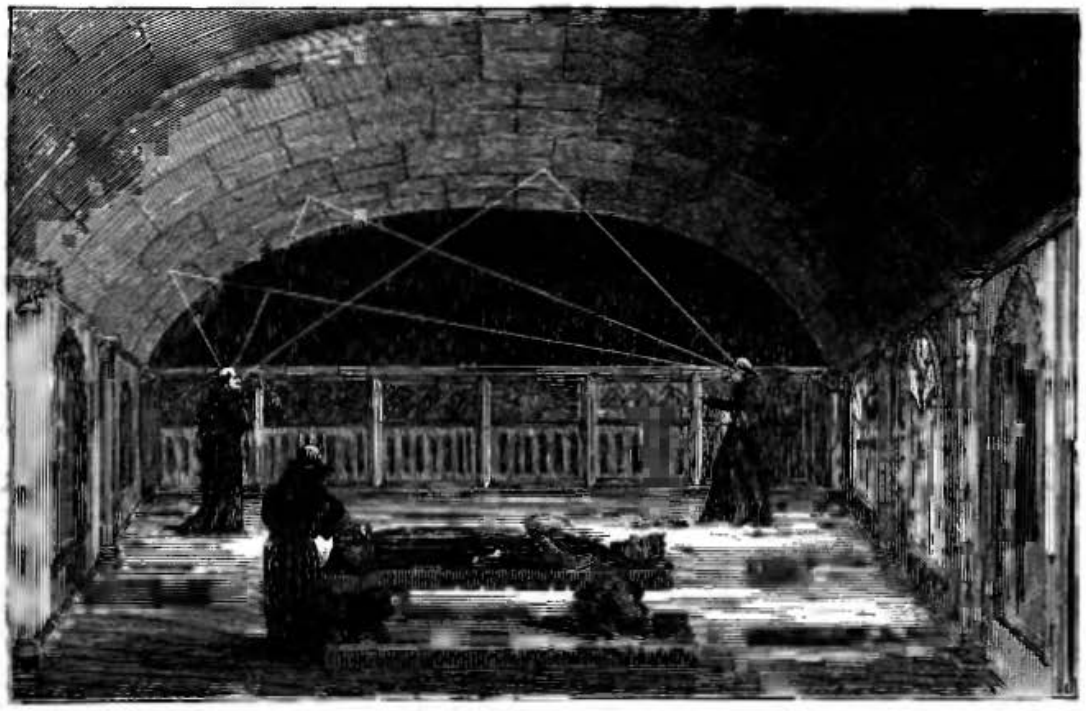


Fig. 164. Odbijanie się dźwięku od elipsoidalnego sklepienia.

czyli powstaje *odgłos*. Przeciwnie, gdy odległość *O A* wynosi więcej, niż 17 metrów, wtedy wrażenie, spowodowane przez bezpośrednie usłyszenie wymówionej zgłoski ustaje wcześniej, nim dźwięk odbity od ściany wpada do naszego ucha tak, że odnośną zgłoskę słyszymy po raz drugi, jakkolwiek nieco słabiej i powstaje *echo*. Im bardziej oddalona jest ściana odbijająca, tem później wraca odbity od niej dźwięk, tem więcej przeto zgłosek możemy w tym czasie wymówić; powstaje wtedy *wielozgłoskowe echo*. Możemy naprzykład wygodnie wymówić 4 zgłoski w ciągu 1 sekundy, dajmy na to wyraz „Ameryka“; w czasie tym dźwięk przebiega

drogę 340 metr. Gdy więc ściana odbijająca znajduje się od nas na odległości większej niż 170 metr., to echo pierwszej zgłoski „a“ dojdzie naszego ucha już po ustaniu wrażenia, spowodowanego przez wygłoszenie ostatniej — „ka“, tak że usłyszymy oddzielnie powtórzony przez echo cały rzeczony wyraz. Na tej samej zasadzie polegają *echa wielokrotne*, t. j. takie, które kilka razy powtarzają dany wyraz. Jeżeli mianowicie w różnych odległościach znajduje się kilka ścian, bądź równoległych, bądź tworzących z sobą pewien kąt, wtedy dźwięk od niektórych z nich odbija się tak, iż wprost wraca do nas, od innych zaś tak, że poprzednio pada na nową ścianę i dopiero po odbiciu się od niej, dochodzi naszego ucha.

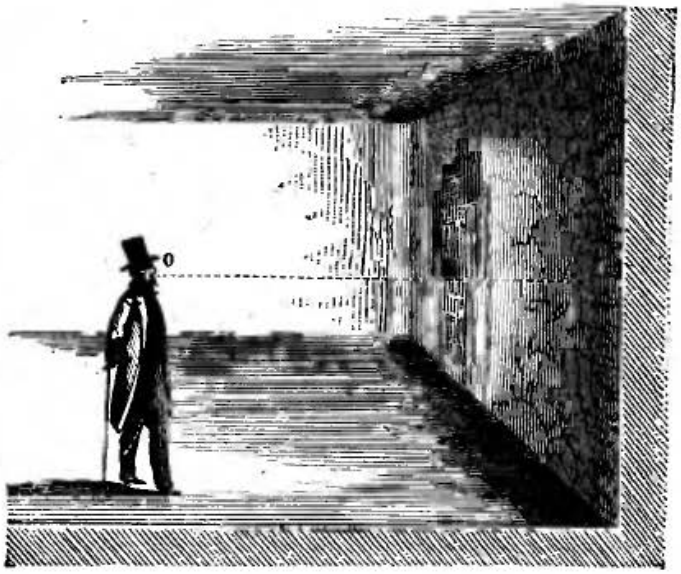


Fig. 165. Odbijanie się dźwięku. Odgłos i echo.

„Odbijanie się dźwięku — powiada Tyndall — od ścian dużej nieumeblowanej sali powoduje częstokroć dziwne zjawiska. Gdy stoimy naprzykład na galeryi giełdy paryzkiej, wtedy uszu naszych dochodzi tylko zagmatwany zgiełk zebranego na dole tłumu. Widzimy poruszenia ust, rąk i ramion, wiemy, iż prowadzą tam na dole ożywioną rozmowę, nie możemy jednak rozróżnić tego, co mówią. Głosy oddzielnych osób zlewają się z echami w jeden chaos, z którego ucho nie może wyosobnić żadnego zrozumiałego dźwięku. Echa, powstające w sali, zostają przytłumione przez meble lub inne podobne przedmioty. W obecności nadto słuchaczy możemy łatwo zrozumieć czyjąś mowę, którąby zaciemniły echa pustej sali. Gdy 16 maja 1865 r. wypadło mi wygłosić prelekcyę w jednej z sal uniwersytetu w Cambridge, spróbowałem przedtem, jak głośno musiałbym mówić,

ażeby głos mój był wszędzie wyraźnie słyszany i wielce przestraszyła mnie okoliczność, że przyjaciel mój, znajdujący się w odległym zakątku sali, nie mógł zrozumieć mych słów z powodu częstego i nieprawidłowego echa. Zgromadzeni atoli słuchacze do tego stopnia przytłumili rozchodzący się dźwięk, że głos mój wyraźnie był słyszany we wszystkich punktach sali."

„Chmury także mniej lub więcej silnie odbijają dźwięk. Przy pogodnem niebie wystrzał armatni na otwartem polu daje urwany i ostry dźwięk, podczas gdy obecność jednej chociażby chmury wystarcza do wywołania echa, podobnego do rozlegania się oddalonego grzmotu. Słabe echo powstaje również wtedy, gdy dźwięk przechodzi z jednej warstwy powietrza do innej o różnej gęstości. Humboldt opowiada, że w pewnej miejscowości dźwięk wielkich wodospadów rzeki Orinoco podobny jest do tego, jaki słyszymy przy rozbijaniu się fal morskich o nadbrzeżne skały i że nadto w nocy jest on o wiele donośniejszy, niż za dnia. Nie można tego przypisywać większej ciszy nocnej, dlatego, że brzęk owadów i ryk dzikich zwierząt czynią w tamtych okolicach noc o wiele niespokojniejszą, niż dzień. Humboldt tłómaczy powyższe zjawisko w następujący sposób: Pomiędzy nim a wodospadami znajdowała się wielka polanka, na której wznosiły się liczne nagię skały. W dzień słońce rozgrzewało te skały do temperatury znacznie wyższej, niż otaczającą je trawę; nad niemi więc unosił się słup rozgrzanego powietrza, znacznie rzadszego, niż to, które znajdowało się ponad trawą. W dzień przeto dźwięk musiał przechodzić przez atmosferę, której gęstość często się zmieniała; częściowe echa, powstające na granicy, oddzielającej warstwy rzadkiego i gęstego powietrza, kilka razy się powtarzały, wskutek tego zaś dochodzący jego uszu dźwięk był znacznie osłabiony. W nocy te różnice temperatury ustawały, dźwięk od wodospadów przechodził przez atmosferę o jednostajnej gęstości i dosięgał jego uszu, nie będąc osłabiony przez kilkakrotne odbicie."

„Sir John Herschel podaje, pomiędzy innemi, następujące przykłady sławnych ech: W parku w Woodstock echo powtarza 17 zgłosek w dzień i 20 w nocy; nad brzegami jeziora del Lupa,

niedaleko wodospadu Terni echo powtarza każdy wyraz 15 razy. W kościele opactwa Św. Albana słychać bicie zegarka od jednego końca kościoła do drugiego. Ośmiokątna galerya katedry w Gloucester przenosi cichy szept na odległość 25 metrów. W galeryi szeptów w kościele Św. Pawła najbardziej nawet słaby dźwięk przenosi się z jednego końca kopuły na drugi, nie słychać go zaś wcale w punktach, leżących pomiędzy niemi. W Canisbrook Castle na wyspie Wight znajduje się studnia, 71 metr. głęboka i 4 metr. szeroka, której wnętrze pokryte jest gładkim murem; gdy do tej studni wpada igła, to po niejakim czasie słychać uderzenie jej o wodę.“

Nadmieniliśmy już, że dźwięk rozprzestrzenia się w różnych środkach z niejednakową prędkością tak, że gdy przechodzi z jednego środka do innego, prędkość jego albo się zwiększa, albo zmniejsza. Ujawnia się zaś to w ten sposób, że gdy promień dźwięku pada pochyło na powierzchnię oddzielającą oba środki, wtedy w pierwszym z powyższych wypadków jeszcze bardziej się odchyla od prostopadłej w punkcie padania, w drugim zaś— zbliża się do niej. To samo daleko łatwiej wykazać dla promieni światła, dla którego o wiele dawniej już skonstatowano odnośne zjawisko, zwane *załamywaniem* się promieni świetlnych. Prawo tych zjawisk szerzej wyłuszczymy w 3-ej księdze, traktującej o świetle, tutaj zaś opiszemy tylko nader ciekawe doświadczenie, które dowodzi, że i promienie dźwięku przy przejściu z jednego środka do innego zostają załamane.

Fizyk Sondhaus naciągnął na metalową obręcz dwie błony z kolodyum, wolną zaś przestrzeń pomiędzy niemi wypełnił kwasem węglanym (w którym dźwięk rozchodzi się wolniej, niż w powietrzu) tak, że cały przyrząd przybrał postać dwuwypukłej soczewki, którą można było zamykać za pomocą kranu (fig. 166, str. 249). Jeżeli w pewnych warunkach istotnie następuje załamanie się dźwięku, to rozbieżne promienie padające z jednej strony na taką soczewkę, muszą się znowu zjednoczyć w jednym punkcie po drugiej jej stronie, podobnie jak to się dzieje z rozbieżnemi promieniami światła, padającemi na wypukłą soczewkę ze szkła. Otóż gdy Sondhaus umieścił zegarek na osi opisanej

tutaj soczewki, wtedy w pewnym punkcie po drugiej jej stronie mógł wyraźnie słyszeć bieg zegarka, czego nie mógł zauważyć w innych punktach, o wiele bliżej niego położonych. Promienie dźwięku zostały więc przez soczewkę tak załamane, że znowu się zjednoczyły w jednym punkcie, co dowodzi, że przy wejściu do soczewki i przy wyjściu z niej zmieniają one swój kierunek.

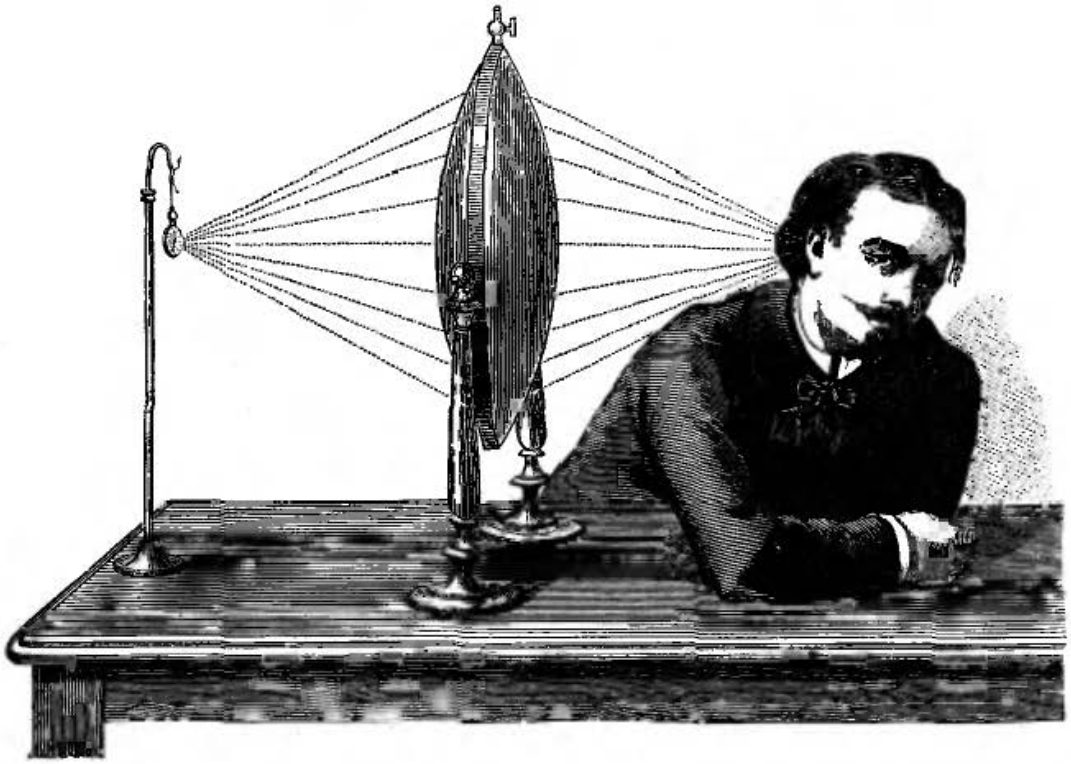


Fig. 166. Załamywanie się dźwięku. Przyrząd Sondhaus'a.

ROZDZIAŁ II.

Istota dźwięku.

§ 1. Ciało, wydające dźwięk, znajduje się w stanie ruchu drgającego.

Dotychczas nie zadawaliśmy sobie jeszcze pytania, na czem polega dźwięk, to jest co zachodzi w ciele dźwięczącem oraz w środku, w którym dźwięk się rozprzestrzenia. Dalszy jednak wykład traktowanego tu przedmiotu byłby bardzo utrudniony,

jeżeli nie niemożliwy bez poprzedniego zbadania tej kwestyi. Odkładając bliższe rozważenie procesu, jaki zachodzi w środku, przenoszącym dźwięk, do następnego §, w niniejszym zajmiemy się stanem ciała dźwięczącego.

Bardzo proste doświadczenia pokazują, że dźwięk wydawać mogą tylko ciała sprężyste, t. j. takie, których cząstki, będąc wyprowadzone z pierwotnie zajmowanego położenia, z mniejszą lub większą mocą usiłują doń wrócić. Gdy przesuwamy cząstki takich ciał przez uderzenie, tarcie albo w jakikolwiek inny spo-

Fig. 167. Drgania wyprężonej struny.

sób, wracają one z pewną prędkością do swego pierwotnego położenia; dotarłszy jednak doń nie zatrzymują się, lecz wskutek raz nabytej prędkości oscylują w drugą stronę na podobieństwo wahadła i przychodzą w stan spoczynku dopiero po wykonaniu pewnej liczby drgań. Oscylacye te czyli drgania przenoszą się we wszystkich kierunkach na otaczające ciała—stałe, ciekłe, czy też lotne i za ich pośrednictwem dochodzą naszego ucha.

Łatwo można wykazać, że ciało dźwięczące istotnie znajduje się w stanie mniej lub więcej szybkiego ruchu drgającego. Pociągnijmy wyprężoną strunę smyczkiem skrzypcowym albo zarwijmy ją ku górze palcem, a usłyszymy pewien określony ton. Jednocześnie struna będzie się nam wydawała jakby nabrzmiałą od końców ku środkowi. Pochodzi to ztąd, że oko, podobnie jak i ucho, zachowuje doznane wrażenie jeszcze przez pe-

Fig. 168. Drgania sztaby metalowej.

wien czas po ustaniu działającej przyczyny: szybko drgająca struna zajmie więc już nowe położenie, zanim jeszcze oko traci wrażenie, spowodowane poprzedniem jej położeniem tak, że oddzielne jej fazy zlewają się w jeden obraz nabrzmiałej ku środkowi struny (fig. 167, str. 250). O drganiu struny, podczas tego gdy wydaje ona ton, możemy także łatwo przekonać się, dotykając jej palcem: uczuwamy wtedy jej uderzenia.

Umocujmy sztabę metalową w sposób, pokazany na fig. 168, str. 251, odchylmy swobodny jej koniec w stronę, a następnie wypuśćmy go z ręki. Zobaczymy, że sztaba wykonywa szereg oscylacyj, których amplituda stopniowo się zmniejsza; jednocześnie słyszymy określony ton, coraz słabszy, który w końcu zamilka wraz z ustaniem drgań sztaby.

Pociągając brzegi klosza szklanego albo dzwonu smyczkiem skrzypcowym, słyszymy bardzo głośne tony, które również po-

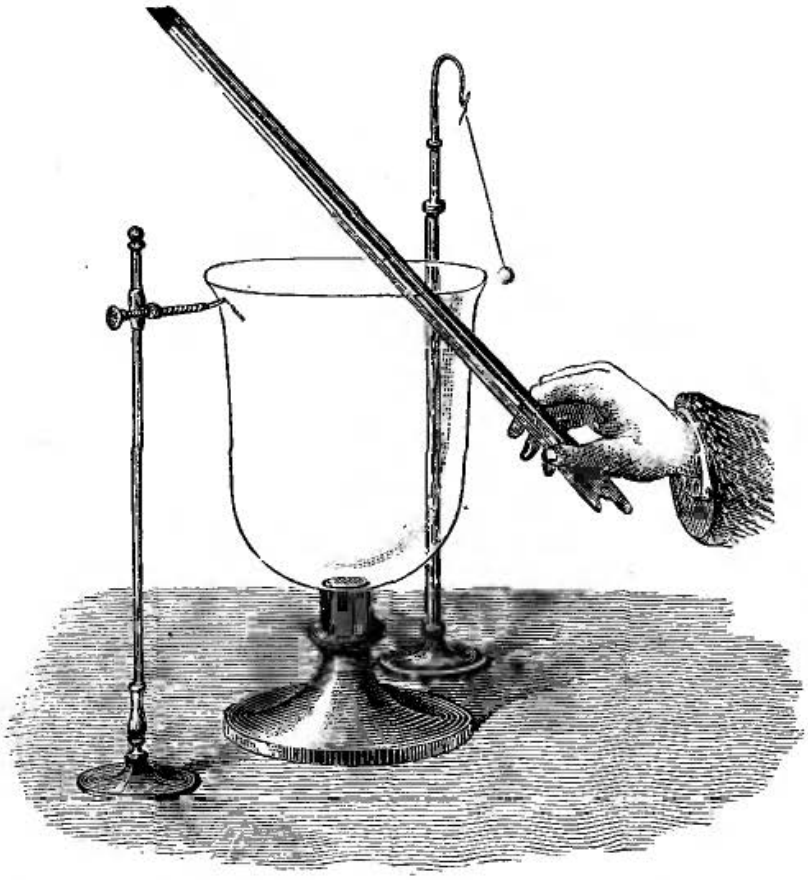


Fig. 169. Drgania klosza szklanego.

wstają wskutek drgań tych ciał, jak o tem można się przekonać za pomocą jednego z następujących sposobów: Ustawmy na bardzo nieznacznej odległości od spoczywającego jeszcze klosza ostrze, wtedy podczas dźwięczenia jego słyszymy krótkie urywane uderzenia szkła o ostrze, dające się bardzo łatwo odróżnić od tonu, wydawanego przez sam klosz (fig. 169). Albo zawieśmy na delikatnej nitce kulkę z lekkiego materyału tak, ażeby doty-

kała klosza, wtedy przez cały czas trwania wytworzonego tonu kulka będzie ciągle odrzucana przez klosz.

W tem miejscu wypada nam nieco szerzej omówić wspomniany już przedtem (str. 229) przyrząd, zwany drygawką Trevelyana. Przyrząd ten składa się z podłużnej płyty żelaznej lub mosiężnej, mającej od spodu wyżłobienie z ostremi brzegami i przymocowanej do dłuższej nieco od niej sztaby, zakończonej kulką (fig. 170). Jeżeli ogrzejemy taką drygawkę i następnie położymy ją na zaostrzonej ku górze bryle zimnego ołowiu, wtedy usłyszymy ostry ton, który trwa dopóty, dopóki temperatury obu metali się nie wyrównają. Powstanie odnośnego tonu tłómaczymy sobie w następujący sposób: Gdy drygawka jednym swym brzegiem dotyka zimnego ołowiu, wtedy metal ten w punktach ze-

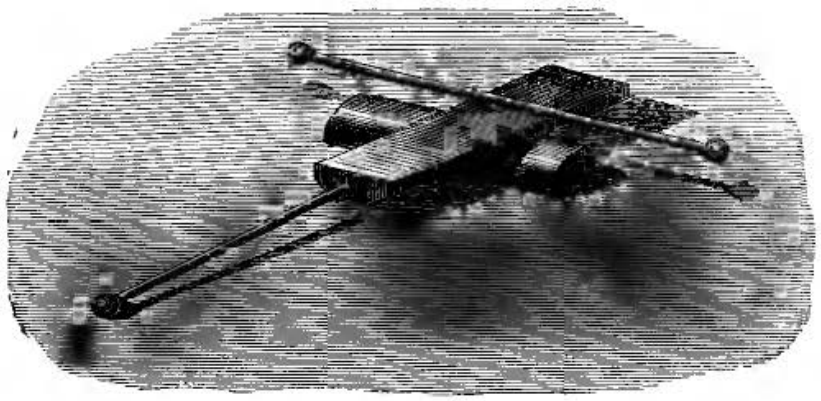


Fig. 170. Drygawka Trevelyan'a.

tknięcia raptownie się rozgrzewa, wskutek czego w tem miejscu powstaje małe wzniesienie (fig. 171, str. 254) i drygawka zostaje podrzucona do góry, tymczasem drugi jej brzeg spada na ołów, następnie zostaje podrzucony i t. d. Pchnięcia kolejno zadawane przez rozgrzewające się części ołowiu obu brzegom drygawki, wprawiają ją w szybkie drgania, które przenosząc się do naszego ucha, wywołują w niem wrażenie odpowiedniego tonu. Drgania te możemy znacznie zwolnić, umieszczając wpoprzek płyty sztabę, zakończoną kulkami (fig. 170), które oprócz tego ruchem swym uwidoczniają oscylacye całego przyrządu.

Ciecze także ulegają mniej lub więcej szybkim drganiom, gdy powstaje w nich dźwięk. Jeżeli naprzykład kielich szklany

napełnimy do połowy wodą i następnie będziemy pocierali brzeg jego smyczkiem albo zwilżonym palcem, to zobaczymy, iż powierzchnia cieczy rozdzieli się na 4 do 6 części, rozmaicie ugrupowanych, zależnie od wysokości wytwarzanego przy tem tonu. Przy dostatecznie zaś silnych dźwiękach, drgania potęgują się do tego stopnia, że woda odłącza się od powierzchni cieczy i w postaci bardzo drobnych kropel rozpryskuje się na wszystkie strony.

Nakoniec dźwięk powstaje także wskutek drgań słupa jakiegoś gazu. Jeżeli zadmiemy w piszczałkę organową za pomocą ust albo przez naciśnięcie połączonego z nią miecha, usłyszymy ton, którego wysokość, jak to później zobaczymy, zależy od rozmiarów piszczałki. Dotykając jej ścian, nie czujemy jednak żadnych uderzeń, w tym więc wypadku drga nie ciało stałe—piszczałka, lecz zawarte w niej powietrze. Łatwo to wykazać, jeżeli do piszczałki o szklanej ścianie, dozwalającej widzieć co zachodzi we wnętrzu, wprowadzimy błonę, uczepioną do nitek i obsypaną piaskiem (fig. 172, str. 255), a następnie w nią zadmiemy: ziarnka piasku żywo wtedy podskakują, zdradzając swym ruchem drgania powietrza.

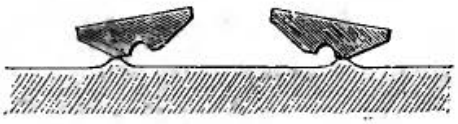


Fig. 171. Przyczyna drgań w przyrządzie Trevelyan'a.

§ 2. Rozchodzenie się dźwięku w powietrzu. Fale dźwiękowe.

Opisane w poprzednim § doświadczenia wykazują w sposób niewątpliwy, że dźwięk polega na drganiach ciała sprężystego. Sama jednak obecność takiego ciała nie wystarcza jeszcze, abyśmy otrzymali wrażenie dźwięku; do tego potrzeba nadto sprężystego środka, któryby drgania te doprowadzał do naszego ucha, wiemy bowiem, że w próżni dźwięk się nie rozchodzi. Środkiem takim zwykle jest powietrze, w którem po największej części znajduje się zarówno ciało drgające, jak i organ słuchowy. Rozważmy tedy nieco bliżej proces, zachodzący w powietrzu podczas rozprzestrzeniania się w niem dźwięku.

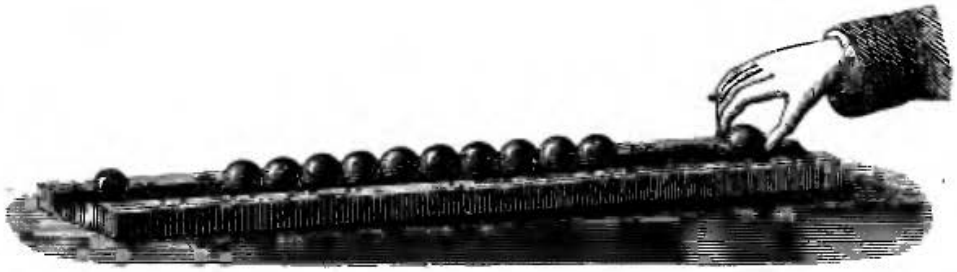
Ściany ciała drgającego w pewnej fazie swej oscylacyi raptownie popychają naprzód najbliższe cząstki otaczającego powietrza, te szybko udzielają swój ruch sąsiednim cząstkom, same zaś wracają do pierwotnego położenia; sąsiednie te cząstki trącają o dalsze, z kolei przechodzą w stan spoczynku i t. d. Każda z kolejnych warstw powietrza, otaczających ciało drgające, przejmuje ruch poprzedniej warstwy i przenosi go na następną i w ten sposób wstrząśnienie powstające w początku naokoło źródła dźwięku, rozchodzi się na wszystkie strony i dosięga naszego ucha. Przenoszenie się tego wstrząśnienia jest czemś odmiennem od ruchu samych cząstek powietrza, podczas bowiem gdy te ostatnie wykonywują tylko nieznaczne drgania około średniego swego położenia, wstrząśnienie przenosi się na bardzo znaczną odległość.

Fig. 172. Drgania słupa powietrza.

Procesu tego w powietrzu dostrzedz naturalnie nie możemy, doskonały jednak obraz zachodzącego w niem ruchu dają nam niektóre analogiczne zjawiska przenoszenia się wstrząśnienia przez szereg stykających się z sobą i dostatecznie sprężystych ciał stałych, naprzykład przez szereg kul ze szkła albo kości słoniowej. Zjawiska te opiszemy tu wymownemi słowy Tyndalla.

Ułóżmy takie kule obok siebie w odpowiedniem wyżłobieniu w ten sposób, aby wzajemnie się stykały (fig. 173, str. 256), następnie weźmy jednę z nich do ręki i potoczmy ją silnie tak, ażeby uderzyła o pierwszą z pozostałych. Wstrząśnienie, nadane w ten sposób pierwszej kuli, udziela się drugiej, ta przenosi je na trzecią, trzecia—na czwartą i t. d.; każda kula udziela swój ruch następnej, lecz sama pozostaje w miejscu; tylko ostatnia kula szeregu odskakuje. Otóż w po-

dobny sposób dźwięk od cząstki do cząstki rozprzestrzenia się w powietrzu. Cząstki powietrza, wypełniające wklęsłość ucha, uderzają w końcu o błonę bębenkową, naciągniętą wpoprzek kanału słuchowego zewnętrznego i wprawiają ją w drgania, które udzielają się zakończeniom nerwowym i wzdłuż tych ostatnich zostają przeprowadzone do mózgu. Tam wywołują pewne zmiany, którym, w razie dostatecznie wielkiej prędkości i amplitudy



Fig, 173. Przenoszenie się ruchu przez szereg sprężystych kul.

drgań, towarzyszy wrażenie odpowiedniego dźwięku. Związek, jaki zachodzi pomiędzy fizyczną stroną tego ostatniego zjawiska—zmianami w mózgu a stroną psychiczną—wrażeniem dźwięku, jest dla nas dotychczas jeszcze zupełnie ciemny.

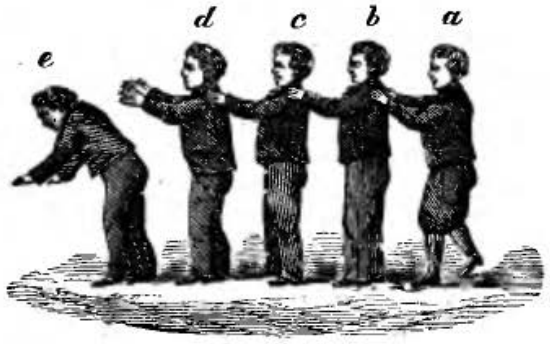


Fig. 174. Przenoszenie się ruchu przez szereg opierających się o siebie chłopców.

Sprobujmy wyświetlić proces rozprzestrzeniania się dźwięku w powietrzu za pomocą innego jeszcze bardzo zwykłego, lecz doskonale odpowiadającego celowi przykładu: Przypuśćmy, iż mamy przed sobą szereg z pięciu chłopców—*a*, *b*, *c*, *d*, *e* (fig. 174) ustawionych tak, że ręce każdego z nich spoczywają na ramionach znajdującego się przed nim sąsiada; *e* rozpoczyna, *a* zaś zamyka sobą szereg. Trąćmy nagle chłopca *a*, ten daje pchnięcie następnemu chłopcu *b*, poczem znowu zajmuje pionowe położenie, *b* pcha *c*, *c*—*d*, *d*—*e;* każdy chłopiec, dawszy pchnięcie swemu sąsiadowi, znowu się wypro-

stowuje. Tylko *e*, nie mając nikogo przed sobą, przesuwa się ku przodowi. Gdyby znajdował się on nad brzegiem przepaści, wtedy stoczyłby się do niej; gdyby opierał się o szybę - stłukłby szkło; gdyby stykał się z błoną bębna—wprawiłby ją w drgania. W ten sposób moglibyśmy przesłać pchnięcie przez szereg, składający się ze stu lub więcej chłopców; każdy oddzielny chłopiec jednak wahałby się przytem tylko w jednę i drugą stronę. Otóż tak samo przesyłamy dźwięk przez powietrze i wprawiamy w drgania błonę bębenkową jakiegoś oddalonego od nas ucha, podczas gdy każda oddzielna cząstka powietrza, przyjmująca udział w przenoszeniu wstrząśnienia, wykonywa tylko nieznaczne stosunkowo oscylacye. Że istotnie oddzielne cząstki środka przy rozprzestrzenianiu się w nim dźwięku oscylują tylko tam i napowrót, lecz nie przenoszą się z jednego miejsca na inne, nie

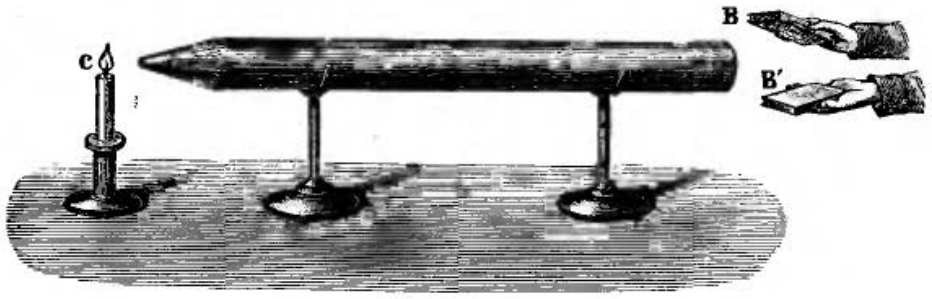


Fig. 175. Cząstki środka, przenoszącego dźwięk, nie zostają porwane, lecz tylko oscylują w jednę i drugą stronę.

zostają porwane, tego dowodzi następujące doświadczenie, podane przez Tyndalla: Skierujmy jeden stożkowato zaostrzony koniec metalowej rury, 5 metrów długiej, na płomień świecy (fig. 175), drugi zaś jej koniec napełnijmy dymem z palącego się papieru lub cygara. Gdy następnie silnie uderzymy o siebie dwie książki *B* i *B'* tak, jak to pokazuje figura, płomień zostanie zagaszony, lecz najmniejsze nawet ślady dymu nie wysuną się z końca rury, zwróconego do świecy. Wstrząśnienie przenosi się przez cząstki powietrza i dymu, nie porywając ich z sobą.

Mamy już teraz jaśniejsze pojęcie o sposobie rozprzestrzeniania się pojedyńczego uderzenia. Rozważmy teraz cały ich szereg:

niechaj widełki strojowe drgają w pobliżu otwartej z obu stron rury (fig. 176), dla ułatwienia sobie zadania weźmy nadto pod uwagę tylko jedno ich ramię a, zwrócone do rury. Gdy ramię to od skrajnego swego położenia po lewej stronie a'' oscyluje naprzód aż do a', wtedy popycha przed sobą powietrze. Gdyby to ostatnie było ciałem niesprężystem, jak naprzykład ołów albo glina, wtedy słup powietrza, znajdujący się w rurze, zostałby przytem tylko z niej wysunięty na długość, odpowiednią amplitudzie drgania widełek. Ponieważ jednak powietrze jest łatwo ściśliwe i sprężyste, przeto pod naciskiem drgającego ramienia będzie się tylko zgęszczało na pewnej przestrzeni

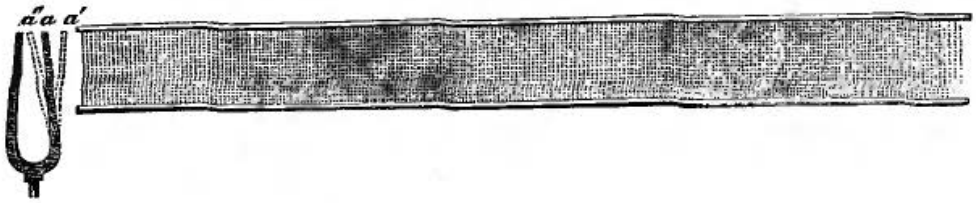


Fig. 176. Rozprzestrzenianie się dźwięku w słupie powietrza.

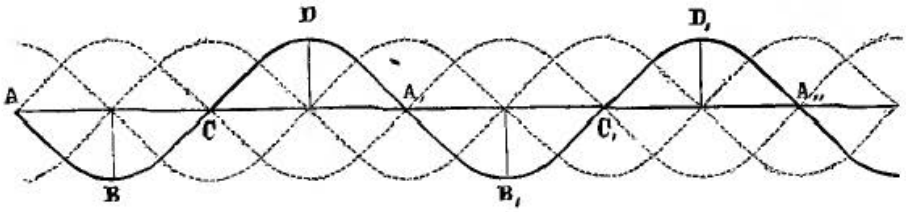


Fig. 177. Graficzne przedstawienie fal dźwiękowych.

dopóty, dopóki ramię nie dosięgnie skrajnego położenia z prawej strony a'. Zgęszczona ta warstwa wskutek sprężystości powietrza usiłuje znowu się rozszerzyć i przenosi zgęszczenie na następną warstwę powietrza; jednocześnie atoli drgające ramię rozpoczyna swój ruch wsteczny od a' do a'', pozostawiając za sobą częściową próżnię, do której wpływa rozszerzające się powietrze tak, że teraz rozrzedza się ono w początku rury. Przy następnej oscylacyi ramienia znowu otrzymamy zgęszczenie, po którem nastąpi rozrzedzenie i t. d., przyczem tak jedno, jak drugie przenosi się kolejno z warstwy na warstwę wzdłuż całej rury. Każdej całkowitej oscylacyi ciała drgającego odpowiadają więc

w rurze dwie następujące po sobie warstwy, jedna—rozrzedzonego, druga—zgęszczonego powietrza, które razem wzięte stanowią t. zw. *falę dźwiękową*, posuwającą się coraz dalej wzdłuż rury.

Stan powietrza w oddzielnych punktach rury możemy także przedstawić graficznie (geometrycznie) w następujący sposób: Na linii prostej, wyobrażającej kierunek rury, a więc i kierunek rozprzestrzeniania się fal dźwiękowych, wznosimy w punktach, w których powietrze jest zgęszczone, prostopadłe ku górze, w tych zaś, gdzie powietrze jest rozrzedzone, prowadzimy prostopadłe ku dołowi i nadajemy im długość, proporcyonalną do stopnia zgęszczenia lub rozrzedzenia w danem miejscu (fig. 177). Łącząc z sobą końcowe punkty tych prostopadłych, otrzymujemy falową linię $A\ B\ C\ D\ A,\ B,\ C,\ D,\ A_{,,}\ldots$, która swemi zagięciami ku górze lub ku dołowi unaocznia zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza. Po pewnym czasie każde zgęszczenie i rozrzedzenie udziela się nieco naprzód; odpowiednio do tego linia falowa przyjmuje położenia, oznaczone na figurze kropkami. Długość $A\ A_{,,}$ od początku jednego rozrzedzenia do początku następnego, albo równą jej długość $B\ B_{,,}$—od maximum jednego rozrzedzenia do maximum następnego, albo też równą długość $C\ C_{,,}$ lub wreszcie $D\ D_{,}$ nazywamy *długością fali*. Zastanawiając się nad procesem, przedstawionym na figurze 176, przekonywamy się, że w czasie, gdy ciało dźwięczące—w danym wypadku widełki strojowe—wykonywa jednę całkowitą oscylacyę, dźwięk przenosi się na długość jednej fali i że w ogóle ilość fal powstających w danym czasie jest takaż sama, co i ilość drgań ciała dźwięczącego w tymże czasie (1). W powyższym przykładzie przyjęliśmy, że drgania ciała dźwięczącego zachodzą według praw wahadła; w takim wypadku prędkość oscylującego naprzód ramienia począwszy od położenia a'', w którem równa się 0, ciągle wzrasta aż do położenia a, gdzie jest największa; do tej chwili ramię wykonało $^1/_4$ oscylacyi. Następnie prędkość drgania znowu się zmniejsza aż do położenia a', odpowiadającego $^1/_2$ oscylacyi, w którem staje się równą 0, poczem ramię oscyluje na-

(1) Do punktu tego wrócimy jeszcze w następnym rozdziale.

powrót z coraz to wzrastającą prędkością aż do maximum w a, odpowiadającego $^3/_4$ oscylacyi; od tego zaś punktu prędkość znowu się zmniejsza i staje się równą 0 w a'', w końcu całej oscylacyi. Największa więc prędkość w jednę lub drugą stronę przypada w końcu $^1/_4$ i $^3/_4$ oscylacyi; w tym jednak czasie, jak widzieliśmy, dźwięk przenosi się na długość $^1/_4$, względnie $^3/_4$ fali, w tych przeto miejscach, t. j. pośrodku każdej pół-fali, cząstki powietrza drgają także z największą prędkością w jednę lub drugą stronę i tamże przypadają maxima zgęszczeń lub rozrzedzeń. Widzimy też na fig. 177, że w rzeczonych punktach prostopadłe—przedstawiające prędkość drgania cząstek powietrza, jakoteż stopień zgęszczenia lub rozrzedzenia—są najdłuższe. Jeżeli drgania ciała dźwięczącego zachodzą według innych praw, niż oscylacye wahadła, to w innych także punktach przypadają maxima zgęszczeń i rozrzedzeń.

Nazwa fal dźwiękowych pochodzi od podobieństwa, jakie przedstawiają one pod pewnym względem z *falami wodnemi*. Każdy dobrze zna te ostatnie. Gdy na spokojną powierzchnię stawu rzucimy kamień, wtedy powstaje pod nim zagłębienie, wokoło którego woda wznosi się do góry, tworząc wzniesienie, za niem powstaje dokoła zagłębienie czyli *dół*, dalej znów wzniesienie czyli *góra* i t. d. W ten sposób współśrodkowe zagłębienia i wzniesienia czyli doły i góry rozprzestrzeniają się od punktu spadku kamienia na wszystkie strony, tworząc coraz szersze pierścieniowate fale, z których każda składa się z dołu i góry, odpowiadających rozrzedzeniu i zgęszczeniu fali dźwiękowej. Stojącemu na brzegu obserwatorowi wydaje się, jakoby sama woda przepływała ku niemu od punktu, w którym spadł kamień; jestto jednak tylko złudzenie: i w tym wypadku, podobnie jak przy dźwięku, ma tylko miejsce przenoszenie się ruchu falowego, lecz nie samych cząstek drgających. Można się o tem przekonać, rzucając na falującą wodę skrawki papieru lub kawałki korka: ciała te wraz ze znajdującemi się pod niemi cząstkami wody kołyszą się tylko w górę i na dół, pozostając w miejscu, a nie przenoszą się z jednego miejsca na inne, co uczyniłyby, gdybyśmy je rzucili na płynącą wodę, naprzykład na rzekę.

Zachodzi atoli ważna różnica pomiędzy falowaniem powietrza podczas rozchodzenia się w niem dźwięku, a falowaniem wody. W pierwszym wypadku cząstki powietrza oscylują tam i napowrót w samym kierunku rozprzestrzeniania się fal dźwiękowych (w doświadczeniu naprzykład, przedstawionem na fig. 176— w kierunku rury), podczas gdy przy falowaniu wody oddzielne jej cząstki kołyszą się w górę i na dół, t. j. w kierunku pionowym, same zaś fale rozchodzą się po powierzchni wody w kierunku poziomym, a więc drgania zachodzą tu prostopadle do kierunku rozchodzenia się fal. Drgania albo falowania pierwszego rodzaju nazywamy *podłużnemi*, drugiego zaś — *poprzecznemi*. Dźwięk więc polega na *podłużnych falowaniach* powietrza, albo innego sprężystego środka. Zobaczymy w następnej księdze, że światło, przeciwnie, polega na *poprzecznych* drganiach bardzo subtelnego środka—eteru świetlnego.

§ 3. Zależność prędkości dźwięku od sprężystości i gęstości środka. (1)

Z kolei wypada nam zająć się teraz warunkami, od jakich zależy prędkość rozprzestrzeniania się fal dźwiękowych. Zanim to jednak uczynimy, wróćmy się jeszcze raz do omówionego w poprzednim § przykładu z chłopcami (fig. 174), który ułatwi nam zrozumienie przynajmniej jednego z tych warunków. Gdy popychamy chłopca *a*, wtedy może on zwolna poddawać się wywieranemu nań naciskowi i powoli oddawać swój ruch sąsiadowi *b;* ten ostatni może to samo uczynić względem *c*, *c* względem *d*, *d* względem *e*. W ten sposób ruch może bardzo wolno przenosić się przez cały szereg. Chłopiec *a* może jednak także, przez silne natężenie mięśni i następne szybkie cofnięcie się, oddać prędko otrzymane uderzenie swemu sąsiadowi *b*, a potem spocząć, *b* może to samo uczynić z *c*, *c* z *d*, *d* z *e*. Ruch w takim razie szybko przenosi się przez cały szereg. Otóż silne to natężanie mięśni i szybkie

(1) Przy opracowaniu tego §, jak i wielu innych ustępów niniejszej księgi, posługiwaliśmy się głównie dziełem Tyndalla „Dźwięk."

cofanie się odgrywa tu podobną rolę, co i *sprężystość* powietrza albo innego środka przy rozchodzeniu się dźwięku. Gdy przy przenoszeniu się fali dźwiękowej warstwa powietrza pchana jest *ku sąsiedniej warstwie, to oddaje ona jej swój ruch, poczem sama* wskutek sprężystości się cofa, i czem prędzej zachodzi to oddawanie ruchu i cofanie się, czyli innemi słowy im większa jest *sprężystość* powietrza albo w ogóle danego środka, tem prędzej rozchodzi się w nim dźwięk.

Miarę sprężystości powietrza daje nam jego ciśnienie, które, jak już wiemy, wyraża się zwykle wysokością równoważonego przez nie słupa rtęci; na poziomie morza ciśnienie to jest przeszło 2 razy większe, niż na szczycie Mont-Blanc, sprężystość powietrza jest więc w pierwszem miejscu przeszło 2 razy większa, niż w drugiem.

Co się tyczy gęstości powietrza lub też każdego innego środka, to im ona jest większa, tem wolniej rozchodzi się w nim dźwięk i naodwrót. Wszystko więc, co sprzyja spotęgowaniu sprężystości albo zmniejszeniu gęstości środka, powiększa także prędkość dźwięku; czynnikiem takim, pomiędzy innemi, jest ciepło.

Gdybyśmy mogli zwiększyć sprężystość powietrza, nie zmieniając jego gęstości, to prędkość dźwięku wzrosłaby przytem, albo gdybyśmy mogli zmniejszyć gęstość powietrza, nie zmieniając jego sprężystości, to również powiększylibyśmy prędkość dźwięku. Jak jedno tak i drugie daje się urzeczywistnić. Gdy ogrzewamy naprzykład powietrze w zamkniętym balonie tak, aby nie mogło się rozszerzać, wtedy zwiększamy ciśnienie, a więc *i sprężystość tego gazu, podczas gdy gęstość jego nie ulega* przytem żadnej zmianie. Przez tak ogrzewane powietrze dźwięk przenosi się szybciej, niż przez zimne. Z drugiej strony, gdy ogrzewane powietrze może się swobodnie rozszerzać, wtedy gęstość jego się zmniejsza, ciśnienie natomiast, a więc i sprężystość pozostaje bez zmiany; w takiem przeto powietrzu dźwięk również się rozchodzi prędzej, niż w zimnem. Ten ostatni wypadek ma miejsce z naszą atmosferą, gdy ją ogrzewają promienie słoneczne: powietrze wtedy swobodnie się rozszerza na wszystkie

strony, wskutek czego gęstość jego się zmniejsza, ciśnienie zaś, a więc i sprężystość się nie zmienia. Pojmujemy teraz, dlaczego, mówiąc w poprzednim rozdziale o prędkości dźwięku, zawsze uwzględnialiśmy przytem temperaturę: *przy niższej temperaturze dźwięk rozchodzi się w tym samym środku wolniej, niż przy wyższej.*

Porównajmy teraz ze sobą pod omawianym tu względem różne gazy. Przy tej samej sprężystości gęstość wodoru jest znacznie mniejsza, niż powietrza, dźwięk w pierwszym z tych gazów o wiele też prędzej się rozchodzi, niż w drugim. Przeciwnie się rzecz ma z cięższym od powietrza kwasem węglanym: podczas gdy sprężystość tego ostatniego jest ta sama, co i powietrza (przy jednakowem ciśnieniu), gęstość jego natomiast jest większa, a więc prędkość rozchodzenia się w nim dźwięku — mniejsza, niż w powietrzu. Ponieważ ciśnienie (a więc także sprężystość) i gęstość powietrza — według prawa Boyle'a-Mariotte'a, ściśle stosującego się do tego gazu — przy niezmiennej temperaturze wzrastają lub zmniejszają się w tym samym stosunku, przeto wpływy ich na prędkość dźwięku muszą się wzajemnie zobojętnić. Gdyby więc naprzykład na najwyższych szczytach alpejskich panowała ta sama temperatura, co u ujścia Wisły, t. j. na poziomie morza, wtedy i prędkość dźwięku w obu tych miejscach byłaby jednakowa; jakkolwiek bowiem sprężystość powietrza na szczycie Mont-Blanc jest prawie dwa razy mniejsza niż przy ujściu Wisły, lecz za to i gęstość powietrzą w pierwszem miejscu jest dwa razy mniejsza. Ponieważ jednak powietrze w górnych warstwach atmosfery jest zimniejsze, niż w dolnych, przeto prędkość dźwięku na szczytach gór jest w rzeczywistości mniejsza, niż na poziomie morza.

Związek, zachodzący pomiędzy prędkością dźwięku a sprężystością i gęstością środka, wyrażamy następującem prawem, odkrytem przez Newtona: *Prędkość dźwięku jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego ze sprężystości środka i odwrotnie proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z jego gęstości.* Gdyśmy naprzykład ogrzali w zamkniętem naczyniu powietrze od 0 do 819° C., zwiększylibyśmy przez to jego ciśnienie, a więc

i sprężystość 4 razy, przyczem gęstość jego pozostałaby bez zmiany; w takiem powietrzu dźwięk rozchodziłby się 2 razy prędzej, niż w powietrzu przy 0°. Gęstości tlenu i wodoru mają się do siebie jak 16 do 1; otóż prędkość dźwięku w pierwszym z tych gazów jest, przy jednakowem ich ciśnieniu, a więc przy jednakowej sprężystości, 4 razy mniejsza, niż w drugim.

Prawu powyższemu zdaje się przeczyć znany nam już dobrze fakt, że w ciałach ciekłych i stałych, gęstszych od powietrza, dźwięk rozchodzi się prędzej, niż w tym gazie (1). Sprzeczność ta jest jednak tylko pozorna. Jeżeli bowiem gęstość tych ciał znacznie przewyższa gęstość powietrza, to z drugiej strony sprężystość ich o wiele bardziej przewyższa sprężystość powietrza. Miarę sprężystości różnych ciał daje nam wielkość siły, mogącej wywołać w nich jednę i tę samą zmianę, a więc naprzykład siły, która sprowadza ich objętość do połowy. Otóż siła ta jest najmniejsza dla ciał lotnych, dla cieczy zaś jest bez porównania większa, niż dla tych ostatnich, a nawet niż dla ciał stałych; to samo dotyczy sprężystości. Dźwięk więc dlatego prędzej się rozchodzi w ciałach ciekłych i stałych, niż w gazach, że stosunek sprężystości do gęstości jest dla tych ciał większy, niż dla gazów, bynajmniej zaś nie dlatego, jak to częstokroć mylnie przypuszczają, że ciała te są gęstsze, niż gazy. Przeciwnie wzrost gęstości, przy innych równych warunkach, zawsze powoduje zmniejszenie prędkości dźwięku. I gdyby sprężystość wody była tylko równa sprężystości powietrza, wtedy prędkość dźwięku w wodzie zamiast być przeszło 4 razy większą, niż prędkość w powietrzu, stanowiłaby tylko drobny ułamek tej ostatniej. Należy więc w tych wypadkach uwzględnić zarówno sprężystość, jak i gęstość środka, gdyż prędkość dźwięku warunkuje się nie jedną z nich, lecz stosunkiem jednej do drugiej. Bardzo pouczający przykład wpływu małej gęstości,—przy olbrzymiej sprężystości,—na prędkość rozprzestrzeniania się fal, daje nam eter świetlny, który, jak to zobaczymy w następnej księdze, przenosi

---

(1) Patrz tabliczkę na str. 241.

drgania światła z prędkością nie tylu i tylu metrów, lecz około 42000 mil na sekundę.

W poprzednim rozdziale opisaliśmy już *doświadczalne* metody, za pomocą których oznaczono prędkość dźwięku w powietrzu. Znając jednak sprężystość i gęstość tego gazu, możemy także na mocy powyżej wyłuszczonego prawa *teoretycznie obliczyć* rzeczoną prędkość. Newton, który pierwszy poznał właściwą naturę dźwięku, zrobił to obliczenie, otrzymał jednak przytem dla prędkości dźwięku w powietrzu przy 15° C. wartość—283 metrów na sekundę—o $^1/_6$ mniejszą od tej, którą dają bezpośrednie doświadczenia. Robiono tedy najrozmaitsze przypuszczenia czyli hypotezy co do przyczyny tej niezgodności teoryi z doświadczeniem. Sam Newton wyraził hypotezę, według której dźwięk potrzebuje pewnego czasu tylko na przeniesienie się od jednej cząstki powietrza do następnej, lecz nie wymaga żadnego czasu dla przejścia przez same te cząstki; przyjął on nadto, że tylko $^1/_6$ linii, po której przebiega dźwięk, zajęta jest przez cząstki powietrza i że resztę tej linii stanowią wolne przestrzenie międzycząstkowe. Jeżeli więc — rozumował on — dźwięk w ciągu 1 sekundy, jak to pokazują bezpośrednie doświadczenia, przebiega drogę 340 metrów, to ponieważ $^1/_6$ tej drogi, czyli w całych cyfrach 57 metrów zajęta jest przez cząstki powietrza, na przebycie których dźwięk nie potrzebuje żadnego czasu, przeto 1 sekundy użył on właściwie tylko na to, aby przejść przez wolne przestrzenie międzycząstkowe, czyli na przebycie drogi 283 metr. (340 mniej 57). W ten sposób starał się on pogodzić teoryę z doświadczeniem; genialna ta hypoteza upadła jednak, jako sprzeczna z pewnemi faktami. Usiłowano ją tedy zastąpić innemi hypotezami, lecz i te również chybiły celu i dopiero sławny matematyk francuzki Laplace zdołał wykryć właściwą przyczynę rzeczonej różnicy. Spróbujmy punkt ten, najtrudniejszy z całej teoryi dźwięku, nieco bliżej wyświetlić:

Za pomocą bardzo prostych doświadczeń, które później poznamy, można wykazać, że przy raptownem zgęszczeniu gazu wywiązuje się ciepło i że przeciwnie: przy rozrzedzeniu gazu ciepło zostaje pochłonięte; w pierwszym wypadku gaz się ogrzewa,

w drugim zaś—oziębia. Otóż gdy ciało dźwięczące oscyluje naprzód, popycha ono przed sobą cząstki otaczającego powietrza i zgęszcza najbliższą warstwę tegoż, z czego wynika, że sprężystość tej warstwy wzrasta: 1) wskutek zwiększenia jej gęstości i 2) wskutek ciepła, wywiązanego przy zgęszczeniu. Newton uwzględnił tylko zmianę sprężystości, wynikającą ze zmiany gęstości, zupełnie zaś przeoczył zwiększenie sprężystości wskutek działania ciepła, wywiązującego się przy zgęszczeniu. Jeżeli zaś wraz z Laplacem weźmiemy w rachubę obie zmiany sprężystości, wtedy prędkość dźwięku, obliczona na zasadzie teoryi, zupełnie się zgadza z prędkością, otrzymaną na drodze doświadczalnej.

Możemy tu jednak łatwo popaść w błąd, jeżeli nie zachowamy pewnych ostrożności. Umysł nasz musi przy badaniu przyrody ciągle mieć się na baczności, aby uwzględnić wszystkie warunki; w przeciwnym razie wkrótce przekonywamy się, że wnioski nasze nie zgadzają się z faktami. Należy dokładnie sobie uprzytomnić, że przyrost prędkości dźwięku, wywołany przez zmianę temperatury samej fali dźwiękowej, jest zupełnie różny od zwiększenia prędkości, które powstaje wskutek ogrzania całej masy powietrza. Przeciętna temperatura powietrza nie ulega żadnej zmianie wskutek samego rozchodzenia się w niem fal dźwiękowych: nie możemy bowiem wytworzyć zgęszczonej pół-fali bez odpowiadającej jej rozrzedzonej pół-fali, o ile zaś temperatura pierwszej się podnosi, o tyle też temperatura drugiej spada. Otóż przypuśćmy, że masa powietrza na pewnej przestrzeni składa się już z takich zgęszczonych i rozrzedzonych warstw o różnej temperaturze; jeżeli teraz przybywający z zewnątrz dźwięk przenosi się przez taką masę powietrza, to w zgęszczonych warstwach zostaje on o tyleż przyśpieszony, o ile w rozrzedzonych — zwolniony, przeciętna jego prędkość nie mogłaby tedy się zmienić wskutek takiego rozmieszczenia temperatur.

Jeżeli jednak tak jest, to zkądże pochodzi zaznaczony przez Laplace'a przyrost prędkości dźwięku? Prosimy usilnie czytelnika, aby ze skupioną uwagą śledził podane niżej wyjaśnienie tego zawiłego nieco punktu.

Gdy ściskamy powietrze, wtedy objętość jego się zmniejsza; przeciwnie przy zmniejszeniu zewnętrznego ciśnienia powietrze się rozszerza i powiększa swą objętość. Siła, która opiera się ciśnieniu i powoduje rozszerzenie, jestto siła sprężystości, albo krócej sprężystość powietrza. Tak tedy zewnętrzne ciśnienie stara się zbliżyć do siebie cząstki powietrza, ich własna zaś sprężystość usiłuje je oddalić od siebie i cząstki są w równowadze, gdy obie te przeciwdziałające sobie siły (zewnętrzne ciśnienie i sprężystość gazu) są równe. Wskutek tego zewnętrzne ciśnienie daje nam miarę sprężystości powietrza.

Niechaj teraz środkowy z trzech szeregów punktów, nakreślonych na figurze 178, przedstawia szereg cząstek powietrza od a do x, znajdujących się w równowadze. Jeżeli której-

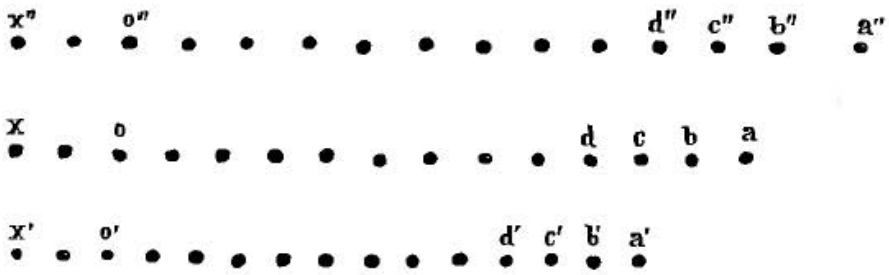


Fig. 178. Przenoszenie się zgęszczeń i rozrzedzeń fal dźwiękowych.

kolwiek z nich nadamy jakiś ruch, to przeniesie się on, wskutek sprężystości istniejącej pomiędzy cząstkami, na cały ich szereg. Przypuśćmy, że cząstka a została popchnięta przez ramię widełek strojowych w kierunku do x tak, że w końcu zajmie ona położenie a' w ostatnim szeregu punktów. Z chwilą rozpoczęcia oscylacyi przez cząstkę a, ruch jej zaczyna się przenosić na cząstkę b, ta w następnej chwili oddaje swój ruch c, c—d, d—e i t. d. tak, że w chwili, gdy cząstka a zajmie położenie a', ruch zostaje przeniesiony po linii cząstek aż do punktu o', mniej lub więcej oddalonego od a'. Cały szereg cząstek od a' do o' znajduje się wtedy w stanie zgęszczenia. Odległość a' o', na jaką przenosi się ruch w ciągu oscylowania cząstki a do położenia a', zależy od stopnia sprężystości, istniejącej między cząstkami. Zwróćmy naszą uwagę na dwie dowolne cząstki a i b. Możemy sobie elasty-

czność pomiędzy niemi przedstawić jako sprężynę i jasną jest rzeczą, że im słabsza jest ta sprężyna, tem wolniej przenosi się ruch od *a* do *b*, im zaś silniej jest naprężona, tem szybciej następuje przeniesienie ruchu. To samo stosuje się do każdej innej pary cząstek między *a* i *o*. Otóż rzeczona sprężyna zostaje silniej naprężana przez ciepło, wywiązujące się przy zgęszczeniu, albo, jeżeli odrzucimy porównanie, sprężystość powietrza zwiększa się wskutek ciepła, przez co wzrasta także prędkość rozprzestrzeniania się w niem zgęszczeń fal dźwiękowych. Zachodzi tu coś podobnego, jak gdyby w opisanym przedtem przykładzie z szeregiem chłopców, siła mięśni w ramieniu każdego z nich wzrastała wskutek tego, że oddaje on uderzenie swemu sąsiadowi i jak gdyby czyniło go to zdolniejszym do szybszego przenoszenia uderzenia. Zgęszczona część fali dźwiękowej przenosi się w opisany sposób—i jasną jest teraz dla nas rzeczą, że prędkość jej rozprzestrzeniania się zostaje powiększona wskutek ciepła, wywiązującego się przy zgęszczeniu.

Rozważmy teraz przenoszenie się rozrzedzonej części fali dźwiękowej. Niechaj znowu, jak poprzednio, środkowy szereg punktów *a x* przedstawia cząstki powietrza w stanie równowagi przy ciśnieniu 1 atmosfery. Przypuśćmy, że cząstka *a* nagle zostaje pociągnięta na prawo tak, że w końcu zajmuje ona położenie *a''* w górnym szeregu punktów; za *a''* podąża bezpośrednio *b*, za *b''*—*c*, za *c''*—*d* i t. d. tak, że w chwili, gdy cząstka *a* właśnie skończyła swą oscylacyę na prawo, rozrzedzenie przeniosło się wzdłuż linii *a'' x''* aż do punktu *o''*. Dlaczego cząstka *b* podąża za *a''*, gdy ta ostatnia zostaje od niej odciągnięta? Oczywiście dlatego, że siła sprężystości między *b* i *a''* jest słabsza, niż między *b* i *c*. W samej rzeczy: *b* zostaje pociągnięta za *a''* przez siłę, równą różnicy sprężystości między *a''* i *b* i między *b* i *c*. To samo stosuje się do ruchu cząstki *c* ku *b''*, *d* ku *c''* i w ogóle do ruchu każdej następnej cząstki, podążającej za swą prawą sąsiadką. Im większa jest różnica sprężystości po obu stronach każdej cząstki, tem prędzej podąża ona za swą poprzedniczką. Teraz pojmujemy, jak działa obniżanie się temperatury, zachodzące przy rozrzedzeniu: Do zmniejszenia

sprężystości między cząstką *a* i *b* wskutek odsunięcia się pierwszej na większą odległość przyłącza się jeszcze zmniejszenie sprężystości wskutek spadku temperatury. Ubytek ciepła powiększa różnicę sprężystości, na której to różnicy polega właśnie przenoszenie się rozrzedzeń.

Widzimy tedy, że z jednej strony ciepło, wytwarzające się przy zgęszczeniu powietrza powiększa prędkość rozprzestrzeniania się zgęszczeń fal dźwiękowych i że z drugiej strony ubytek ciepła, powstający przy rozrzedzeniu, powiększa prędkość rozchodzenia się rozrzedzeń fal dźwiękowych. I przeciętna więc prędkość całej fali dźwiękowej, składającej się ze zgęszczonej i rozrzedzonej warstwy powietrza, musi się zwiększyć wskutek wzrostu i ubytku ciepła, powstającego przy jej rozprzestrzenianiu się.

Przy teoretycznem więc obliczeniu prędkości dźwięku w powietrzu należy koniecznie uwzględnić zwiększenie tej prędkości, wynikające z powyżej wyłuszczonych przyczyn. Aby zobaczyć jak to się czyni, zboczmy na chwilę od naszego przedmiotu i podajmy już w tem miejscu niektóre określenia z zakresu ciepła, o których później obszerniej pomówimy: Ilość ciepła, potrzebną do ogrzania od 0^0 do 1^0 C. jednostki wagowej (kilograma lub grama) powietrza, znajdującego się w zamkniętem naczyniu— przyczem gaz nie może się rozszerzać — nazywamy *ciepłem właściwem powietrza przy stałej objętości.* Ilość zaś ciepła, potrzebną do ogrzania od 0^0 do 1^0 C. takiejże jednostki wagowej powietrza, mogącego się swobodnie rozszerzać,—przyczem ciśnienie jego się nie zmienia—nazywamy *ciepłem właściwem powietrza przy stałem ciśnieniu.* Ta ostatnia ilość jest większa od poprzedniej; stosunek ciepła właściwego powietrza przy stałem ciśnieniu do jego ciepła właściwego przy stałej objętości równa się 1,42. Otóż Laplace wykazał, że dla uwzględnienia wzrostu prędkości dźwięku wskutek zmian temperatury, jakie powstają przy zgęszczeniu i rozrzedzeniu, należy wartość, otrzymaną przez Newtona, pomnożyć przez pierwiastek kwadratowy z liczby 1,42, wyrażającej rzeczony stosunek: otrzymujemy wtedy dla prędkości dźwięku wartość taką samą, jaką dają bezpośrednie doświadczenia. Znając prędkość dźwięku w danym gazie, jego spręży-

stość i gęstość, możemy więc, na mocy powyższego, obliczyć stosunek jego ciepła właśc. przy stałem ciśnieniu do ciepła właśc. przy stałej objętości i naodwrót: znając ten ostatni stosunek oraz sprężystość i gęstość gazu, możemy z góry obliczyć, z jaką prędkością rozchodzi się w nim dźwięk. W ten sposób prawo Newtona, uzupełnione przez Laplace'a, ustala związek pomiędzy tak odmiennemi zjawiskami, jak przenoszenie się dźwięku i ogrzewanie się gazów.

Prędkość dźwięku w cieczach można obliczyć na podstawie powyżej wyłuszczonego prawa Newtona, bez uwzględnienia poprawki Laplace'a dlatego, że zmiany temperatury, spowodowane przez przenoszenie się fal dźwiękowych, są tu tak nieznaczne, iż wywierają nader mały wpływ na prędkość dźwięku. Wartości, obliczone według tego prawa dla prędkości dźwięku w wodzie, dobrze się zgadzają z rezultatami, otrzymanemi na drodze doświadczalnej przez Colladona i Sturma, o których mówiliśmy już w poprzednim rozdziale (patrz str. 240). I tu znowu, znając prędkość dźwięku w danej cieczy oraz jej gęstość, możemy jak wyżej, na zasadzie rzeczonego prawa, obliczyć jej sprężystość i naodwrót.

Ponieważ dla ciał stałych, podobnie jak i dla cieczy, stosunek sprężystości do ich gęstości jest większy, niż dla gazów, przeto dźwięk w tych pierwszych również prędzej się rozchodzi, niż w ostatnich, jak to potwierdzają także doświadczenia, omówione w poprzednim rozdziale (patrz str. 233).

§ 4. Natężenie dźwięku.

Zobaczmy teraz, od czego zależy natężenie czyli siła dźwięku. Działanie mechaniczne kuli, uderzającej o tarczę, zależy od dwóch warunków: od jej masy i od jej prędkości; jest ono, jak to się dowodzi w mechanice, wprost proporcyonalne do masy kuli i do *kwadratu* z jej prędkości; ta sama kula, poruszając się z 2, 3, 4 i t. d. razy większą prędkością, wywiera 4, 9, 16 i t. d. silniejszy skutek. Otóż to samo dotyczy cząstek powietrza, uderzających o błonę bębenkową ucha. Rozważmy taką cząstkę,

gdy przyjmuje udział w przenoszeniu dźwięku: porusza się ona naprzód z początku z wzrastającą, później zaś ze zmniejszającą się prędkością (patrz str. 260). Sile, popychającej ją naprzód, opiera się sprężystość powietrza, która w końcu zatrzymuje cząstkę i zmusza ją do cofnięcia się. W pewnym punkcie oscylacyi naprzód, mianowicie w połowie drogi (patrz str. 260) prędkość ta dosięga maximum. Otóż *natężenie dźwięku jest wprost*

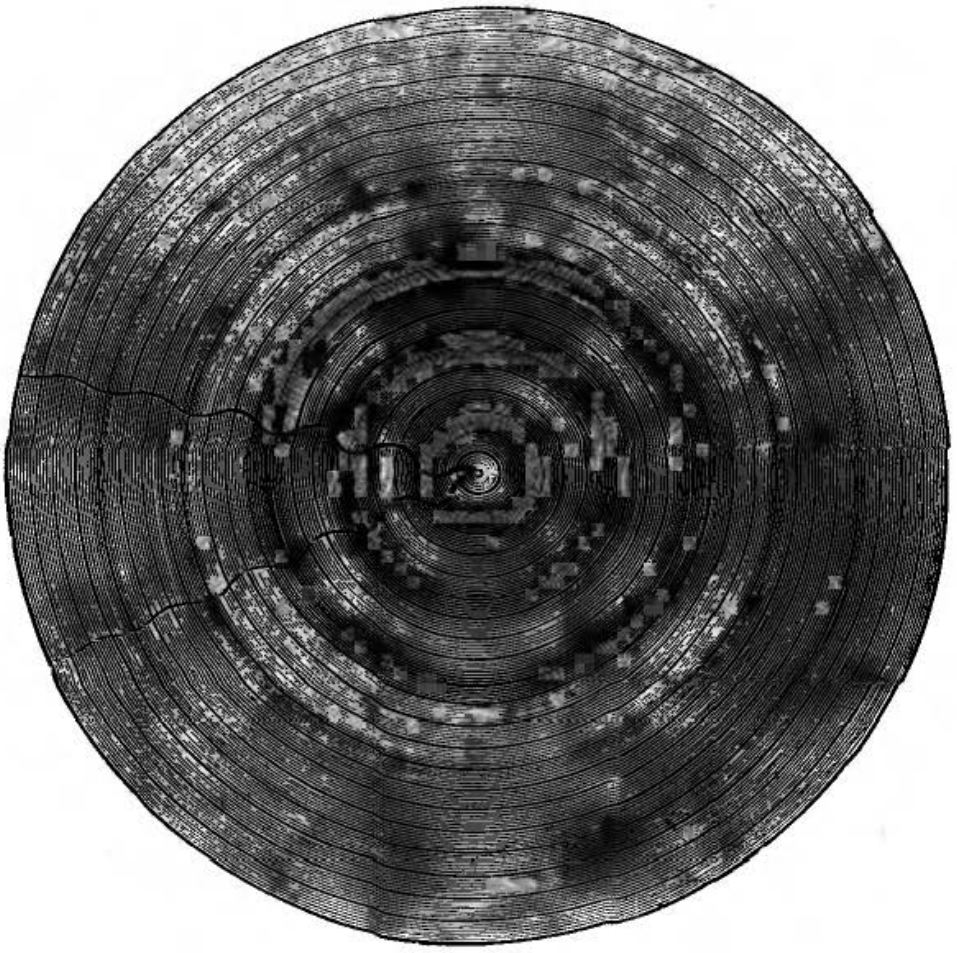


Fig. 179. Rozchodzenie się fal dźwiękowych w otwartem powietrzu.

proporcyonalne do kwadratu z tej maximalnej prędkości. Działanie dźwięku podlega temu samemu prawu, co i działanie mechaniczne wyrzuconej z lufy kuli.

Droga, jaką przebywa drgająca cząstka powietrza od jednego swego skrajnego położenia do drugiego, nazywa się, podobnie jak przy wahadle, amplitudą drgania. Otóż *natężenie*

dźwięku jest wprost proporcyonalne do kwadratu z amplitudy drgania; jest ono również wprost proporcyonalne do kwadratu z amplitudy drgania ciała dźwięczącego. Struna naprzykład, oscylująca z amplitudą 1 centymetra, usiłuje wywołać dźwięk 4 razy silniejszy od tego, jaki powstaje przy amplitudzie równej $^1/_2$ cent.

Zbadajmy obecnie związek, zachodzący pomiędzy natężeniem dźwięku a odległością od ciała dźwięczącego. W poprzednim §, dla ułatwienia sobie zadania, rozważyliśmy tylko szczegółowy i najprostszy wypadek rozprzestrzeniania się dźwięku, mianowicie w powietrzu, znajdującem się w walcowatej rurze (fig. 176). Zwykle zaś dźwięk rozchodzi się od ciała dźwięczącego na wszystkie strony w postaci współśrodkowych kulistych fal o coraz to większym promieniu, jak to pokazuje figura 179, na której miejsca cieniowane oznaczają zgęszczenia, inne zaś— rozrzedzenia powietrza. Jednakowo silne drgania ciała dźwięczącego udzielają się w ten sposób coraz to większym masom powietrza tak, że amplituda drgań—jak to pokazują zmniejszające się wygięcia falowych linij, nakreślonych na figurze — się zmniejsza, wskutek czego dźwięk musi oczywiście w miarę odległości stawać się coraz słabszym. Zakreślmy wokoło punktu wytwarzania dźwięku powierzchnię kulistą o promieniu równym 1 metrowi; otóż powierzchnia kulista o promieniu 2 metr. jest, jak to się dowodzi w geometryi, 4 razy większa, czyli że znajduje się na niej 4 razy więcej cząstek powietrza, niż na pierwszej; przy promieniu, równym 3, 4, 5 i t. d. metr. ilość takich cząstek jest 9, 16, 25 i t. d. razy większa. Ilość cząstek powietrza, wprawianych w ruch przez te same drgania ciała dźwięczącego, wzrasta tedy wprost proporcyonalnie do kwadratu z odległości od tego ostatniego; w tym samym stosunku zmniejsza się także natężenie dźwięku. Wyrażamy odnośne prawo mówiąc, że *natężenie dźwięku zmienia się odwrotnie proporcyonalnie do kwadratu z odległości od ciała dźwięczącego.* Zobaczymy w następnej księdze, że natężenie światła zmienia się według tego samego prawa.

Gdy dźwięk rozchodzi się nie w otwartem powietrzu, lecz w ograniczonej przestrzeni, wtedy przenosi się on na wielką odległość bez znacznego osłabienia, jak to naprzykład się dzieje,

gdy przesyłamy falę dźwiękową przez walcowatą rurę z gładką wewnętrzną powierzchnią. Znakomity uczony francuzki Biot obserwował rozprzestrzenianie się dźwięku w próżnych wodociągowych rurach miasta Paryża i przekonał się, że mógł przytłumionym głosem rozmawiać ze swym pomocnikiem przez żelazną rurę na 3000 metrów długą. Najcichszy szept był jeszcze wyraźnie słyszany na tej odległości, wstrząśnienie zaś, wynikające z wystrzału pistoletowego, danego na jednym końcu rury, gasiło palącą się świecę, umieszczoną na drugim jej końcu. Później Regnault wykonał szereg doświadczeń nad rozchodzeniem się dźwięku w walcowatych rurach, przyczem okazało się, że zarówno natężenie, jak i prędkość dźwięku zmniejszają się w miarę odległości od ciała dźwięczącego i to tem prędzej, im mniejsza jest średnica rury. Należy to przypisać, jak się zdaje, tarciu jednych warstw powietrza o inne i o ściany rury, jakoteż częściowemu pochłanianiu dźwięku przez te ściany.

Natężenie dźwięku zależy tylko od gęstości środka w punkcie wytwarzania dźwięku, nie zaś od gęstości środka w punkcie, w którym go słyszymy. Obserwator naprzykład, stojący na szczycie Mont-Blanc, słyszy wystrzał armatni w dolinie Chamouni; nie słyszałby go zaś, gdyby przeciwnie—z takiejż armaty strzelano na szczycie góry, a on sam znajdował się w rzeczonej dolinie. W tej ostatniej powietrze jest prawie 2 razy gęstsze, niż na szczycie Mont-Blanc. W ogóle natężenie dźwięku wzrasta wraz z gęstością środka w miejscu wytwarzania dźwięku. Jeżeli naprzykład z pod klosza maszyny pneumatycznej, pod którym znajduje się mechanizm zegarowy patrz doświadczenie, przedstawione na figurze 157—wypompujemy powietrze i zastąpimy je wodorem o takiem samem ciśnieniu, wtedy słabiej będziemy słyszeli dźwięk. Przeciwnie, przy zastąpieniu powietrza gęstszym odeń kwasem węglanym o takiem samem ciśnieniu, dźwięk donośniej będzie się rozlegał. We wszystkich jednak 3-ch wypadkach środek (powietrze), otaczający nasze ucho, posiada tę samą gęstość.

ROZDZIAŁ III.

Tony.

§ 1. Wysokość tonu. Granice słuchu. Długość fal dźwiękowych. Zasada Doepplera.

Ze wszystkich dźwięków najważniejszemi są dla nas *tony*, któremi też odtąd głównie w tej księdze zajmować się będziemy. Trudno powiedzieć, czem się różni wrażenie tonu od wrażenia każdego innego dźwięku; wszyscy jednak dobrze znamy z doświadczenia tę różnicę: Wstrząśnijmy naprzykład pudełkiem, w którem znajdują się gwoździe, młotek, piły i tym podobne przedmioty, a usłyszymy *hałas* (1); pociągnijmy natomiast smyczkiem wyprężoną strunę, a otrzymamy *ton*. Co się tyczy fizycznej różnicy pomiędzy temi zjawiskami, to hałas powstaje wskutek nierównych i nieregularnych drgań, podczas gdy ton zostaje wywołany przez drgania prawidłowe, dostatecznie szybkie i następujące po sobie w równych odstępach czasu.

Dlaczegóż jednak nie słyszymy oddzielnych drgań ciała dźwięczącego? Pochodzi to wskutek znanej nam już właściwości ucha, które zachowuje przez pewien czas doznane wrażenie. Przedstawmy sobie szereg uderzeń o błonę bębenkową, następujących *po sobie w równych odstępach czasu; błona przy każdem* uderzeniu ulega wstrząśnieniu, które ostatecznie przenosi na nerw słuchowy. Ruch ten ustaje wprawdzie bardzo prędko, lecz nie natychmiastowo; w razie więc, gdy ruch, nadany nerwowi słuchowemu przez pojedyńcze uderzenie, trwa aż do nastąpienia nowego uderzenia, to wrażenie dźwięku wcale nie ustaje i oddzielne impulsy zlewają się w jeden ciągły ton. Dla powstania muzykalnego tonu koniecznie potrzeba, ażeby fale dźwiękowe następowały po sobie w równych odstępach czasu, przyczem obojętną jest rzeczą, z jakiego źródła one pochodzą; jeżeli tylko powyższy warunek jest spełniony, to otrzymujemy muzykalny ton.

---

(1) Każdy dźwięk, wyjąwszy ton, nazywamy hałasem.

Gdybyśmy np. powiększyli liczbę uderzeń zegarka aż do 100 na sekundę, to utraciłyby one dla nas swą indywidualność i zlałyby się w jeden muzykalny ton; albo gdyby uderzenia skrzydeł gołębia zachodziły z rzeczoną prędkością, to lot tego ptaka przez powietrze byłby połączony z muzyką i t. d.

Tony różnią się pomiędzy sobą pewnemi cechami, z których najważniejsza, tak pod względem fizycznym jak i muzykalnym, jest *wysokość tonu*. Zobaczymy wkrótce, od czego zależy ta ostatnia; jak zaś tony rozmaitej wysokości różnią się dla naszego ucha, tego tak samo niepodobna opisać słowami, jak naprzykład różnicę pomiędzy barwą czerwoną a zieloną. Drugą cechą, odróżniającą tony, jest ich *natężenie* czyli siła; jeden i ten sam ton może brzmieć silniej lub słabiej, nie zmieniając przytem swej wysokości; natężenie tonu (jak każdego w ogóle dźwięku) zależy tylko od amplitudy drgań, jest ono, jak widzieliśmy w końcu poprzedniego rozdziału, wprost proporcyonalne do kwadratu z tej amplitudy. Nareszcie tony różnią się jeszcze pomiędzy sobą *kolorytem* czyli *brzmieniem* (timbre): jeden i sam ton może być wydawany jednakowo silnie przez klarnet, skrzypce lub głos ludzki, a jednak w każdym z tych wypadków brzmi on inaczej dla ucha które łatwo może odróżnić, od jakiego instrumentu pochodzi dany ton.

Przyczynę rozmaitego brzmienia jednego i tego samego tonu, wydawanego przez różne instrumenty muzyczne, będziemy mogli wykazać dopiero później; o natężeniu tonu obszernie już mówiliśmy w końcu poprzedniego rozdziału, tutaj więc pozostaje nam jeszcze głębiej rozważyć pytanie, od czego zależy wysokość tonu. Bardzo proste doświadczenia odpowiedzą nam na to pytanie.

Galileusz wytwarzał muzykalny ton przez przesuwanie noża wokoło brzegów starego piastra: drobne zazębienia monety wprawiały nóż w dostatecznie szybkie i regularne drgania. Zauważył on przytem, że moneta o licznych zazębieniach wydaje ton wyższy, niż o małej liczbie zazębień, z czego wyprowadził wniosek, że wysokość tonu zależy od szybkości uderzeń. Daleko łatwiej wytwarzamy ton przez uderzenia, gdy stykamy brzeg

karty z obracającem się szybko kołem zębatem. Doświadczenie takie po raz pierwszy wykonane zostało przez sławnego współcześnika Newtona—Roberta Hooka, w nowszych zaś czasach Savart użył tego sposobu do oznaczania ilości drgań w ciągu 1 sekundy, czyli *częstości drgań*, odpowiadających tonowi pewnej wysokości. Rzeczone doświadczenie w nieco uproszczonej formie możemy powtórzyć za pomocą przyrządu, zwanego *gyroskopem*. Zasadniczą jego część stanowi ciężki mosiężny pierścień *d*, otaczający krążek, osadzony na poziomo umieszczonej stalowej osi (fig. 180). Jeżeli wokoło tej ostatniej okręcimy grubą nitkę, a następnie silnie ją wyciągniemy, jak to się robi przy puszczaniu bąka, to pierścień, a wraz z nim małe koło zębate *w* zostają wprawione w szybki ruch obrotowy. Dotykając zębów tego koła brzegiem karty, otrzymujemy bardzo wysoki ton, który z biegiem czasu staje się jednak coraz niższy, a to w miarę zmniejszania prędkości obrotu koła zębatego; w końcu zaś, przy bardzo wolnem obracaniu się koła, słyszymy już oddzielne uderzenia jego zębów o kartę. Proste to doświadczenie pokazuje nam, że *wysokość tonu zależy od szybkości, z jaką następują po sobie drgania*; im częściej zęby koła uderzają o przyciskaną do nich kartę, tem wyższy jest ton i naodwrót.

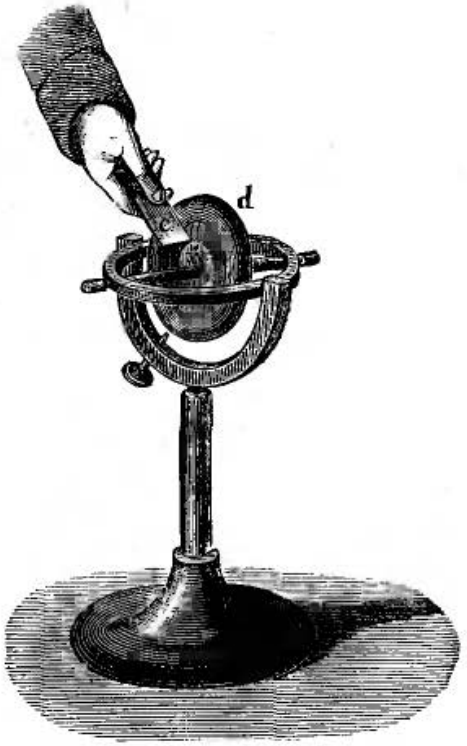


Fig. 180. Wytwarzanie tonu za pomocą gyroskopu.

Ton powstaje także wskutek szybkich zgęszczeń powietrza, następujących po sobie w równych odstępach czasu, jak to pierwszy wykazał Robison, używszy do tego celu pierwotnej formy przyrządu, który wkrótce bliżej poznamy pod nazwą *syreny*. Powtórzmy odnośne doświadczenie w nieco zmienionej formie, nadanej mu przez Seebecka (fig. 181). Krążek tektu-

rowy lub metalowy *A B*, opatrzony wokoło szeregiem jednakowo odległych otworów, jest połączony sznurem *o r* z maszyną odśrodkową, za pomocą której możemy go wprawić w mniej lub więcej szybki ruch obrotowy. Po nad krążkiem znajduje się rurka szklana *m*, komunikująca z miechem (na rysunku niewidocznym). Figura przedstawia krążek w stanie spoczynku, dolny otwór rurki *m* znajduje się w tej chwili nad jednym z jego otworów; gdy więc naciśniemy miech, prąd powietrza przejdzie przez rurkę *m* i znajdujący się pod nią w danej chwili otwór krążka, przy nieznacznem zaś obróceniu tego ostatniego, nieprzedziurawiona jego część znajdzie się pod rurką i prąd powietrza zostanie przerwany. Wskutek jednostajnego obracania się krążka, otwory kolejno i w równych odstępach czasu podchodzą pod rurkę, za każdym też razem przez odnośny otwór przepływa prąd powietrza. W ten sposób otaczające powietrze zostaje wprawione w równomierne drgania, które, w razie dostatecznej szybkości obrotu krążka, jednoczą się w muzykalny ton. Otóż łatwo się przekonać, że wysokość tego tonu wzrasta wraz z szybkością obrotu krążka, a więc *wzrasta z liczbą drgań w ciągu sekundy czyli wraz z częstością drgań.* Możemy nawet łatwo obliczyć ilość drgań, odpowiadającą danemu tonowi: niechaj naprzykład krążek posiada 20 otworów i niechaj czyni 15 obrotów na sekundę; wtedy prąd powietrza 300 razy w ciągu sekundy przepływa przez otwory i tyleż razy zostaje przerwany; powstającemu przy tem tonowi odpowiada więc 300 drgań na sekundę.

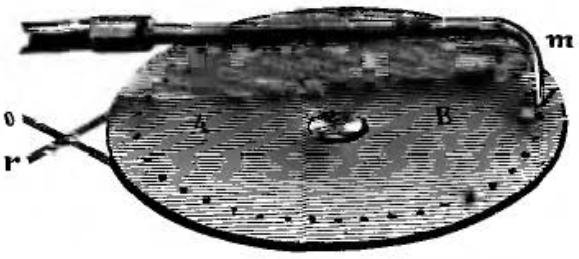


Fig. 181. Wytwarzanie tonu za pomocą równomiernie przerywanego prądu powietrza.

Gdybyśmy, zamiast jednej, wzięli kilka rurek tak, aby koniec każdej z nich przypadał po nad jednym z otworów spoczywającego krążka, wtedy wysokość tonu, przy jednakowej prędkości obrotu od tego by się nie zmieniła; natężenie natomiast tego tonu wskutek jednoczesnego działania kilku prądów, znacznie by wzrosło. Powiększenie liczby rurek wzmacnia więc

tylko odnośny ton, nie zmieniając jego wysokości. Takie wzmocnione tony wydaje syrena Seebecka (fig. 182), składająca się z krążka, opatrzonego kilkoma współśrodkowemi szeregami otworów i wprawianego w jednostajny ruch obrotowy za pomocą odpowiedniego mechanizmu. Przed krążkiem umieszczone są liczne rurki, których końce dowolnie mogą być skierowywane na otwory któregobądź z szeregów, albo też zupełnie odsunięte (w tym ostatnim wypadku znajdują się naprzykład dwie dolne

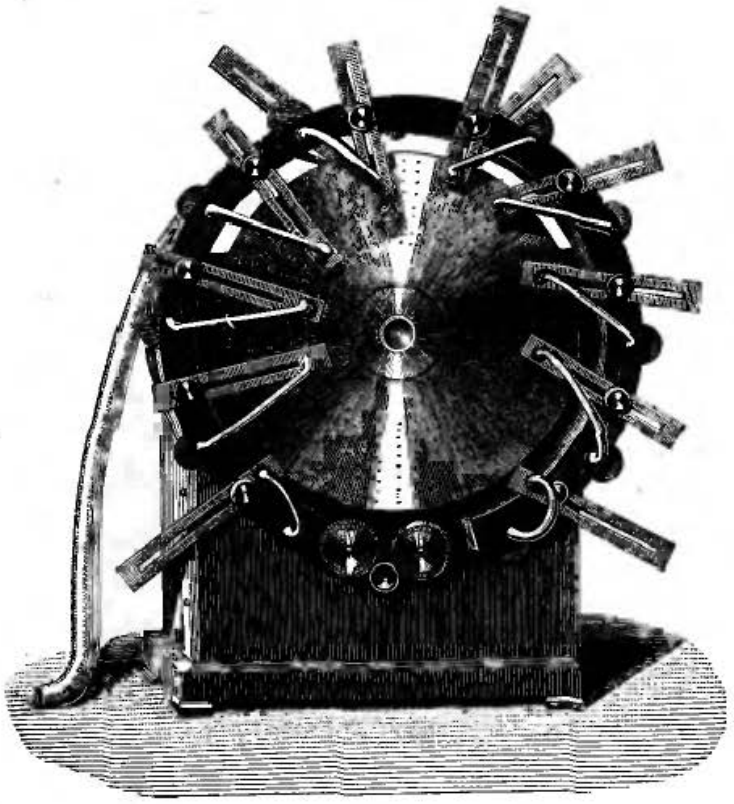
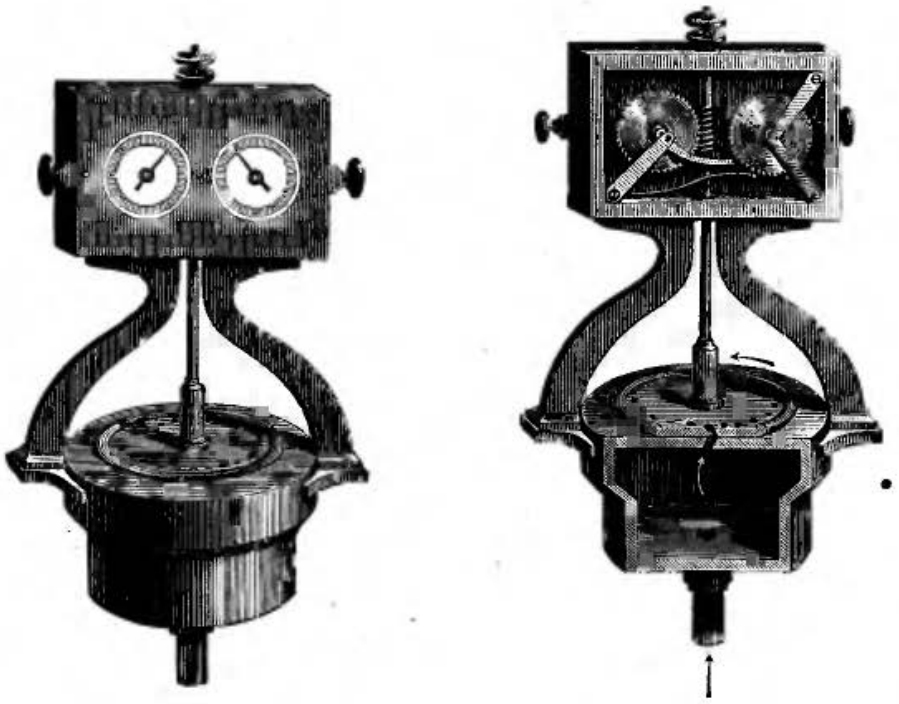


Fig. 182. Syrena Seebecka.

rurki, jedna po prawej, druga—po lewej stronie figury). Wszystkie te rurki komunikują z jedną wspólną szeroką rurą, połączoną ze skrzynią miechów organowych, które dozwalają przesyłać silny prąd powietrza jednocześnie przez wszystkie szeregi otworów obracającego się krążka. *W ten sposób otrzymujemy* jednocześnie kilka tonów i oczywistą jest rzeczą, że odpowiadające im częstości drgań są do siebie w tym samym stosunku, co i liczby otworów w odnośnych szeregach. Za pomocą tej syreny

możemy, pomiędzy innemi, wytwarzać różne akordy i dowolnie zmieniać natężenie każdego z ich składowych tonów, a to przez skierowywanie większej lub mniejszej liczby rurek na odnośny szereg otworów.

Najodpowiedniejszym przyrządem do obliczania częstości drgań różnych tonów jest syrena Cagnard-Latour'a (fig. 183 i 184). Składa się ona z walcowatego pudła, komunikującego



Figury 183 i 184. Syrena Cagnard—Latour'a: wygląd zewnętrzny (183) i przekrój pionowy (184).

za pomocą rury ze skrzynią miechów organowych i którego pokrywa opatrzona jest ukośnie wyciętemi i jednakowo odległemi od siebie otworami, na okręgu koła. Bezpośrednio nad tą pokrywą znajduje się ruchomy krążek z taką samą liczbą otworów, wyciętych również ukośnie, lecz w kierunku przeciwnym kierunkowi otworów pokrywy tak, jak to pokazuje fig. 185. Wskutek takiego urządzenia powietrze, wpędzone za pomocą miechów do pudła, wychodząc przez otwory pokrywy, uderza o ściany otworów krążka i wprawia go w ruch obrotowy, tem szybszy, im silniejszy

Fig. 185. Układ otworów w syrenie Cagnard—Latour'a.

jest prąd powietrza. Strzałki na fig. 184 pokazują kierunek prądu powietrza i obrotu krążka. Powietrze wychodzi swobodnie z pudła na zewnątrz za każdym razem, gdy otwory obracającego się krążka znajdują się ponad otworami pokrywy, zostaje zaś wstrzymane, gdy nad temi ostatniemi otworami znajdują się nieprzedziurawione części krążka. Przy każdym więc obrocie krążka powietrze doznaje tylu uderzeń, ile posiada on otworów; uderzenia te rozprzestrzeniają się w postaci fal dźwiękowych, wywołujących ton, którego wysokość pozostaje stałą, jeżeli prędkość obrotu się nie zmienia. Aby można było liczyć ilość obrotów w danym czasie, krążek osadzony jest na pionowej osi, opatrzonej w górnej części kilkoma skrętami śrubowemi (fig. 184), które zahaczają o zęby małego koła i posuwają je przy każdym obrocie krążka o jeden ząb; do koła tego stale przymocowana

Fig. 186. Graficzna metoda oznaczania liczby drgań.

jest wskazówka, posuwająca się po cyferblacie, podzielonym na tyleż części, ile koło ma zębów. Koło to za pomocą bocznego pręcika zahacza o zęby drugiego koła, połączonego ze wskazówką i posuwa je przy każdym swym obrocie również o jeden ząb. Jeżeli więc pierwsze koło posiada naprzykład 100 zębów, to wskazówka drugiego koła zaznacza na odnośnym cyferblacie setki obrotów krążka. Za pomocą sprężyn, umieszczonych z obu stron przyrządu, można dowoli oba koła zębate odsuwać od osi, albo też zbliżać do niej.

Przypuśćmy, iż za pomocą opisanego przyrządu mamy oznaczyć częstość drgań, odpowiadającą tonowi, wytwarzanemu przez dane widełki strojowe; niechaj przytem krążek syreny posiada 16 otworów, koło zaś, którego wskazówka notuje obroty krążka—

100 zębów. Wdymamy powietrze do pudła i jednocześnie pociągamy smyczkiem o widełki; w tej chwili koła zębate są jeszcze odsunięte od osi. Oba przyrządy dźwięczą razem, widełki wydają ton wyższy; w miarę jednak silniejszego wdymania powietrza i zwiększania prędkości obrotu krążka syreny, wysokość tonu tej ostatniej ciągle wzrasta, aż wreszcie brzmi ona w *unisono* z widełkami. Gdy to nastąpiło, przysuwamy przez naciśnięcie sprężyn koła zębate do osi, notujemy położenie wskazó-

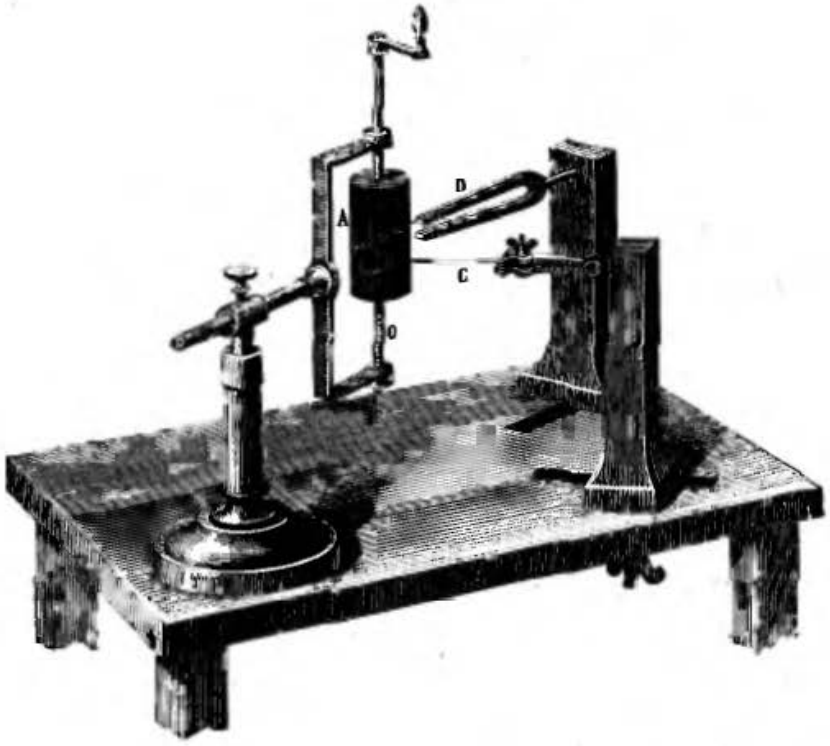


Fig. 187. Wibroskop Duhamela.

wek oraz czas i pozwalamy tonowi syreny rozbrzmiewać przez kilka minut, dajmy na to przez 3 minuty, naciskając przytem równomiernie miechy tak, aby nie zmienić wysokości tonu, nareszcie po upływie rzeczonego czasu odsuwamy znowu koła od osi. Przypuśćmy, że wskazówka pierwszego koła przesunęła się o 30 podziałek, drugiego zaś—o 36; znaczy to, że krążek zrobił przez ten czas 3630 obrotów, a że przy każdym obrocie powstaje 16 fal dźwiękowych, mnożąc tedy 3630 przez 16, otrzymamy *liczbę drgań widełek w ciągu 3 minut*—58080, czyli w ciągu 1

sekundy 363 drgań. W podobny sposób możemy także oznaczyć częstość drgań jakiegokolwiek ciała dźwięczącego: wyprężonej struny, piszczałki organowej i t. d. Za pomocą którejkolwiek z opisanych syren możemy się przekonać, że ton, który rozróżniamy w muzyce jako *oktawę* innego tonu, powstaje przy liczbie drgań 2 razy większej, niż ten ostatni; w podobny sposób *kwintę* otrzymujemy przy $1^1/_2$ razy większej częstości drgań i t. d. O stosunkach tych obszerniej pomówimy w końcu niniejszego rozdziału.

Syrena zawdzięcza swą nazwę temu, że wydaje także ton będąc zanurzona w wodzie, a mianowicie gdy za pomocą silnego ciśnienia przepychamy tę ciecz przez otwory krążka. Ton jej przytem jest nadzwyczaj wysoki dlatego, że ciężka i silnie naciskana woda wprawia krążek w nader szybki ruch obrotowy; zwalniając lub przyśpieszając przepływ cieczy, zwiększamy lub zmniejszamy wysokość wydawanego przez syrenę tonu.

Fig. 188. Linie falowe, nakreślone przez drgające widełki strojowe.

W niektórych razach możemy tak urządzić, że ciało dźwięczące samo zapisuje swe drgania. Jeżeli naprzykład do jednego ramienia widełek przytwierdzimy lekki zaostrzony pręcik i, wprawiwszy je w drgania, będziemy trzymali ponad zakopconym papierem, to pręcik będzie kreślił wciąż tę samą linię w razie, gdy papier pozostaje na miejscu, jeżeli go natomiast będziemy równomiernie wysuwali z pod widełek, to otrzymamy falową linię (fig. 186, str. 280), której każde dwa wygięcia, czyli cała fala, odpowiadają jednemu całkowitemu drganiu widełek. Na tej zasadzie polega *wibroskop* Duhamel'a. Przyrząd ten (fig. 187, str. 281) składa się z pionowo ustawionego walca *A*, pokrytego zakopconym papierem i osadzonego na śrubowej osi *o* tak, że przy każdym obrocie walec jednocześnie się nieco obniża. Ostrze drgających widełek kreśli na papierze linię falową odnośnego tonu; jeżeli więc stosowny aparat zegarowy zaznaczy jeszcze na tej linii początek i koniec każdej sekundy, to liczba fal, zawartych pomiędzy dwoma następującemi po sobie znaczkami, da nam licz-

bę drgań widełek na sekundę. Figura 188 (str. 282) pokazuje takie falowe linie, jak one się przedstawiają na papierze, po zdjęciu go z walca. Powyższa metoda może także być zastosowana do ciał drgających, posiadających rozmaite inne formy, jak sztaby, błony i t. d. Później poznamy inną jeszcze, optyczną metodę badania drgań dźwiękowych.

Nie każdą liczbę drgań ucho ludzkie odróżnia jako ton. Słuch nasz w samej rzeczy posiada dwie granice, po za któremi nie odczuwamy już muzykalnych tonów. Savart oznaczył najniższą granicę dla słuchu ludzkiego, jako równą 8 drganiom na sekundę; aby jednak tak powolne oscylacye zlać w jeden ton, musiał on użyć bardzo silnych uderzeń; według tegoż uczonego, najwyższą granicę dla słuchu stanowi 24000 drgań na sekundę, którą to liczbę oznaczył on za pomocą koła zębatego i odpowiedniego aparatu zegarowego. Dokładniejsze jednak poszukiwania Helmholtza, wykonane w nowszych czasach, pokazały, że pierwsza granica leży przy 16, druga zaś przy 38000 drganiach na sekundę. Granice te nie mogą zresztą być ściśle określone dlatego, że zdolność słyszenia różnych tonów jest niejednakową u różnych ludzi. Nic zabawniejszego, powiada John Herschel, jak gdy z 2-ch osób, cieszących się zkądinąd dobrym słuchem, jedna skarży się na świszczący ton małej fujarki, podczas gdy druga utrzymuje, iż fujarka ta wcale nie wydaje żadnego tonu. Tyndall podczas jednej wycieczki w Alpach Berneńskich rozkoszował się ćwierkaniem owadów, gdy przyjaciel jego nic z tego wszystkiego nie słyszał. Weźmy za punkt wyjścia ton o 16 drganiach, pomnóżmy tę liczbę przez 2, otrzymany iloczyn znowu przez 2 i t. d. 11 razy, a znajdziemy, że otrzymana w końcu liczba 32768 drgań odpowiada 11-ej oktawie zasadniczego tonu (o 16 drganiach). Jeżeli więc przyjmiemy podane przez Helmholtza granice, to słuch ludzki obejmuje mniej więcej 11 oktaw. Nie wszystkie jednak tony, leżące pomiędzy temi granicami, używane są w muzyce; częstość drgań zwykłych muzykalnych tonów leży pomiędzy 40 a 4000 na sekundę, co w okrągłych cyfrach wynosi 7 oktaw.

Światło, podobnie jak dźwięk, polega także na drganiach pewnego nader sprężystego środka—eteru; różne barwy, tak samo jak tony różnej wysokości, zostają wytworzone przez rozmaitą częstość drgań. Barwy świetlne następują po sobie w takiej kolei: czerwona, pomarańczowa, żółta, zielona, niebieska, indygo i fioletowa; najmniejsza częstość drgań odpowiada czerwieni, największa zaś—fioletowi. Otóż ucho o wiele przewyższa oko pod względem rozległości skali odczuwanych wrażeń: Podczas gdy pierwsze obejmuje 11 oktaw, drugie natomiast obejmuje zaledwie więcej niż jednę, najszybsze bowiem drgania (skrajnego fioletu), odczuwane przez oko jako światło, mają tylko około 2 razy większą prędkość, niż najpowolniejsze (skrajnej czerwieni); najszybsze zaś drgania, rozróżniane przez ucho jako muzykalny ton, następują po sobie przeszło 2000 razy prędzej, niż najpowolniejsze.

Znając częstość drgań, odpowiadającą pewnemu tonowi, możemy łatwo znaleźć odnośną długość fali w danym środku. W podanym poprzednio przykładzie widełki strojowe drgają 363 razy na sekundę; ponieważ podczas jednej całkowitej oscylacyi dźwięk przenosi się na długość jednej fali (patrz str. 259), to w ciągu 1 sekundy przeniesie się on na 363 fal, a że w tymże czasie dźwięk w powietrzu o zwykłej temperaturze (15° C.) przebywa drogę 340 metr., na tej więc przestrzeni rozmieści się 363 fal, czyli że długość 1 fali równa się $^{340}/_{363}$, t. j. prawie 1 metrowi. W wodorze przy 0°, w którym dźwięk rozprzestrzenia się z prędkością 1270 metr. na sekundę (patrz str. 241), długość fali, odpowiadająca rzeczonemu tonowi, równałaby się $^{1270}/_{363}$, czyli $3\frac{1}{2}$ metr. i t. d. W ogóle *długość fali, odpowiadająca pewnemu tonowi w danym środku, równa się prędkości dźwięku w tym środku, podzielonej przez odnośną częstość drgań;* z tego zaś wynika, że *częstość drgań równa się prędkości dźwięku, podzielonej przez długość 1 fali*, oraz że *prędkość dźwięku równa się iloczynowi z częstości drgań przez długość 1 fali.*

Wysokość tonu zależy jedynie od ilości fal dźwiękowych, wpadających do ucha w ciągu danego czasu; im większa jest ona, tem wyższy jest ton, im mniejsza—tem niższy. Zazwyczaj liczba

fal jest ta sama, co i częstość drgań ciała dźwięczącego, niekiedy jednak słyszymy przy jednakowej liczbie drgań ton wyższy albo niższy, zależnie od tego, czy źródło dźwięku zbliża się do nas, czy też oddala, albo też czy my zbliżamy się lub oddalamy od ciała dźwięczącego. Przykład lepiej nam pomoże zrozumieć tę zasadę, wygłoszoną po raz pierwszy przez Doepplera w r. 1842. Przypuśćmy, że widz jakiś stoi przed posągiem Kopernika na Nowym Świecie w Warszawie i że regularnie co 5 minut wychodzi tramwaj ze stacyi przy placu Trzech Krzyży na plac Zygmunta; wtedy w ciągu 1 godziny przejdzie przed tym widzem 12 tramwajów. Jeżeli zaś będzie on szedł w stronę rzeczonej stacyi, to w ciągu godziny przejdzie koło niego więcej, niż 12 tramwajów; (to samo miałoby miejsce, gdyby widz stał na miejscu, a stacya mogła się zbliżać do niego), przeciwnie, gdy będzie on szedł w stronę placu Zygmunta, w ciągu godziny minie go mniej niż 12 tramwajów (to samo nastąpiłoby, gdyby stacya tramwajów mogła się oddalać od stojącego na miejscu widza). Otóż podobnie się rzecz także ma z dźwiękiem: gdy ciało dźwięczące zbliża się do obserwatora, albo ten ostatni do źródła dźwięku, wtedy przy jednakowej częstości drgań, ucha jego dochodzi większa liczba fal, a więc słyszy on ton wyższy, niż wtedy, gdy ciało dźwięczące i słuchacz znajdują się we względnym spoczynku. Przeciwnie, gdy źródło dźwięku oddala się od obserwatora, albo ostatni od tego ciała, wtedy przy jednakowej częstości drgań, o ucho jego uderza mniejsza liczba fal tak, że słyszy on niższy ton, niż w razie spoczynku ciała dźwięczącego i słuchacza. W samej rzeczy, gdy w pobliżu osoby, stojącej na stacyi, przebiega gwiżdżąca lokomotywa, to przy zbliżaniu się ostatniej, osoba ta słyszy wyraźnie, jak ton świstawki staje się coraz wyższy i jak przy oddalaniu się lokomotywy ton ten ciągle się obniża. Doświadczenia, wykonane w tym względzie przez Buys-Ballota na drodze żelaznej Utrecht-Maarsen, później zaś przez Scotta-Russel'a na drogach żelaznych w Anglii, zupełnie stwierdziły słuszność zasady Doepplera.

Ta sama zasada stosuje się także, jak to później zobaczymy, do światła: barwa światła, wysyłanego przez jakąś

gwiazdę, przesuwa się w stronę czerwieni albo fioletu, gdy gwiazda ta oddala się od nas albo zbliża.

§ 2. Drgania strun. Węzły i pętlice. Tony harmoniczne.

Przypatrując się skrzypcom, widzimy na nich 4 struny rozmaitej grubości i z różnego materyału, z jednej strony stale przymocowane do deki skrzypiec, z drugiej zaś okręcone wokoło kołków, za pomocą których możemy struny mniej lub więcej naprężać. Struny te, stale podparte w dwu punktach tak, iż posiadają jednakową długość, przeciągnięte są nad podstawką, przytwierdzoną do pudła, mającego w dwóch miejscach otwory w kształcie znaku *f i* wydają tony, których wysokości znajdują się do siebie w pewnym określonym stosunku. Gdy stosunek ten jest naruszony, albo innemi słowy gdy skrzypce są odstrojone, możemy go znowu przywrócić, zakręcając odpowiedni kołek w jednę lub drugą stronę; zależnie od kierunku zakrętu, odnośna struna zostaje silniej albo słabiej naprężona i daje ton wyższy albo niższy. Ponieważ jednak 4 tony nie wystarczają do wykonywania utworów muzycznych, gracz więc może jeszcze dowolnie zwiększyć liczbę tonów, skracając długość brzmiących strun przez naciskanie ich w odpowiedniem miejscu palcami lewej ręki.

Z pobieżnej tej obserwacyi znanych wszystkim skrzypców, które wybraliśmy jako przykład instrumentu muzycznego strunowego, łatwo już domyśleć się można, że zachodzi pewien związek pomiędzy wysokością tonów z jednej, a długością, grubością, naprężeniem i materyałem strun z drugiej strony. Ponieważ zaś wysokość tonów zależy, jak już wiemy, od częstości drgań, przeto i ta ostatnia musi pozostawać w pewnym związku z rzeczonemi cechami strun. Najważniejsze z praw, dotyczących tej zależności, znane już były w ogólnych zarysach starożytnym filozofom, zwłaszcza pytagorejczykom; prawa te zostały jednak ustalone na drodze doświadczalnej dopiero w roku 1630 przez Mersenne'a. Teoretyczną zaś stronę tej kwestyi rozwinęli: Taylor, Jan i Daniel Bernoulli, d'Alembert, Euler, zwłaszcza zaś slawny matematyk francuzki Lagrange.

Zanim jednak przejdziemy do rozważenia tych praw, musimy sobie zadać pytanie, dlaczego wyprężone struny należy umieszczać nad pudłem z otworami, aby otrzymać muzykalny ton. Dzieje się to dlatego, że drgania samej wyprężonej struny nie wystarczają do wytworzenia tonu, jak tego dowodzi następujące doświadczenie: Na żelaznej podpórce C spoczywa drewniany kloc $A\ B$, od obu końców którego zwieszają się sznury, zakończone pętlicami; przez te ostatnie przesunięta jest sztaba żelazna $m\ n$, do środka której przywiązany jest stalowy drut $s\ s'$, wyprężony przez ciężar W, uczepiony do dolnego jego końca (fig. 189). W ten sposób drut jest oddzielony od wszelkich sprężystych ciał o większej powierzchni, którym mógłby udzielać swe drgania. Otóż gdy zarwiemy palcem tak zawieszony drut, wtedy doskonale widzieć będziemy jego drgania, nie usłyszymy jednak żadnego tonu. Rozmiary ciała drgającego są w tym wypadku tak małe, że za każdym jego ruchem otaczające powietrze opływa tylko naokoło niego, następuje tylko miejscowy przypływ i odpływ powietrza, dalej zaś leżące powietrze pozostaje w spoczynku. Jeżeli natomiast ten sam drut, wyprężony przez taki sam ciężar, naciągniemy nad podstawkami, opartemi na dece skrzypiec, albo poniżej opisanego przyrządu—monochordu, drut za każdem drgnięciem nadaje impuls dece, która przytem cokolwiek się ugina, wprawiając przez to w drgania całe pudło oraz zawarte w niem powietrze. Jak-

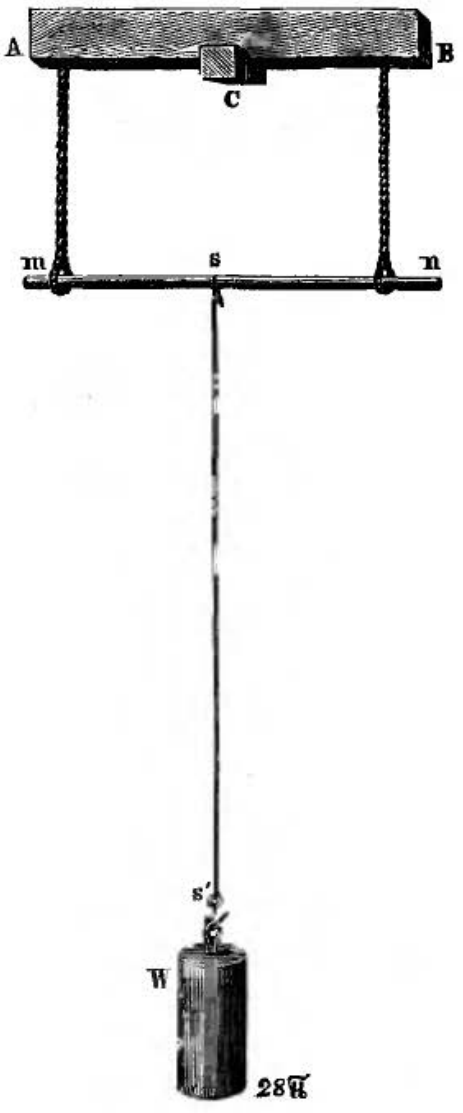


Fig. 189. Drgania samej tylko struny nie wystarczają do wytworzenia tonu.

kolwiek amplituda drgań takich pudeł jest bardzo niewielka, to jednak wskutek szerokości ich dek, otaczające powietrze nie może już opływać naokoło nich, lecz ulega zgęszczeniom i rozrzedzeniom, tworząc wyraźny układ fal dźwiękowych i powstaje dosyć silny ton. To samo dotyczy drgania wszelkich innych ciał o małych rozmiarach: gdy są one odosobnione, wtedy nie wydają wyraźnego tonu, czynią to zaś natychmiast, gdy opieramy je o duże powierzchnie ciał sprężystych, naprzykład o stół lub drzwi, albo jeszcze lepiej o t. zw. pudło rezonansowe (przedziurawione pudło odpowiednich rozmiarów, wzmacniające ton ciała drgającego). Przy poszukiwaniu praw, według jakich zachodzą drgania strun,

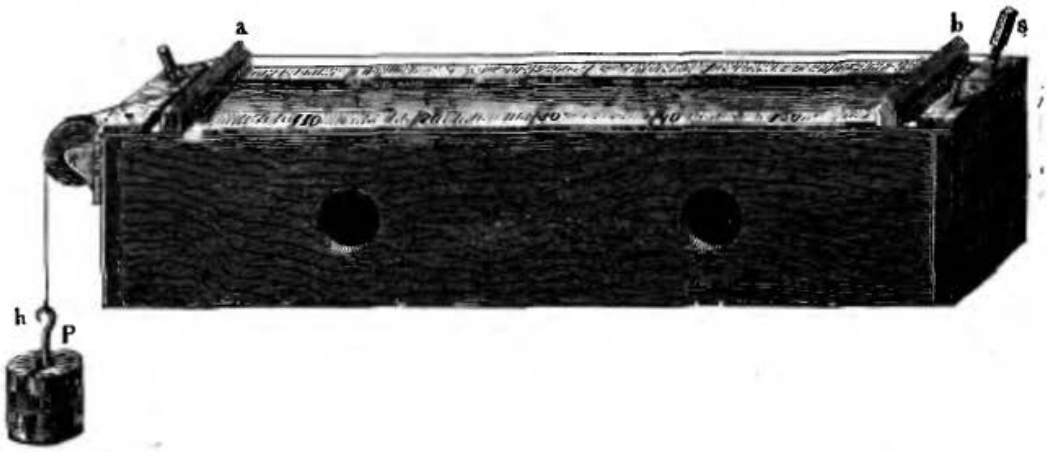


Fig. 190. Monochord.

używają przyrządu, zwanego *monochordem* (1) albo *sonometrem* (2). Składa się on z drewnianego pudła rezonansowego ze struną, naciągniętą nad dwiema stałemi podstawkami, opartemi na dece pudła (fig. 190). Jeden koniec tej struny—której długość mierzy się odległością podstawek, odczytywaną na skali—jest stale przyczepiony do kołka, drugi zaś koniec przerzuca się przez blok i zaopatruje w pętlicę, do której przyczepia się różne ciężary, mniej lub więcej naprężające strunę. Napiąwszy strunę przez uczepienie stosownego ciężaru tak, ażeby przy zarwa-

(1) Od wyrazów: monos—jeden i chorda—struna.
(2) Co znaczy po polsku: dźwiękomierz.

niu wydawała wyraźny ton, oznaczamy za pomocą syreny odpowiadającą mu częstość drgań. Wiemy wtedy, ile oscylacyj struna ta, drgając jako całość, wykonywa w ciągu 1 sekundy; niechaj częstość drgań wynosi naprzykład 440, długość zaś struny—60 centym. Jeżeli teraz podeprzemy strunę w samym środku za pomocą dającej się przesuwać podstawki, albo gdy naciśniemy ją w rzeczonym punkcie palcem i zarwiemy tylko połowę struny, to usłyszymy oktawę poprzedniego tonu, czyli ton o podwójnej liczbie, t. j. o 880 drganiach. Oddzielmy w podobny sposób $^1/_3$, $^1/_4$ i t. d. struny i zarwijmy oddzieloną część, a wyda ona ton o potrójnej—1320, poczwórnej—1760 i t. d. liczbie drgań. Z tego wyprowadzamy prawo, że *liczba drgań struny jest odwrotnie proporcyonalna do jej długości.* Pozwólmy znowu tej samej strunie drgać jako całość, zmieńmy jednak wyprężający ją ciężar, a zobaczymy, że liczba jej drgań w ciągu sekundy staje się 2, 3, 4, 5 i t. d. razy większą, gdy zwiększamy ciężar 4, 9, 16, 25 i t. d. razy. Pierwsze liczby przedstawiają pierwiastki kwadratowe ostatnich, otrzymujemy więc drugie prawo, według którego *liczba drgań struny jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z ciężaru naprężającego.* Przygotujmy sobie kilka strun z tego samego materyału, lecz różnej grubości, nadajmy im jednakową długość, naciągając je nad temi samemi podstawkami i wyprężmy je za pomocą równych ciężarów, a przekonamy się, że przy zarwaniu grubsze struny dają tony niższe, a więc o mniejszej ilości drgań, niż cienkie. Jeżeli średnice tych strun mają się do siebie jak liczby 1, 2, 3,4 i t. d., to częstości drgań, odpowiadające wydawanym przez nie tonom, są w stosunku liczb 4, 3, 2, 1 tak, że *liczba drgań struny jest odwrotnie proporcyonalna do jej średnicy.* Nareszcie 4-te prawo otrzymujemy przy użyciu strun z różnego materyału. Przygotujmy sobie 2 struny—żelazną i platynową, nadajmy im jednakową grubość oraz długość i wyprężmy je za pomocą równych ciężarów, a przy zarwaniu struna żelazna wyda wyższy ton, niż platynowa. Przy podobnem doświadczeniu znaleziono, że jeżeli naprzykład platynowa struna wykonywa 1000 drgań na sekundę, to żelazna w tymże czasie wykonywa ich 1640: liczby te mają się do siebie jak 1 : 1,64;

te ostatnie liczby przedstawiają pierwiastki kwadratowe liczb 1 i 2,69. Porównywając z drugiej strony ciężary właściwe platyny—21,04 i żelaza—7,8, znajdujemy, że ciężary te znajdują się w stosunku odwrotnym, niż ostatnio wymienione liczby 1 i 2,69, to jest w stosunku 2,69:1. Z doświadczeń tych wyprowadzamy więc następujące prawo: *liczba drgań struny jest odwrotnie proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z ciężaru właściwego albo z gęstości materyału, z którego wyrobiona jest struna.*

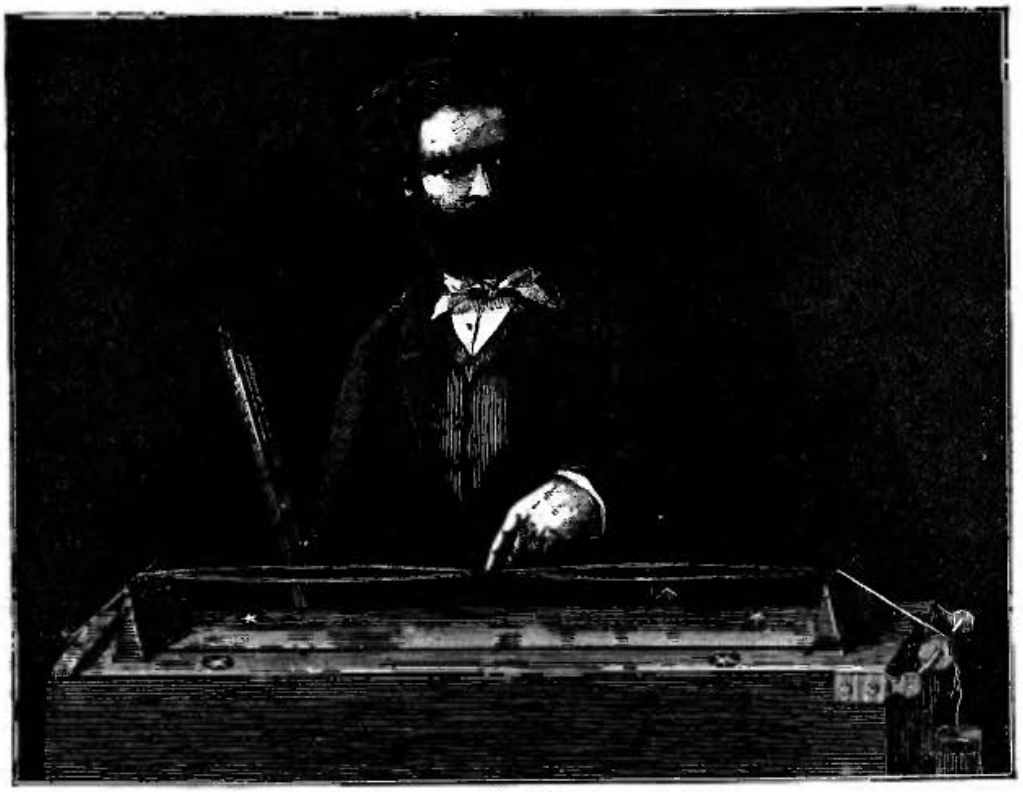


Fig. 191. Drgania oddzielnych części struny.

Wyłuszczone wyżej prawa stosują się jednak tylko do wypadku poprzecznych drgań struny, to jest drgań, zachodzących w kierunku prostopadłym do długości struny, jak to ma miejsce przy zarywaniu jej palcem albo przy pociąganiu smyczkiem. Jeżeli zaś będziemy przeciągali strunę wzdłuż suknem, posypanem kalafonią, to wtedy wyda ona bardzo wysoki, przenikliwy ton, który powstaje wskutek podłużnych drgań cząstek struny, to jest drgań, zachodzących w kierunku samej długości struny, które podlegają innym prawom, niż powyżej wymienione. Drgania te

jednak nie bywają praktycznie stosowane i co najwyżej przy niezręcznej grze skrzypka obrażają nasze ucho, możemy je więc pominąć, musimy natomiast rozważyć tu jeszcze jedno ważne zjawisko, mianowicie drgania oddzielnych części strun, z czego wypływa *harmoniczne powinowactwo tonów.*

Dotykając palcem środka struny i pociągając smyczkiem jednę jej połowę (fig. 191, str. 290), otrzymujemy, jak o tem już nadmieniliśmy, *oktawę* czyli ton o 2 razy większej liczbie drgań,

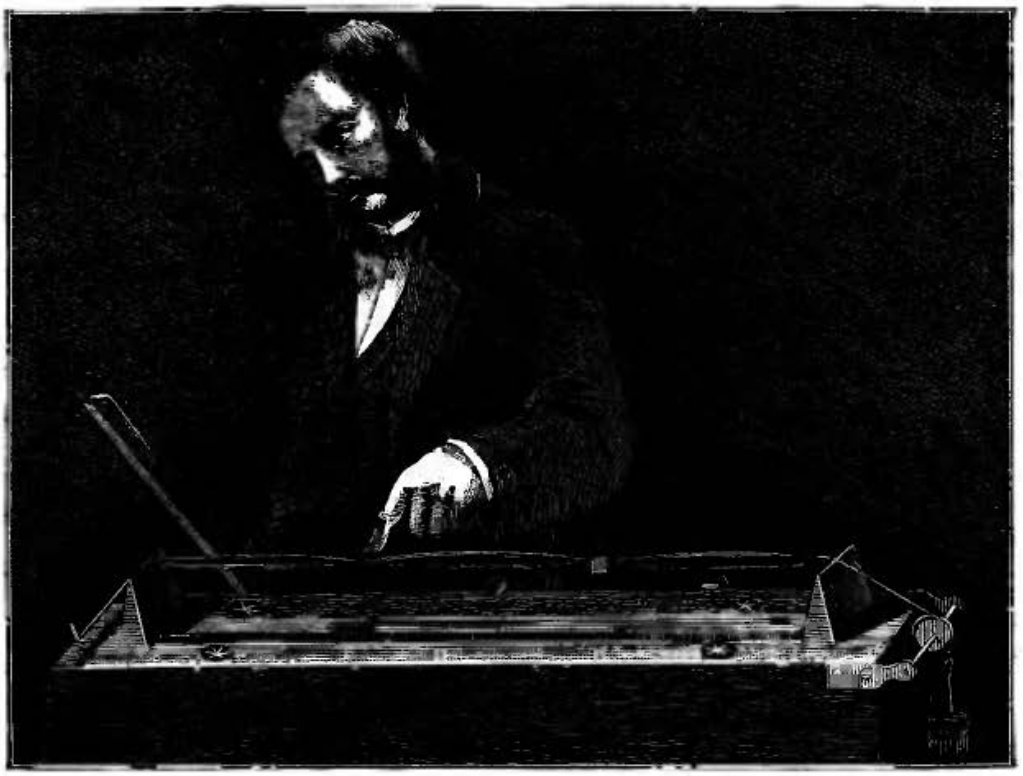


Fig. 192. Pętlice i węzły drgającej oddzielnemi częściami struny.

niż *ton zasadniczy*, wydawany przez strunę, gdy drga ona jako całość. Ważnem jednak jest to, że drga nietylko ta część struny, którą pociągnęliśmy smyczkiem, lecz i druga jej polowa, przytem tak, że gdy ta ostatnia idzie do góry, druga połowa jednocześnie idzie na dół i naodwrót. Możemy drgania niepociągniętej smyczkiem części struny uwidocznić, umieszczając na niej zgięte skrawki papieru, t. zw. koniki, które natychmiast spadają, gdy struna zaczyna drgać. Oddzieliwszy palcem $^1/_3$ część struny (fig. 193) i pociągnąwszy tę część smyczkiem, słyszymy, według

pierwszego z powyższych praw, ton o 3 razy większej liczbie drgań, niż ton zasadniczy, a więc o $^3/_2$ większej liczbie drgań, niż otrzymana w poprzednim wypadku *oktawa*. Ton ten o potrójnej liczbie drgań w stosunku do tonu zasadniczego, nazywamy *kwintą* jego oktawy. I w tym wypadku niepociągnięta smyczkiem część struny także zostaje wprawiona w drgania, przyczem jednak dzieli się na 2 równe części tak, iż cała struna składa się teraz, jak to pokazuje fig. 193, z 3 równych części, z których każda drga niezależnie od innych i przytem w kierunku przeciwnym, niż część sąsiednia. Drgające te części nazywamy *pętlicami*, środki tych ostatnich, mające największą amplitudę drgania—*brzuszkami*, zaś punkt, oddzielający dwie pętlice i pozostający podczas drgań struny we względnym spoczynku—*węzłem*. Koniki, umieszczone na węzłach, podczas drgań struny pozostają na miejscu, te natomiast, które znajdują się na pętlicach, spadają. W podobny sposób łatwo możemy strunę podzielić na 4, 5, 6 i t. d. oddzielnie drgających części z tylomaż pętlicami i z 3, 4, 5 i t. d. węzłami (liczba tych ostatnich jest zawsze o 1 mniejsza, niż liczba pętlic, nie licząc naturalnie 2-ch końcowych punktów struny, które, będąc stale przytwierdzone do deki, nie mogą wcale drgać, a więc także stanowią węzły). Zręczny gracz może nawet wywołać ten podział przez ostrożne pociąganie struny smyczkiem, nie dotykając wcale palcem żadnego jej punktu. Struna więc może drgać albo jako całość i wydawać ton zasadniczy o pewnej określonej liczbie drgań, albo podzielić się na 2, 3, 4, 5 i t. d. części i wytwarzać ton o 2, 3, 4, 5 i t. d. razy większej liczbie drgań. Tony, powstające w ten sposób, nazywamy *harmonicznemi tonami* albo *przytonami* tonu zasadniczego (najniższego, jaki w ogóle może wydawać struna danej długości); liczby ich drgań są zawsze wielokrotnemi liczby drgań tego ostatniego. Zobaczymy później, że okoliczność ta jest nader ważną dla teoryi muzyki.

Otóż niepodobna wcale dokonać tego, ażeby struna drgała *tylko* jako całość, zawsze dzieli się ona przytem mniej lub więcej wyraźnie na części, drgające jako niezależne od siebie struny. Jeden ruch nie przeszkadza przytem innym ruchom, podobnie jak

wahadło nie przestaje oscylować na płynącym okręcie, biorąc jednocześnie udział w jego kołysaniach i w jego ruchu postępowym. Tak samo jak struny, zachowują się wszelkie inne ciała dźwięczące: drgania całych ciał zawsze idą w parze z niezależnemi od nich drganiami oddzielnych części tak, że obok tonu zasadniczego, brzmiącego najsilniej, rozbrzmiewają także słabiej jego przytony. Wskutek zlewania się tych ostatnich z tonem zasadniczym powstaje to, co nazywamy kolorytem, brzmieniem (timbre) tonu, którym jeden instrument muzyczny różni się od innego. Struna naprzykład skrzypiec może być nastrojona na ten sam ton zasadniczy, co i klarnet, a jednak łatwo odróżniamy dwa te instrumenty. Przytony struny skrzypcowej są różne od przytonów klarnetu i gdy zlewają się one z jednym i tym samym tonem zasadniczym, nadają mu różne brzmienie. Do punktu tego powrócimy jeszcze w rozdziale, traktującym o analizie dźwięku.

§ 3. Drgania sztab, płyt, błon i dzwonów. Figury dźwiękowe Chladni'ego. Podłużne drgania sztab.

Sztaby nie potrzebują być naprężone albo obciążone jak struny, ażeby drgać; czynią one to już wskutek swej sprężystości, gdy, będąc umocowane w jednym lub w kilku punktach, zostają wyprowadzone z położenia równowagi. Drgania te mogą przytem być poprzeczne albo podłużne, zależnie od tego, w jaki sposób je wywołujemy: jeżeli uderzamy sztabę z boku lub odchylamy w stronę i następnie puszczamy, zaczyna ona drgać poprzecznie, gdy zaś przeciągamy ją wzdłuż suknem albo zwilżonemi palcami, to wprawiamy ją w drgania podłużne. Odkładając zbadanie tych ostatnich do końca niniejszego §, rozważmy tymczasem poprzeczne drgania sztab.

Umocujmy jeden koniec sztaby w śrubsztoku tak, jak to pokazuje fig. 168 na str. 251 i odchyliwszy drugi jej koniec, wypuśćmy go z ręki: sztaba drga wtedy jako całość z prędkością, zależną od jej grubości, długości, ciężaru właściwego oraz sprężystości i jeżeli prędkość ta jest dostatecznie wielka, słyszymy ton. *Częstości drgań sztab z tego samego materyału są niezależne*

od ich szerokości, wprost proporcyonne do ich grubości i odwrotnie proporcyonalne do kwadratów z długości. Sztaba 2, 3, 4 i t. d. razy grubsza od innej jednakowej z nią długości, drga tyleż razy prędzej; gdy zaś przy tej samej grubości jest ona 2, 3, 4, 5 i t. d. razy dłuższa od innej sztaby z tego samego materyału, wtedy drga ona 4, 9, 16, 25 i t. d. razy wolniej, niż ta ostatnia. Sztaba, przytwierdzona w rzeczony sposób, może także drgać oddzielnemi częściami, jeżeli jakiś punkt, położony pomiędzy obu jej końcami, będziemy słabo naciskali palcem; punkt ten staje się wtedy węzłem i oddziela dwie sąsiednie części, drgające zawsze w kierunkach przeciwnych. Przy podziale sztaby powstaje ton o większej liczbie drgań niż wtedy, gdy drga ona jako całość; wysokość tego tonu zależy od liczby węzłów. Z krótkich sztab, *umocowanych w powyżej opisany sposób, można urządzić* wcale znośny instrument muzyczny. Naprzykład w grającej tabakierce tony zostają wytworzone przez drgania małych *języczków* metalowych, przytwierdzonych w jednym tylko końcu; obracający się walec opatrzony jest sztyfcikami, które, odchylając i następnie puszczając swobodne końce tych języczków, wprawiają je w drgania tem szybsze, im mniejsza jest długość i im większa grubość języczka.

Sztaba, umocowana na obu końcach, drga—podobnie jak struna—albo jako całość i wydaje wtedy ton zasadniczy, albo też oddzielnemi częściami, dając wyższe tony; wysokość tych ostatnich podlega innemu prawu, niż kolejne tony harmoniczne struny. Ponieważ jednak tak umocowane sztaby nie znajdują zastosowania w muzyce, zbytecznem więc byłoby rzeczone prawo—dosyć zawiłe—szerzej wyłuszczać. Rozważmy natomiast jeszcze drgania sztaby, podpartej w dwóch innych, niekońcowych punktach. Chladni, któremu nauka o dźwięku bardzo wiele zawdzięcza, pierwszy dokładnie zbadał różne rodzaje drgań, wykonywanych przez tak podparte sztaby. Najprostszy wypadek ma miejsce, gdy sztaba *podzielona jest przez dwa węzły* (punkty podparcia) na 3 niezależnie drgające części; węzły te leżą wtedy mniej więcej na $^1/_6$ i $^5/_6$ długości sztaby tak, iż składa się ona z jednej całej pętlicy—od jednego do drugiego węzła i z 2 części

pętlicy, z których każda rozpościera się od węzła do bliższego swobodnego końca sztaby. Przy następnym podziale powstaje jeszcze 1 węzeł w samym środku pomiędzy dwoma poprzedniemi i sztaba dzieli się na 4 części; przy dalszych podziałach otrzymujemy 4, 5, 6 i t. d. węzłów, z których dwa zawsze leżą w punktach podparcia, przyczem wysokość tonu ciągle wzrasta, lecz w stosunku szybszym, niż liczba węzłów. Powstające w ten sposób tony są jednak nieharmoniczne, dlatego też do celów muzycznych posługują się tylko pierwszym rodzajem podziału o 2 węzłach, ułożonych tak, jak wyżej podano. Jako przykład może służyć instrument drewniany (fig. 193), w którym sztabki różnej

Fig. 193. „Instrument drewniany", zwany także skrzypcami słomkowemi.

długości i grubości podtrzymywane są w rzeczonych węzłach przez zwykłe sznurki lub słomę (od tej ostatniej instrument ten nosi także nazwę skrzypiec słomkowych). Zawieszając sznur na haku i trzymając drugi koniec sznura w ręku, możemy przez uderzanie o sztabki stosowną pałeczką otrzymywać dosyć dźwięczne tony.

Widełki strojowe (stroik, kamerton) nie przedstawiają nic innego, jak tylko zgiętą sztabę o swobodnych końcach. Niechaj *a a* przedstawia nam prostą sztabę, której węzły, odpowiadające pierwszemu rodzajowi podziału, oznaczone są przez kropkowane linie (fig. 194). Zegnijmy sztabę tak, aby przyjęła postać linii *b b*, a zachowa ona jeszcze oba węzły, które jednak znajdują się

teraz nieco bliżej siebie; ton zgiętej sztaby jest też nieco niższy, niż prostej. Zginajmy ją coraz więcej tak, ażeby kolejno przyjmowała postać linii *c c*, *d d* i t. d., a otrzymamy w końcu stroik *e e* o równoległych ramionach; zachował on oba węzły, które leżą wszakże o wiele bliżej siebie, niż wtedy, gdy sztaba była jeszcze prostą. Gdy stroik taki, po potarciu go smyczkiem, wydaje najniższy ton — zasadniczy, wtedy drga on w sposób, przedstawiony na fig. 195, na której węzły oznaczone są przez litery *p* i *q*, granice zaś, pomiędzy któremi oscylują ramiona stroika — przez litery *b n* i *f m*. Widzimy, że gdy oba ramiona stroika drgają ku sobie, zgięta jego część, zawarta między węzłami *p* i *q*, oscyluje ku dołowi i naodwrót — gdy ramiona oddalają się od siebie aż do skrajnych położeń *b p* i *m q*, rzeczona część drga ku górze. Dla stroika nie istnieje podział, odpowiadający trójwęzłowemu podziałowi prostej sztaby; gdy wydaje on pierwszy przyton, to oprócz węzłów *p* i *q*, na każdem jego ramieniu tworzy się jeszcze 1 nowy węzeł, tak iż stroik składa się wtedy z 5-ciu oddzielnie drgających części, odgraniczonych przez 4 węzły; tonowi temu odpowiada 5—6 razy większa częstość drgań, niż tonowi zasadniczemu. Przy dalszych podziałach wysokość odnośnego tonu nader szybko wzrasta. Górne te tony mniej lub więcej wyraźnie towarzyszą tonowi zasadniczemu, tak samo jak to się dzieje w innych wypadkach (patrz w tym względzie str. 293), ponieważ jednak bardzo prędko przebrzmiewają, przeto stroik przy dłuższem dźwięczeniu wydaje, jak to wykazał Chladni, tylko ton zasadniczy. Dla wzmocnienia tonu stroika, umieszcza się go, podobnie jak to się robi ze strunami, na pudle rezonansowem odpowiednich rozmiarów (fig. 196).

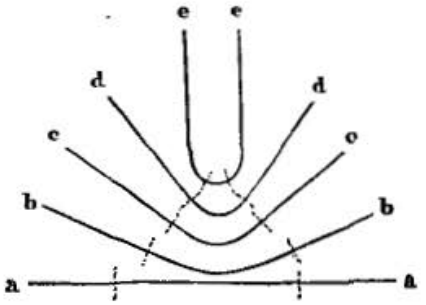


Fig. 194. Stroik przedstawia zgiętą sztabę o swobodnych końcach.

Fig. 195. Sposób drgania stroika przy wydawaniu tonu zasadniczego.

Płytę—to samo stosuje się do krążka—możemy rozpatrywać jako połączenie sztab. Płytę wprawia się w drgania, przymocowując ją w jakimkolwiek punkcie za pomocą odpowiedniego przyrządu, np. takiego, jaki przedstawia fig. 197 i pociągając brzeg jej smyczkiem. Przy takiem urządzeniu nie drga ona nigdy jako całość, lecz oddzielnemi częściami, odgraniczonemi przez miejsca pozostające w spoczynku, zwane *liniami węzłowemi*. Dwie sąsiadujące z sobą części drgają zawsze w kierunkach przeciwnych tak, że gdy jedna idzie do góry, druga oscyluje ku

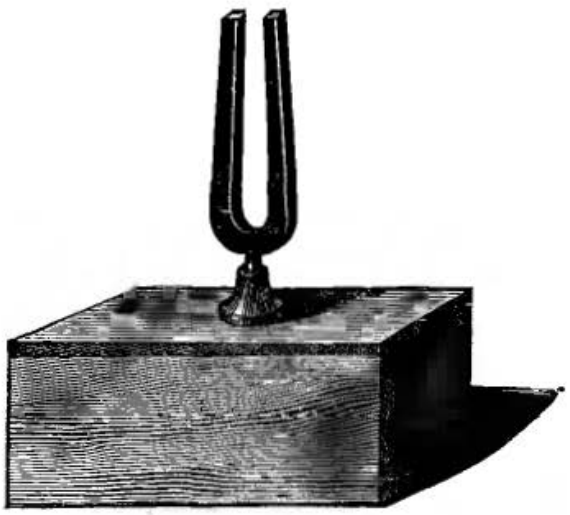


Fig. 196. Stroik z pudłem rezonansowem.

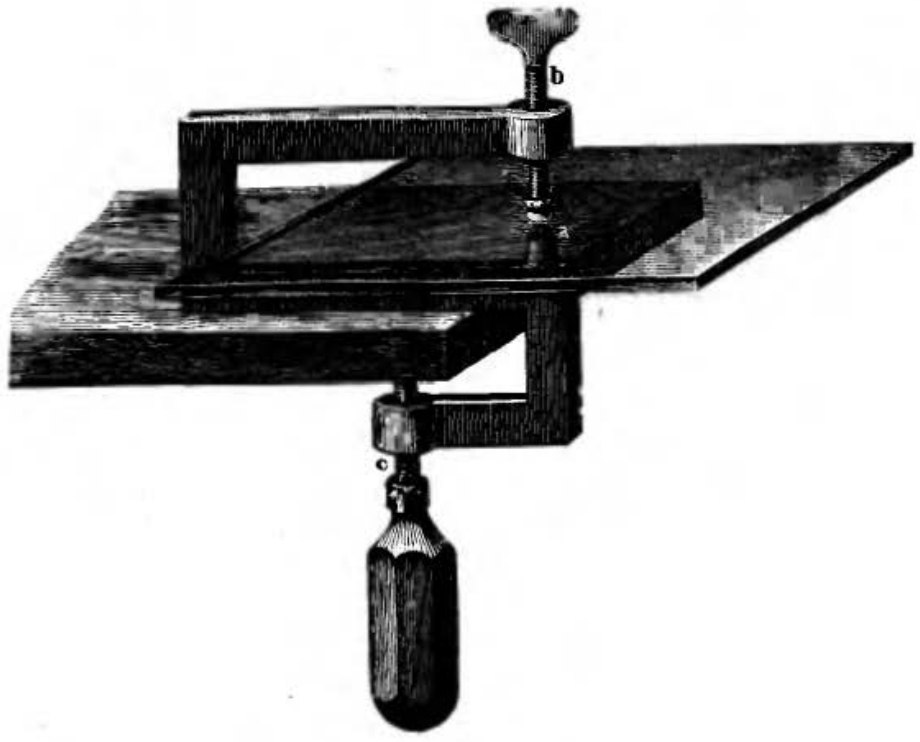


Fig. 197. Przyrząd do przytwierdzania drgających płyt.

dołowi i naodwrót. Ponieważ płyty przedstawiają tylko połączenie sztab, przeto podlegają one podobnemu co i te ostatnie prawu

orzekającemu, że *częstości drgań płyt z tego samego materyału są wprost proporcyonalne do ich grubości i odwrotnie proporcyonalne do kwadratów z ich średnic*, które to prawo jest jednak w tym razie tylko przybliżenie prawdziwe. Częstość drgań zależy nadto od liczby części, na które rozdziela się płyta i, co za tem idzie, od liczby tworzących się przytem linii węzłowych. Układ jakoteż ilość tych ostatnich warunkuje się sposobem przytwierdzenia płyty oraz położeniem punktu albo punktów, których ruch tamujemy palcem, względem miejsca, pociągniętego smyczkiem tak, że

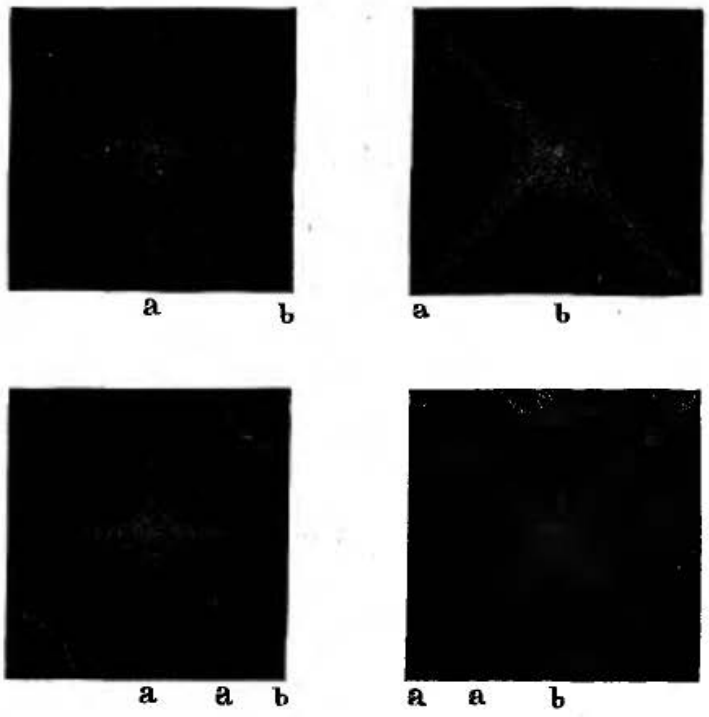


Fig. 198. Figury dźwiękowe Chladni'ego—Savarta.

ta sama płyta może drgać z różną częstością i dawać najrozmaitsze tony. Punkt przytwierdzenia, jak i w ogóle te punkty płyty, których drgania tamujemy, przytrzymując je naprzykład palcami, z konieczności tworzą węzły, inne zaś—tworzą części pętlic, wreszcie w punkcie, pociągniętym smyczkiem, powstaje brzuszek, t. j. miejsce najsilniejszego drgania. Tony płyty albo krążka są nieharmoniczne między sobą.

Chladni, który pierwszy dokładniej zbadał drgania płyt i krążków, podał bardzo łatwy sposób uwidoczniania tworzących

się na nich linii węzłowych. W tym celu drgającą płytę lub krążek posypuje się miałkim piaskiem, albo lepiej jeszcze proszkiem lycopodium; ziarnka piasku albo proszku zostają zrzucone z miejsc najsilniejszego drgania, t. j. z brzuszków, staczają się po równiach pochyłych, odgraniczonych liniami węzłowemi i zbierają się na tych ostatnich, tworząc w ten sposób t. zw. figury dźwiękowe Chladni'ego. Dla dokładnego odtworzenia kształtu tych figur, Savart zamiast piasku używał zaprawionej gumą mączki krochmalowej, którą obsypywał drgające płyty lub krążki; po utworzeniu się odnośnych figur, przykładał on do płyty lub krążka zwilżony arkusz papieru, do którego przykleja się mączka krochmalowa. Figura 198 przedstawia linie węzłowe, otrzymane sposobem Savarta: punkt, przytrzymywany palcami, oznaczony jest przez *a*, punkt zaś pociągnięty smyczkiem — przez *b*. Przypatrzywszy się dokładniej takim figurom dźwiękowym, widzimy, że na drgających płytach linie węzłowe układają się przeważnie w 2 kierunkach: równolegle do przekątnych płyty albo do jej boków, na krążkach zaś linie te układają się głównie w kierunku promieni. Ażeby otrzymać współśrodkowe linie węzłowe, należy brzeg przedziurawionego we środku krążka umocować w śrubsztoku (fig. 199) i nitką przesuniętą przez otwór pociągać wewnętrzny brzeg krążka w jakimkolwiek punkcie; ziarnka piasku albo proszku lycopodium układają się wtedy w rzeczone linie. Nie udało się jeszcze dotychczas znaleźć określonego związku pomiędzy kształtem figur dźwiękowych na płytach lub krążkach a wysokością odnośnych tonów i tyle tylko daje się powiedzieć, że im figura jest bardziej skomplikowana, tem wyższy jest ton.

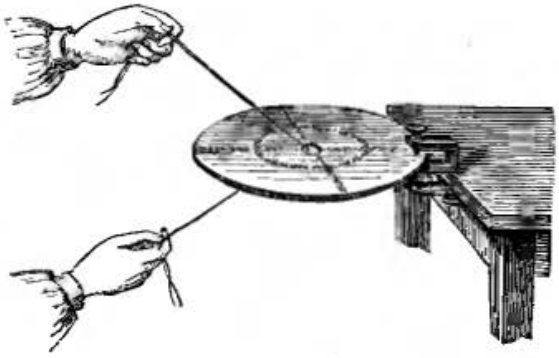


Fig. 199. Przyrząd do otrzymywania współśrodkowych linii węzłowych na drgających krążkach.

Jeżeli błonę równomiernie napniemy na obwodzie obręczy, albo naciągniemy wpoprzek wydrążonego walca i uderzymy o nią stosowną pałeczką, wtedy błona wpukla się i wypukla, drgając jako całość i daje ton zasadniczy; brzegi jej, będąc przytwierdzone, nie mogą brać udziału w tych drganiach, stanowią przeto węzły tak, że rozrzucony po błonie piasek stacza się całkowicie ku jej brzegom. Błona może atoli także drgać oddzielnemi częściami i daje wtedy tony wyższe, nieharmoniczne. Im grubsza i bardziej napięta jest błona, tem ton wydawany przez nią jest wyższy. Dwa bębny orkiestry stroi się tak, iż jeden z nich wydaje ton o $1^1/_2$ razy większej liczbie drgań, niż drugi; tony więc obu bębnów zawsze różnią się o kwintę.

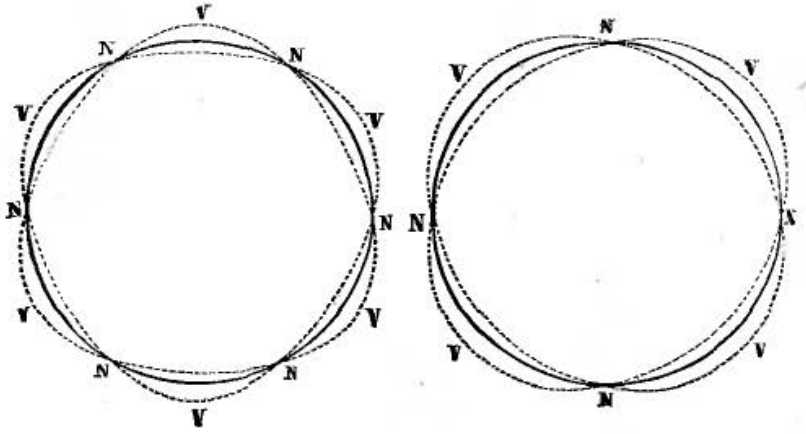


Fig. 200. Układ węzłów i brzuszków w drgającym dzwonie dla tonu zasadniczego i pierwszego górnego tonu.

Podobnie jak stroik uważaliśmy za zgiętą w dwa równoległe ramiona sztabę, tak też możemy dzwon rozważać jako zakrzywioną w odpowiedni sposób płytę. Dzwon nigdy nie drga jako całość, lecz dzieli się na *parzystą* liczbę równych odcinków, oddzielonych liniami węzłowemi, które biegną od leżących naprzeciw siebie punktów dolnego obwodu ku wierzchołkowi dzwonu. Na fig. 200 koło przedstawia poprzeczny przekrój dzwonu w stanie spoczynku. Jeżeli uderzymy młotkiem o środek którejkolwiek pętlicy $N\,N$, wtedy koło peryodycznie przyjmuje postać to jednej, to drugiej elipsy (patrz prawą stronę fig. 200). Dwa naprzeciwległe odcinki drgają zawsze w jednakowym kierunku, to jest ku sobie

albo od siebie, dwa zaś przylegające odcinki oscylują jednocześnie w kierunkach przeciwnych: gdy jeden z nich oddala się od środka koła, drugi się zbliża i naodwrót. Punkty przecięcia (N) elips ze sobą i z kołem stanowią węzły; te drgają bardzo słabo, najsilniej zaś oscylują punkty V, leżące na środku pomiędzy dwoma węzłami, t. j. brzuszki. Przy takim podziale—na 4 odcinki, oddzielone 4 węzłami—dzwon wydaje ton zasadniczy tem wyższy, im mniejsza jest powierzchnia i im większa grubość dzwonu. Przy następnym podziale (przedstawionym na lewej stronie fig. 200), odpowiadającym pierwszemu górnemu tonowi, powstaje 6 odcinków, rozdzielonych przez 6 węzłów; przy dalszych podziałach mamy 8, 10, 12 i t. d. (zawsze parzystą liczbę) odcinków i tyleż węzłów, przyczem powstaje coraz to wyższy ton.

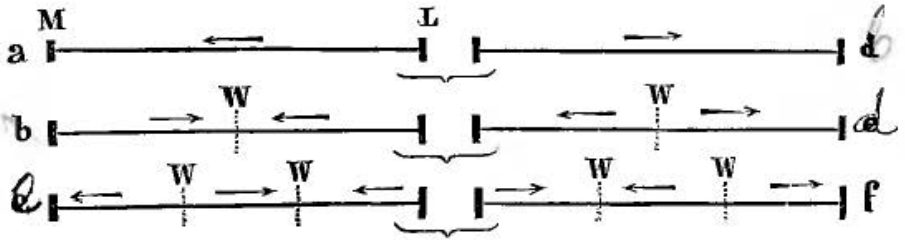


Fig. 201. Układ węzłów w podłużnie drgającej sztabie, przytwierdzonej w obu końcach: *a b*—ton zasadniczy, *c d*—pierwszy przyton, *e f*—drugi przyton.

Opisany powyżej układ węzłów i brzuszków można łatwo sprawdzić, zawieszając w różnych punktach lekkie kulki, dotykające brzegów drgającego dzwonu tak, jak to pokazuje fig. 169 na str. 252: najsilniej zostają wtedy odrzucone kulki, zwieszające się przy brzuszkach, najsłabiej zaś te—które dotykają węzłów. Gdy Tyndall zbliżał kulę z kości słoniowej, zawieszoną na krótkim sznurku, naprzemian to do drgającego odcinka to do któregoś z węzłów wielkiego dzwonu w Westminsterze, wtedy rzeczona kula w pierwszym wypadku odrzucana była na 5 cali, w drugim zaś—tylko na $2^3/_4$ cala.

Rozważmy teraz podłużne drgania sztab, powstające, jak już nadmieniliśmy, wskutek przeciągania wzdłuż tych ostatnich

suknem albo palcami. Powstający przytem ton jest znacznie wyższy od tego, jaki wydaje sztaba jednakowej długości, drgając poprzecznie.

Umocujmy sztabę żelazną w obu końcach (fig. 201, str. 301) i pocierajmy ją wzdłuż suknem, posypanem żywicą: impuls biegnie (*a*) od jednego końca sztaby (*L*) do drugiego (*M*), wywierając ciśnienie na ścianę *M*, ciągnienie zaś—na *L*, poczem wraca napowrót (*b*), wywierając teraz, przeciwnie, ciśnienie na *L*, ciągnienie zaś—na *M*. Czas, jakiego potrzebuje dźwięk na przebycie drogi tam i napowrót, odpowiada jednemu drganiu. Czas, w którym ciało wykonywa jednę całkowitą oscylacyę, nazywamy *peryodem drgania*. Łatwo zrozumieć, że im większa jest liczba drgań w ciągu 1 sekundy, tem krócej trwa każde pojedyńcze drganie, czyli że *peryod drgania jest odwrotnie proporcyonalny do częstości drgań;* równa się on w sekundach 1, podzielonej przez liczbę, wyrażającą częstość drgań.

W opisanym wyżej wypadku sztaba drga podłużnie jako całość i wydaje ton zasadniczy; może ona jednak także, podobnie jak struna, podzielić się na części—oscylujące zawsze w kierunkach przeciwnych, jak to pokazują strzałki—i dawać tony wyższe. Podeprzyjmy sztabę w samym środku, wtedy tworzy się tam węzeł: impulsy biegną (*c*) od końców sztaby tylko aż do środka *W*, odbijają się tam, wracają napowrót (*d*) i t. d. Droga, jaką przebywa dźwięk, jest teraz 2 razy krótsza, niż w poprzednim razie, wskutek czego i peryod drgania jest 2 razy mniejszy, czyli że sztaba tak podparta wykonywa w tym samym czasie 2 razy większą liczbę drgań, a więc daje oktawę tonu zasadniczego. Tak samo gdy sztaba dzieli się na 3 części (fig. 201, *e*, *f*), to wydaje ton o 3 razy większej liczbie drgań, przy 4 częściach—ton o 4 razy większej liczbie drgań, niż ton zasadniczy i t. d.

Weźmy teraz sztabę tej samej długości *L M*, lecz z ołowiu, a za pomocą syreny łatwo możemy się przekonać, że sztaba taka, drgając podłużnie jako całość, daje ton zasadniczy o 4 razy mniejszej częstości drgań, niż żelazna. Dlaczego tak jest? Oto poprostu dlatego, że dźwięk rozchodzi się w ołowiu 4 razy wolniej, niż w żelazie, czyli że dla przebycia tej samej drogi potrze-

buje on w pierwszym wypadku 4 razy dłuższego czasu, niż w drugim; przy tej samej długości, peryod drgania sztaby ołowianej jest więc 4 razy dłuższy, niż sztaby żelaznej, czyli że częstość drgań pierwszej jest 4 razy mniejsza, niż drugiej. Tak samo gdybyśmy wzięli sztabę z materyału, w którym dźwięk rozchodzi się 2 lub 3 razy wolniej albo prędzej niż w żelazie, to dawałaby ona ton zasadniczy o 2 lub 3 razy mniejszej albo większej liczbie drgań, niż sztaba żelazna jednakowej długości. Z doświadczeń tych wyprowadzamy dla podłużnie drgających sztab następujące prawo: *Częstości drgań sztab z różnego materyału są odwrotnie proporcyonalne do ich długości, wprost zaś proporcyonalne do prędkości rozchodzenia się w nich dźwięku.*

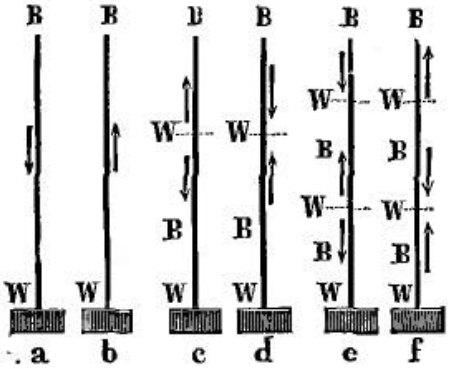


Fig. 202. *Układ węzłów i brzuszków w podłużnie drgającej sztabie, przytwierdzonej w jednym końcu: a b—ton zasadniczy, c d—pierwszy przyton, e f—drugi przyton.*

Na mocy powyższego łatwo oznaczyć względną prędkość dźwięku w różnych ciałach stałych. W tym celu dostatecznem jest przygotować z danych materyałów, naprzykład z dwóch różnych metali 2 sztaby, które, będąc podparte w obu końcach i drgając podłużnie, dają ton zasadniczy jednakowej wysokości: stosunek długości tych sztab pokazuje wtedy zarazem stosunek prędkości dźwięku w obu metalach.

Wyłuszczone wyżej prawo stosuje się także w razie, gdy drgająca podłużnie sztaba przytwierdzona jest tylko w jednym końcu, albo gdy oba jej końce są swobodne, punkt zaś podparcia znajduje się pomiędzy niemi.

Umocujmy sztabę drewnianą albo metalową jednym końcem w śrubsztoku i pocierajmy ją wzdłuż palcami, pokrytemi żywicą, a otrzymamy muzykalny ton. Gdy sztaba wydaje ton zasadniczy, wtedy drga ona jako całość (fig. 202, *a b*); punkt przytwierdzony stanowi jedyny w tym razie węzeł *W*, swobodny zaś koniec—brzuszek *B* i impuls biegnie poprostu od tego *ostatniego*

do węzła i napowrót, jak to pokazują strzałki, przyczem sztaba naprzemian to się kurczy, to wydłuża. I tu znowu peryod drgania, a więc co za tem idzie, częstość drgań i wysokość tonu określa się czasem, jakiego potrzebuje dźwięk dla przebycia drogi od swobodnego do przytwierdzonego końca sztaby i napowrót, albo, ogólniej, od brzuszka do węzła i napowrót. Jeżeli ma powstać nowy węzeł, to musi on się przedzielić od poprzedniego (t. j. od przytwierdzonego końca sztaby) nowym brzuszkiem, zawsze bowiem na środku pomiędzy dwoma węzłami musi się znajdować brzuszek i naodwrót. Temu zaś warunkowi staje się zadość tylko wtedy, gdy nowy ten węzeł przypada na $^1/_3$ długości sztaby,

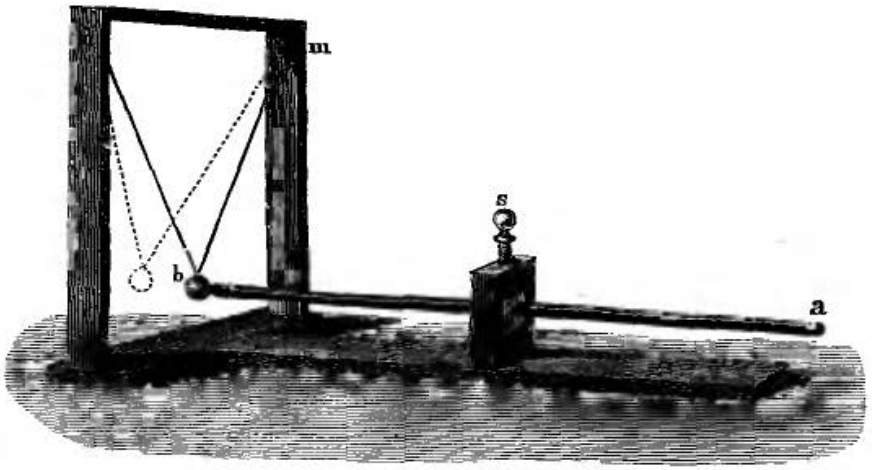


Fig. 203. Przyrząd Koeniga do badania podłużnych drgań sztaby o swobodnych końcach.

licząc od swobodnego jej końca. Sztaba podzielona jest wtedy (fig. 202, *c d*) na 2 części, drgające zawsze w kierunkach przeciwnych, t. j. jednocześnie oddalające się od węzła (*c*), albo zbliżające się ku niemu (*d*). Ponieważ odległość od brzuszka do węzła jest teraz 3 razy krótsza, niż w poprzednim wypadku, przeto peryod drgania będzie teraz również 3 razy krótszy, a więc powstającemu w tym wypadku tonowi—pierwszemu przytonowi odpowiada 3 razy większa częstość drgań, niż tonowi zasadniczemu. Podobne rozumowanie prowadzi nas do wniosku, że po następnym podziale układ węzłów i brzuszków musi być taki, jak to pokazuje fig. 202 w *e f:* Węzły leżą przy umocowanym końcu

sztaby oraz na $^2/_5$ i $^4/_5$ jej długości, licząc od rzeczonego końca, brzuszki zaś—na $^1/_5$, $^3/_5$ długości sztaby oraz przy swobodnym końcu; ponieważ odległość między brzuszkiem i węzłem wynosi teraz $^1/_5$ długości całej sztaby, przeto wydawanemu przez nią teraz tonowi—drugiemu przytonowi odpowiada częstość drgań, 5 razy większa, niż tonowi zasadniczemu. Tak samo przy następnych podziałach powstają kolejno przytony o 7, 9, 11 i t. d. razy większej liczbie drgań, niż ton zasadniczy. Widzimy więc, że *częstości drgań kolejnych harmonicznych tonów podłużnie drgającej sztaby, przytwierdzonej w jednym końcu, są do siebie w stosunku liczb 1, 3, 5, 7, 9 i t. d., czyli w stosunku kolejnych liczb nieparzystych.*

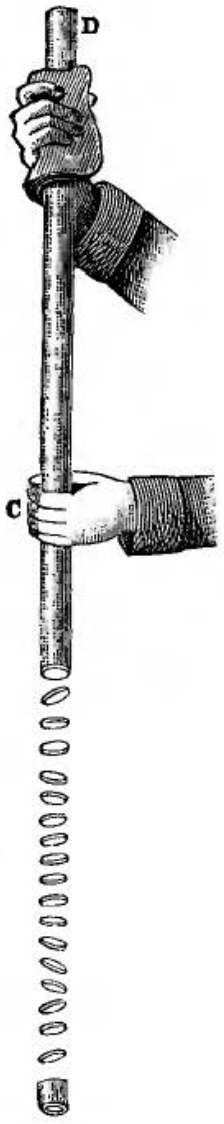


Fig. 204. Roztrzaskiwanie się rury szklanej przy podłużnych drganiach.

Rozważmy teraz kilka przykładów podłużnych drgań sztaby albo rury o swobodnych końcach. Zbadanie tego przedmiotu doprowadzi nas, jak to później zobaczymy, do bardzo ważnych rezultatów. Umocujmy (fig. 203, str. 304) środek sztaby *a b* za pomocą śruby *s* i zawiesiwszy na sznurkach *n b* i *m b* kulę z kości słoniowej tak, aby dotykała końca sztaby, pocierajmy silnie wzdłuż prawą połowę tej ostatniej. Słyszymy wtedy donośny muzykalny ton, pochodzący od sztaby, drgającej podłużnie nietylko tą połową, którą pocieramy, lecz i drugą połową, jak o tem świadczy szybkie odskakiwanie kuli od końca *b* sztaby. Pocierając wzdłuż rurę szklaną mokrą chustką, możemy łatwo zauważyć, jak warstewka cieczy, odłączająca się od chustki, tworzy na rurze wązkie drgające pierścienie, które powstają wskutek drgań znajdującego się pod niemi szkła. Te ostatnie możemy nawet tak spotęgować, iż, jak to pierwszy pokazał Savart, jedna połowa szkla-

nej rury roztrzaskuje się na oddzielne krążki, gdy silnie przeciągamy wzdłuż drugą jej połowę (fig. 204). Krążki te, jakkolwiek same są już bardzo cienkie, pokazują nadto pod mikroskopem liczne rysy, zdradzające dalszy podział drgań rury.

W wypadku, przedstawionym na fig. 203, środek sztaby stanowi jedyny węzeł, oba zaś jej swobodne końce tworzą brzuszki, od których impulsy biegną jednocześnie ku węzłowi, tam się odbijają i wracają napowrót; *otrzymujemy wtedy ton zasadniczy o częstości drgań, 2 razy większej, niż ton zasadniczy sztaby tej samej długości, lecz przytwierdzonej w jednym końcu.* W samej rzeczy ponieważ węzeł działa jak stała ściana, przeto sztaba o swobodnych końcach i umocowana we środku przedstawia jakby dwie sztaby 2 razy krótsze, z których każda przytwierdzona

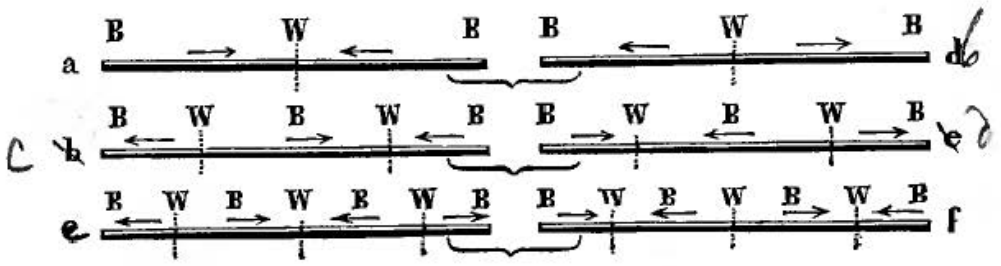


Fig. 205. Układ węzłów i brzuszków w drgającej podłużnie sztabie o swobodnych końcach dla tonu zasadniczego *a b*, pierwszego przytonu *c d* i drugiego przytonu *e f*.

jest jednym końcem, jak to najlepiej się uwidocznia przy porównaniu fig. 205 *a b* z fig. 202 *a b:* w pierwszym razie odległość brzuszka od węzła, którą warunkuje się peryod drgania, jest 2 razy mniejsza niż w drugim tak, że w pierwszym razie otrzymujemy 2 razy większą częstość drgań, niż w ostatnim.

Podział sztaby o swobodnych końcach z *jednym* tylko węzłem na środku (fig. 205 *a b*) odpowiada najniższemu jej tonowi—zasadniczemu. Sztaba jednak może jeszcze dalej się dzielić i dawać przytony. Ponieważ oba swobodne końce sztaby zawsze stanowią brzuszki i ponieważ na środku pomiędzy dwoma węzłami zawsze również znajduje się brzuszek, przeto w wypadku 2-ch węzłów, układ ich musi być taki, jak to pokazuje fig. 205 *c d:* węzły leżą na $^1/_4$ i $^3/_4$ długości sztaby, brzuszki zaś—na

obu jej końcach i na środku. Sztaba podzielona jest na 3 części,—drgające zawsze w kierunkach przeciwnych, jak to pokazują strzałki; a że odległość od brzuszka do węzła jest teraz 2 razy mniejsza, niż w *a b*, przeto peryod drgania jest 2 razy krótszy, otrzymujemy więc w tym wypadku ton—pierwszy przyton o 2 razy większej częstości drgań, niż ton zasadniczy. Możemy to sprawdzić, przymocowując sztabę *a b* (fig. 203), zamiast we środku, w punkcie, leżącym na $^1/_4$ jej długości: będąc potarta, daje ona wtedy oktawę tonu zasadniczego. Łatwo zrozumieć, że jeżeli dwa wyżej podane warunki mają być spełnione, to przy następnym podziale (fig. 205 *e f*) węzły muszą leżeć na $^1/_6$, $^3/_6$ i $^5/_6$ długości sztaby, brzuszki zaś—na obu jej końcach oraz na $^2/_6$ i $^4/_6$ jej długości; odległość brzuszka od węzła jest w tym wypadku trzy razy mniejsza niż w *a b* tak, że drugiemu przytonowi odpowiada 3 razy większa liczba drgań, niż tonowi zasadniczemu. Tak samo dalszym przytonom odpowiada 4, 5, 6 i t. d. razy większa częstość drgań, niż tonowi zasadniczemu. Widzimy tedy, że *częstości drgań kolejnych tonów harmonicznych podłużnie drgającej sztaby o swobodnych końcach są w stosunku liczb 1, 2, 3, 4, 5 i t. d., czyli w równym mu stosunku liczb parzystych 2, 4, 6, 8, 10 i t. d.*

W jakim stanie znajdują się różne punkty drgającej podłużnie sztaby? Węzły prawie wcale nie drgają, lecz tylko doznawają zmian gęstości, gdyż cząstki sztaby po obu stronach węzła poruszają się zawsze w kierunkach wprost przeciwnych, t. j. albo ku węzłowi (patrz fig. 201, 202 i 205), powodując w nim zgęszczenie, albo od węzła, przez co w tym ostatnim powstaje rozrzedzenie. W chwili, gdy w jednym węźle zachodzi największe zgęszczenie, w sąsiednim współcześnie powstaje największe rozrzedzenie (patrz np. fig. 205 *d*), gdyż cząstki, które zbliżają się do jednego węzła, jednocześnie oddalają się od sąsiedniego. Zupełnie przeciwnie się dzieje w punktach, leżących pośrodku między dwoma węzłami, t. j. w brzuszkach: gdy pewne cząstki oddalają się od brzuszka, posuwając się ku jednemu z leżących po obu jego stronach węzłów, to jednocześnie inne cząstki, oddalając się od drugiego węzła, zbliżają się do tegoż brzuszka (patrz np. środ-

kowe brzuszki *B* sztaby na fig. 205 *c* lub *d*) tak, że gęstość w brzuszkach się nie zmienia, natomiast ruch w tych punktach jest najsilniejszy. *W węzłach tedy mamy tylko maxima zgęszczeń lub rozrzedzeń bez żadnego, albo bardzo tylko nieznacznego drgania, w brzuszkach zaś—maximum ruchu bez zmian gęstości.* Stosunki te staną się dla nas jaśniejsze, gdy rozważymy drgania słupów powietrznych, zupełnie analogiczne do podłużnych drgań sztab.

§ 4. Zjawiska rezonansu czyli odbrzmiewania. Prawa drgań słupów powietrznych. Piszczałki. Metoda oznaczania prędkości dźwięku w gazach, cieczach i ciałach stałych.

Jeżeli stroik nie jest połączony z pudłem rezonansowem, to wydaje tylko bardzo słaby ton. Weźmy taki stroik, wykonywający naprzykład 340 drgań na sekundę i, pociągnąwszy go smyczkiem, zbliżmy do otworu cylindra *A B*, 30 centym. wysokiego (fig. 206): zaledwie możemy wtedy dosłyszeć ton stroika. Wlewajmy następnie ostrożnie wodę do cylindra, a słup zawartego w nim powietrza staje się coraz to krótszy wskutek podnoszenia się poziomu dolewanej wody; jednocześnie natężenie tonu stroika ciągle wzrasta i gdy woda dosięga pewnej wysokości, ton ten rozbrzmiewa bardzo silnie tak, iż słychać go w całym pokoju. Przy dalszem zaś dolewaniu wody, ton stroika znowu słabnie i w końcu staje się

Fig. 206. Odbrzmiewanie słupa powietrza na ton stroika.

prawie tak cichy, jak w początku. Doświadczenie to pokazuje, że słup powietrza najsilniej odbrzmiewa na ton danych widełek strojowych wtedy, gdy posiada pewną określoną długość; wzmocnienie to tonu nazywa się *rezonansem*, samo zaś ciało, wzmacniające ton—*rezonatorem*. Jeżeli zamiast jednego, weźmiemy kilka stroików o różnych tonach, to dla każdego z nich możemy znaleźć żądaną długość słupa powietrza, przy której następuje najsilniejszy rezonans. Uczyniwszy to, przekonywamy się, że słup powietrza jest tem krótszy, im większa jest liczba drgań odnośnego tonu, na który ma odbrzmiewać, albo ściślej wyrażamy to prawem, orzekającem, że *długości słupów powietrznych, najsilniej odbrzmiewających na dane tony, są odwrotnie proporcyonalne do częstości drgań tych ostatnich.*

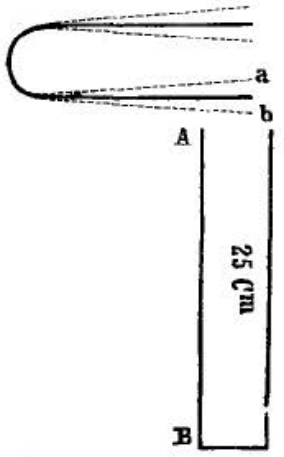


Fig. 207. Przyczyna rezonansu.

Jakaż jest przyczyna tego zadziwiającego faktu? Wzmocnienie tonu stroika może pochodzić tylko wskutek tego, że powietrze w pokoju zostaje wprawione w silniejsze drgania. W jakich tedy warunkach stroik może nadać temu powietrzu wzmocniony ruch? Ażeby odpowiedzieć na to pytanie, przypomnijmy sobie związek, zachodzący między częstością drgań, odpowiadającą danemu tonowi i długością odnośnej fali dźwiękowej (patrz str. 284): długość ta równa się prędkości dźwięku w danym środku (w naszym wypadku—w powietrzu), podzielonej przez częstość drgań. Dla stroika, użytego do powyższego doświadczenia, który wykonywa 340 drgań na sekundę, długość fali równa się $^{340}/_{340}$ (1), czyli 1 metrowi. Wiemy nadto (patrz str. 259), że w czasie, gdy stroik wykonywa 1 całą oscylacyę, dźwięk przenosi się na długość 1 fali, w danym więc razie—na 1 metr, w czasie trwania półoscylacyi — na długość półfali, w naszym więc wypadku—na $^1/_2$ metra. Zwa-

(1) We wszystkich przykładach, podawanych w tej księdze, przyjmujemy dla uproszczenia rachunku, że prędkość dźwięku w powietrzu równa się 340 metr.

żywszy to, podstawmy pod nasz drgający stroik (fig. 207) cylinder AB o wysokości $^1/_4$ metra (25 cent.), a więc wysokości, równej $^1/_4$ długości fali, odpowiadającej tonowi stroika i zobaczmy, co z tego wyniknie. W czasie, gdy ramię stroika oscyluje od położenia a do b, spowodowane przez ten ruch zgęszczenie powietrza przenosi się aż do dna cylindra, tam zostaje odbite i wraca napowrót do góry. Ponieważ zaś odległość od A do B i napowrót wynosi $^1/_2$ metra, przeto powracająca fala dźwiękowa spotka ramię stroika dokładnie w chwili, w której rozpoczyna ono drugą połowę swej oscylacyi, to jest ruch wsteczny od b do a. Pod cofającem się teraz ramieniem stroika powstaje rozrzedzenie powietrza, które również przenosi się aż do dna cylindra, tam się odbija, wraca napowrót do góry i—dla tej samej co wyżej przyczyny—trafia ramię w chwili, gdy dosięgło ono położenia a i rozpoczyna drugie już drganie. To samo powtarza się przy każdej nowej oscylacyi stroika; ten ostatni, jak widzimy, ma ten sam peryod drgania, co i słup powietrza długości $^1/_4$ metra, wskutek zaś tej zgodności peryodów drgania ruch coraz bardziej nagromadza się w cylindrze i rozchodząc się ztąd na cały pokój, powoduje owo gwałtowne wzmocnienie tonu. Pojmujemy teraz, dlaczego cylinder, użyty do doświadczenia, przedstawionego na fig. 206, był za długi; ażeby peryod drgania zawartego w nim słupa powietrza zrównać z peryodem drgania stroika, należało słup ten skrócić do $^1/_4$ długości fali, odpowiadającej tonowi stroika, a więc skrócić o 5 cent., cośmy właśnie uczynili, nalawszy do cylindra stosowną ilość wody. Widzimy tedy, że *długość słupa powietrza, zawartego w zamkniętej z jednej strony rurze i najsilniej odbrzmiewającego na dany ton, równa się $^1/_4$ długości odpowiadającej temu tonowi fali.* Jeżeli więc weźmiemy, zamiast powyższego, inny stroik, wydający naprzykład ton o 2 razy większej liczbie drgań, t. j. 680, to, ponieważ długość odpowiadającej temu tonowi fali równa się $^{680}/_{340}$ czyli $^1/_2$ metr., dla otrzymania przeto rezonansu należy wziąć cylinder długości $^1/_8$ metr. czyli $12^1/_2$ centymetr., a więc 2 razy krótszy, niż w poprzednim wypadku. Tak samo, dla wzmocnienia tonu o 3, 4, 5 i t. d. razy większej liczbie drgań, wypada użyć 3, 4, 5 i t. d. razy krótszego cylindra, na-

pełnionego powietrzem. W ten sposób tłómaczy się wymienione na str. 309 prawo, wyrażające związek między długością odbrzmiewającego słupa powietrza i częstością drgań odnośnego tonu.

Rozumie się, że zamiast powietrza moglibyśmy do powyższych doświadczeń również dobrze użyć jakiegokolwiek innego gazu; w takim jednak razie długości cylindrów musiałyby także być inne. Prędkość naprzykład dźwięku w gazie oświetlającym jest prawie $^8/_5$ razy większa, niż w powietrzu. Otóż za pomocą stosownych doświadczeń możemy się przekonać, że na ton stroika o 340 drganiach najsilniej odbrzmiewa słup gazu oświetlającego długości 40 centym., t. j. tyleż razy dłuższego od słupa powietrza (25-centymetrowego), ile razy dźwięk prędzej się rozchodzi w gazie oświetlającym, niż w powietrzu. Tak samo na ton stroika o 680 drganiach najsilniej odbrzmiewa słup gazu oświetlającego o długości 20 cent., t. j. 2 razy krótszy niż w poprzednim wypadku, na ton o 3, 4, 5 i t. d. razy większej liczbie drgań— 3, 4, 5 i t. d. razy krótszy słup tego gazu; zawsze jednak słup gazu oświetlającego jest $^8/_5$ razy dłuższy od słupa powietrza, odbrzmiewającego na ten sam ton. Nie trudno zrozumieć, dlaczego tak jest. W samej rzeczy, ponieważ dźwięk w gazie oświetlającym rozchodzi się $^8/_5$ razy prędzej, niż w powietrzu, przeto w pierwszym gazie przebiega on w tym samym czasie, t. j. podczas półoscylacyi stroika $^8/_5$ razy większą drogę, niż w drugim, a więc cylinder, napełniony pierwszym gazem, musi być także $^8/_5$ razy dłuższy od cylindra z powietrzem. Podobny rezultat otrzymalibyśmy dla każdego innego ciała lotnego: słup jego musiałby być tyleż razy dłuższy albo krótszy od słupa powietrza, odbrzmiewającego na ten sam ton, ile razy dźwięk rozchodzi się w tem ciele prędzej albo wolniej, niż w powietrzu. Zważywszy, że częstość drgań słupa gazu jest ta sama, co i częstość drgań tonu, na który słup ten odbrzmiewa, możemy zyskane dotąd rezultaty wyrazić następującem prawem, stanowiącem tylko uogólnienie prawa, wymienionego na str. 309: *Częstości drgań słupów różnych gazów są odwrotnie proporcyonalne do ich długości, wprost zaś proporcyonalne do prędkości rozchodzenia się dźwięku w tych gazach.*

Temu samemu prawu podlegają także drgania słupów cieczy i uważny czytelnik bez wątpienia dostrzegł już podobieństwo jego z prawem, dotyczącem podłużnych drgań sztaby, wymienionem na str. 303. Tak jest w samej rzeczy i możemy

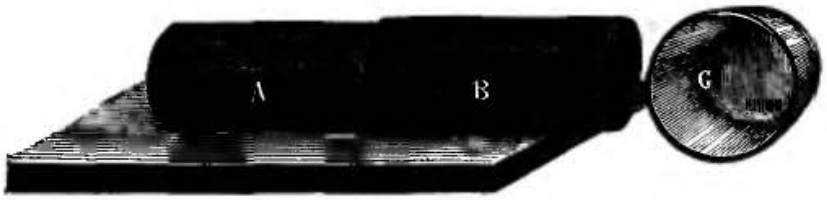


Fig. 208. Odbrzmiewanie słupa powietrza, znajdującego się w otwartej z obu stron rurze.

wszystkie te prawa uogólnić w jedno, obejmujące zarówno podłużne drgania sztab, jak i słupów gazów lub cieczy i które brzmi jak następuje: *Częstości drgań podłużnych różnych ciał—stałych, ciekłych czy lotnych—są odwrotnie proporcyonalne do ich długości i wprost proporcyonalne do prędkości rozchodzenia się w nich dźwięku.* Prawo to nie stosuje się jednak tak ściśle do drgań słupa gazu, jak do drgań sztaby dlatego, że słup taki nie jest ciałem odosobnionem, lecz komunikuje u otworu rury, w której jest zawarty, z zewnętrzną atmosferą, która działa zwalniająco na drgania słupa, wskutek czego wydawany przezeń ton, zarówno jak i ton, na który on odbrzmiewa, jest nieco niższy, niż wypada z teoryi.

Fig. 209. Rura odbrzmiewa tylko na jeden z mięszaniny tonów.

Wróćmy jednak do zjawisk odbrzmiewania. Rezonans możemy także wywołać za pomocą otwartej z obu stron rury, składającej się zwykle z dwóch części, wchodzących jedna w drugą tak, że wyciągając albo wsuwając jednę z nich, możemy dowolnie zmieniać długość całej rury. Zbliżmy taką złożoną z 2-ch części rurę *A B* (fig. 208) do jakiegoś ciała dźwięczą-

cego, naprzykład do drgającego klosza C i wyciągajmy albo wsuwajmy część A: przy pewnej długości całej rury $A\,B$, ton klosza będzie najsilniej rozbrzmiewał, przy innej zaś—większej albo mniejszej, będzie znacznie słabszy. Za pomocą odpowiednich doświadczeń łatwo się przekonać, że i dla otwartych z obu stron rur *długości słupów powietrza (albo innego gazu), najsilniej odbrzmiewających na dane tony, są odwrotnie proporcyonalne do częstości ich drgań.* Porównywując zaś ze sobą długości 2 rur—jednej krytej, drugiej otwartej — odbrzmiewających na jeden i ten sam ton, znajdziemy, iż ta ostatnia jest dokładnie 2 razy dłuższa, niż pierwsza. A ponieważ długość rury krytej równa się $^1/_4$ długości odnośnej fali, z poprzedniego więc rezultatu wynika, że *długość słupa powietrza, zawartego w otwartej z obu stron rurze, który najsilniej odbrzmiewa na dany ton, równa się $^1/_2$ długości odpowiadającej temu tonowi fali.*

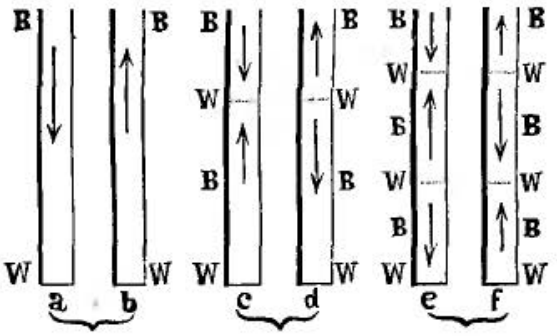


Fig. 210. Układ węzłów i brzuszków w rurze krytej dla tonu zasadniczego (*a b*) i dwóch pierwszych przytonów (*c d* i *e f*).

Rzeczony stosunek długości rury otwartej i krytej tłómaczymy sobie w następujący sposób: W krytej rurze (figura 210 *a b*) warstwa powietrza dotykająca dna, nie mogąc drgać z powodu przeszkadzającej temu stałej ściany, z konieczności tworzy węzeł; przeciwnie warstwa powietrza, znajdująca się u wylotu rury, komunikując z zewnętrzną atmosferą, zachowuje prawie stałą gęstość i, drgając najsilniej, stanowi brzuszek. Fala dźwiękowa biegnie poprostu od wylotu do dna, t. j. od brzuszka do węzła, tam się odbija i wraca napowrót, jak to pokazują strzałki. Natomiast w rurze otwartej (fig. 211 *a b*) warstwy powietrza, znajdujące się u jej wylotów, komunikują z zewnętrzną atmosferą i drgają najsilniej, tworzą więc brzuszki; ponieważ zaś między dwoma brzuszkami zawsze leży węzeł, na samym

więc środku otwartej rury przypada powierzchnia węzłowa (oznaczona na figurze kropkami), od której zbliżające się z dwu przeciwnych stron fale dźwiękowe odbijają się tak, jak od stałej ściany (fig. 211 *a*). Otwarta rura przedstawia przeto jakby dwie kryte i 2 razy krótsze rury o wspólnem dnie—powierzchni węzłowej—musi ona więc być 2 razy dłuższa, aby odbrzmiewać na ten sam ton, co rura kryta; tak też uczyniliśmy, nadając na fig. 211 rurze otwartej 2 razy większą długość, niż krytej, przedstawionej na fig. 210. Na jaki ton będzie tedy odbrzmiewała rura otwarta tej samej długości, co kryta? — Oczywiście, że na oktawę tonu tej ostatniej, czyli na ton o 2 razy większej liczbie drgań. Dostatecznie jest porównać figury 210 *a b* i 211 *a b* z fig. 202 *a b* i 205 *a b*, aby się przekonać, że słup powietrza, zawarty w rurze krytej drga jako całość, podobnie jak podłużnie drgająca sztaba, przytwierdzona na jednym końcu i że powietrze, znajdujące się w otwartej z obu stron rurze, drga tak, jak sztaba o swobodnych końcach. Analogia ta rozpościera się, jak to zaraz zobaczymy, nie tylko na tony zasadnicze, lecz i na tony harmoniczne drgających podłużnie sztab i słupów powietrza (albo innego gazu).

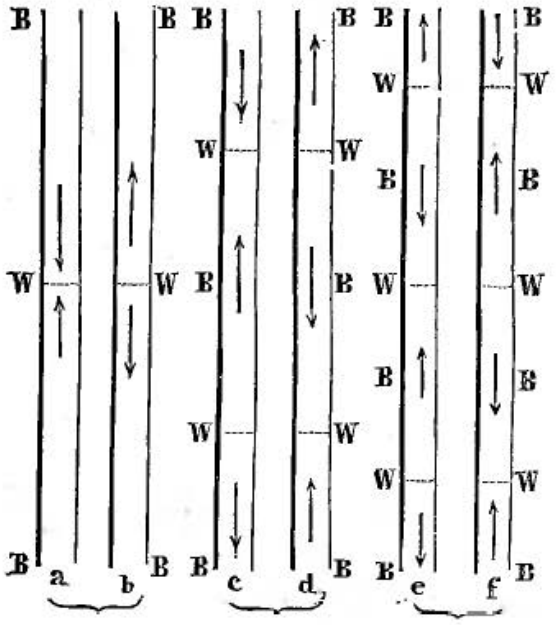


Fig. 211. Układ węzłów i brzuszków w otwartej rurze dla tonu zasadniczego (*a b*) i dwóch pierwszych przytonów (*c d* i *e f*).

Weźmy teraz kilka stroików, z których jeden wydaje ton o 340 drganiach, reszta zaś inne, różne tony, i pociągnąwszy stroiki smyczkiem, zbliżajmy je jeden po drugim do tej samej rury—krytej o długości $^1/_4$ metra, albo otwartej o długości $^1/_2$ metra,— a tylko jeden stroik, mianowicie pierwszy, wyda

silny ton. Dana rura odbrzmiewa tylko na ten ton, który powstaje wskutek drgań, zgodnych z własnemi jej drganiami i gdybyśmy nad nią trzymali nawet kilkanaście drgających stroików, wydających różne tony, to z powstającej w ten sposób mięszaniny drgań rura wybrałaby tylko te, które są zgodne z drganiami zawartego w niej słupa powietrza. Zważywszy to, wykonajmy teraz następujące proste doświadczenie (fig. 209. str. 312): Dmijmy wpoprzek otworu zamkniętej od dołu rurki *tu*, której długość niechaj wynosi $^1/_4$ metra: wskutek tarcia powietrza o brzegi otworu powstaje świszczący hałas, składający się z całego szeregu nieregularnych wstrząśnień. Otóż rurka wybiera z mięszaniny drgań te, które mają jednakowy peryod z drganiami zawartego w niej słupą powietrza i podnosi je, według pięknego wyrażenia Tyndalla, do godności muzykalnego tonu. Jestto ten sam ton, który otrzymalibyśmy, zbliżając do rurki odpowiedni stroik; w samej rzeczy słup powietrza, zawarty w rurce, jakby stwarza sobie w tym wypadku stosowny stroik, fale bowiem, które wychodzą z rurki, oddziaływując na cienką warstwę ruchomego powietrza, napływającego od naszych ust, zmuszają ją do dźwięczenia w *unissono* z powietrzem w rurce i narzucają tej warstwie rolę stroika. Podobnie także każde inne ciało, zdolne wydawać dźwięk, odbrzmiewa tylko na taki ton, który samo może wydawać i z mięszaniny różnych tonów wybiera i wzmacnia tylko taki ton. Na tem właśnie polega, jak później zobaczymy, zastosowanie rezonatorów do analizy dźwięków, t. j. do rozłożenia ich na składowe tony.

Przy słabem zadęciu rura kryta (figura 210 *a b*) albo otwarta (fig. 211 *a b*, str. 313 i 314) wydaje najniższy ton, jaki w ogóle dawać może,—jestto ton zasadniczy. Dmijmy nieco silniej, a ton chwilowo przybierze cechy hałasu, aż przy jeszcze silniejszem zadęciu otrzymamy pierwszy przyton; dmąc coraz silniej, wytwarzamy po kolei drugi, trzeci i t. d. przytony. Powietrze, zawarte w rurze, dzieli się przytem na coraz to większą liczbę części przedzielonych węzłami, z których dwie znajdujące się przy sobie drgają zawsze w kierunkach wprost przeciwnych, t. j. obie jednocześnie albo zbliżają się do węzła, albo oddalają

od niego, jak to pokazują strzałki. Kolejne podziały powietrza w rurze krytej dokładnie odpowiadają podziałom podłużnie drgającej sztaby, przytwierdzonej w jednym końcu (patrz fig. 202, str. 303), w rurze zaś otwartej—podziałom podłużnie drgającej sztaby o swobodnych końcach (patrz fig. 205, str. 306). I w tym wypadku, jak i przy podłużnie drgających sztabach, peryod drgania określa się czasem, jakiego potrzebuje dźwięk na przebycie drogi od brzuszka do najbliższego węzła i napowrót. Otóż dla rury krytej (fig. 210) droga ta jest w *c d* 3 razy, w *e f* zaś—5 razy krótsza, niż w *a b;* dla rury otwartej (fig. 211) droga ta jest w *c d* 2 razy, a w *e f*— 3 razy krótsza niż w *a b*. Widzimy tedy, że kolejne tony drgających słupów powietrza podlegają prawu analogicznemu do tego, które dotyczy kolejnych tonów podłużnie drgających sztab: *Częstości drgań kolejnych tonów słupa powietrza, zawartego w rurze krytej, są do siebie w stosunku liczb nieparzystych 1, 3, 5, 7 i t. d., zaś w rurze otwartej—w stosunku kolejnych liczb 1, 2, 3, 4, 5 i t d, albo w równym mu stosunku liczb parzystych 2, 4, 6, 8, 10 i t. d.*

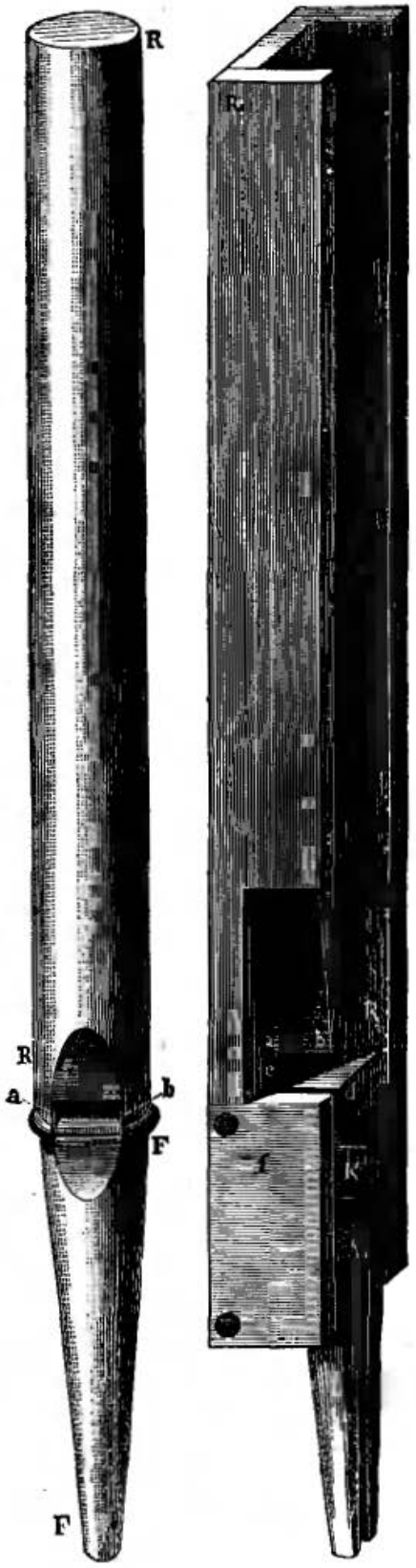


Fig. 212 i 213. Piszczałki wargowe: kryta i otwarta.

Zwróćmy się teraz do instrumentów dętych. Zasadniczą ich część stanowi pryzmatyczna albo walcowata rura, prosta lub zgięta w kilka

skrętów, w której powietrze zostaje wprawione w drgania przez zadęcie ustami albo miechem. Rury takie, które mogą być kryte albo otwarte, nazywamy w akustyce (nauce o dźwięku) *piszczałkami;* rozróżniamy dwa ich rodzaje: *wargowe* i *języczkowe.* Rozważmy z początku piszczałki wargowe.

Figura 213 przedstawia pryzmatyczną, otwartą piszczałkę organową w pionowym przekroju: aby lepiej uwidocznić wewnętrzne jej urządzenie. Przez dolny przewód wdyma się, za pomocą miechów, powietrze do komórki *K*, od góry prawie zupełnie zamkniętej tak, iż pozostaje tylko wązka szczelina *c d*, przez którą może wypływać ściskane w komórce powietrze. Wązki prąd powietrza przepływa za *dolną wargą*, znajdującą się przed szczeliną i uderza o ostrą krawędź *a b górnej wargi*, powodując przez to świszczący hałas, którego pewne drgania zostają wzmocnione przez zawarty w piszczałce słup powietrza i zamienione w ton. Ten ostatni powstaje więc tutaj w podobny sposób, jak w doświadczeniu, przedstawionem na fig. 209. Fig. 212 pokazuje zewnętrzny wygląd walcowatej, krytej piszczałki, mającej takie same wewnętrzne urządzenie, co i poprzednio opisana, nie wymaga ona więc dalszego opisu.

Prawa drgań powietrza w piszczałkach, odkryte przez Daniela Bernouilli'ego, wyłuszczyliśmy już wyżej, omawiając zjawiska odbrzmiewania. Zarówno w piszczałkach krytych, jak i otwartych, częstość drgań jest odwrotnie proporcyonalna do ich długości. Długość piszczałki krytej równa się $^1/_4$ długości fali odpowiadającej jej tonowi zasadniczemu, otwartej zaś—$^1/_2$ długości takiej fali; z tego wynika, że przy jednakowej długości piszczałka otwarta daje ton zasadniczy o oktawę wyższy od tonu zasadniczego piszczałki krytej. Wszystkie te prawa można sprawdzić, dmąc w piszczałki kryte i otwarte jednakowej formy, lecz różnej długości.

Przy słabem zadęciu piszczałki dają tony zasadnicze, przy coraz silniejszem—kolejne przytony, przyczem zawarte w piszczałkach powietrze dzieli się na coraz to większą liczbę oddzielnie drgających części tak, jak to pokazują fig. 210 i 211. Uprzytomnijmy sobie jeszcze *raz* stan powietrza w różnych punktach

piszczałki krytej i otwartej (patrz rzeczone fig.). Warstwy powietrza, stanowiące węzły, nie podlegają prawie wcale drganiu, lecz pozostają w miejscu, doznając tylko naprzemian zgęszczenia—gdy fale dźwiękowe z obu stron płyną ku nim, lub rozrzedzenia—gdy fale, odbiwszy się od węzłów, oddalają się od nich. Cząstki zaś powietrza w innych punktach przeciwnie drgają naprzemian to w jednę, to w drugą stronę, *najsilniej te, które leżą przy brzuszkach*, przyczem ma miejsce tylko bardzo nieznaczne zgęszczenie lub rozrzedzenie. Zważywszy to, możemy doświadczalnie wykazać, że układ węzłów i brzuszków w piszczałkach jest istotnie taki, jak go przedstawiają figury 210 i 211. Jeżeli naprzykład do wnętrza otwartej piszczałki o jednej szklanej ścianie będziemy opuszczali (w sposób przedstawiony na fig. 172, str. 255) błonę, obsypaną piaskiem, to zobaczymy, że w wypadku tonu zasadniczego piasek spokojnie leży na błonie tylko wtedy, gdy znajduje się ona w samym środku długości piszczałki—tam więc przypada węzeł i że w innych miejscach żywo podskakuje, najsilniej u wylotu i dolnego końca piszczałki—tam zaś przypadają węzły. Doświadczenie więc znajduje się w zgodzie z teoryą. Gdy piszczałka otwarta przy silniejszem zadęciu wydaje pierwszy przyton, wtedy według teoryi (patrz fig. 211 *c d*), brzuszki powinny się znajdować u obu końców i na środku, węzły zaś—na $^1/_4$ i $^3/_4$ długości piszczałki: zachowywanie się piasku na błonie w tych punktach pokazuje, że tak jest w istocie.

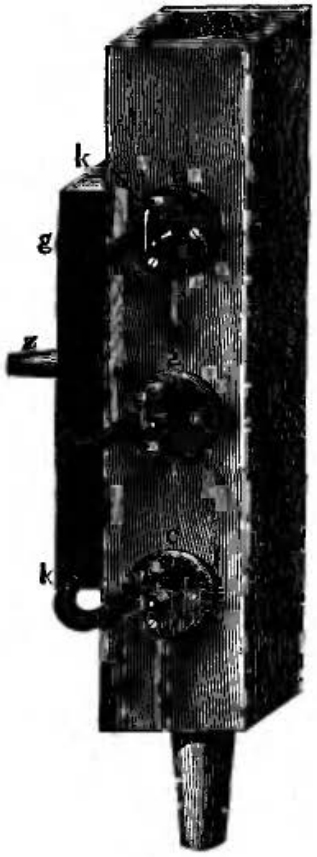


Fig. 214. Metoda Koeniga do wykazania węzłów i brzuszków w piszczałkach.

Jeszcze lepiej można wykazać położenie węzłów i brzuszków w piszczałce krytej lub otwartej, za pomocą t. zw. płomy-

ków manometrycznych Koeniga. W tym celu piszczałka otwarta (1) urządzona jest jak następuje (fig. 214): Jedna z jej ścian posiada na $^1/_4$, $^2/_4$ i $^3/_4$ swej długości otwory, zamknięte przez cienkie elastyczne błony; te ostatnie stanowią zarazem dna małych pudełek *b*, *a*, *c*, opatrzonych palnikami *s*. Błona, przypadająca przy węźle, zostaje, podczas każdego zgęszczenia się w nim powietrza zawartego w piszczałce, wypchnięta na zewnątrz; przeciwnie przy każdem rozrzedzeniu się tego ostatniego, zostaje napowrót wepchnięta przez ciśnienie zewnętrznej atmosfery tak, że błona ta drga bardzo silnie i zgodnie z powietrzem, zawartem w piszczałce. Błona natomiast, leżąca przy jakimś brzuszku, drga tylko bardzo słabo, z powodu nieznacznych, jak widzieliśmy wyżej, zgęszczeń i rozrzedzeń w takim punkcie. Drgania tych błon udzielają się płomieniom odnośnych palników, zasilanych gazem oświetlającym, który ze zbiornika przepływa przez rurę *z* do pustej skrzynki *kk*, a ztamtąd przez małe zgięte rurki *g* do każdego z pudełek. Fig 215 przedstawia oddzielnie przekrój jednego takiego pudełka. Zapalmy gaz, wypływający ze wszystkich trzech palników i zadmijmy w piszczałkę tak, ażeby wydawała ton zasadniczy, a wszystkie płomyki zaczną drgać, najsilniej jednak środkowy; gdy zaś przez zwolnienie dopływu gazu zmniejszymy płomyki, to środkowy z nich zgaśnie, podczas gdy dwa inne dalej się będą paliły. W tym więc wypadku węzeł istotnie znajduje się w środku piszczałki, jak tego wymaga teorya. Zadmijmy teraz silniej w piszczałkę tak, aby wydała pierwszy przyton, a zawarte w niej powietrze podzieli się na części tak, jak to pokazuje fig. 211 *c d*, to jest: w środku piszczałki mamy teraz

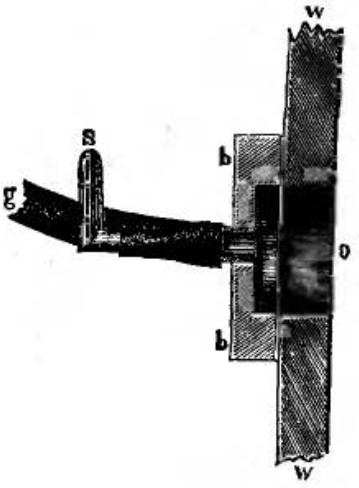


Fig. 215. Przekrój jednego z pudełek w piszczałce, przedstawionej na fig. 214.

(1) Tej samej jednak metody można użyć do wykazania węzłów i brzuszków w piszczałce krytej.

brzuszek zamiast węzła, węzły zaś przypadają na $^1/_4$ i $^3/_4$ jej długości. Jeżeli tak jest rzeczywiście i jeżeli mały płomyk przy węźle zawsze gaśnie, to przy zabrzmieniu pierwszego przytonu płomyki, palące się przy *b* i *c* powinny zgasnąć, zaś ten, który znajduje się pośrodku między niemi, to jest w *a*, powinien dalej się palić. Doświadczenie, kilkakrotnie powtórzone, a to w celu wykluczenia przypadku, pokazuje, że wywody nasze były słuszne.

Przejdźmy teraz do piszczałek *języczkowych*. Ton zostaje w nich wzbudzony za pomocą równomiernie przerywanego prądu powietrza, podobnie jak to się dzieje w syrenie. Rolę przerywacza prądu w tych instrumentach odgrywa drgający pasek z metalu lub z drzewa, zwany *języczkiem*.

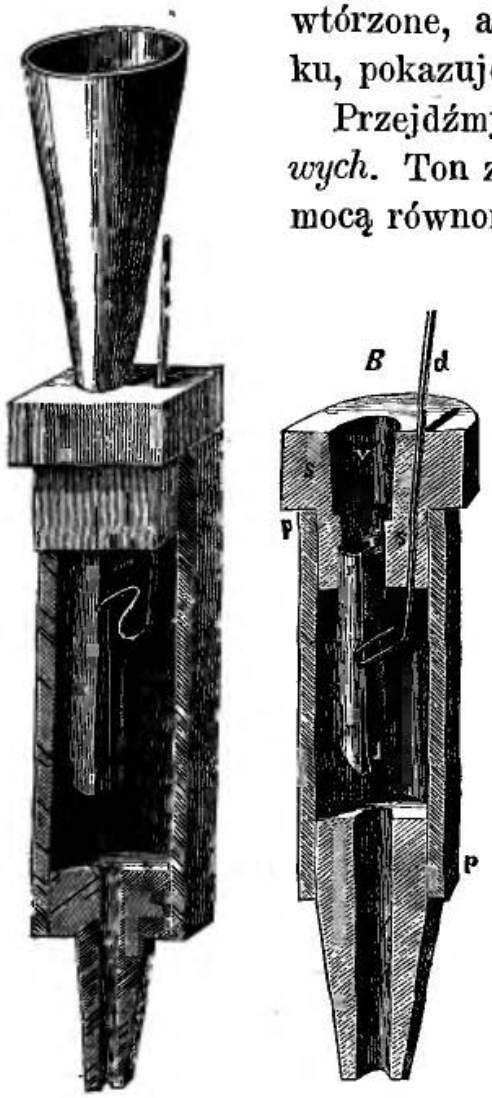


Fig. 216 i 217. Piszczałka języczkowa: wygląd zewnętrzny i przekrój pionowy.

Jeżeli języczek jest ciężki i względnie sztywny, wtedy zmusza on słup powietrza, zawartego w połączonej z nim piszczałce, do drgań zgodnych z temi, jakie sam wykonywa; gdy zaś jest lekki i bardzo giętki, to przeciwnie sam się dostosowuje do drgań słupa powietrznego. Ażeby w pierwszym wypadku odnieść korzyść z obecności piszczałki, należy długość jej tak uregulować, ażeby liczba drgań, odpowiadająca jej tonowi zasadniczemu albo któremukolwiek z przytonów, zgadzała się z liczbą drgań języczka. Gdy warunek ten jest spełniony, otrzymujemy ton czysty i bardzo silny; przy niewielkiem zresztą zboczeniu od zupełnej zgodności drgań, czystość tonu mało co zo-

staje naruszona, gdy jednak zboczenie to przekracza pewne granice, wtedy piszczałka nie przynosi już żadnej korzyści, ton bowiem warunkuje się wtedy tylko drganiami samego języczka.

Daleko częściej jednak używa się języczków giętkich, przystosowywujących się do drgań odnośnych słupów powietrznych. Figury 216 i 217 przedstawiają zewnętrzny wygląd (1) i przekrój piszczałki języczkowej, używanej w organach. Powietrze wdmuchuje się przez dolny przewód do pryzmatycznej przegrody, zwanej nóżką, w której znajduje się pionowy rowek *r r*, zamykany *prawie* zupełnie przez giętki metalowy pasek—języczek *J*, stale przytwierdzony w jednym końcu, lecz zresztą swobodny i odstający nieco w stanie równowagi od brzegów rowka; ten ostatni komunikuje z rozszerzającą się ostrokręgowo ku górze otwartą piszczałką *v*, t. zw. *czarą głosową*. Wyciągając albo wsuwając drut *d*, przechodzący przez pokrywę nóżki i naciskający języczek, możemy zwiększyć lub zmniejszyć długość tego ostatniego i w ten sposób zmienić, w pewnych wszakże tylko granicach, prędkość jego drgań. Prąd powietrzny, wpływając z nóżki przez rowek do piszczałki, powoduje tam zgęszczenie; ponieważ jednak powietrze w nóżce, wskutek ciągłego dopływu gazu z miechów, dalej się zgęszcza, przeto przyciska ono wkrótce języczek do brzegów rowka tak, że ten zostaje prawie zupełnie zamknięty i prąd się przerywa. Następnie języczek, dzięki swej sprężystości, wraca do pierwotnego położenia, odmykając rowek, wskutek czego prąd powietrza znowu przepływa przezeń do piszczałki, wywołuje tam drugie uderzenie i t. d. Wskutek tych peryodycznie powtarzających się uderzeń powstaje bardzo silny ton. Języczek obniża ton piszczałki otwartej, z czego korzystają przy budowie organów i innych instrumentów.

Oprócz metalowych, używają się jeszcze w organach bardzo giętkie języczki drewniane, nader łatwo przystosowujące się do drgań znajdujących się nad niemi słupów powietrznych. Najprostszy przykład działania takich języczków daje nam zwy-

(1) *Uwaga.* Przednia ściana tej piszczałki jest ze szkła tak, że możemy widzieć jej wnętrze.

czajne źdźbło z pszenicy. Natnijmy takie źdźbło (fig. 218) scyzorykiem w punkcie r na głębokość, równą mniej więcej $^1/_4$ średnicy źdźbła i obróciwszy nieco ostrze scyzoryka, poprowadźmy je ku bliższemu końcowi źdźbła, aż do pewnego punktu, a otrzymamy w ten sposób słomiany pasek $r\ r'$. Otóż niechaj pasek ten przedstawia nam języczek, źdźbło zaś—piszczałkę. Zadmijmy w nią, a usłyszymy dosyć czysty ton; odetnijmy kawałek źdźbła, a ton się podniesie, skracajmy je dalej, a usłyszymy coraz to wyższy ton. We wszystkich tych jednak wypadkach użyliśmy jednego i tego samego języczka, który właśnie za każdym razem musiał się przystosować do drgań słupa powietrznego.

Klarnet, obój, fagot, niektóre z piszczałek organowych oraz najdoskonalszy instrument muzyczny—narząd głosowy człowieka przedstawiają piszczałki języczkowe; niektóre piszczałki organowe, flet i t. d. należą do piszczałek wargowych krytych; trąby

Fig. 218. Przystosowywanie się giętkiego języczka do drgań słupa powietrznego.

zaś — do piszczałek wargowych otwartych. O instrumentach tych, zwłaszcza zaś o narządzie głosowym człowieka obszerniej pomówimy w końcu niniejszej księgi.

Poświęciliśmy tak wiele miejsca podłużnym drganiom sztab i słupów powietrznych nie tyle ze względu na znaczenie ich dla muzyki, ile raczej dlatego, że sposób, w jaki przedmiot ten poznano, przedstawia wyborną ilustracyę metody badania w fizyce. Metoda ta polega zarówno na wyprowadzaniu indukcyjnem praw z odnośnych zjawisk naturalnych albo sztucznych, t. j. doświadczeń, jak i na dedukcyjnem wyprowadzaniu nowych wniosków z prawd, doświadczalnie już ustalonych. Im bardziej przytem rozwinięty jest pewien dział fizyki, tem więcej daje się doń stosować druga część rzeczonej metody, t. j. dedukcya, z tem jednak zastrzeżeniem, aby zdobyte tą drogą wnioski były, o ile tylko można, sprawdzane przez doświadczenie. Otóż wyższy ten

stopień rozwoju danego działu fizyki cechuje się możnością postawienia pewnej teoryi czyli ogólnego poglądu na naturę wchodzących w zakres tego działu zjawisk, która z jednej strony dozwalałaby z jednolitego punktu widzenia rozpatrywać zdobyte już rezultaty nauki, z drugiej zaś—wytykalaby nowe kierunki i nowe przedmioty badania. A jeżeli nawet pewna teorya, jak to się nieraz w dziejach nauki zdarzało, z biegiem czasu upada, jako sprzeczna z nowoodkrytemi faktami, niemniej jednak oddaje ona w swoim czasie niepoślednie usługi, skierowywując na pewne ciemne jeszcze kwestye umysł badacza, który bez niej nie wiedziałby, co mianowicie i jak ma badać.

W akustyce rolę podobną oddawna odgrywa teorya rozprzestrzeniania się dźwięku, którą wyłuszczyliśmy w poprzednim rozdziale. Niejednemu zapewne z uważnych czytelników teorya ta wydawała się wtedy jeszcze zbyt mało ugruntowaną, przedstawiającą nadto zbyt mało punktów, które dałyby się wprost doświadczalnie sprawdzić, przyjmuje ona bowiem drgania cząstek powietrza, fale i t. d., których *bezpośrednio* widzieć ani zmierzyć nie możemy. Jedno wszakże już wtedy było dla nas pewne, to mianowicie, że jeżeli dźwięk istotnie rozprzestrzenia się tak, jakeśmy przyjęli, wtedy *prędkość jego w danym środku musi się równać długości fali, pomnożonej przez częstość drgań ciała dźwięczącego.* W toku niniejszego § widzieliśmy jednak, iż z tego twierdzenia — nie dającego się również jeszcze bezpośrednio sprawdzić—możemy wyprowadzić pewne wnioski, dotyczące zjawisk odbrzmiewania, drgań słupów powietrznych i dzielenia się ich na oddzielnie drgające części. Co więcej, na mocy tej teoryi, a właściwie jednego z jej wyników, wyrażającego rezultat krzyżowania się fal dźwiękowych naprzód biegnących czyli *postępowych* z falami odbitemi, Daniel Bernouilli, Chladni i Poisson zdołali wyprowadzić wszelkie prawa, dotyczące podłużnych drgań sztab, słupów cieczy albo gazów. Otóż wnioski te i prawa okazały się, jak widzieliśmy, zupełnie zgodne z doświadczeniem; to zaś przemawia za prawdziwością owego twierdzenia, jakoteż i teoryi, z której ono koniecznie wynika. W następnej księdze czytelnik znajdzie jeszcze bardziej przekonywający dowód słu-

szności tej teoryi w t. zw. zjawiskach interferencyi dźwięku, których wszelkie szczegóły dają się na jej zasadzie z góry przewidzieć i które dopiero w świetle tej teoryi stają się dla nas zrozumiałe.

Tymczasem zaś pokażemy, jak rzeczone twierdzenie, wynikające z teoryi rozprzestrzeniania się dźwięku, prowadzi do rozwiązania pewnych praktycznych zadań. W samej rzeczy, gdybyśmy oprócz częstości drgań pewnego tonu, łatwo dającą się oznaczyć za pomocą syreny, znali jeszcze długość odpowiadającej mu fali, to na mocy tego twierdzenia moglibyśmy także oznaczyć prędkość dźwięku w danym środku. Długości fali wprost mierzyć nie możemy; widzieliśmy atoli, iż długość ta równa się poczwórnej długości piszczałki krytej, albo podwójnej długości piszczałki otwartej, wydającej ten ton jako ton zasadniczy. Możemy tedy, nie wychodząc z pokoju i posługując się jedynie syreną oraz piszczałkami różnej długości, oznaczyć prędkość dźwięku w gazach i cieczach. Przypuśćmy, iż mamy piszczałkę otwartą o długości 1 metra, napełnioną powietrzem; dmijmy w nią tak, aby wydawała ton zasadniczy i niechaj odpowiadająca mu częstość drgań, oznaczona za pomocą syreny, wynosi 170; prędkość dźwięku w powietrzu równa się tedy $1 \times 2 \times 170$ czyli 340 metr. Chcąc otrzymać ten sam ton zasadniczy z piszczałki otwartej, napełnionej wodorem, znaleźlibyśmy, iż musi ona w tym celu być prawie $3^1/_2$ razy dłuższa, t. j. mieć $3^1/_2$ metr. długości; prędkość dźwięku w tym gazie równa się tedy $^7/_2 \times 2 \times 170$, t. j. 1190 metr., czyli że jest ona $3^1/_2$ razy większa, niż w powietrzu. Tak samo możemy oznaczyć prędkość dźwięku w innych gazach lub cieczach. W tym ostatnim wypadku przepycha się odnośną ciecz przez stosownie urządzoną piszczałkę; w ten sposób znaleźlibyśmy naprzykład, że piszczałka, napełniona eterem siarczanym, powinna być $3^1/_2$ razy dłuższa, niż takaż piszczałka, napełniona powietrzem, wydająca ten sam ton zasadniczy, co dowodzi, że prędkość dźwięku w tej cieczy jest prawie $3^1/_2$ razy większa, niż w powietrzu. Ale i podłużne drgania sztaby o swobodnych końcach podlegają temu samemu prawu, co i drgania słupa gazu, zawartego w piszczałce otwartej; długość takiej

sztaby także się równa $^1/_2$ długości fali odpowiadającej jej tonowi zasadniczemu tak, że prędkość dźwięku w jakimś materyale stałym równa się podwójnej długości takiej sztaby z tego materyału, pomnożonej przez częstość drgań jej tonu zasadniczego. W opisany tu sposób otrzymano niektóre z liczb, wyrażających prędkość dźwięku w różnych ciałach stałych, ciekłych i gazowych, podanych na str. 241. Pominęliśmy przytem pewne ostrożności, jakie należy zachować przy podobnych oznaczeniach oraz poprawki, jakie wypada wprowadzić do otrzymanych rezultatów. Chodziło nam bowiem tylko o wyłuszczenie samej zasady tej metody, opierającej się na teoryi rozprzestrzeniania się dźwięku, albo raczej na pewnych wynikających z niej twierdzeniach i o wykazanie w ten sposób jeszcze jednej korzyści, jaką nam teorya ta oddaje.

§ 5. Interwale tonów, używanych w muzyce. Gamy. Temperatura.

Doświadczenie pokazało, że tony, brzmiące jednocześnie albo następujące jeden po drugim, tylko wtedy wywierają na nas mniej lub więcej przyjemne wrażenie, gdy odpowiadające im częstości drgań są do siebie w stosunku prostym, nie bardzo się zbliżającym do jedności. Stosunek tonu wyższego do niższego, wyrażający odstęp między niemi pod względem wysokości, nazywamy *przestankiem* (interwalem). Najprostszy przestanek wykazuje ton o 2 razy większej liczbie drgań, niż ton zasadniczy, a więc o stosunku 2 : 1; wydaje się on naszemu słuchowi najbardziej spowinowacony z tonem zasadniczym do tego stopnia, że oba tony wyrażamy nawet jedną literą, nazywając wyższy *oktawą* niższego. Ponieważ jest dużo stosunków, mniejszych od 2 : 1, a jednak dosyć prostych, przeto między tonem zasadniczym a jego oktawą przypada jeszcze kilka interwalów. Przestanki kolejnych tonów *względem tonu zasadniczego*, jak je przedstawiają naprzykład tony kolejnych białych klawiszów fortepianu, są następujące:

Prima	Secunda	Tercya	Kwarta	Kwinta	Sexta	Septima	Oktawa
$^1/_1$	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	$^2/_1$
c	*d*	*e*	*f*	*g*	*a*	*h*	*c'*

Nazwa każdego tonu tłómaczy się miejscem, jakie zajmuje on w skali tych najprostszych przestanków, nazywanej *gamą diatoniczną;* najniższy ton (zasadniczy) gamy nazywamy jej *toniką.*

Tony, które brzmiąc jednocześnie, wywierają na nas przyjemne wrażenie, oznaczamy jako *zgodne*, samo zaś ich współbrzmienie—jako *współdźwięk*, inne zaś nazywamy *niezgodnemi*, a ich współbrzmienie—*rozdźwiękiem* (dyssonansem). Z wymienionych powyżej tonów, oprócz oktawy, najlepszy współdźwięk z primą daje kwinta, dalej—tercya, kwarta i sexta. Secunda i septima nie dają wprawdzie zgodnych tonów z primą, lecz musiano je włączyć do skali, ażeby zapełnić zbyt duże odstępy między primą i tercyą oraz między sextą i oktawą.

Mnożąc wyżej podane stosunki przez 24, możemy przestanki tonów gamy diatonicznej wyrazić całemi liczbami:

24	27	30	32	36	40	45	48
c	*d*	*e*	*f*	*g*	*a*	*h*	*c'*.

Stosunki te łatwo sprawdzić za pomocą syreny Seebecka o krążku z 8 współśrodkowemi szeregami otworów, z których najmniejszy posiada ich 24, następne—27, 30 i t. d., największy zaś—48. Dmuchając, przy jednostajnym obrocie krążka, kolejno przez te szeregi otworów, usłyszymy tony gamy diatonicznej; muzykalne ucho łatwo może odróżnić ton, powstający przy dmuchaniu przez otwory 5-go szeregu (o 36 otworach), licząc od środka krążka, jako kwintę tonu, wydawanego przez szereg o 24 otworach i t. d.

Dla lepszego odróżniania przestanków, wprowadzono odnośne nazwy tonów, składające się z liter lub zgłosek. W krajach północnych do tego celu służą litery *c, d, e, f, g, a, h*, w południowych zaś zgłoski do (ut), re, mi, fa, sol, la, si. Gamy diatoniczne możemy rozpoczynać nietylko od tonu zasadniczego *c*, lecz także od którejkolwiek z jego wyższych lub niższych oktaw.

Tony tych nowych gam są również oktawami odpowiednich tonów pierwszej gamy i z tego powodu oznacza się je temi samemi literami. Aby jednak módz odróżnić jednoimienne tony, nadano oddzielnym oktawom, z których każda obejmuje 7 tonów, różne nazwy. Oktawę, przypadającą we środku głosu męzkiego nazwano *oktawą małą*, a kolejne jej tony oznaczono małemi literami od *c* do *h*. Oktawa, bezpośrednio wyższa, przypadająca w środku głosu kobiecego, nazywa się *raz przekreśloną*, następna—*dwa razy przekreśloną* i t. d.; tony pierwszej oznacza się przez c', d'.... h', drugiej przez c'', d''.... h'' i t. d. Oktawa, bezpośrednio niższa od małej, nazywa się *oktawą wielką*, tony jej oznacza się dużemi literami od *C* do *H*. Idące za tą ostatnią niższe oktawy nazywamy raz podkreśloną albo *kontraoktawą*, dwa razy podkreśloną albo *subkontraoktawą*, trzy razy podkreśloną i t. d.; litery zaś, oznaczające ich tony podkreślamy raz, dwa, trzy razy i t. d. Kolejne naprzykład oktawy (niższe i wyższe) tonu *c* oznaczamy więc przez $\underline{\underline{\underline{C}}}$, $\underline{\underline{C}}$, $\underline{C}$, C, c, c', c'', c''' i t. d.

Porównywając ze sobą przestanki dwóch obok siebie stojących tonów powyższej gamy diatonicznej, a mianowicie dzieląc każdy stosunek przez poprzedzający go stosunek, widzimy, iż przestanki te nie są równe:

$$\begin{array}{cccccccc} c & d & e & f & g & a & h & c' \\ {}^{9}/_{8} & {}^{10}/_{9} & {}^{16}/_{15} & {}^{9}/_{8} & {}^{10}/_{9} & {}^{9}/_{8} & {}^{16}/_{15}. \end{array}$$

Największy przestanek $^{9}/_{8}$—nazwany *wielkim całym tonem*—powtarza się w gamie 3 razy, mianowicie od *c* do *d*, od *f* do *g* i od *a* do *h;* prawie równy poprzedniemu przestanek $^{10}/_{9}$, zwany *małym całym tonem*, leży między *d* i *e* oraz między *g* i *a*, nareszcie przestanek $^{16}/_{15}$, zwany *półtonem* powtarza się w gamie 2 razy od *e* do *f* i od *h* do *c'*. Pomijając nateraz różnicę między wielkim i małym całym tonem i uważając je za jednakowe, otrzymamy dla rzeczonej gamy następujące przestanki:

$$\begin{array}{cccccccc} c & d & e & f & g & a & h & c' \\ 1 & 1 & {}^{1}/_{2} & 1 & 1 & 1 & {}^{1}/_{2} \end{array}$$

Szereg tonów, następujących po sobie według tego szematu, nazywa się gamą *dur*. Spróbujmy ułożyć taką gamę wychodząc

z kwinty *c*, t. j. z *g* jako z tonu zasadniczego. Gdybyśmy do tego użyli tylko tonów poprzedniej gamy *c-dur*, to otrzymalibyśmy następujący szereg:

g *a* *h* *c'* *d'* *e'* *f'* *g'*
1 1 ½ 1 1 ½ 1

Szereg ten różni się od poprzedniego przestankami między sextą i septimą oraz między septimą i oktawą, t. j. ton *f'* jest o ½ tonu za mały względem *e'* i o ½ tonu za duży względem *g'*. Chcąc więc dla gamy *g-dur* otrzymać taki sam szereg przestanków jak dla gamy *c-dur*, należy *f'* podwyższyć o ½ tonu; podobne podwyższenie tonu oznaczamy przez krzyżyk ♯ i nadajemy takiemu tonowi nazwę, przyłączając do odnośnej litery zgłoskę *is*, w danym więc wypadku otrzymamy ton *fis'*. Gama *g-dur*, mająca takie same przestanki, co i *c-dur*, przedstawia się tedy jak następuje:

g *a* *h* *c'* *d'* *e'* *fis'* *g'*
1 1 ½ 1 1 1 ½

Dla gamy, rozpoczynającej się od kwinty *g*, a więc od *d'* albo od niższej oktawy tego ostatniego tonu, t. j. od *d*, musimy oprócz tonu *f* podwyższyć jeszcze *c'* na *cis'*, gama więc *d-dur* zawiera 2 krzyżyki—*fis* i *cis;* tak samo gama zaczynająca się od następnej kwinty, t. j. od *a*, zawiera 3 krzyżyki – *cis*, *fis* i *gis* i t. d. Gdy przy tem podwyższaniu coraz to nowych tonów przychodzimy nareszcie do *e* i *h*, to podwyższone tony tych ostatnich *eis* i *his* już bardzo mało się różnią od tonów *f* i *c'*. Instrumenty klawiszowe o gotowych już tonach nie dozwalają wcale wyrazić tej różnicy: na fortepianie naprzykład *f* służy zarazem jako *eis*, a *c'* jako *his;* natomiast w instrumentach, których tony muszą dopiero być wytwarzane (np. skrzypce) oraz przy śpiewie tony rzeczone—*eis* i *f* oraz *his* i *c*—są różne, co przy dokładnem wykonywaniu utworów muzycznych zawsze bywa uwzględniane.

Gdybyśmy z tonów gamy *c-dur* ułożyli gamę dla kwarty *c*, t. j. *f* jako primy, to otrzymalibyśmy następujące przestanki:

f *g* *a* *h* *c'* *d'* *e'* *f'*
1 1 1 ½ 1 1 ½

Widzimy, iż przestanek między *a* i *h* jest o $^1/_2$ tonu za duży, zaś między *h* i *c'*—o $^1/_2$ tonu za mały; chcąc przeto otrzymać dla gamy *f-dur* ten sam szereg przestanków, co i dla gamy *c-dur*, należy ton *h* obniżyć o $^1/_2$ tonu; powstający przez to ton nazywa się *b* tak, że gama *f-dur* przedstawia się jak następuje:

f g a b c' d' e' f'
1 1 $^1/_2$ 1 1 1 $^1/_2$

Tak samo, obierając za ton zasadniczy gamy kwartę *f*, t. j. *b*, należy obniżyć ton *e* i t. d. To obniżanie tonów oznaczamy przez t. zw. bemol ♭ i nadajemy obniżonym tonom nazwy, przyłączając do odnośnej litery zgłoskę *es* albo też tylko literę *s;* obniżeniami naprzykład tonów *d*, *e*, *g* będą *des*, *es* i *ges*. I przy obniżaniu, podobnie jak przy podwyższaniu tonów, dochodzimy do takich, które bardzo zbliżają się do tonów, powstających inną drogą, np. *b* i *ais*, *es* i *dis*, *ces* i *h* i t. d., których na instrumentach klawiszowych nie możemy wcale odróżniać. Na fortepianie naprzykład czarny klawisz między *f* i *g* służy do wytwarzania zarówno tonu *fis* jak i *ges*, czarny klawisz między *c* i *d* służy dla tonów *cis* i *des* i t. d.

Gama, powstająca wskutek wstawienia 5 półtonów między tony gamy diatonicznej, obejmująca więc 12 półtonów, nazywa się *chromatyczną*. Na fortepianie wytwarzamy ją, uderzając kolejno klawisze białe i czarne, otrzymujemy wtedy tony *c*, *cis*, *d*, *dis*, *e*, *f*, *fis*, *g*, *gis*, *a*, *ais*, *h*, *c'*, *cis'* i t. d. Gama ta zawiera szereg nowych przestanków, które rozróżniamy jako wielkie i małe. Na szczególną uwagę zasługują tony, powstające wskutek podwyższenia secundy $^9/_8$ i kwinty $^3/_2$ o półton $^{16}/_{15}$. Do tonu zasadniczego są one w stosunkach $^9/_8 \times {}^{16}/_{15}$ czyli $^6/_5$ i $^3/_2 \times {}^{16}/_{15}$ *czyli* $^8/_5$. *Z powodu prostoty tych stosunków, rzeczone tony są* jeszcze zgodne z tonem zasadniczym i, różniąc się bardzo mało od tercyi i sexty, stanowią ich obniżenia, dlatego też nazywamy je *małą tercyą* i *małą sextą*. Gama, w której zamiast tercyi i sexty znajduje się mała tercya i mała sexta, brzmi bardziej ciemno i ponuro, niż gama *dur* i nazywa się *gamą moll*.

Pozostaje nam powiedzieć jeszcze kilka słów o wyrównaniu nastroju różnych tonów. Przypuśćmy, iż zaczynając od c, stroimy fortepian według czystych kwint tak jednak, że za każdym razem, gdy odnośny ton przypada w raz przekreślonej oktawie, bierzemy zamiast niego ton o oktawę niższy: kwinta np. g przypada na d', zamiast tego tonu bierzemy d, kwinta a przypada na e' zamiast tego bierzemy ton e i t. d. Przy tworzeniu więc każdej nowej kwinty, musimy wtedy częstość drgań poprzedniego tonu mnożyć przez $^3/_2$, przy każdem zaś cofaniu się o oktawę, otrzymany rezultat dzielić przez 2. Oznaczywszy częstość drgań tonu c przez 1, otrzymamy dla innych tonów następujące liczby drgań:

$$c = 1$$
$$g = \frac{3}{2}$$
$$d' = \frac{9}{4}\ d = \frac{9}{8}$$
$$a = \frac{27}{16}$$
$$e' = \frac{81}{32},\ e = \frac{81}{64}$$
$$h = \frac{243}{128}$$
$$fis' = \frac{729}{256},\ fis = \frac{729}{512}$$
$$cis' = \frac{2187}{1024},\ cis = \frac{2187}{2048}$$
$$gis = \frac{6561}{4096}$$
$$dis' = \frac{19683}{8192},\ dis = \frac{19683}{16384}$$
$$ais = \frac{59049}{32768}$$
$$eis' = \frac{177147}{65536},\ eis = \frac{177147}{131072}$$
$$his = \frac{531441}{262144}$$

Ponieważ jednak his jest zarazem c', postępując więc rzeczoną drogą, otrzymalibyśmy dla oktawy c, t. j. dla tonu c' częstoś drgań $\frac{531441}{262144}$, to jest więcej niż 2 razy tak dużą, jak dla c, ton ten byłby tedy za wysoki. Chcąc przeto otrzymać czystą oktawę

i jednocześnie równomiernie traktować wszystkie kwinty, musimy każdą kwintę brać nieco niżej, mianowicie zamiast odpowiadającego jej przestanku $^3/_2$ czyli 1,5, należy wziąć nieco mniejszy stosunek 1,4983, zwany stosunkiem *temperowanej kwinty*. Zmiany, jakie należy porobić w różnych tonach, aby otrzymać jak najczystsze przestanki, nazywamy temperaturą. W dzisiejszej muzyce powszechnie używają *temperatury jednostajnej*, w której wszystkie oktawy są naturalnie czyste (t. j. każdej bezpośrednio wyższej oktawie jakiegoś tonu odpowiada dokładnie 2 razy większa częstość drgań, niż temu tonowi) i 12 tonów gamy chromatycznej mają równe przestanki. Przy takim nastroju, bardzo łatwo przechodzić z jednej tonacyi w inną, nie zmieniając przestanków kwart, kwint i t. d.

Znając wartości różnych przestanków, możemy łatwo obliczyć absolutne częstości drgań dla wszystkich tonów muzycznych, jeżeli dana jest absolutna częstość drgań, odpowiadająca jednemu, jakiemukolwiek tonowi całej skali. Przyjęto stroić różne instrumenty muzyczne według tonu a', którego wysokość oznacza się za pomocą stroika i syreny. Jednakże wysokość tonu a' stroika w różnych miejscach i czasach była i jest rozmaitą. We Francyi od r. 1859 postanowiono, ażeby liczba drgań stroika o tonie a' wynosiła 435. Według tego nastroju otrzymujemy naprzykład dla tonu c oraz niższych i wyższych jego oktaw następujące częstości drgań:

$\underline{\underline{C}}$	$\underline{C}$	C	c	c'	c''	c'''	c''''
16,31	32,62	65,25	130,5	261	522	1044	2088

§ 6. Optyczne metody badania drgań dźwiękowych.

Oprócz wymienionych w 1 § niniejszego rozdziału metod badania drgań dźwiękowych, istnieje jeszcze jedna—optyczna metoda, zbyt ważna, abyśmy ją mieli tu pominąć, zobaczymy bowiem, że przy jej pomocy nawet głuchy może nastrajać widełki do *unissono* albo do jakiegobądź dowolnego interwalu z taką do-

kładnością, jakiejby nie mógł osiągnąć człowiek, obdarzony najdelikatniejszym nawet słuchem, lecz przytem ślepy.

Za właściwego twórcę tej metody uważać należy fizyka angielskiego Tomasza Younga, który unaoczniał węzły i pętlice drgającego wypolerowanego drutu, rzucając na różne jego punkty silne światło. Punkty te opisują wtedy w powietrzu różne płomieniste linie, które wydają się nam ciągłemi dlatego, że oko, podobnie jak i ucho, zachowuje przez pewien czas doznane wrażenie, wskutek czego oddzielne obrazy świecącego punktu, szybko zmieniającego swe położenie w przestrzeni, zlewają się dla nas w jednę ciągłą linię, tak samo jak szybko następujące po

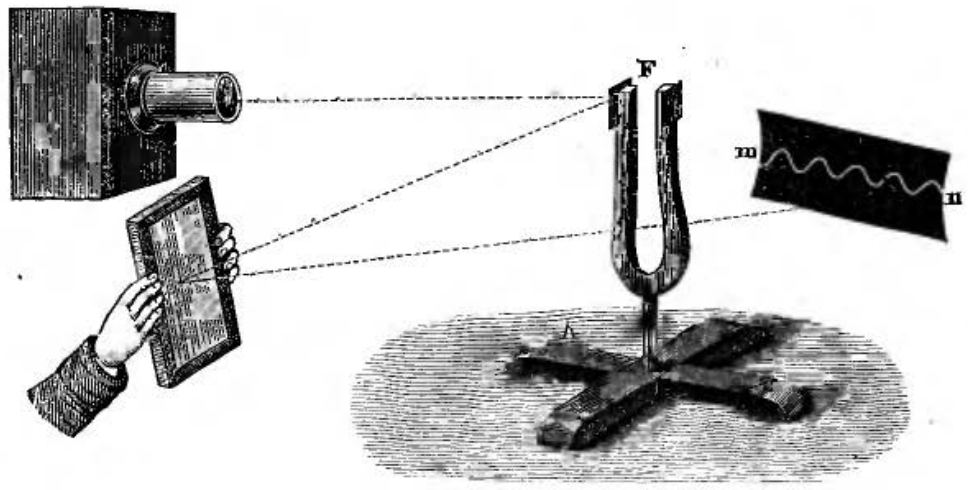


Fig. 219. Zasada optycznej metody Lissajous, służącej do badania drgań stroików.

sobie uderzenia zlewają się dla ucha w ciągły ton. Na tej samej zasadzie polega wynaleziony przez Wheatstona w r. 1827 przyrząd, zwany *kaleidofonem*. Składa się on z szeregu elastycznych sztab metalowych o prostokątnym przekroju, przytwierdzonych w jednym końcu i opatrzonych na drugim swobodnym końcu posrebrzoną kulką, na którą rzucamy silne światło. Gdy przez stosowne uderzenia wprawimy podobną sztabę w poprzeczne drgania tak, aby odbywały się one jednocześnie w kierunkach obu średnic jej przekroju, wtedy świecąca kulka opisuje węzłowatą linię, której kształt zmienia się wraz ze zmianą stosunku częstości drgań, wykonywanych przez sztabę w jednym i drugim kierunku.

W nowszych czasach Lissajous znakomicie ulepszył tę metodę, używając jako ciał dźwięczących—dużych stroików o ramionach nie równoległych, lecz górnemi końcami nieco nachylonych ku sobie. Niejeden zapewne z czytelników śledził przesuwanie się świetlnego punktu po ścianie lub suficie, gdy obracał on zlekka zwierciadło, na które padała wiązka promieni słonecznych. Otóż proste to doświadczenie stanowi podstawę optycznej metody Lissajous, którą dokładniej unaocznia figura 219. Zauważywszy, że odbijanie się światła podlega temu samemu prawu, co i odbijanie się dźwięku (patrz str. 242), łatwo zrozumiemy doświadczenia, jakie można wykonywać ze stroikiem *o nachylonych nieco ku sobie ramionach, z których jedno opatrzone* jest małem zwierciadłem *F*, drugie zaś, dla równowagi, obciążone jest stosownym balastem. Gdy promień światła lampy, skierowany na zwierciadło *F*, zostaje przez nie odrzucony ku drugiemu zwierciadłu, które trzymamy w ręku, i gdy po odbiciu od tego ostatniego promień pada na ciemny ekran, wtedy mogą zajść różne wypadki, z których rozważymy tylko 4 następujące: 1) Gdy widełki oraz zwierciadło, trzymane w ręku, które odtąd będziemy nazywali dużem, zostają w spoczynku, wtedy na ekranie otrzymujemy jeden świetlny punkt, a raczej mały świetlny krążek. 2) Gdy stroik, a wraz z nim zwierciadełko *F* drga, duże zaś zwierciadło nie zmienia swego położenia, na ekranie powstaje prosta pionowa świetlna linia, której rozmiary, przy stałej odległości ekranu od widełek, zależą tylko od amplitudy drgania tych ostatnich. 3) Jeżeli podczas drgań stroika będziemy zlekka obracali duże zwierciadło naokoło poziomej osi, to na ekranie również utworzy się pionowa linia prosta, dłuższa jednak albo krótsza, niż w poprzednim wypadku, zależnie od tego, czy ruchy dużego zwierciadła są więcej lub mniej zgodne z ruchami zwierciadełka *F*. 4) Gdy natomiast podczas drgań stroika będziemy duże zwierciadło zlekka obracali naokoło pionowej osi, naprzykład z lewa na prawo, to na ekranie otrzymamy poziomą falową linię *m n*, której każde dwa wygięcia odpowiadają jednej całkowitej oscylacyi stroika. Ten sam rezultat nastąpi także w razie, gdy zamiast obracać duże zwierciadło, będziemy przesuwali sam ekran z prawa na lewo.

2-gi i 3-ci z wymienionych wypadków możemy także wywołać, jeżeli, zamiast trzymać zwierciadło w ręku, przyczepimy je również do stroika, który względem drugiego stroika może zajmować jakiekolwiek położenie. W ten sposób Lissajous kombinował dwa drgające ruchy, równoległe albo prostopadłe do siebie, o jednakowym lub różnym peryodzie drgania i, dzięki takiemu urządzeniu, zdołał on kreślić płomieniste linie, charakteryzujące akordy, różne interwale muzyczne, współdźwięki, rozdźwięki, t. zw. kołysania i t. d.

Dla dokładniejszego przedstawienia poniżej omówionych doświadczeń, musimy poprzednio zwrócić uwagę na pewne zjawisko i wprowadzić nowy termin, którego dotąd nie używaliśmy. Gdy ciało jakieś, np. wahadło oscyluje, wtedy przy każdej całkowitej jego oscylacyi rozróżniamy 4 główne położenia, zwane *fazami*, przez które wahadło przechodzi kolejno i w jednakowych odstępach czasu, równych $^1/_4$ peryodu całej oscylacyi. Z początku np. znajduje się ono: 1) w skrajnem lewem położeniu, poczem oscylując na prawo, mija 2) położenie równowagi, następnie dosięga 3) skrajnego prawego położenia, poczem oscyluje na lewo, znowu przechodząc przez 4) położenie równowagi i dosięgłszy po raz drugi skrajnego lewego położenia, kończy pierwszą oscylacyę, po której następuje druga, trzecia i t. d. z takiemiż fazami. W podobny sposób możemy rozróżnić 8 faz, następujących po sobie w jednakowych odstępach czasu, równych $^1/_8$ peryodu całej oscylacyi. Gdy wprawiamy w kołysania dwa wahadła równej długości, a więc o jednakowym peryodzie oscylacyi, wtedy może się zdarzyć, że oba znajdują się w jednakowych fazach, t. j. że oba naprzykład oscylując w tę samą stronę, przechodzą jednocześnie przez położenie równowagi, albo że oba jednocześnie dosięgają skrajnego lewego lub prawego położenia; powiadamy wtedy, że różnica ich faz równa się 0. Wahadła atoli mogą znajdować się także we wręcz przeciwnych fazach, gdy oba naprzykład oscylując w kierunkach przeciwnych, jednocześnie przechodzą przez położenie równowągi, albo gdy jedno z nich dosięga skrajnego lewego położenia, drugie zaś jednocześnie dosięga skrajnego prawego, lub naodwrót; wypadek ten wy-

rażamy, mówiąc, że różnica faz wahadeł równa się $^1/_2$ całej oscylacyi. Nareszcie jedno wahadło może wyprzedzać drugie o $^1/_8$, $^1/_4$, $^3/_8$, $^5/_8$, $^3/_4$ lub $^7/_8$ oscylacyi i wtedy tym samym ułamkiem oznaczamy różnicę ich faz. Po krótkim namyśle przekonamy się, że jeżeli wahadła rozpoczynają swe kołysania od tej samej fazy, to w wypadku *zupełnej* zgodności ich peryodów oscylacyi, będą się one zawsze znajdowały w jednakowych fazach. Przeciwnie, gdy peryody oscylacyi nie są zupełnie równe, wtedy różnica faz między obu wahadłami, równająca się w początku oscylacyi 0, staje się coraz większą i wreszcie równą 1 całej oscylacyi. W tym ostatnim momencie otrzymamy znowu koincydencyę (1) faz, (dwa bowiem wahadła, różniące się o *całą* liczbę oscy-

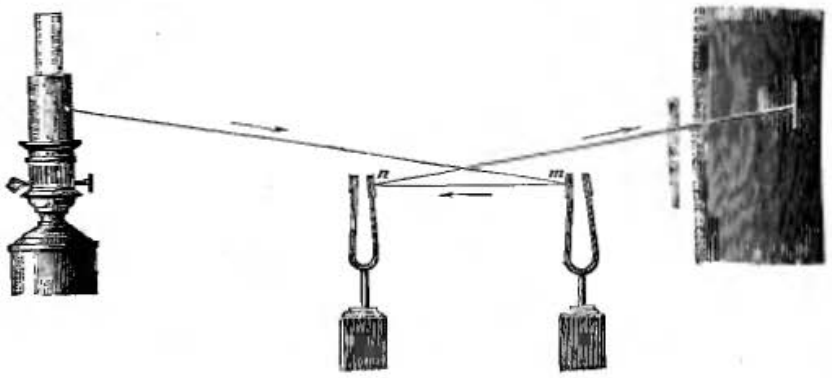


Fig. 220. Złożenie 2 drgających ruchów o kierunkach równoległych.

lacyj, znajdują się oczywiście w jednakowych fazach), która jednak w następnej chwili zostaje w powyższy sposób naruszona i t. d. To, cośmy powiedzieli o kołysaniach wahadeł, stosuje się w równej mierze do każdego innego ruchu oscylacyjnego, do cząstek falującej wody, do drgań strun, słupów powietrza, widełek strojowych i t. d.

W celu skombinowania oscylacyj, zachodzących w kierunkach równoległych, ustawia się dwa stroiki, opatrzone zwierciadłami, jeden naprzeciw drugiego, jak to pokazuje fig. 220. Wiązka promieni światła, wysyłanego przez stosowną lampę, po

(1) Patrz metodę koincydencyj w rozdziale o wahadle, str. 47.

odbiciu się od obu zwierciadeł m, n i po przejściu przez zbierającą soczewkę, kreśli na ekranie obraz małego otworu lampy, z którego wychodzi światło.

Przypuśćmy, że peryody drgań stroików są jednakowe. Gdy oba są w spoczynku, wtedy na ekranie powstaje świetlny krążek; jeżeli jeden tylko stroik drga, rzeczony obraz wydłuża się w pionową prostą linię; wprawmy nareszcie oba stroiki w drgania, a otrzymamy na ekranie również prostą linię, która będzie najdłuższą w razie, gdy stroiki znajdują się w jednakowych fazach (1), najkrótszą zaś—przy wręcz przeciwnych fazach oscylacyi. Z tego, cośmy wyżej powiedzieli o wahadłach, wynika

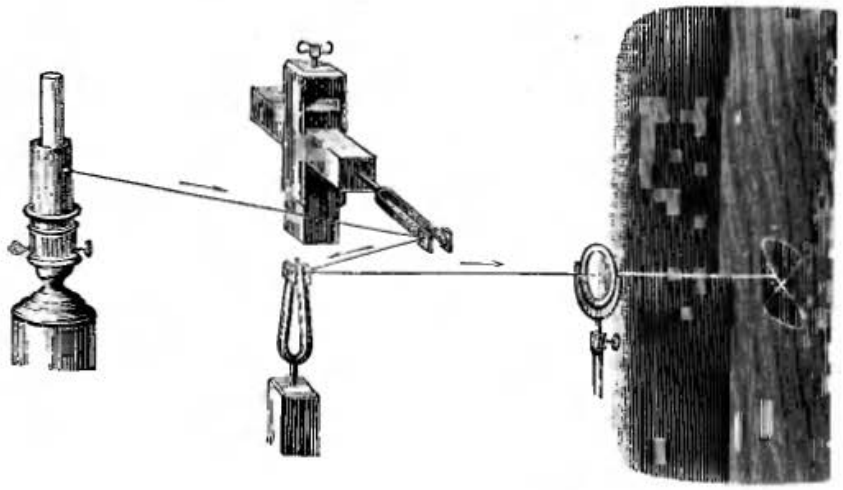


Fig. 221. Złożenie 2 drgających ruchów o kierunkach prostopadłych do siebie.

nadto, że w razie zupełnie jednakowych peryodów drgania obu stroików, długość świetlnej linii na ekranie pozostaje stałą dopóty, dopóki amplitudy ich oscylacyj się nie zmieniają. Jeżeli natomiast przez przyklejenie kawałka wosku przestroimy jeden stroik tak, ażeby spóźniał się on nieco względem drugiego, wtedy długość świetlnej linii, rzuconej na ekran, peryodycznie się zmienia, stając się największą przy każdej koincydencyi faz, najmniejszą zaś przy każdem przeciwieństwie faz oscylacyi obu

(1) To jest, gdy ramiona każdego stroika jednocześnie zbliżają się ku sobie i jednocześnie oddalają się od siebie, czyli gdy ramię m oscyluje na prawo, to jednocześnie ramię n drga na lewo i naodwrót.

stroików. Zobaczymy później, jak skorzystano z tego przy optycznem przedstawieniu t. zw. kołysań dźwięku.

Przy powyższem urządzeniu otrzymalibyśmy prostą pionową linię świetlną i wtedy także, gdyby częstość drgań jednego stroika była 2, $^3/_2$, $^5/_4$ i t. d. razy większa, niż drugiego, to jest gdyby tony ich różniły się o oktawę, kwintę, tercyę i t. d. W ten sposób trudno więc byłoby rozróżniać interwale muzyczne. Rzecz się jednak zmieni, gdy stroiki umieścimy prostopadle jeden do drugiego tak, jak to pokazuje fig. 221 (str. 336). Jeżeli przy takim układzie drga tylko stroik poziomy albo tylko stroik pionowy, widzimy na ekranie prostą świetlną linię, w pierwszym wypadku — poziomą, w drugim zaś—pionową. Gdy zaś oba stroiki drgają, wtedy promień światła, odbity od obu zwierciadeł, drgając jednocześnie w kierunku pionowym i poziomym, kreśli na ekranie pochyłą prostą linię, albo też krzywą, której kształty zależą od stosunku częstości drgań użytych stroików.

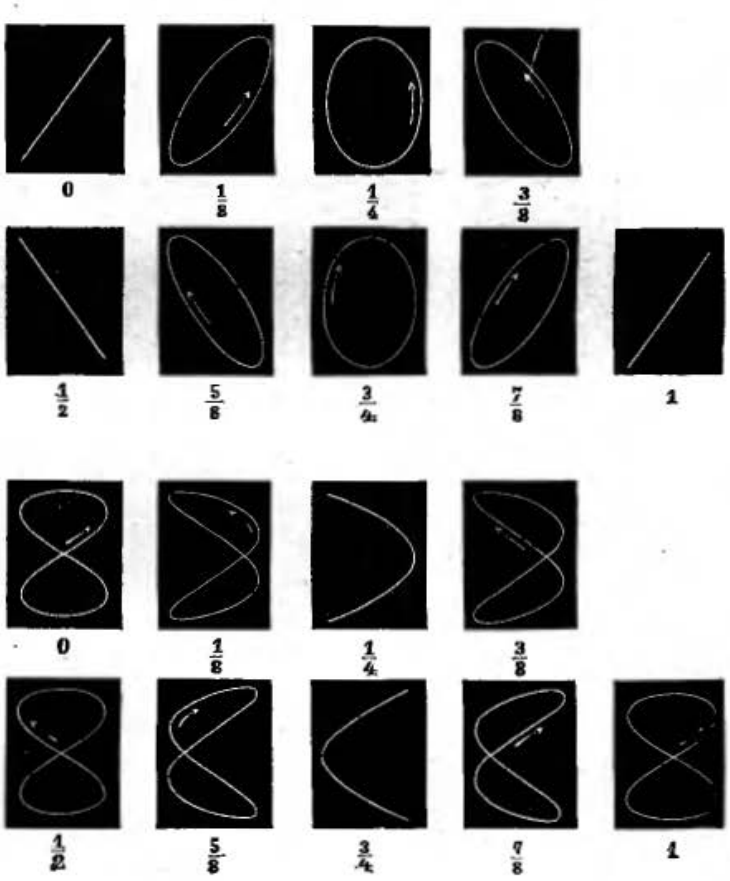


Fig. 222 i 223. Figury świetlne Lissajous dla primy (222) i oktawy (223).

Figura 222 przedstawia różne kształty obrazu świetlnego, rzuconego na ekran w wypadku, gdy stroiki—poziomy i pionowy brzmią w *unissono*. Jeżeli różnica ich faz równa się 0, wtedy odbity od zwierciadeł obu stroików promień świetlny kreśli na

ekranie pochyłą prostą linię, stanowiącą przekątnę prostokąta, którego boki równają się amplitudom drgań stroików. Linia ta przechyla się na lewo przy różnicy faz równej $^1/_2$ oscylacyi, przy innych zaś różnicach faz przyjmuje postać nachylonej lub prostej elipsy, która nareszcie przy różnicy faz, równej 1 całej oscylacyi, znowu przechodzi w pierwotną prostą linię. Kształt świetlnej linii warunkuje się jedynie początkową różnicą faz stroików i jeżeli peryody ich drgań są *dokładnie równe*, różnica ta stale się utrzymuje, świetlna zaś linia nie zmienia swego kształtu przez cały czas oscylacyi stroików i staje się tylko coraz mniejszą w miarę zmniejszania się amplitud ich drgań. W razie natomiast,

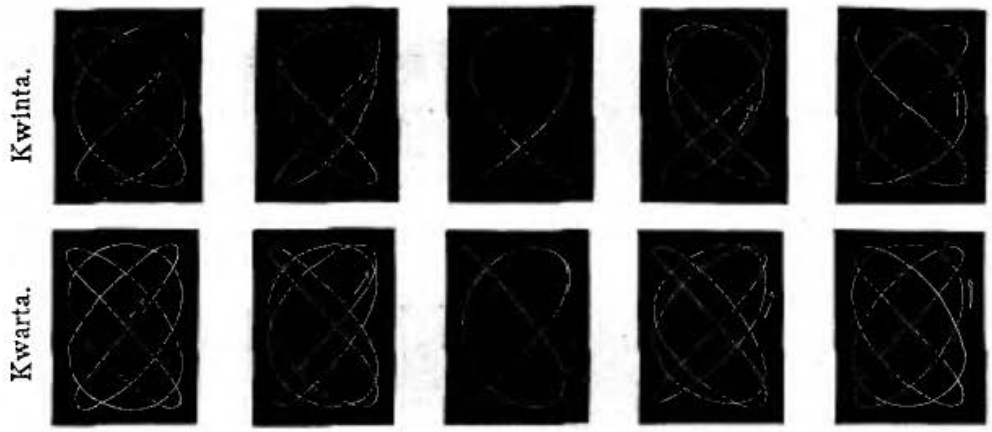


Fig. 224. Figury świetlne Lissajous dla kwinty i kwarty.

gdy stroiki drgają niezupełnie zgodnie, gdy np. przez przyklejenie kawałka wosku do jednego stroika, przestroimy go nieco względem drugiego, początkowa różnica faz nie może się utrzymać, lecz przybiera coraz to inną wartość, wskutek czego obraz świetlny zmienia się, przyjmując kolejno kształty, przedstawione na fig. 222.

Fig. 223 przedstawia różne kształty obrazu świetlnego na ekranie, gdy stroik pionowy wykonywa w tym samym czasie 2 razy więcej drgań, niż poziomy, t. j. gdy pierwszy wydaje ton o oktawę wyższy, niż drugi. Cyfry, pomieszczone pod oddzielnemi liniami, oznaczają odpowiadające im różnice faz stroików. Na fig. 224 widzimy różne kształty świetlnych linij dla kwinty

(gdy pionowy stroik wykonywa w tym samym czasie $^3/_2$ razy więcej drgań, niż poziomy) i dla kwarty (gdy stosunek częstości drgań stroika pionowego do częstości drgań poziomego jest jak 4 : 3). Tak samo każdy inny interwal muzyczny charakteryzuje obraz świetlny odmiennego kształtu, wskutek czego możemy za pomocą opisanej tu metody oznaczyć stosunek częstości drgań dwóch stroików daleko dokładniej, niż przy posługiwaniu się samym tylko słuchem, najbardziej nawet czułym na różnice wysokości tonów. Jeżeli np. dwa stroiki, brzmiące w *unisono*, dają

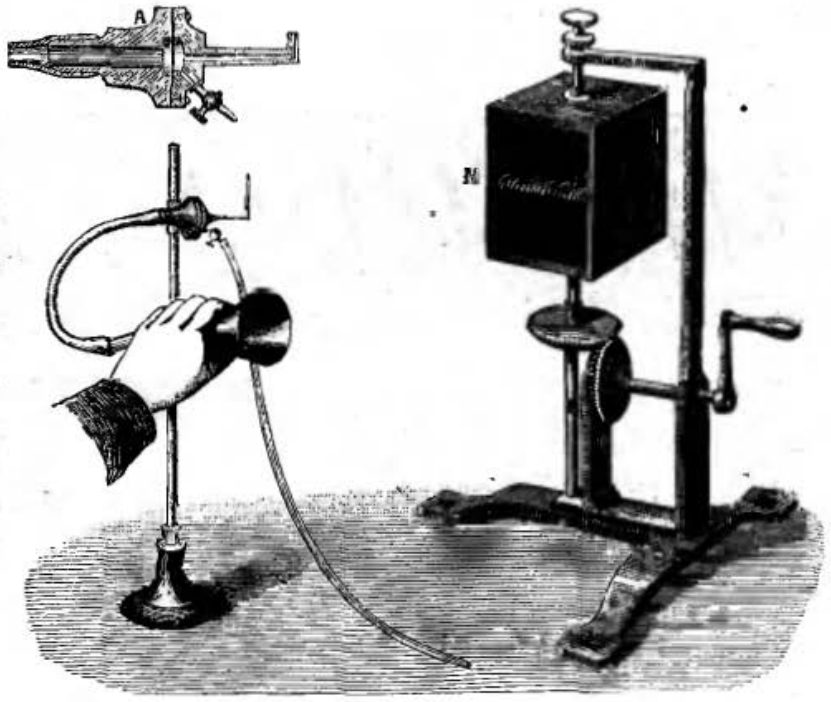


Fig. 225. Zasada optycznej metody Koeniga dla badania drgań gazu.

jednę z linij, przedstawionych na fig. 222, która zawsze zachowuje swój kształt, zależny od różnicy faz stroików, to wystarcza cokolwiek ogrzać jeden z nich, aby linia ta po kolei przyjmowała postacie, nakreślone na rzeczonej figurze: doskonałość współdźwięku stroików została naruszona, chociaż ucho nie jest w stanie odczuć tak drobnej różnicy.

Opisana wyżej optyczna metoda badania drgań dźwiękowych, dająca się stosować tylko do poprzecznie drgających ciał stałych, znajduje uzupełnienie w pięknej metodzie Koeniga,

dozwalającej optycznie przedstawiać drgania słupów gazu i polegającej na tem, że drgania takie udzielone zostają płomykom palącego się gazu oświetlającego, które migotaniem swem zdradzają wysokość tonu, a raczej interwal jego względem innego tonu— zasadniczego. W tym celu dzieli się pudełko za pomocą cienkiej elastycznej błony na 2 przedziały (fig. 225), z których jeden (na figurze prawy), opatrzony palnikiem, zasilany jest gazem oświetlającym, doprowadzanym ze zbiornika przez rurę kauczukową, drugi zaś (na fig. lewy) łączy się za pomocą kauczukowej rury z lejkowatem naczyniem, przed otworem którego śpiewamy tę lub ową nutę. Pionowy przekrój pudełka przedstawiony jest

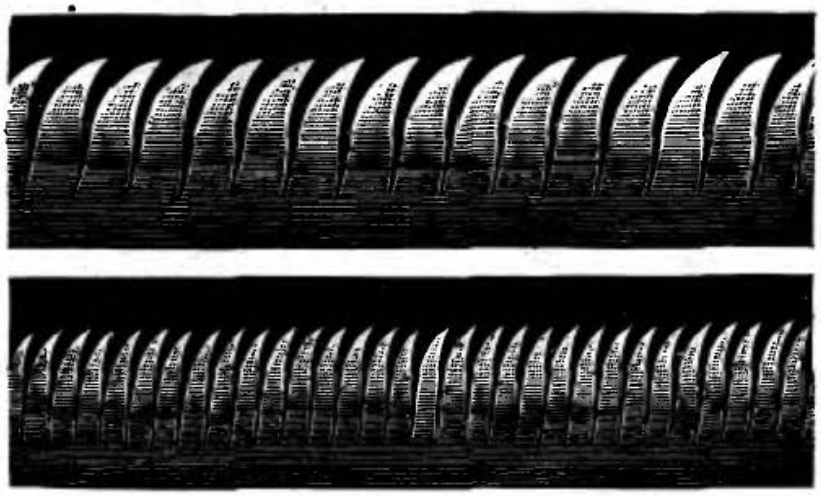


Fig. 226. Obrazy płomieni manometrycznych dla primy i oktawy.

oddzielnie w *A*. Zgęszczenia fal dźwiękowych, wpływających do lewego przedziału pudełka, wyginają rzeczoną błonę na prawo i zgęszczają gaz, znajdujący się w prawym przedziale; podczas rozrzedzeń zaś fal dźwiękowych, błona wygina się na lewo, przez co rzeczony gaz zostaje rozrzedzony tak, że płomień (1) palnika wydłuża się i kurczy rytmicznie ze zgęszczeniami i rozrzedzeniami fal dźwiękowych, najdokładniej w ten sposób odtwarzając drgania brzmiącego ciała lotnego. Dla lepszego unaocznienia

(1) Płomienie takie nazywają się manometrycznemi; posłużyliśmy się już niemi do wykazania węzłów i brzuszków w piszczałce (patrz str. 318).

tych zmian płomyka, Koenig używa tego samego sposobu, co i Lissajous: ustawia on mianowicie przed płomykiem zwierciadło *M* o 4 ścianach, które za pomocą systemu kół zębatych można wprawiać w mniej lub więcej szybki, lecz jednostajny ruch obrotowy. Czyniąc to, widzimy w zwierciedle szereg płomienistych

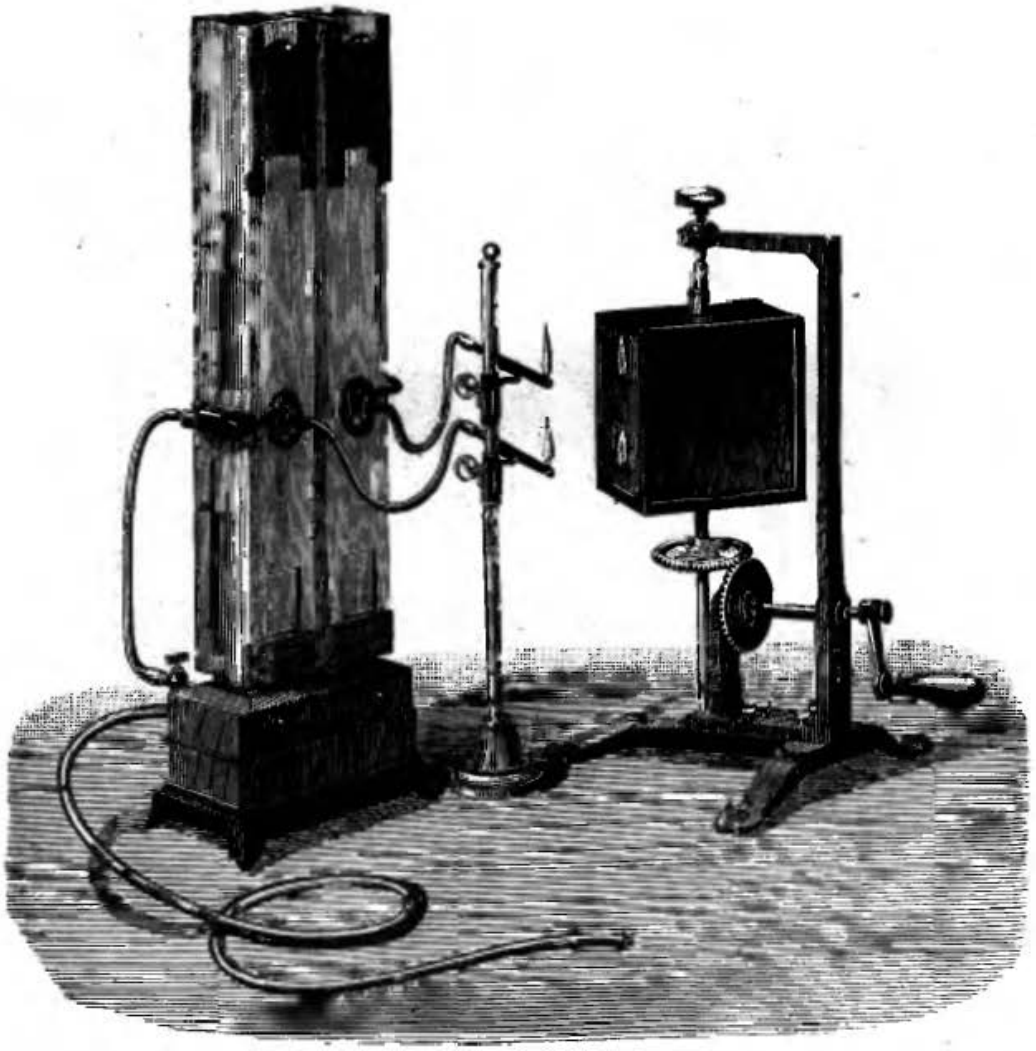


Fig. 227. Optyczne przedstawienie drgań powietrza w piszczałkach.

zębów, przedzielonych ciemnemi lukami, albo też świetlną smugę, której górny brzeg rozdzielony jest na zęby, znajdujące się w równych od siebie odstępach. Jeżeli w pobliżu otworu lejkowatego naczynia zaśpiewamy jakąś nutę, a potem jej oktawę, to przy obracaniu zwierciadła płomieniste obrazy 2 tych tonów przedstawią się tak, jak pokazuje fig. 226: na każdy świetlny ząb dla primy przypadają 2 świetlne zęby dla oktawy.

Dla optycznego przedstawienia drgań powietrza w piszczałkach, Koenig łączy z powyżej opisanemi pudełkami te miejsca piszczałek, w których przypadają węzły, palniki zaś, komunikujące z pudełkami za pomocą rurek kauczukowych, ustawia jeden ponad drugim tak, że w zwierciedle widzimy jednocześnie obrazy wszystkich,—w wypadku, przedstawionym na fig. 227 dwóch—płomieni. Gdy piszczałki brzmią w *unissono*, wtedy przy obracaniu zwierciadła widzimy dwie świetlne smugi o jednakowej liczbie zębów; w wypadku, gdy jedna piszczałka daje oktawę tonu drugiej, otrzymujemy dwie świetlne smugi, jednę po nad drugą, takie, jak pokazuje fig. 226; tak samo, gdy jedna z piszczałek

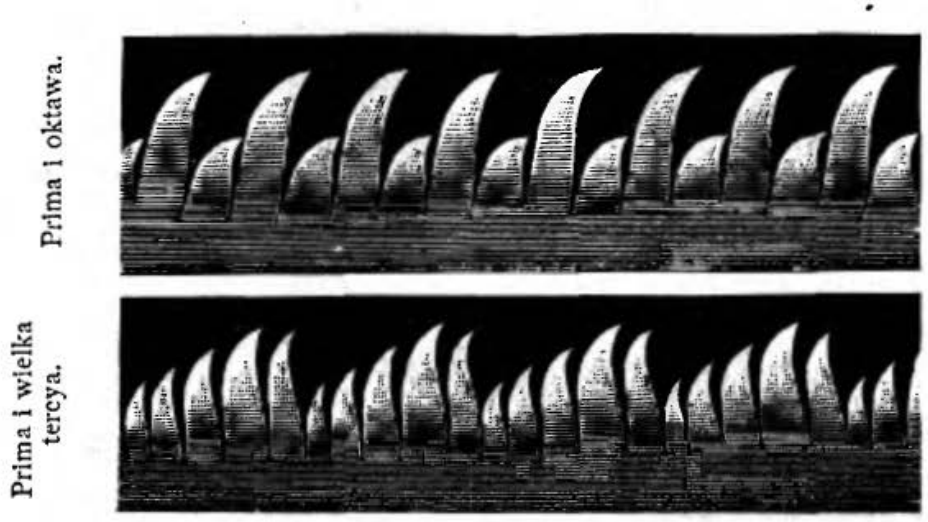


Fig. 228. Obrazy płomieni manometrycznych dla primy i oktawy oraz dla primy i tercyi.

daje ton o kwintę wyższy, niż ton drugiej piszczałki, wtedy na każde 2 świetlne zęby smugi, odpowiadającej tonowi tej ostatniej, otrzymamy 3 zęby dla tonu pierwszej piszczałki i t. d.

Jeszcze lepiej można porównywać z sobą wysokości tonów dwóch piszczałek, jeżeli połączymy obie rurki kauczukowe, wychodzące z ich pudełek, z jednym i tym samym palnikiem. Gdy obie piszczałki brzmią, wtedy płomień tego palnika drga zgodnie z oscylacyami powietrza, zawartego w jednej i drugiej piszczałce i otrzymujemy wtedy przy obracaniu zwierciadła jednę tylko świetlną smugę, której zazębienia zależą od stosunku częstości drgań obu piszczałek. Gdy np. jedna z nich daje ton o oktawę

wyższy, niż druga, to otrzymujemy smugę świetlną, w której pomiędzy każdemi 2 dłuższemi zębami przypada jeden krótszy; gdy zaś tony piszczałek różnią się o tercyę, to odnośna smuga świetlna składa się z grup o 5-ciu dłuższych i krótszych zębach (fig. 228).

ROZDZIAŁ IV.

Zasadnicze zjawiska fal dźwiękowych.

§ 1. Interferencya dźwięku.

Wykład nasz teoryi zjawisk dźwiękowych byłby niezupełny, gdybyśmy nie wyłuszczyli jeszcze jednego punktu, dotyczącego pytania, w jaki sposób dwa albo więcej systemów fal dźwiękowych mogą jednocześnie rozchodzić się w powietrzu, nie przeszkadzając sobie wzajemnie i nie wytwarzając chaosu. Czem się to dzieje, że podczas koncertu np., gdy najrozmaitsze instrumenty przesyłają nam fale dźwiękowe, krzyżowanie się tych ostatnich zlewa się jednak dla naszego ucha w harmonię, że możemy nawet odróżniać dźwięki oddzielnych instrumentów. Bracia Bernouilli i Euler rozstrzygnęli to pytanie na drodze teoretycznej, wykazując, że w jednym i tym samym środku mogą jednocześnie rozprzestrzeniać się i krzyżować z sobą różne ruchy oscylacyjne, nie przeszkadzając sobie wzajemnie. Nie możemy tu jednak przytoczyć matematycznych wywodów tych uczonych, nie posiadamy nadto żadnego sposobu unaoczniania zawiłych ruchów powietrza podczas krzyżowania się w niem różnych systemów fal. Uciekamy się przeto do procesu, analogicznego z rozprzestrzenianiem się dźwięku, mianowicie do rozchodzenia się i krzyżowania fal na powierzchni cieczy, dającego się już łatwo śledzić gołem nawet okiem.

Gdy na spokojną powierzchnię wody rzucamy 2 kamienie na niewielkiej od siebie odległości, wtedy wokoło każdego z punktów spadku kamieni powstaje system współśrodkowych, pierścieniowatych fal, z których każda składa się z wyniesienia i zagłę-

bienia, czyli *góry* i *dołu*. Po pewnym czasie, rozprzestrzeniające się coraz dalej fale obu systemów stykają się i zachodzą jedne na drugie, rozdzielając powierzchnię wody pomiędzy obu punktami spadku na małe wyniesienia i zagłębienia. Przypuśćmy, że amplitudy drgań cząstek wody w obu systemach fal są jednakowe; jakiż będzie skutek ich krzyżowania się? Tam, gdzie góra

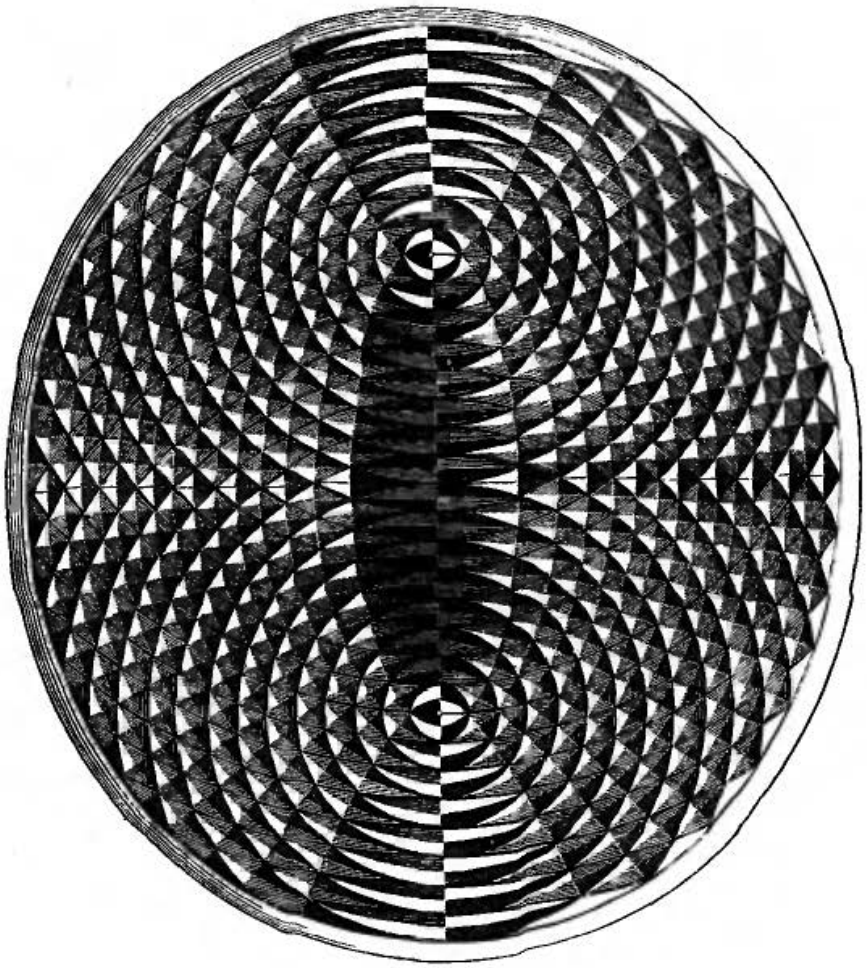


Fig. 229. Krzyżowanie się fal na powierzchni rtęci.

jednej fali zejdzie się z górą drugiej fali, woda podniesie się na podwójną wysokość, tam zaś, gdzie dół zejdzie się z dołem, zagłębienie będzie dwa razy większe, niż przy pojedyńczej fali; tam nareszcie, gdzie góra jednej fali zejdzie się z dołem drugiej, woda pozostanie na zwykłym swym poziomie. Widzimy, że oddzielne cząstki wody doznają jednocześnie impulsów, skierowa-

nych w tę samę stronę, w górę lub na dół, albo też w przeciwne strony; w pierwszym wypadku, zwanym koincydencyą, impulsy wzajemnie się wspomagają i odnośna cząstka wody wskutek tego silniej się podnosi albo obniża, w drugim zaś, zwanym interferencyą, impulsy całkowicie albo częściowo się zobojętniają i odnośna cząstka wody albo wcale, albo tylko nieznacznie wznosi się lub obniża. Rezultat ten *superpozycyi* czyli nakładania się drgań wyrażamy mówiąc, że *wypadkowy ruch każdej oddzielnej cząstki równa się sumie albo różnicy ruchów składowych.* Jestto ogólne prawo krzyżowania się fal, stosujące się zarówno do falowania wody, jak i rozchodzenia się dźwięku, światła, albo fal elektrycznych. I gdybyśmy zamiast 2, rzucili na wodę 10, 100 i więcej kamieni, to wypadkowy rezultat licznych współczesnych impulsów, nadawanych cząstkom wody, przekraczałby być może granice naszego postrzegania, lecz zawsze podlegałby rzeczonemu prawu.

Zjawisko krzyżowania się fal otrzymujemy także przy spotykaniu się fal postępowych z odbitemi; przedstawia się ono najwyraźniej na powierzchni rtęci. Fig. 229 daje nam zaledwie słabe wyobrażenie o piękności tego zjawiska: Jeżeli naczynie eliptycznego kształtu napełnimy rtęcią i spuścimy kroplę tej cieczy na punkt, w którym przypada jedno z ognisk elipsy, to naokoło tego punktu powstaną pierścieniowate fale, które, rozchodząc się na wszystkie strony, odbijają się od ścian naczynia i koncentrują w drugiem ognisku, z którego znowu się rozchodzą w postaci pierścieni, łączą w pierwszem ognisku i t. d., dopóki spuszczamy krople na jedno z ognisk. Pomimo krzyżowania się fal, wychodzących z rzeczonych punktów, możemy doskonale rozróżnić oba systemy fal.

Podobnie jak ciecze, tak i powietrze może przejmować naraz wiele ruchów oscylacyjnych i przeprowadzać drgania chociażby 1000 jednocześnie brzmiących instrumentów. Gdy próbujemy unaocznić sobie zachodzące przytem ruchy atmosfery, to wyobraźnia odmawia nam posłuszeństwa; pomimo to jednak powyższe prawo zachowuje swą siłę: Wypadkowy ruch każdej oddzielnej cząstki powietrza równa się sumie oddzielnych jednokierunko-

wych, albo różnicy różnokierunkowych ruchów składowych i może być rozłożony tylko na te ruchy składowe, z których powstał. Co zaś najbardziej zadziwia, to okoliczność, że pomimo, iż na ucho działa tylko słup powietrza o średnicy zaledwie kilku milimetrów, możemy jednak wyodrębniać oddzielne systemy fal dźwiękowych i przy pewnej uwadze i wprawie możemy odróżniać pojedyńcze tony.

Rozważmy teraz nieco bliżej różne wypadki krzyżowania się fal. Wprawmy w drgania stroik, który dla odróżnienia od innego nazwijmy *A:* przesyła on przez powietrze szereg fal dźwiękowych. Ustawmy za nim inny drgający stroik—*B*, wtedy wychodzące z tego ostatniego fale będą przeciągały przez powietrze, rozfalowane już przez drgania pierwszego stroika. Otóż nietrudno pojąć, iż drgania obu stroików mogą zachodzić w ten sposób, że zgęszczenia fal jednego z nich zlewają się ze zgęszczeniami fal drugiego i że to samo zachodzi z rozrzedzeniami ich fal, będziemy wtedy mieli koincydencyę. Jeżeli wypadek ten ma miejsce, to oba stroiki wzajemnie się wspomagają i zarówno zgęszczenia, jak i rozrzedzenia powietrza będą daleko większe, niż w razie drgania jednego tylko stroika. Ponieważ zaś natężenie tonu zależy właśnie, jak wiemy, od wielkości tych zgęszczeń i rozrzedzeń, przeto dwa jednocześnie brzmiące stroiki w przyjętym tu wypadku dają ton o wiele intensywniejszy, niż jeden drgający stroik. Łatwo jednak zrozumieć, iż może zajść także taki wypadek, że gdy jeden z drgających stroików powoduje zgęszczenie, to drugi wywołuje rozrzedzenie, albo innemi słowy, gdy cząstki powietrza wskutek drgań jednego stroika usiłują posuwać się naprzód, to jednocześnie wskutek drgań drugiego stroika usiłują one cofać się w tył tak, że nastąpi interferencya. Jeżeli siły, działające na rzeczone cząstki w kierunkach wręcz przeciwnych, są sobie równe, wtedy cząstki te nie posuną się ani naprzód, ani w tył i w rezultacie tego nastąpi spoczynek powietrza, odpowiadający milczeniu, to jest brakowi wszelkiego dźwięku. Można tedy przez dodanie tonu jednego stroika do tonu drugiego wywołać milczenie. Zjawisko interferencyi lepiej, niż każde inne, charakteryzuje ruch falowy. Zoba-

czymy w następnej księdze, że przez dodanie światła do światła można w pewnych warunkach wytworzyć ciemność i rezultat ten stanowi jeden z najgłówniejszych dowodów na korzyść teoryi falowania światła. Prawie w tym samym czasie, gdy rozpoczęliśmy opracowanie niniejszego dzieła, wykazano zjawiska interferencyi przy rozprzestrzenianiu się działań elektrycznych, musimy przeto przyjąć, że te ostatnie także polegają na falowaniach pewnego środka.

Zobaczmy jednak, przy jakich warunkach następuje koincydencya czyli zlewanie się i interferencya czyli znoszenie się fal dźwiękowych. Niechaj 2 stroiki *A* i *B*, brzmiące w *unissono*, drgają zawsze w jednakowych fazach, t. j. tak, że jednocześnie oba ramiona każdego stroika zbliżają się ku sobie i jednocześnie oddalają się od siebie. Dla uproszczenia zadania, weźmy pod

Fig. 230. Koincydencya fal dźwiękowych.

uwagę tylko prawe ich ramiona (fig. 230). Przy jakiej odległości ramion *A* i *B* następuje zlanie się zgęszczeń i rozrzedzeń— oznaczonych na figurze przez silniej i słabiej cieniowane miejsca—fal obu stroików. Po pewnym namyśle przekonamy się, że ma to miejsce wtedy, gdy odległość między temi ramionami równa się długości 1 całej fali, odpowiadającej wydawanemu przez stroiki tonowi, albo gdy odległość ta równa się długości 2, 3, 4 i t. d., albo jakiejkolwiek innej liczby całych fal. Zarówno zgęszczenia, jak i rozrzedzenia będą na całej drodze, którą przebiega dźwięk, silniejsze, wskutek czego usłyszymy także o wiele donośniejszy ton, niż w razie, gdybyśmy jeden ze stroików usunęli na stronę.

Cóż tedy nastąpi, gdy *A* oddalone jest od *B* tylko na długość pół fali? Wtedy oczywiście zgęszczenia jednego systemu

fal zlewają się z rozrzedzeniami drugiego systemu fal i otrzymamy interferencyę: Powietrze na prawo od *A* będzie wszędzie w spoczynku, jak to pokazuje fig. 231, na której jednostajność cieniowania ma oznaczać brak zgęszczeń i rozrzedzeń; jeżeli przytem amplitudy drgań obu stroików są sobie zupełnie równe, to w rozważanym tu wypadku nie usłyszymy żadnego tonu. Przy odległości między ramionami, równej długości 2 pół-fal, otrzy-

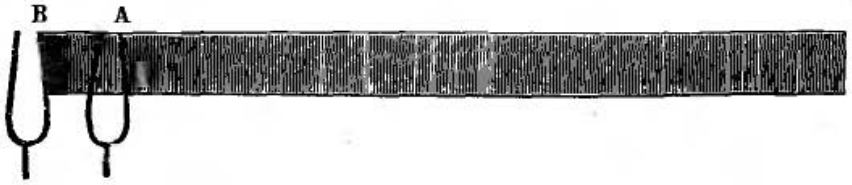


Fig. 231. Interferencya fal dźwiękowych.

mamy, jak widzieliśmy wyżej, koincydencyę, gdy odległość ta równa się długości 3 pół-fal, nastąpi znowu interferencya i t. d.

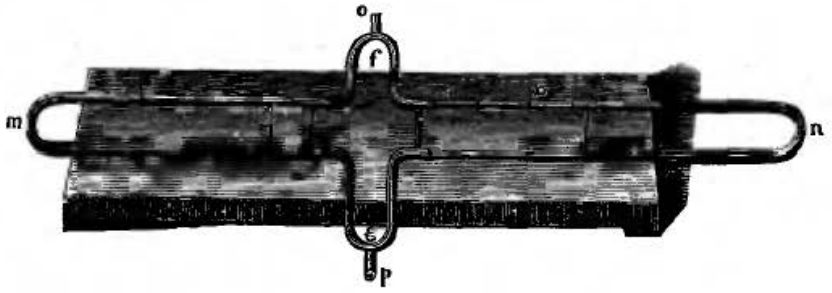


Fig. 232. Doświadczalne stwierdzenie prawa koincydencyi i interferencyi fal dźwiękowych.

Albo, ogólniej się wyrażając, *otrzymamy koincydencyę obu systemów fal, gdy odległość między ramionami stroików albo między jakiemikolwiek dwoma ciałami dźwięczącemi, brzmiącemi w unissono, równa się parzystej liczbie długości pół-fali, interferencyę zaś, gdy odległość ta równa się nieparzystej liczbie długości pół-fali.* Podobne prawo stosuje się także do fal świetlnych i elktrycznych.

Rzeczone prawo możemy stwierdzić za pomocą nader prostego doświadczenia, proponowanego już dawniej przez Johna

Herschla i urzeczywistnionego w nowszych czasach przez Quinckego i Koeniga. Polega ono na tem, że rozdzielamy system fal, wychodzących z ciała dźwięczącego, na dwa prądy nierównej długości, które, będąc znowu połączone, interferują z sobą. Fig. 232 przedstawia przyrząd, używany do podobnych doświadczeń: Rura $o\,f$ rozgałęzia się w f na dwa ramiona $f\,a\,b\,n\,g$ i $f\,m\,g$, które przy g znowu łączą się z sobą w jeden wspólny kanał $g\,p$. Część $b\,n$ rury daje się wysuwać tak, że możemy nadawać różną długość ramionom prawemu i lewemu, przez które rozprzestrzeniają się wstępujące do rury przy o fale dźwiękowe. Zbliżmy do otworu o drgający stroik, do p zaś—ucho, wtedy, w razie jednakowej długości ramion rury, fale dźwiękowe, rozchodzące się jednocześnie przez oba ramiona, dosięgną w tym samym czasie naszego ucha i usłyszymy wyraźnie ton stroika. Wyciągajmy teraz część $b\,n$ rury, a osiągniemy wreszcie długość, przy której ton stroika ucicha; następuje to wtedy, gdy całe prawe ramię rury jest dłuższe od lewego o $^1/_2$ długości fali, odpowiadającej tonowistroika, t.j. gdy długość $a\,b$ równa się $^1/_4$ długości takiej fali. Przy dalszem wyciąganiu części $b\,n$ rury, słyszymy coraz to lepiej rzeczony ton i gdy różnica długości obu ramion równa się długości całej fali, ton ten rozbrzmiewa tak silnie, jak w początku doświadczenia, poczem przy dalszem wysuwaniu $b\,n$, ton znowu słabnie i zupełnie ucicha przy różnicy długości ramion równej potrójnej długości pół-fali, następnie dosięga maximum natężenia, gdy różnica ta równa się poczwórnej długości pół-fali i t. d. Otrzymujemy więc, jak tego wymaga powyższe prawo, koincydencyę albo interferencyę fal, zależnie od tego, czy różnica dróg, jakie przebywa dźwięk, równa się parzystej czy nieparzystej liczbie pół-fal. Jasną jest rzeczą, że za pomocą tego sposobu możemy oznaczyć długość fali, odpowiadającej danemu tonowi. W tym celu wystarcza znaleźć różnicę długości dróg, przy której następuje pierwsza zupełna interferencya; podwójna ta różnica równa się wtedy szukanej długości fali. Jeżeli oprócz tego znamy jeszcze odnośną częstość drgań, to na mocy znanego nam już twierdzenia (patrz str. 284) możemy obliczyć prędkość dźwięku w powietrzu.

Widzieliśmy, że w pewnych warunkach dwa ciała dźwięczące mogą się wzajemnie zobojętniać tak, iż ton ucicha. Z tego wynika, że jeżeli dwa różne ciała dźwięczące albo dwa odcinki jednego i tego samego ciała interferują z sobą, wtedy możemy wzmocnić ton, tamując ruch jednego z ciał lub odcinków. Jako przykład pierwszego wypadku może służyć okoliczność, że gdy w pewnych warunkach zatrzymamy ruchy jednego z dwóch zgodnie drgających stroików, umieszczonych na tem samem pudle rezonansowem, ton zostaje wzmocniony. Do przedstawienia drugiego wypadku najlepiej się nadaje płyta lub krążek. Wiemy już,

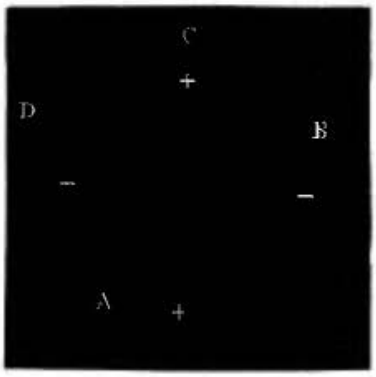


Fig. 233. Przeciwieństwo faz drgania dwóch przyległych odcinków płyty.

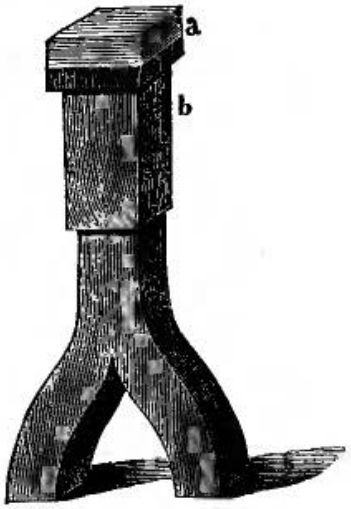


Fig. 234. Przyrząd Hopkinsa do wykazania przeciwieństwa faz oscylacyi dwóch przyległych odcinków płyty.

że dwa przylegające odcinki płyty lub krążka drgają zawsze w kierunkach przeciwnych—gdy jeden z nich oscyluje do góry, drugi jednocześnie idzie na dół i naodwrót, oraz że rozdzielająca je linia węzłowa oznacza miejsce, które zostaje w spoczynku, t. j. ani się podnosi, ani obniża.

W chwili, gdy jeden z odcinków—*A* (fig. 233) powoduje w znajdującem się nad nim powietrzu zgęszczenie, odcinek przyległy *B* lub *D* wywołuje w temże powietrzu rozrzedzenie, wskutek czego następuje interferencya i częściowe zniesienie tonu. Do wykazywania tego Hopkins posługiwał się rurą *b* (fig. 234), roz-

gałęziającą się u dołu na dwie nóżki i zakrytą u góry przez elastyczną błonę, posypaną piaskiem. Jeżeli trzymamy nóżki rury ponad dwoma przyległemi odcinkami płyty (fig. 233)—nad *A* i *B*, lub nad *A* i *D* i t. d., to piasek spokojnie leży na błonie dlatego, że w tym wypadku fale wysyłane przez oba odcinki, drgające w kierunkach przeciwnych, wzajemnie się znoszą z powodu przeciwieństwa faz. Jeżeli natomiast umieścimy nóżki rury ponad dwoma naprzemianległemi odcinkami—nad *A* i *C* albo *B* i *D*, to piasek zostanie zrzucony z błony, co dowodzi, że w tym razie zachodzi koincydencya faz oscylacyj odcinków: powietrze w rurze zostaje jednocześnie przez drgania obu odcinków zgęszczane i następnie rozrzedzane, wskutek czego silnie drgająca błona zrzuca znajdujący się na niej piasek.

Brak miejsca nie pozwala nam przytoczyć jeszcze innych nader ciekawych przykładów interferencyi dźwięku, ani też bliżej wyłuszczyć warunków, przy jakich wskutek krzyżowania się fal postępowych z odbitemi w samem ciele dźwięczącem powstają t. zw. *fale stojące.* Te ostatnie tworzą się wtedy, gdy fale poprzeczne albo podłużne, biegnąc wzdłuż struny, sztaby albo słupa gazu, odbijają się od stałej ściany albo od przytwierdzonego punktu i, wracając napowrót, spotykają się z nowemi falami, z któremi interferują; wskutek tego ciało dźwięczące dzieli się na oddzielnie drgające części, przedzielone węzłami tak, jak to pokazują fig 192, 201, 202, 205, 210 i t. d. Długość fali stojącej równa się połowie długości odnośnej fali postępowej; drgająca naprzykład jako całość struna przedstawia jednę poprzeczną stojącą falę, drgający zaś jako całość słup gazu, zawartego w zamkniętej z jednej strony rurze, przedstawia jednę podłużną stojącą półfalę. Różnica między falą postępową i stojącą polega na tem, że przy pierwszej cząstki środka kolejno jedna po drugiej przechodzą przez te same fazy, podczas gdy przy drugiej wszystkie drgające cząstki zawsze jednocześnie znajdują się w jednakowych fazach. Wszystkie cząstki np. drgającej jako całość struny jednocześnie dosięgają maximum odchylenia w jednę lub drugą stronę i jednocześnie przechodzą przez położenie równowagi, przyczem amplitudy drgań oddzielnych cząstek są różne, podczas

gdy przy fali postępowej amplitudy drgań różnych cząstek są jednakowe.

§ 2. Współdrganie i współbrzmienie. Kołysania dźwięku: uderzenia i pauzy. Tony kombinacyjne.

Sporządźmy sobie wahadło z ciężkiej kuli zawieszonej na sznurze i spróbujmy wprawić je w kołysania uderzeniami ręki. Jeżeli te ostatnie następują po sobie w odstępach czasu, ściśle równych peryodowi oscylacyi wahadła, to za pomocą szeregu nieznacznych nawet ruchów ręki możemy nadać wahadłu, chociażby bardzo ciężkiemu, regularne oscylacye o wielkiej amplitudzie; w przeciwnym razie ruchy ręki interferują z kołysaniami wahadła, wskutek czego oscyluje ono bardzo słabo i nieregularnie, albo też w pewnych warunkach zupełnie się zatrzymuje. W powyższym wypadku impulsy, zgodne z peryodem oscylacyi wahadła, udzielone mu zostają bezpośrednio; możemy to jednak zrobić także za pośrednictwem jakiegokolwiek stosownego środka: Zawieśmy naprzykład w pewnej od siebie odległości na tej samej poprzecznej belce dwa wahadła o jednakowym peryodzie oscylacyi i wprawmy w kołysania jedno z nich, a zobaczymy, że po niejakim czasie i drugie zacznie się kołysać z coraz to większą amplitudą. Impulsy przenoszą się tu za pośrednictwem massy belki z jednego, poruszonego wahadła na drugie i, nagromadzając się w tym ostatnim, zmuszają je w końcu do kołysania. Zjawisko to, zwane *współdrganiem*, możemy otrzymać także dla jakichkolwiek ciał oscylujących, jeżeli tylko peryody ich drgań są równe; gdy przytem te ostatnie są dosyć częste, to współdrganiu towarzyszy *współbrzmienie*, to znaczy, że ciało bezpośrednio nieporuszone, przejąwszy drgania drugiego ciała, samo zaczyna wydawać ton. Rozważmy kilka odnoszących się tu przykładów:

Naciągnijmy nad temi samemi podstawkami monochordu (patrz fig. 190, str. 288) dwie struny i, nastroiwszy je do *unisono*, umieśćmy na jednej z nich zgięty skrawek papieru (t. zw. konik), drugą zaś zarwijmy palcem. Rzeczony konik zleci ze

struny, chociaż jej wcale nie dotknęliśmy i jeżeli zatamujemy ruch zarwanej struny, to odnośny ton będzie jednak nadal rozbrzmiewać; rolę przenosiciela impulsów odgrywają tu wspólne dla obu strun podstawki. Wszystkie doświadczenia z konikami, jakie przy opisie węzłów i pętlic strun (patrz str. 292) wykonaliśmy z jedną struną, możemy także powtórzyć z dwiema strunami, brzmiącemi w *unissono*. Podeprzyjmy naprzykład jednę z nich na $^1/_4$ długości, w różnych zaś punktach drugiej umieśćmy czerwone i niebieskie koniki, zaznaczające miejsca brzuszków pętlic i węzłów. Jeżeli teraz pociągniemy smyczkiem krótszą część podpartej struny, to wszystkie czerwone koniki umieszczone na brzuszkach drugiej, niepotrąconej wcale struny, zlecą, niebieskie zaś, które leżą na węzłach, pozostaną na swych miejscach. Gdy natomiast przestroimy nieco jednę strunę względem drugiej, to wskutek naruszenia zgodności drgań, koniki nie będą już zlatywały z niepotrąconej struny.

Wpływ zgodności drgań jeszcze lepiej daje się wykazać za pomocą dwóch kamertonów, nastrojonych do *unissono*. Jeżeli jeden z nich pociągniemy silnie smyczkiem, to i drugi, znajdujący się na pewnej odeń odległości, także zaczyna drgać i wydawać ton, o czem możemy się przekonać, tamując ruch potrąconego kamertonu palcami. Rolę środka, przenoszącego oscylacye, odgrywa w tym razie powietrze, a po części także drzewo pudeł rezonansowych, na których zwykle pomieszcza się stroiki. Drgający stroik wytwarza w otaczającem powietrzu fale, które we właściwych odstępach czasu uderzają o ramiona drugiego, spoczywającego stroika i działania tych uderzeń, nagromadzając się w nim, wprawiają go w końcu w drgania. Spoczywający stroik przejmuje, pochłania tylko drgania stroika albo innego ciała dźwięczącego, wydającego ton tej samej wysokości; gdy więc jeden ze stroików przestroimy, to zjawisko współdrgania i współbrzmienia nie nastąpi. Jeżeli w pobliżu drgającego stroika znajduje się cały szereg stroików, wydających różne tony, to tylko ten z nich zostaje wprawiony we współdrganie i współbrzmienie, którego peryod oscylacyi ściśle się równa peryodowi drgania pierwszego stroika, *inne zaś milczą. To samo dotyczy* innych

ciał dźwięczących: gdy np. do wnętrza fortepianu głośno zaśpiewamy jakąś nutę, to odnośna struna, zdolna wydawać ten sam ton, zaczyna drgać i brzmieć, o czem łatwo się przekonać, umieszczając na niej koniki, które wtedy zlatują. Naodwrót — z mięszaniny różnych drgań stroik albo jakiekolwiek inne ciało dźwięczące przejmuje tylko te, które samo może wydawać. To samo stosuje się także do drgań świetlnych. Gdy wysyłane przez jakieś ciało drgania świetlne, odpowiadające pewnej określonej barwie, napotykają na swej drodze inne ciało, zdolne w pewnych warunkach wysyłać takie same drgania, wtedy zostają one pochłonięte; zjawisko to stanowi, jak później zobaczymy, podstawę analizy światła czyli t. zw. analizy spektralnej. Opisane powyżej zjawiska możemy wyrazić ogólną zasadą, orzekającą, że *każde ciało przejmuje za pośrednictwem odpowiedniego środka drgania innego ciała, jeżeli są one zgodne z temi, które samo może wykonywać i z mięszaniny różnych drgań wybiera i przejmuje tylko te, które ściśle odpowiadają własnym jego drganiom.*

Rozważmy teraz rezultaty jednoczesnego drgania dwóch niezupełnie ściśle dostrojonych do siebie kamertonów. Przypuśćmy, że przez przyklejenie kawałka wosku do jednego z nich, zmniejszyliśmy liczbę jego drgań o 1 względem drugiego; niechaj np. ten ostatni wykonywa 240 drgań na sekundę, pierwszy zaś — 239. Co z tego wyniknie? Jeżeli oba stroiki rozpoczynają swe oscylacye od tej samej fazy, t. j. tak, że zgęszczenia fal, wytwarzanych przez jeden z nich zlewają się ze zgęszczeniami fal drugiego i rozrzedzenia fal jednego koincydują z rozrzedzeniami fal drugiego, to jasną jest rzeczą, iż stan taki — t. j. zgodność faz utrzymać się nie może. Jeden bowiem stroik coraz bardziej się spóźnia względem drugiego i po upływie $^1/_2$ sekundy od początku ruchu spóźnienie to wynosi $^1/_2$ oscylacyi tak, że stroiki znajdują się wtedy w fazach wręcz przeciwnych. W tym momencie jeden z nich wywołuje zgęszczenie tam, gdzie drugi wytwarza rozrzedzenie i wskutek tej interferencyi oba stroiki w tym określonym momencie wzajemnie się zobojętniają tak, że nie słyszymy wtedy żadnego, albo też tylko bardzo słaby ton. Od tego momentu stroiki znowu coraz więcej się wspomagają, aż po upływie 1 se-

kundy, gdy jeden skończy 240, drugi zaś—239 drganie, otrzymamy znowu stan początkowy, t. j. koincydencyę. To samo zachodzić będzie podczas każdej następnej sekundy (1). Oczywiście, że w takich warunkach nie może mieć miejsca ciągłe i doskonałe współbrzmienie stroików; przeciwnie mamy tu naprzemian to wzmocnienie, to osłabienie tonu, pierwsze dosięga maximum przy zgodności faz, drugie zaś przy przeciwieństwie faz. W ten sposób wywołujemy zjawisko, znane muzykom pod nazwą *kołysań*, przyrosty natężenia tonu nazywają *uderzeniami*, ubytki zaś—*pauzami*, często bowiem podczas tych ostatnich wcale nie słyszymy tonu.

Przyklejmy teraz za pomocą wosku do jednego z naszych stroików drobny pieniądz, np. srebrną dziesięciogroszówkę; niechaj wskutek tego obciążenia wykonywa on o 6 drgań na sekundę mniej, niż drugi, nieobciążony stroik. Ile uderzeń usłyszymy w ciągu sekundy? Po pewnym namyśle przekonywamy się, że 1 uderzenie musi nastąpić w odstępie czasu, którego potrzebuje jeden stroik na to, ażeby wykonać o 1 drganie więcej, niż drugi; a ponieważ w rozważanym teraz wypadku mamy 6 takich odstępów czasu w ciągu każdej sekundy, otrzymamy więc także 6 uderzeń w ciągu tego czasu. Jednem słowem *liczba uderzeń w ciągu sekundy zawsze równa się różnicy częstości drgań.* Uderzenia podobne możemy także otrzymać za pomocą jakichkolwiek ciał dźwięczących. Jeżeli naprzykład mamy przed sobą dwie dokładnie do siebie dostrojone piszczałki kryte lub otwarte, to zadąwszy jednocześnie w obie, otrzymamy doskonałe współbrzmienie. Wystarcza jednak zbliżyć palce do wargi jednej piszczałki, ażeby zmniejszyć częstość jej drgań i w ten sposób wywołać szybko po sobie następujące i nader silne uderzenia; trzymając rękę ponad wylotem jednej z otwartych piszczałek, nastrojonych do *unissono*, wywołujemy również uderzenia, które następują tem częściej, im więcej zakrywamy otwór.

Uderzenia piszczałek możemy także przedstawić optycznie za pomocą przyrządu, przedstawionego na fig. 227, str. 341. Je-

(1) Porównaj metodę koincydencyj, opisaną na str. 47.

żeli piszczałki są nastrojone do *unissono*, to, przy zadęciu w obie i przy obracaniu zwierciadła, otrzymamy symetryczne obrazy świetlne, jednak tak, że zęby jednej smugi świetlnej przypadają pomiędzy zęby drugiej smugi, co pochodzi od tego, że dwie blizko siebie ustawione i nastrojone do *unissono* piszczałki drgają zawsze w fazach przeciwnych. Gdy zaś wysuwamy nieco jednę z zasuwek, znajdujących się przy górnych końcach piszczałek i przez to odmykamy mały boczny otwór, wtedy skracamy długość odnośnej piszczałki i przestrajamy ją nieco względem drugiej: następują silne uderzenia i symetrya obrazów świetlnych w obracającem się zwierciedle zostaje naruszona.

Kołysania, pochodzące wskutek braku zgodności drgań dwóch stroików, dają się przedstawić optycznie za pomocą urządzenia, przedstawionego na fig. 220, str. 335. Widzieliśmy wtedy, że gdy równolegle do siebie ustawione drgające kamertony

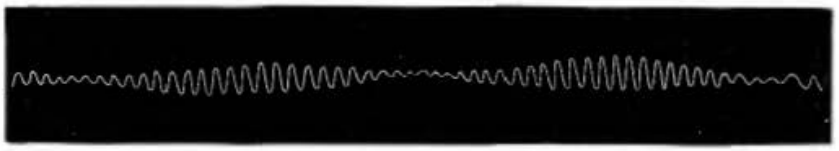


Fig. 235. Optyczne przedstawienie kołysań dźwięku.

są ściśle nastrojone do *unissono*, wtedy odbity od ich zwierciadeł *m* i *n* promień świetlny kreśli na ekranie prostą pionową linię, stawającą się bez przerwy coraz to krótszą, w miarę zmniejszania się amplitudy drgań stroików i redukującą się tylko przy ustaniu tych drgań do małego świetlnego krążka, pozostającego w spoczynku. Gdybyśmy przytem zlekka przesuwali stroik ze zwierciadełkiem *n* z lewa na prawo, albo sam ekran z prawa na lewo, to ujrzelibyśmy na ekranie poziomą świetlną linię falową o jednostajnych wszędzie wygięciach, taką, jaką przedstawia np. fig. 219, str. 332. Przestrójmy natomiast jeden ze stroików, przyklejając doń kawałek wosku, a otrzymamy na ekranie świetlną pionową linię, która peryodycznie się wydłuża i skraca; w momentach, gdy linia ta jest najdłuższą, słyszymy uderzenia, w tych zaś, gdy jest najkrótszą—zachodzą pauzy. Przesuwajmy

stroik lub ekran, jak wyżej podano, a otrzymamy poziomą linię o niejednostajnych, peryodycznie to zwiększających się, to zmniejszających wygięciach (figura 235). Maxima tych ostatnich odpowiadają uderzeniom, minima zaś—pauzom.

W tem miejscu wypada nam rozważyć nową grupę dźwięków muzykalnych, za przyczynę których przez długi czas uważano uderzenia i które teraz tłómaczymy jako szczególny wypadek interferencyi. Przy jednoczesnem brzmieniu dwóch *silnych* i różnych tonów powstają nowe i zupełnie odmienne od nich t. z. *tony kombinacyjne*, zauważone po raz pierwszy w r. 1745 przez organistę niemieckiego Sorgego i później dokładniej nieco zbadane przez sławnego skrzypka włoskiego Tartini'ego, od imienia którego nazywają je też niekiedy tonami Tartini'ego. Dla otrzymania tonów kombinacyjnych najlepiej jest użyć syreny z krążkiem o kilku szeregach otworów. Przypuśćmy, że kolejne szeregi krążka mają 16, 12, 10, 8, 6, 4 otworów. Obracajmy szybko krążek i dmijmy jednocześnie przez 2 szeregi o 8 i o 12 otworach, a otrzymamy, jak już wiemy, primę i kwintę, oprócz nich czułe ucho słyszy jednak jeszcze jeden ton—kombinacyjny, tej samej wysokości, jaki otrzymalibyśmy dmąc przez szereg o 4 otworach, a więc o oktawę niższy od niższego z obu pierwotnych tonów. Dmijmy jednocześnie przez szeregi o 12 i 16 otworach, a usłyszymy oprócz primy i kwarty jeszcze jeden ton—kombinacyjny, taki sam, jaki otrzymalibyśmy dmąc przez szereg o 4 otworach; częstość drgań tego tonu wynosi w tym razie $^1/_3$ częstości drgań niższego z tonów pierwotnych. Dmijmy nareszcie przez szeregi o 10 i 16 otworach, a usłyszymy obok primy i małej tercyi ton kombinacyjny, odpowiadający szeregowi o 6 otworach. We wszystkich tych wypadkach *częstość drgań tonu kombinacyjnego równa się różnicy częstości drgań tonów pierwotnych*, dlatego też nazwano takie tony kombinacyjne *różnicowemi*. Obok nich występują jeszcze inne, tony jednak różnicowe pod względem natężenia przewyższają wszystkie inne tony kombinacyjne i dlatego najłatwiej mogą być słyszane.

Tomasz Young tłómaczył powstawanie tonów kombinacyjnych jako skutek działania uderzeń, które, gdy następują dosyć

szybko po sobie, zlewają się,—na wzór peryodycznych impulsów zwykłych muzykalnych tonów—w jeden ciągły ton—kombinacyjny. Za takiem tłómaczeniem zdaje się przemawiać fakt, że częstość drgań tonu kombinacyjnego, zarówno jak i liczba uderzeń, równa się różnicy częstości drgań obu tonów pierwotnych. Takie objaśnienie nie wytrzymuje jednak ściślejszej krytyki. Uderzenia słychać silniej, niż jakikolwiek ciągły ton i nietrudno je odróżniać nawet wtedy, gdy same powodujące je tony są już niesłyszalne. Pochodzi to po części wskutek pewnych właściwości naszego ucha, głównie jednak wskutek tego, że gdy dwa niejednakowo wysokie tony powodują kołysania, wtedy wypadkowa amplituda drgań cząstek otaczającego powietrza w pewnych chwilach — podczas interferencyi zostaje zredukowana do minimum, w innych zaś—podczas koincydencyi, a więc podczas uderzeń dosięga wielkości większej, niż amplituda drgań, odpowiadająca każdemu z pojedyńczych tonów, wskutek czego uderzenia łatwiej można słyszeć, niż same te tony (1).

Gdyby więc tony kombinacyjne pochodziły wskutek zlewania się uderzeń tonów pierwotnych, wtedy musielibyśmy pierwsze słyszeć także w razie, gdy te ostatnie tony są bardzo słabe. Tak jednak nie jest. Okoliczność ta zniewoliła Helmholtza do ponownego zbadania omawianego tu przedmiotu. Uczony ten wykazał, że przyczyna tonów kombinacyjnych jest zupełnie różna od tej, jaką podał Young. Nadmieniliśmy już (patrz str. 345) o prawie nakładania się drgań, orzekającem, że gdy dwa albo więcej ruchów drgających, odpowiadających pojedyńczym tonom, jednocześnie rozchodzą się w powietrzu, wtedy nakładają się one i tworzą ruchy złożone tak, że każdy ruch złożony daje się rozłożyć tylko na te elementarne ruchy, z których powstał. Otóż podobnie jak prawo izochronizmu wahań wahadła (patrz str. 36) stosuje się tylko do małych łuków, tak też i prawo superpozycyi czyli nakładania się drgań jest ściśle słusznem tylko dla drgań o nadzwyczaj małej amplitudzie. Przy większych zaś amplitudach oscylacyi powstają, wskutek ścierania się cząstek drgają-

(1) Wiemy bowiem, że natężenie dźwięku zależy od amplitudy drgań powietrza.

cych, jeszcze drugorzędne ruchy drgające, tworzą się fale wtórne, które dochodzą naszego ucha jako tony kombinacyjne. Wykazawszy to, Helmholtz dalej wywnioskował, że podobnie jak istnieją tony kombinacyjne różnicowe, tak też na zasadzie teoryi, muszą się także dać otrzymać tony kombinacyjne o częstości drgań, równej sumie częstości drgań powodujących je tonów pierwotnych, a więc tony *sumowe* i następnie doświadczalnie wykazał ich istnienie. Tony kombinacyjne sumowe, nie dające się, jak widzimy, wytłómaczyć na zasadzie teoryi Younga, znajdują zupełne wyjaśnienie w teoryi Helmholtza.

Inny skutek niestosowalności prawa nakładania się drgań do oscylacyj o zbyt wielkich amplitudach stanowi fakt, że gdy pojedyńcze ciało dźwięczące drga bardzo silnie, to wytwarza ono w powietrzu fale wtórne, które odpowiadają harmonicznym tonom ciała dźwięczącego. Tak np. pierwszemu górnemu tonowi stroika odpowiada częstość drgań mniej więcej $6^1/_4$ razy większa, niż jego tonowi zasadniczemu (patrz str. 296); górny ten ton nie jest więc harmoniczny z tonem zasadniczym. Helmholtz jednak wykazał, że jeżeli wprawia się stroik w drgania nie przez pociąganie go smyczkiem, lecz przez silne uderzenie o kloc, to wydaje on oktawę tonu zasadniczego (t. j. pierwszy ton harmoniczny), którą należy przypisywać falom wtórnym, powstającym wskutek innego nakładania się drgań, niż to, jakiego wymaga wyłuszczone wyżej prawo, stosujące się tylko do drgań o nadzwyczaj małej amplitudzie.

„Rozważania te, powiada Tyndall, jasno pokazują, że połączenie muzykalnych tonów przedstawia proces daleko bardziej zawiły, niżby to można było sądzić. Gdy np. gra orkiestra, to oprócz zasadniczych tonów każdej struny i każdego instrumentu dętego, powstają jeszcze ich górne tony, dochodzące niekiedy aż do 16-go tonu odnośnego szeregu, dalej tony kombinacyjne — zarówno różnicowe, jak i sumowe; wszystkie one wstrząsają to samo powietrze i wytwarzają fale, które uderzają o ten sam bębenek uszny. Przytem tony każdej grupy — zasadniczych, górnych i kombinacyjnych interferują z sobą i z tonami innych grup. Wyobraźnia cofa się bezsilnie przed próbą unaocznienia za-

wiłego stanu powietrza podczas rozchodzenia się w niem wszystkich tych tonów. A jednak dążności muzyki wszech czasów, podczas których służyła ona ku rozkoszy ludzkości, zmierzały do takiego empirycznego urządzenia rzeczy, ażeby ucho nie cierpiało od rozdźwięków, mogących powstać wskutek tych różnorodnych interferencyj. Zajęci tem muzycy nie wiedzieli przytem nic o fizykalnych faktach i zasadach, leżących w osnowie ich usiłowań, wiedzieli oni o tem wszystkiem również mało, jak wynalazca prochu o stosunkach, w jakich łączą się różne ciała. Próbowali oni bezustannie, aż osiągnęli zadawalniające rezultaty i dopiero teraz, gdy duch nauki ożywił tę sprawę, zaczyna się z chaosu wyłaniać harmonia i okazuje się, że rezultaty tych prób empirycznych zgadzają się z prawami przyrody.“

§ 3. Uginanie się fal dźwiękowych.

Ruch falowy cechuje się jeszcze jednem zjawiskiem, zwanem dyffrakcyą albo uginaniem się fal. Gdy duża fala morska napotyka na swej drodze samotnie stojącą skałę, wtedy wznosi się ona do góry i opływa skałę dokoła. Fakty podobnego rodzaju zniewoliły Newtona do zarzucenia teoryi falowania światła. Gdyby światło—argumentował on—istotnie polegało na ruchu falowym, wtedy stawiając na jego drodze jakieś ciało nieprzezroczyste, nie otrzymalibyśmy cienia, gdyż fale światła zachodziłyby za krawędzie ciała nieprzezroczystego, uginałyby się tak samo, jak fala wodna opływa napotkaną skałę. Od owego czasu udało się atoli wykazać zjawisko uginania się dla światła, o czem obszerniej pomówimy w następnej księdze, i w ten sposób usunięto jeden z najpoważniejszych zarzutów przeciw teoryi falowania światła. Podobnie także i fale dźwiękowe obchodzą przeszkodę, t. j. promienie dźwięku przy krawędziach napotkanego ciała zginają się. Stojąc za przeszkodą można słyszeć, lecz na pewnej tylko niewielkiej odległości, wskutek bowiem uginania się dźwięku, natężenie jego znacznie się zmniejsza, tworzy się jakby częściowy „cień dźwięku“ tak, że na większej odległości wcale go już nie słyszymy. Kto obserwował przejście pociągu

przez tunel, ten zauważył zapewne zachodzące przy tem zmiany w natężeniu dźwięku. Szum wodospadu zostaje znacznie przyciszony, jeżeli pomiędzy nim a nami znajduje się chociażby niewielki pagórek, słabsze zaś dźwięki zostają przez podobną przeszkodę zupełnie stłumione. A jednak, jak powiedzieliśmy, „cień dźwięku“ jest tylko częściowy i człowiek stojący naprzykład za tarczą, słyszy wystrzał, chociaż kula nie może weń ugodzić. Wspominany przez nas tyle razy w tej księdze autor opowiada następujący, nader ciekawy przykład uginania się dźwięku, jaki zaszedł w wiosce Erith podczas wybuchu magazynu prochu w r. 1864. Wioska ta leży o kilka mil drogi od rzeczonego magazynu, pomimo to jednak szyby w oknach wszystkich jej domów wskutek wstrząśnień powietrza, spowodowanych przez wybuch prochu, popękały i, co szczególniej zaznaczyć należy, okna, odwrócone od miejsca wybuchu, ucierpiały tyleż co i te, które były doń zwrócone. Okna kościoła wiejskiego oprawione były w ołowiane ramy, które będąc względnie giętkie, poddały się naciskowi zgęszczonego powietrza tak, że niewiele tylko szyb popękało. Wszystkie jednak okna kościoła, zarówno po tej jego stronie, która była zwrócona do miejsca wybuchu, jak i tej, która była odeń odwrócona, zostały wgięte do wnętrza gmachu. Gdy fala dźwiękowa dosięgła kościoła, to obeszła go z prawej i z lewej strony, otaczając go przez chwilę pierścieniem silnie zgęszczonego powietrza, które wszystkie okna wcisnęło na wewnątrz. Po tem zgęszczeniu nastąpiło niewątpliwie rozszerzenie powietrza w kościele, usiłujące okna znowu wyprostować. Znaczna jednak część siły zgęszczenia powietrza, otaczającego kościół, użytą została na zgięcie okien, wskutek czego powietrze wewnątrz kościoła uległo tylko niewielkiemu zgęszczeniu tak, że następujące potem rozszerzenie tegoż powietrza nie wystarczyło już do zniesienia działania pierwotnego nacisku i do wyprostowania okien.

ROZDZIAŁ V.

Analiza i synteza dźwięku.

§ 1. Rezonatory. Analiza dźwięku za pomocą metody optycznej i graficznej. Fonautograf i fonograf.

Na zasadzie praw odbrzmiewania, omówionych na str. 309, możemy zanalizować każdy złożony dźwięk, t. j. rozłożyć go na składowe tony. Do tego celu służą przyrządy, zwane rezonatorami. Zwykłą ich formę stanowi wydrążona kula (fig. 236), szklana lub mosiężna, z dużym otworem po jednej i małym — po drugiej stronie. Gdy powietrze, zawarte wewnątrz kuli, zostaje w jakikolwiek sposób wprawione w drgania, wtedy wydaje ona ton pewnej określonej wysokości, gdy np. średnica szklanej kuli wynosi 13 cent., wewnętrzna zaś jej objętość — 1053 centym. sześc., to rezonator jest, że tak powiemy, nastrojony na ton *c'* i może ten ton wydawać samodzielnie (1), albo nań odbrzmiewać. Niekiedy rezonatorowi nadaje się postać wydrążonego walca, składającego się z dwóch wchodzących jedna w drugą i wysuwalnych rur (fig. 237) tak, że długość rezonatora, a więc i objętość zawartego w nim powietrza można dowolnie zmieniać,

Fig. 236. Rezonator kulisty.

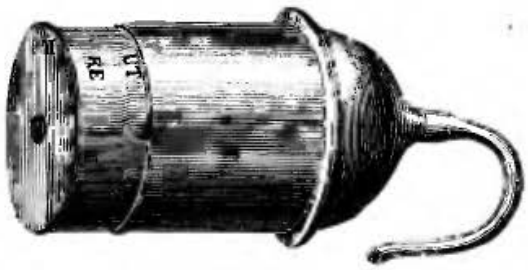


Fig. 237. Rezonator walcowaty.

(1) Gdy rezonator uderzamy.

przez co może on służyć do wzmocnienia różnych tonów. Walec ten po jednej stronie posiada duży otwór, przez który wchodzi dźwięk, po drugiej zaś—komunikuje przez mniejszy otwór z rurką kauczukową, którą przy analizowaniu dźwięku wprowadza się do ucha albo do pudełka z płomieniem manometrycznym. Jeżeli w powietrzu zachodzą drgania, przedstawiające ten sam peryod, co i powietrze zawarte w rezonatorze, wtedy ostatni przejmuje te drgania i sam zaczyna silnie brzmieć. Gdy więc zaopatrzymy się w cały szereg rezonatorów, z których jeden nastrojony jest np. na ton *c*, inne zaś na kolejne tony harmoniczne, a więc na c', g', c'' i t. d., to wówczas w pobliżu jakiegoś ciała dźwięczącego, dajmy na to piszczałki, wydającej ton *c* jako zasadniczy, jedne rezonatory się odezwą, inne zaś nie. O brzmieniu danego rezonatora możemy się przekonać, jeżeli, zatkawszy jedno ucho, przyłożymy do drugiego mniejszy otwór rezonatora, większy zaś jego otwór, znajdujący się po stronie przeciwnej, zwrócimy ku piszczałce. Jeśli ton, odpowiadający temu rezonatorowi, wchodzi w skład złożonego dźwięku piszczałki, to wyraźnie słyszymy, iż rezonator właściwym sobie tonem głośno śpiewa, wzmacniając ten właśnie ton piszczałki; w przeciwnym razie słyszymy przez rezonator poprostu tylko dźwięk piszczałki bez żadnego wzmocnienia któregokolwiek ze składowych jego tonów. Co więcej, wsłuchawszy się dobrze w ton, śpiewany w ten sposób przez rezonator i zachowawszy w umyśle wysokość tego tonu, możemy zupełnie oddalić rezonator i bez jego pomocy bezpośrednio rozróżnić ten ton w ogólnem brzmieniu piszczałki. Powtarzając kilkakrotnie to ćwiczenie z rezonatorami, odpowiadającemi harmonicznym tonom danego ciała dźwięczącego, możemy już następnie nieuzbrojonem uchem słyszeć bardzo wiele, a nawet wszystkie przytony, towarzyszące jego tonowi zasadniczemu. W zwykłych warunkach słyszymy przeważnie ten ostatni ton dlatego, że brzmiąc najsilniej, przyćmiewa on inne.

Dla uniknienia zmudnego i długotrwałego przykładania różnych rezonatorów do ucha, Koenig przenosi drgania zawartego w nich powietrza na odpowiednie płomienie manometryczne, które opisaliśmy już szczegółowo na str. 239. Odnośny przy-

rząd (fig. 238) składa się z całego szeregu umieszczonych jeden ponad drugim rezonatorów, nastrojonych na kolejne tony harmoniczne, np. na c'', c''', g''', c'''', e'''' i t. d. Z boku znajduje się podłużne pudło, opatrzone palnikami, które zasila się gazem oświetlającym, doprowadzanym za pomocą rury kauczukowej (na rysunku niewidocznej) ze zbiornika. Każdy palnik posiada swoje

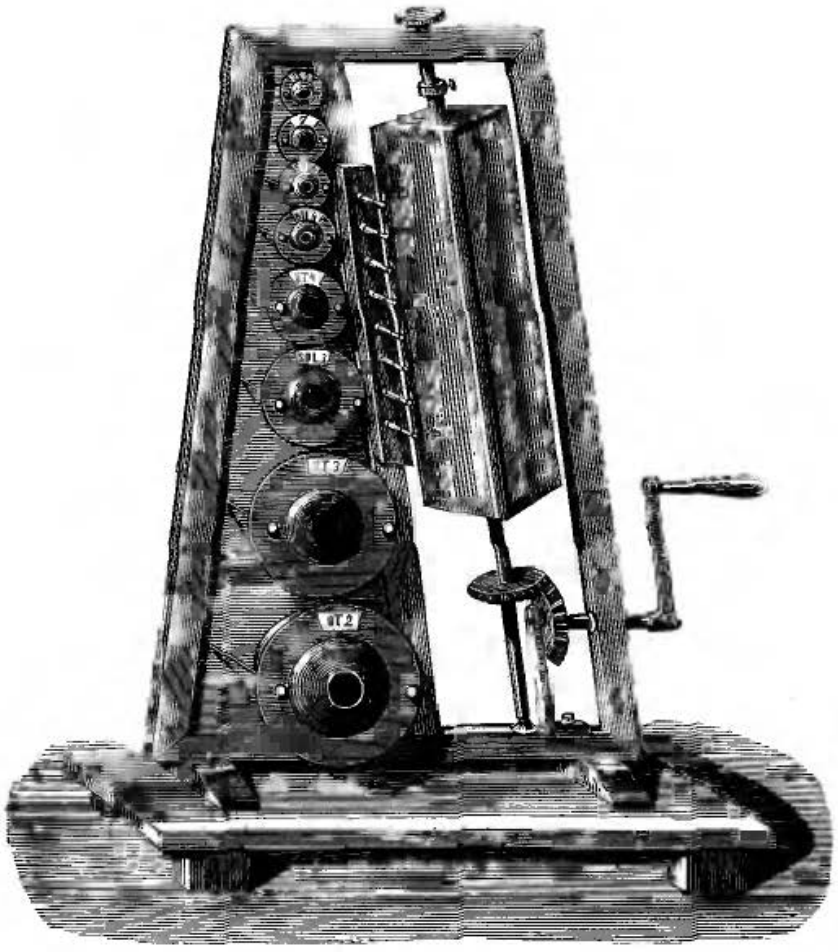


Fig. 238. Przyrząd Koeniga do analizy dźwięku.

pudełko manometryczne (patrz str. 239), komunikujące za pomocą rurki (na rysunku również niewidocznej) z mniejszym otworem odnośnego rezonatora. Płomienie palników stanowią szereg pionowy, odpowiadający szeregowi rezonatorów i odzwierciadlają się w umieszczonem tuż obok nich lustrze. Jeżeli wszy-

stkie rezonatory milczą, to przy szybkiem obracaniu zwierciadła ujrzymy w niem obrazy oddzielnych płomieni w postaci niezazębionych smug świetlnych. Gdy natomiast w pobliżu przyrządu jakikolwiek instrument muzyczny wydaje dźwięk, wtedy powietrze zostaje wprawione w drgania w tych rezonatorach, których tony są zawarte w owym dźwięku i odnośne smugi zazębiają się mniej lub więcej silnie, zależnie od natężenia danego tonu, inne zaś smugi pozostają bez zmiany. W ten sposób dowiadujemy się, jakie tony wchodzą w skład analizowanego dźwięku i poznajemy jego koloryt muzyczny. Gdy np. w pobliżu opisanego przyrządu piszczałka kryta wydaje dźwięk o tonie zasadniczym c'', wówczas tonowi temu, jak już wiemy (patrz str. 316). towarzyszą przytony o 3, 5, 7 i t. d. razy większej częstości drgań, a więc tony g'', e'''', b'''' i t. d., wskutek czego w obracającem się zwierciedle pierwsza—licząc od dołu—trzecia, piąta i siódma smugi będą zazębione, inne zaś—nie.

Możemy także jednocześnie badać różne cechy danego dźwięku: jego wysokość, natężenie i koloryt, albo ściślej mówiąc, wysokości jakoteż natężenia jego tonów składowych, jeżeli pozwolimy dźwiękowi temu działać na jeden i ten sam płomień manometryczny. Wytwórzmy np. w pobliżu otworu stożka przyrządu manometrycznego, przedstawionego na fig. 225, str. 339, jakikolwiek dźwięk, wtedy fala dźwiękowa uderza o błonę przedzielającą pudełko i wprawia ją w złożone drgania, odpowiadające poniekąd złożonym drganiom samego ciała dźwięczącego, i płomień okaże nam te ruchy błony, zmieniając odpowiednio swą wysokośc. Obraz tak drgającego plomienia ujrzymy w obracającem się zwierciedle w postaci jednej zazębionej u góry smugi świetlnej, której duże zęby powycinane są w drobniejsze zęby. Liczba i długość największych zębów wskazują częstość i amplitudę drgań zasadniczego składowego tonu badanego dźwięku, liczba zaś i wielkość drobniejszych zębów wskazują częstość i amplitudę drgań górnych tonów, towarzyszących tonowi zasadniczemu, jak to pokazują np. figury, przedstawione na str. 342, które otrzymamy, wytwarzając w pobliżu rzeczonego stożka dźwięk, złożony z primy i oktawy, względnie z primy i tercyi.

Skomplikowane drgania błony, pobudzanej jednocześnie przez kilka systemów fal dźwiękowych, odpowiadających pojedyńczym składowym tonom analizowanego dźwięku, możemy także przedstawić graficznie, przyczepiając do błony ostrze, które kreśli na stósownie przyrządzonym walcu linię falową, unaoczniającą swemi wygięciami kombinacyę odnośnych składowych tonów. Przyrząd taki, samozapisujący drgania dźwiękowe i zwany od tego *fonautografem*, został wynaleziony przez Leona Scotta i udoskonalony przez Koeniga. Składa się on (fig. 239) z mniej lub więcej 50 centym. długiego wydrążonego elipsoidu z gipsu (Koenig używa teraz do tego celu paraboloidu z metalu), z jednej strony— przy *C*— otwartego, z drugiej zaś—przy *B*—zamkniętego przez stale, w środku przedziurawione, dno. Przez środkowy ten otwór przechodzi krótka mosiężna rurka *c*, której jeden koniec, wchodzący do elipsoidu, jest otwarty, drugi zaś—wystający z niego, jest zakryty przez elastyczną kauczukową błonę. Do błony tej, mogącej być silniej lub słabiej napiętą, przyczepione jest lekkie sztywne ostrze *b*. Ruchomą sztabkę *a*, naciskającą jednym swym końcem rzeczoną błonę, należy tak ustawić, ażeby ostrze *b* pod-

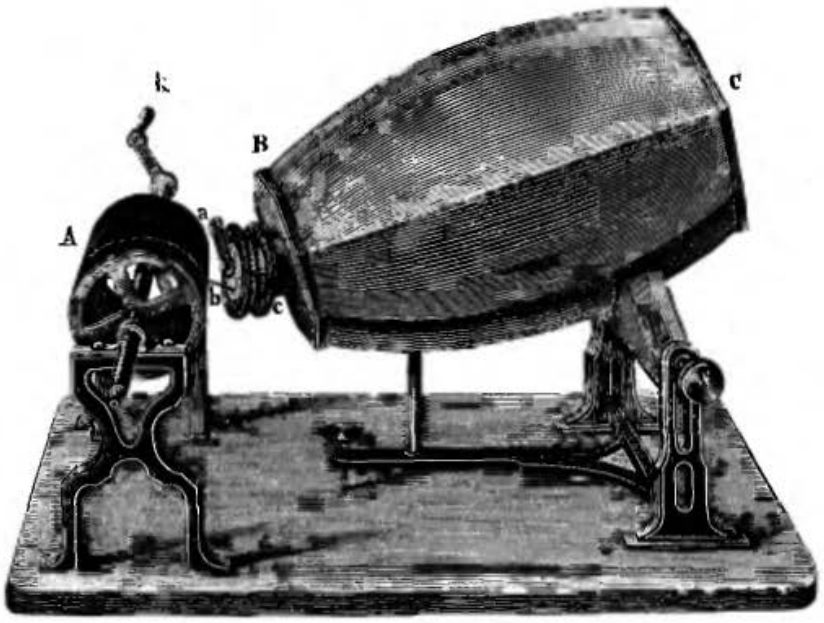


Fig. 239. Fonautograf Scotta i Koeniga.

czas drgań błony przytykało do któregoś z jej brzuszków, nie zaś do węzła.

Opisany przyrząd przysuwa się (jak to pokazuje fig. 239) do walca *A*, pokrytego zakopconym papierem i osadzonego na poziomej szrubowej osi, naokoło której może być obracany za pomocą korby *k;* wskutek takiego urządzenia, walec przy każdym obrocie przesuwa się nieco w kierunku poziomym. Ostrże *b* nie powinno przytem stać prostopadle ani do błony, ani do walca, lecz skośnie do obojga. Jeżeli do elipsoidu przy *C* wpływają fale dźwiękowe pojedyńczego tonu, to błona wraz z ostrzem drga w *unissono* z drganiami powietrza, odpowiadającemi temu tonowi i ostrze kreśli wtedy na obracającym się walcu linię falową o wszędzie jednostajnych wygięciach, jak ją przedstawia np. fig. 188 na str. 282. Jeżeli zaś przy *C* wpadają jednocześnie systemy fal dwóch albo więcej różnych tonów, czyli złożony dźwięk, wtedy drgania błony odpowiadają skombinowanym drganiom powietrza, wstrząsanego przez wszystkie wpadające do elipsoidu systemy fal i ostrze kreśli na obracającym się walcu linię, której częstość i wielkość wygięć zależą od częstości i amplitudy drgań, odpowiadających składowym tonom badanego dźwięku.

Poznawszy przebieg wygięć linij falowych, odpowiadających różnym kombinacyom tonów, możemy już z postaci linii, nakreślonej za pomocą fonautografu przy brzmieniu danego dźwięku, wnioskować o częstości i amplitudzie drgań składowych jego tonów.

Sławny wynalazca Edison spożytkował zasadę fonautografu przy zbudowaniu przyrządu, odtwarzającego różne dźwięki, a nawet całe melodye lub mowy i zwanego *fonografem.* Podajemy tu opis tego przyrządu według fizyki Daniella: Fonograf Edisona jest fonautografem o niezbyt cienkiem ostrzu, znaczącem drgania błony, do której jest przytwierdzone, na arkuszu miękkiej cynfolii, nawiniętej na obracający się walec; błona, drgając, wgniata ostrze w cynfolię głębiej lub płyciej, ostrze więc rzeźbi na cynfolii rowek o zmiennej głębokości. Jeżeli błonę po wyrzeźbieniu rowka oddalimy od walca,—który następnie odwrócimy w drugą

stronę—do pierwotnego położenia, poczem znowu przyciśniemy błonę do cynfolii tak samo jak z początku, a nawet trochę mocniej, to, przy obracaniu walca z poprzednią prędkością, zagłębienia w cynfolii, przesuwając się w tym samym co i poprzednio porządku pod ostrzem, wprawiają to ostatnie, a wraz z niem i błonę w ruch to ku walcowi, to od niego. Powstające w ten sposób drgania błony udzielają się powietrzu, zawartemu w fonautografie, a dalej otaczającemu ten ostatni powietrzu i wywołują w niem fale, które, dochodząc do ucha, wytwarzają dźwięki, podobne do pierwotnych.

Z początku Edison nie potrafił zupełnie wiernie odtwarzać niektórych spółgłosek, zwłaszcza wargowych i syczących (*b*, *p*, *t*, *d*, *k*, *g*, *s*, *z*) oraz wysokich tonów składowych pierwotnych dźwięków, w ostatnich jednak czasach zdołał on braki te szczęśliwie usunąć, i niedawno temu wykonywane w różnych miejscach próby z najnowszym jego fonografem wypadły bardzo pomyślnie.

§ 2. Koloryt muzyczny (brzmienie).

Za pomocą metod, opisanych w poprzednim §, można się przekonać, że dźwięki, wydawane przez różne instrumenty muzyczne, nie są proste, lecz złożone z kilku lub więcej tonów. Pochodzi to, jak już pokrótce nadmieniliśmy na str. 293, ztąd, że każde ciało dźwięczące, drgając jako całość, dzieli się przytem także mniej lub więcej wyraźnie na części, wskutek czego obok tonu zasadniczego powstają także tony górne. Te ostatnie, łącząc się w rozmaitych kombinacyach z jednym i tym samym tonem zasadniczym, wytwarzają właściwość, zwaną brzmieniem albo kolorytem muzycznym (*timbre*), odróżniającą od siebie tony tej samej wysokości, wytwarzane przez rozmaite instrumenty. Bliższe badania Helmholtza, zamieszczone w wiekopomnem jego dziele „Nauka o wrażeniach dźwiękowych,“ ustaliły w sposób niewątpliwy fakt, że *koloryt muzyczny zależy tylko od liczby, wysokości i natężenia tonów górnych, domięszanych do tonu zasadniczego.* Pomijamy tu szmery, częstokroć towarzyszące samym tonom, jak np. syczenie instrumentów dę-

tych, drapanie instrumentów strunowych oraz liczne inne właściwości dźwięków, używane bezwiednie przez pospolite ucho do rozpoznania brzmienia. Twierdzenie Helmholtza stosuje się tylko do brzmienia dźwięku czystego, doskonałego, oswobodzonego od wszelkich szmerów.

Naturalne dźwięki nie są więc pojedyńcze; możemy atoli brzmienia bez tonów górnych wytwarzać sztucznie. W tym celu umieszcza się np. drgający stroik w pobliżu rury rezonansowej, nastrojonej na jego ton zasadniczy. Rura taka, odbrzmiewając tylko na ten ostatni albo na jeden z przytonów parzystych lub nieparzystych, zależnie od tego, czy jest otwarta, czy kryta (patrz str. 316), nie będzie wcale odpowiadać na górne tony stroika, nieharmoniczne z jego tonem zasadniczym tak, że otrzymamy tylko ten ostatni bez domieszki tonów wyższych. „Pojedyńcze takie tony, powiada Helmholtz, są niezwykle miękkie, wolne od wszelkiej ostrości i ochrypłości; wydają się one przytem bardzo nizkiemi tak, że te, które co do wysokości swej odpowiadają dolnym tonom basu, sprawiają wrażenie dźwięków szczególnie, niezwykle nizkich. Z pojedyńczych tonów, których wysokość leży pomiędzy granicami sopranu, niższe brzmią jasno i dźwięcznie, ale nawet najwyższe z nich nie posiadają ani śladu owej nieprzyjemnej ostrości i piskliwości tonów, wydawanych przez większość instrumentów muzycznych, za wyjątkiem chyba fletu, którego brzmienia najwięcej jeszcze zbliżają się do tonów pojedyńczych dlatego, że górne tony fletu są nieliczne i słabe. Pojedyńcze tony mogą naturalnie wykazywać różnice tylko w natężeniu, nie zaś w kolorycie muzycznym. W samej rzeczy brzmienie jest zupełnie jednakowe, czy ton zasadniczy stroika przeniesiemy na otaczające powietrze za pomocą rury rezonansowej z dowolnego materyału—szkła, metalu lub tektury, czy też za pośrednictwem przyczepionej do stroika struny.“

Tony pojedyńcze brzmią jednak, że się tak wyrazimy, czczo i dlatego znajdują tylko bardzo ograniczone zastosowanie w muzyce. Również mało używają się dźwięki o bardzo wysokich lub nieharmonicznych tonach wyższych lub hałasach, jak je wydają naprzykład drgające płyty lub krążki. Sprawiają one na

ucho wrażenie nader niemiłe, co głównie ztąd pochodzi, że górne tony takich płyt lub krążków nie są ciągłe, lecz przerywane i przez to powodują ostrość brzmienia, silnie obrażającą ucho. Można dźwięków takich używać w muzyce tylko wtedy, gdy górne te tony albo hałasy są bardzo słabe i ciągłe, jak to np. ma miejsce z hałasem, powodowywanym przez wypływające z otworów powietrze, podczas gry na flecie lub trąbie. Największe zastosowanie znajdują w muzyce dźwięki o niezbyt wysokich i słabo brzmiących przytonach. Liczba tych ostatnich, jakoteż natężenie każdego z nich względem tonu zasadniczego, określają koloryt muzyczny danego dźwięku. Największe bogactwo odcieni pod tym względem przedstawia głos ludzki.

Podczas gdy ton pojedyńczy, dający się otrzymać w powyżej podany sposób, brzmi bardzo miękko, lecz czczo, to będąc zmięszany z pierwszemi 5—6 przytonami o słabem natężeniu, staje się on pełnym, głośnym, harmonijnym, jak tony piszczałek organowych, fletu, fortepianu lub średnio silnego głosu męzkiego. Jeżeli zaś dołączymy doń jeszcze dalsze tony górne, zwłaszcza te, którym odpowiada 7, 11, 13 razy większa częstość drgań, niż tonowi zasadniczemu, wtedy ucho doznaje bardzo różnych, po większej części nieprzyjemnych wrażeń i dźwięk brzmi ostro i ochrypło. W ogóle możemy przyjąć za prawidło, że dźwięki bez tonów wyższych są miękkie i głuche, z 5 lub 6 pierwszemi niezbyt głośnemi przytonami—pełne i harmonijne, nareszcie brzmienia z wielu, szczególnie dalszemi (poczynając od 7-go) przytonami są ochrypłe i ostre.

§ 3. Synteza dźwięków.

Gdy rozkładamy jakieś skomplikowane zjawisko przyrody na składowe jego objawy, gdy je tylko analizujemy, wówczas nigdy nie możemy być pewni, żeśmy żadnego z tych objawów nie pominęli. Należy więc zawsze, o ile tylko można, starać się sprawdzić rezultat analizy za pomocą procesu odwrotnego, t. j. przez odtwarzanie owego zjawiska ze składowych objawów, przez jego syntezę. Stosuje się to naturalnie także do zajmują-

cego nas tu przedmiotu. Jeżeli koloryt muzyczny, jak to opiewa wyłuszczone w poprzednim § twierdzenie, rzeczywiście zależy jedynie od liczby, wysokości i natężenia pewnych określonych górnych tonów, przymięszanych do danego tonu zasadniczego, to, łącząc ten ostatni z rzeczonemi tonami, powinniśmy znowu otrzymać dźwięk, niczem się nie różniący od pierwotnie analizowanego.

Otóż Helmholtz istotnie to wykonał, posługując się do tego celu następującym, nader pięknym, lecz nieco zawiłym na pierwszy rzut oka przyrządem, którego opis podajemy tu według Ganota. Przyrząd ten (fig. 240). składa się z 11 stroików, oznaczonych na figurze kolejnemi liczbami, z których jeden *A* daje ton zasadniczy o 179 drganiach na sekundę, dziewięć innych— kolejne tony harmoniczne, a więc tony o 358, 537, 716 i t. d. drganiach, jedenasty zaś *K*, nastrojony w *unissono* z kamertonem *A*, służy—w sposób, który zaraz poznamy—do wprawiania w oscylacye wszystkich pozostałych 10 stroików. Każdy z tych ostatnich posiada swój odpowiednio nastrojony rezonator i ustawiony jest pionowo pomiędzy biegunami „elektromagnesu". (Tak nazywamy kawał miękkiego żelaza, mający zwykle postać podkowy, którego oba ramiona otoczone są zwojami drutu, t. zw. cewkami, połączonemi z bateryą elektryczną, tak jednak, że bieguny elektromagnesu wystają nieco z odnośnych cewek. Gdy przez te cewki przechodzi prąd elektryczny, wtedy żelazo magnesuje się (ztąd nazwa elektromagnesu) i przyciąga inne żelazo lub stal, a więc także ramiona znajdującego się pomiędzy jego biegunami stroika, przy przerwaniu zaś prądu—traci własności magnesu).

Stroiki wraz z ich elektromagnesami i rezonatorami ustawione są w dwa szeregi, z których jeden—na rysunku przedni—zawiera kamertony (oznaczone przez 1, 3, 5, 7 i 9), dające ton zasadniczy i kolejne nieparzyste przytony, drugi zaś — kamertony (oznaczone przez 2, 4, 6, 8 i 10), wytwarzające kolejne parzyste tony harmoniczne. Za temi stroikami ustawiony jest poziomo kamerton *K*, odgrywający rolę przerywacza prądu elektrycznego. W tym celu do górnego ra-

mienia stroika K przytwierdzony jest jednym końcem sztyfcik platynowy, którego drugi koniec znajduje się tuż ponad powierzchnią rtęci, nie dotykając jej; metalowe dno naczyńka, zawierającego rtęć, komunikuje za pomocą drutu d z elektromagnesem L, od którego z drugiej strony idzie drut r do bateryi elektrycznej.

Prąd elektryczny, wchodzący do przyrządu przy C, przepływa przez cewki elektromagnesu E, następnie przez cewki pozostałych 9 elektromagnesów i w końcu przez drut m wchodzi do stroika K. Tam prąd zostaje przerwany w wypadku, gdy

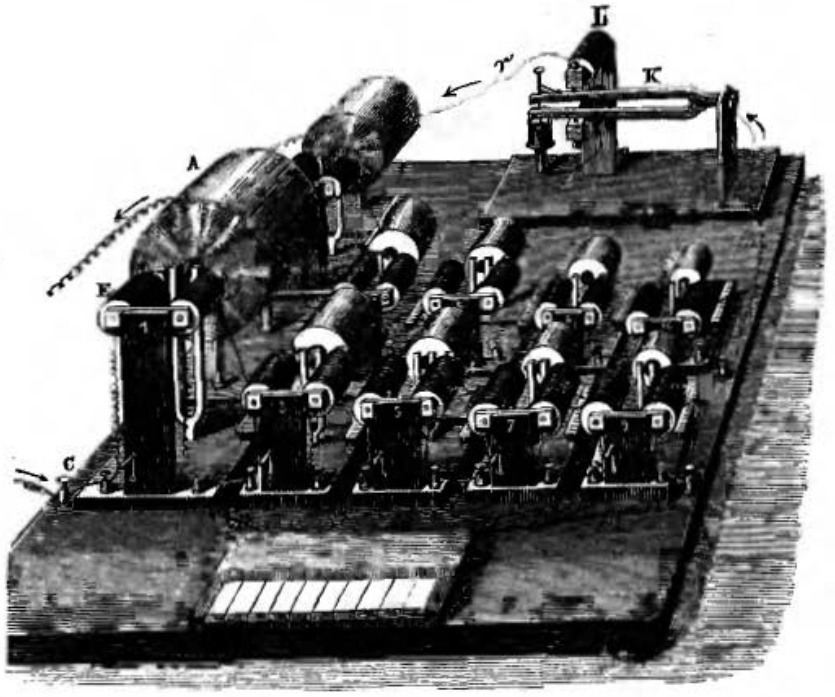


Fig. 240. Przyrząd Helmholtza do syntezy dźwięków.

stroik znajduje się w spoczynku, wtedy bowiem przyczepiony do jego ramienia sztyfcik platynowy nie pogrąża się w rtęć. Jeżeli natomiast stroik wprawimy w drgania, to przy zbliżaniu się do siebie jego ramion, rzeczony sztyfcik zanurza się w rtęci i prąd może swobodnie przejść przez stroik, sztyfcik, rtęć, drut d do cewek elektromagnesu, a ztamtąd przez drut r napowrót do bateryi (na rysunku niewidocznej); gdy następnie ramiona stroika oddalają się od siebie, sztyfcik wynurza się z rtęci i prąd znowu zostaje przerwany. To samo powtarza się przy każdej całkowitej oscylacyi stroika K, a ponieważ wykonywa on, jak to

już wyżej powiedzieliśmy, 129 drgań na sekundę, przeto wszystkie (11) elektromagnesy zostają 129 razy na sekundę wzbudzone i tyleż razy na sekundę przyciągają znajdujące się pomiędzy ich biegunami ramiona odnośnych stroików. Stroik *A*, wykonywający także 129 drgań na sekundę, zostaje przyciągany przez bieguny odnośnego elektromagnesu *E* przy każdej swej oscylacyi; stroik 3, którego częstość drgań jest 3 razy większa, niż stroika-przerywacza, doznaje impulsów od odnośnego elektromagnesu tylko przy każdej trzeciej oscylacyi, stroik 5—przy każdej piątej i t. d. Wskutek takiego urządzenia stroik 1 drga silniej, niż 2, ten silniej niż 3 i t. d. i ton zasadniczy brzmi najgłośniej, kolejne zaś tony harmoniczne—coraz słabiej, odpowiednio do coraz to słabszego natężenia kolejnych składowych tonów, wykazywanego zwykle przez naturalny złożony dźwięk.

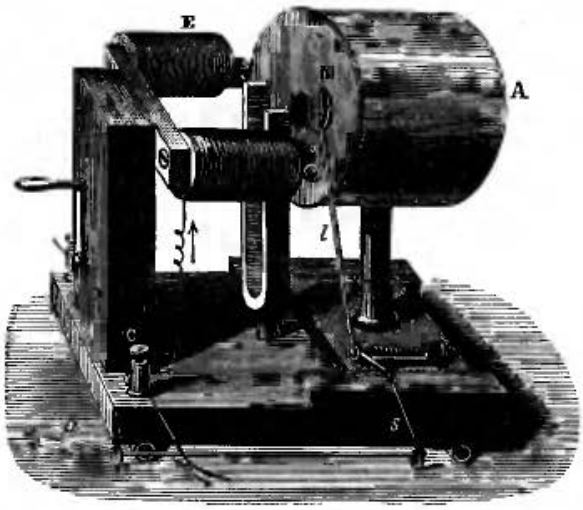


Fig. 241. Pojedyńczy stroik wraz z elektromagnesem i rezonatorem w przyrządzie Helmholtza do syntezy dźwięków.

Zobaczmy teraz, jak ten przyrząd funkcyonuje. Pociągnąwszy smyczkiem stroik—przerywacz *K*, wprawiamy go w drgania, wskutek czego prąd elektryczny, przerywany 129 razy na sekundę, przepływa przez cewki elektromagnesów i wszystkie stroiki także zaczynają drgać. Otwór rezonatora każdego stroika (fig. 241) w zwykłych warunkach jest zamknięty przez krążek 0, przez co tonu drgającego stroika prawie wcale nie słyszymy. Ale każdy taki krążek przyczepiony jest do końca złożonej dźwigni, w danym wypadku *l*, *n*, *s*, której drugi koniec za pomocą sznurka *a* komunikuje z jednym z klawiszów, znajdujących się na

przodzie opisanego wyżej przyrządu (patrz fig. 240) tak, że naciskając odnośny klawisz, otwieramy dany rezonator (ten ostatni wypadek przedstawiony jest właśnie na fig. 241) i wzmacniamy ton odpowiedniego stroika. Możemy tedy, naciskając stosowne klawisze, łączyć z tonem zasadniczym te lub owe tony harmoniczne i w ten sposób odtwarzać dźwięki, których skład odkryła nam analiza. Naciskając jednocześnie np. 1, 3, 5, 7 i 9 klawisz, otrzymujemy dźwięk piszczałki krytej, dającej ton zasadniczy o 129 drganiach. Za pomocą tego przyrządu Helmholtz zdołał sztucznie odtworzyć dźwięki różnych instrumentów muzycznych i głosu ludzkiego.

ROZDZIAŁ VI.

Muzyka i ucho.

§ 1. Fizyczne warunki harmonii muzycznej. Współdźwięk (konsonans) i rozdźwięk (dyssonans). Akkordy.

Liczne doświadczenia pokazały, że połączenie dwóch tonów wywiera na ucho tem przyjemniejsze wrażenie, im mniejsze są liczby, wyrażające stosunek częstości ich drgań. Najdoskonalszy współdźwięk otrzymujemy przy interwalu 1 : 1, t. j. przy współbrzmieniu dwóch tonów jednakowej wysokości, dalej następują interwale oktawy—2 : 1, kwinty—3 : 2, kwarty—4 : 3, wielkiej tercyi—5 : 4, wielkiej sexty—5 : 3, małej tercyi—6 : 5 i małej sexty—8 : 5. Helmholtz nazywa oktawę, kwintę i kwartę doskonałemi konsonansami, wielką tercyę i wielką sextę—średniemi, małą zaś tercyę i sextę—niedoskonałemi konsonansami. Połączenia 2 tonów o innych interwalach, np. sekundy—9 : 8 albo septimy—15 : 8 są nieprzyjemne dla ucha, dają rozdźwięk, dyssonans. Nie należy sobie jednak wyobrażać, jakoby wybór powyższych interwalów dokonany był na zasadzie znajomości tych stosunków, ujawnionych dopiero przez badania naukowe ostatnich wieków. Rzeczy te ustalone były na drodze czysto empirycznej na długi czas przedtem, zanim wiedziano coś o pro-

stocie liczb, wyrażających stosunek częstości drgań składowych tonów konsonansów. Powodowano się przytem tylko przyjemnem wrażeniem, jakie pewne połączenia tonów wywierają na ucho i tych połączeń używano i teraz używa się w muzyce.

Od czego pochodzi powyższa zależność, dlaczego mniejsze liczby wyrażają doskonalszy współdźwięk? Na pytanie to w różnych czasach dawano różne odpowiedzi. Pytagorejczycy, którzy wiedzieli już wprawdzie od swego mistrza, że struna dwa razy krótsza daje oktawę, półtora razy krótsza—kwintę i t. d., lecz nie znali stosunków częstości drgań dla różnych interwałów, odpowiadali: „Wszystko jest liczbą i harmonią.“ Wyobrażali oni sobie nadto, że stosunek liczbowy siedmiu tonów gamy diatonicznej wyraża odległości planet od ich centralnego ogniska, dlatego też mówili o harmonijnym tańcu ciał niebieskich i o „muzyce sfer,“ którą, według ich zdania, tylko jeden Pytagores ze wszystkich śmiertelnych jakoby zdolny był słyszeć. Jestto naturalnie przesąd, ale zanim ich potępimy, zadajmy sobie raczej pytanie, czy my sami jesteśmy już tak zupełnie wolni od przesądów. Poważniejszą próbę wyjaśnienia powyższej zależności poczynił sławny matematyk Euler: Zastanawia się on nad przyczyną przyjemności: Znajdujemy upodobanie w porządku i przyjemnem jest dla nas „śledzenie środków, prowadzących do celu.“ Jednakże wysiłek umysłowy przy odkrywaniu tego porządku nie powinien być tak wielki, ażeby nas męczył; gdy stosunki, które musimy rozwikłać, są zbyt skomplikowane, wówczas możemy wprawdzie porządek postrzegać, lecz nie doznajemy już przytem przyjemności. Czem prostsze przeto jest wyrażenie jakiegoś prawa—tem większa uczuwana przytem przyjemność; tłómaczy nam to przewagę pod względem harmonii prostych stosunków muzykalnych nad zawiłemi. Konsonans, według Eulera, polegałby tedy na duchowej przyjemności, jakiej doznajemy przy uświadamianiu sobie prawa, nie połączonem ze zbyt wielkim wysiłkiem umysłu.

Taki sposób tłómaczenia rzeczy nie wytrzymuje jednak krytyki. Sam Pytagores, który pierwszy wykonywał doświadczenia nad interwalami muzycznemi, nic przecież nie wiedział

o owych stosunkach częstości drgań. Euler zdaje się przeoczył tę okoliczność, że znaczna większość ludzi, którzy rozkoszują się muzyką i posiadają słuch bardzo czuły na najmniejsze dyssonanse, znajdują się również w położeniu Pytagoresa i nic nie wiedzą o drganiach dźwiękowych i ich stosunkach. Co więcej, nawet ci, którzy doskonale poznali już te stosunki, bynajmniej nie znajdują, aby od tego zwiększyła się rozkosz, jakiej doznają przy słuchaniu utworów muzycznych. Tłómaczenie Eulera jest więc niedostateczne i dopiero wielki przyrodnik—Helmholtz, po głębokiem i wyczerpującem zbadaniu całej kwestyi, zdołał odkryć fizykalną przyczynę konsonansu i dyssonansu, przyczynę tak prostą i zadawalniającą nasze wymagania, że trzeba się tylko dziwić, iż tak długo musiała czekać na swego odkrywcę.

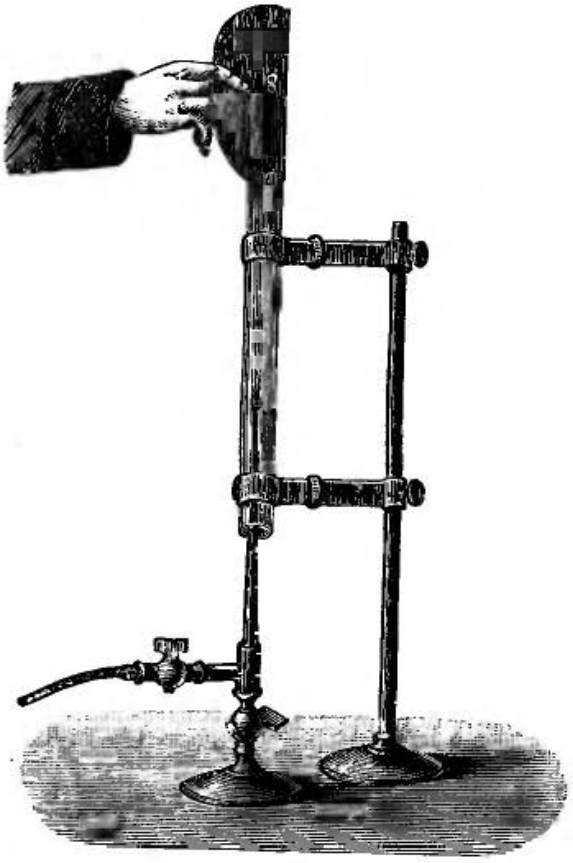


Fig. 242. Uderzenia jako przyczyna dyssonansu.

Następujące doświadczenie, podane przez Tyndalla, najlepiej da nam poznać ową przyczynę. Jeżeli płomień jakiegobądź gazu otoczymy otwartą z obu stron rurą (patrz fig. 156 na str. 230), to wskutek zachodzących w niej drgań powietrza usłyszymy ton, tem wyższy, im krótsza jest rura. Użyjmy do doświadczenia 2 takich śpiewających płomieni i otoczmy jeden z nich rurą o stałej długości, drugi zaś rurą, której długość możemy dowolnie zmieniać, przesuwając w górę lub ku dołowi jedną jej część (na fig. 242 przedstawiona jest tylko ta ostatnia rura). Gdy obie rury są jednakowo długie, wówczas płomienie,

wydając ten sam ton, śpiewają w *unissono;* wydłużmy jednak cokolwiek naszą rurę, przedstawioną na rysunku, a współbrzmienie zostanie naruszone i usłyszymy wyraźne uderzenia, następujące po sobie tak wolno, że z łatwością możemy je liczyć. Przy dalszem przesuwaniu w górę części *s* rury, uderzenia stają się coraz to częstsze, następnie przechodzą w pewien łoskot, różniący się tylko co do szybkości kołysań od szeregu uderzeń odróżnianych jako oddzielne, nareszcie wytwarzają ową nieprzyjemną ochrypłość brzmienia, znaną muzykom pod nazwą dyssonansu. Wysuwając stopniowo wspomnianą część naszej rury, otrzymujemy tedy wszelkie przejścia bez przerwy od oddzielnie słyszalnych uderzeń aż do dyssonansu. Odwróćmy teraz zjawisko, t.j. skracajmy stopniowo naszą wydłużoną rurę, a dyssonans przejdzie w łoskot, następnie w coraz to wolniej po sobie następujące uderzenia, które już w końcu liczyć możemy, aż nareszcie, przy jednakowej długości obu użytych rur, znowu otrzymamy doskonałe współbrzmienie śpiewających płomieni. W ten sposób możemy śledzić uderzenia krok za krokiem, aż przestają one być uderzeniami i przechodzą w dyssonans.

Doświadczenie powyższe ostatecznie dowodzi, że dyssonans powstaje wskutek szybkiego następstwa uderzeń. Przyczyna ta dyssonansu bez wątpienia zostałaby już dawniej odkryta, gdyby umysł ludzki nie był sprowadzony z właściwej drogi przez Youngowską teoryę tonów kombinacyjnych (patrz str. 358). Uczony ten wyobrażał sobie, że uderzenia, jeżeli następują po sobie z pewną szybkością, jednoczą się w ten sam sposób, co i uderzenia powietrza przy zwykłym muzykalnym tonie i zlewają w jeden ciągły ton—kombinacyjny. Faktem atoli jest, że uderzenia wywierają na ucho zupełnie inne wrażenie, niż prawidłowe impulsy zwykłego muzykalnego tonu. Wytwórzmy np. dwa bardzo głośne tony, których różnica częstości drgań wynosi 33, a obok tych tonów usłyszymy jeszcze wyraźnie różnicowy ton kombinacyjny o 33 drganiach na sekundę. Ton ten jest zupełnie równy i muzykalny, podczas gdy 33 uderzeń na sekundę wytwarza, według Helmholtza, nieznośny dla ucha dyssonans; rzeczony ton kombinacyjny nie mógł więc pochodzić od uderzeń.

Gdy liczba uderzeń na sekundę wynosi mniej, niż 33, wówczas nie obrażają one już tak bardzo ucha i mogą nawet, jako naśladowanie tremolowania głosu ludzkiego, stać się przyjemne. Przy większej niż 33 liczbie uderzeń, ochrypłość brzmienia również się zmniejsza, jednak przy 100 jeszcze je odczuwamy; według Helmholtza znikają one zupełnie, gdy liczba ich wynosi 132 na sekundę. Z tego widzimy, że gładkość i równość tonu, wytworzonego przez zwykłe fale dźwiękowe, może być doskonała już przy częstości drgań, leżącej o wiele niżej granicy, przy której uderzenia znikają. W samej rzeczy impulsy zwykłych fal dźwiękowych są bardzo łagodnie odgraniczone, przeciwnie podczas kołysań dźwięku, granice pomiędzy uderzeniami i pauzami są bardzo ostre, wskutek czego doznajemy owych przerywanych wrażeń, które nazywamy dyssonansem, dających się poniekąd porównać do nieprzyjemnego wrażenia, jakie wywiera na oko migotanie się światła.

Liczba uderzeń zależy nietylko od wielkości interwalu pomiędzy dwoma tonami, ale i od absolutnych częstości drgań. Przy tym samym interwalu otrzymamy dla tonów wysokich więcej uderzeń, niż dla średnich, dla tych znowu — więcej, niż dla nizkich. Dlatego też interwale małe (np. sekunda) bardzo wysokich tonów—z powodu zbyt wielkiej liczby uderzeń—bardzo nizkich zaś—z powodu zbyt małej liczby uderzeń—brzmią mniej ochrypło, tworzą mniejszy dyssonans, niż takież interwale tonów średnich. Należy dodać, że tony bardzo nizkie brzmią same przez się ochrypło, raz dlatego, że pojedyńcze drgania słyszymy tu często jako uderzenia, powtóre dlatego, że tony te wytwarzają kołysania z własnemi tonami wyższemi; w ten sposób tłómaczy się owo t. zw. dudnienie bardzo nizkich tonów.

Dotychczas mówiliśmy tylko o uderzeniach, powstających wskutek współbrzmienia dwóch pojedyńczych tonów. Wiemy jednak, że instrumenty muzyczne nie dają wcale brzmień bez tonów wyższych, w które szczególnie obfitują tony instrumentów smyczkowych; oprócz tego powstają jeszcze tony kombinacyjne. Otóż Helmholtz wykazał całą ważność dwóch tych rodzajów tonów dla sprawy konsonansu lub dyssonansu. Kołysania dźwięku

powstają mianowicie nietylko ze współbrzmienia dwóch blizkich siebie tonów zasadniczych, lecz także z wzajemnego na siebie oddziaływania tych ostatnich i tonów górnych, jakoteż kombinacyjnych. Nie możemy tu wyłuszczać rezultatów tych zawiłych oddziaływań, ograniczymy się więc tylko na podaniu ostatecznego wyniku. Dyssonans—według teoryi Helmholtza zgadzającej się z doświadczeniem—polega na ochrypłości współbrzmienia, powstającej przy interwalach o zawiłym stosunku częstości drgań wskutek szybkich uderzeń tonów zasadniczych, górnych i kombinacyjnych. Przeciwnie, konsonans interwalów o prostym stosunku liczb drgań polega na tem, że przy wzajemnem na siebie oddziaływaniu wszystkich trzech rodzajów tonów, nie powstają żadne albo bardzo nieliczne kołysania dźwięku, a więc także żadne albo bardzo nieliczne uderzenia i pauzy.

Ponieważ brzmienie tonów zależy od liczby, wysokości i natężenia tonów górnych, które dla różnych ciał dźwięczących są różne, przeto te same konsonanse i dyssonanse w rozmaitych instrumentach muzycznych muszą brzmieć odmiennie. W instrumentach, dających dźwięki o małej liczbie tonów górnych, dyssonanse brzmią miękko i niewydatnie; dlatego też w nowszej muzyce, nader bogatej w dyssonanse, takie instrumenty nie są używane same: koncert na samych tylko piszczałkach krytych uśpiłby nas wkrótce; „straszniejszym od koncertu na jednym flecie jest koncert na dwóch fletach.“ Z drugiej strony konsonanse instrumentów, bardzo bogatych w tony wyższe, stają się łatwo chropawe i ostre; używa się też ich zwykle tylko przejściowo.

Akkordem nazywamy połączenie trzech lub więcej brzmień, z których każde harmonizuje z pozostałemi. Trójdźwięki *dur* są następujące: prima, wielka tercya i kwinta; wielka tercya, kwinta i oktawa; kwinta, oktawa i decima. Trójdźwięki *moll* powstają z poprzednich przez wstawienie, zamiast wielkiej, małej tercyi. Różnica pomiędzy pierwszemi a drugiemi leży głównie w tonach kombinacyjnych. Bliższy rozbiór tej kwestyi pokazał, że tony kombinacyjne trójdźwięków *dur* wzmacniają pojedyńcze tony akordu; przeciwnie, tony kombinacyjne trójdźwię-

ków *moll*, jako zupełnie obce tonom akordu, udzielają mu coś niejasnego, zamglonego, słowem właściwość akordów *moll*, którą trudno opisać słowami. Dalszych szczegółów harmonii muzycznej, dla braku miejsca, nie możemy tu wyłuszczyć.

§ 2. Instrumenty muzyczne. Narząd głosowy człowieka.

Wszystkie instrumenty muzyczne dają się podzielić na 2 grupy. Do pierwszej należą takie, w których ton zostaje wytworzony przez drgania ciała stałego, do drugiej zaś takie, w których ton powstaje wskutek drgania słupa powietrza.

Z ciał stałych największe zastosowanie w muzyce znajdują napięte struny; ponieważ jednak powierzchnia strun jest zbyt mała, aby mogły one nawet przy najsilniejszych drganiach wytwarzać w otaczającem powietrzu fale o znacznych amplitudach, koniecznie więc należy drgania strun przenosić na elastyczne ciała stałe o dużej powierzchni, na deki pudeł rezonansowych, w które zaopatrzone są wszystkie instrumenty strunowe (patrz str. 288). Najważniejsza różnica pomiędzy temi ostatniemi polega na sposobie wprawiania strun w oscylacye. W fortepianach dokonywają tego młotki, pokryte miękką skórą, uderzające o bardzo silnie naciągnięte, mocne struny metalowe; młotki te zostają wprawione w ruch przez naciskanie odpowiednich klawiszów. Dźwięk struny fortepianowej, pobudzonej w zwykły sposób, jest bardzo bogaty w tony harmoniczne, z których siódmy, jako niezgodny z tonem zasadniczym, bywa umyślnie usuwany przez wybór odpowiedniego miejsca na strunie, w które uderza młotek; ósmy i następne tony harmoniczne są bardzo słabo reprezentowane. Obszar skali fortepianowej rozciąga się od $A_{,,}$ do a'''' lub nawet do c''''; różne tony wydawane są przez struny różnej długości: nizkie — przez struny długie, wysokie — przez coraz to krótsze struny. W harfie, gitarze, cytrze, teorbanie, lirze i innych podobnych instrumentach, które szczególniej rozpowszechnione były śród starożytnych, struny wprawia się w drgania przez zarywanie palcami. W skrzypcach, altówce, wiolonczeli i kontrabasie dokonywa się tego przez pociąganie smyczkiem, od

tego instrumenty te nazywają się smyczkowemi. Wszystkie instrumenty smyczkowe mają po 4 struny, nastrojone w skrzypcach na *g*, *d'*, *a'*, *e''*, w altówce—na *c*, *g*, *d'* *a'*, w wiolonczeli—na *C*, *G*, *d*, *a*, w kontrabasie—na *C*, *A'*, *D*, *G*. Inne tony grający wydobywa, skracając długość brzmiących strun przez naciskanie ich w odpowiednich punktach palcami lewej ręki i pociągając smyczkiem oddzieloną w ten sposób część struny. Drgania strun zostają wzmocnione przez drgania pudła rezonansowego i zawartego w niem powietrza; o ważnym wpływie tego ostatniego można się przekonać, zakrywając papierem otwory w dece pudła: dźwięk instrumentu bardzo się wtedy zmienia na niekorzyść. Dźwięki instrumentów smyczkowych są nader bogate w tony harmoniczne, zwłaszcza wyższe i w muzyce orkiestrowej instrumenty te odgrywają najważniejszą rolę. Drgające krążki, płyty i błony mają wprawdzie dostatecznie wielką powierzchnię, aby wytwarzać w powietrzu wyraźne fale dźwiękowe, same jednе nie są atoli używane, w połączeniu natomiast z innemi instrumentami oddają muzyce orkiestrowej znakomite usługi. Dzwonów używa się głównie wtedy, gdy chodzi o to, aby dźwięk był słyszany daleko wokoło.

Przejdźmy teraz do drugiej grupy instrumentów, zwanych dętemi. Rury ich, w których zawarte jest drgające powietrze, oznaczamy wspólnem mianem piszczałek albo fujarek. Odróżniają, jak nam już wiadomo, dwa ich rodzaje: wargowe i języczkowe.

W organach, zawierających zarówno piszczałki wargowe — kryte i otwarte, jak i języczkowe, każdej z nich odpowiada jeden ton zasadniczy. Szerokie piszczałki kryte dają, zwłaszcza przy słabem zadęciu, prawie tylko ton zasadniczy, wskutek czego brzmienie ich jest nieco czcze; dla usunięcia tego braku łączą z niemi krótsze piszczałki, przez co otrzymuje się odnośne tony harmoniczne. Wązkie piszczałki kryte wytwarzają obok tonu zasadniczego, pierwszy przyton — mianowicie kwintę oktawy. W brzmieniu szerokich piszczałek otwartych, oprócz tonu zasadniczego, słychać dosyć wyraźnie pierwszy przyton t. j. oktawę, drugi zaś—kwinta oktawy—występuje już znacznie słabiej. Wąz-

kie otwarte fujarki dają, zwłaszcza przy silniejszem zadęciu, cały szereg przytonów, głośno towarzyszących tonowi zasadniczemu, co nadaje całemu brzmieniu ostry nieco charakter, przypominający poniekąd brzmienie skrzypiec. Wyższe regestry organów, jak regestr fletowy, składają się prawie wyłącznie z piszczałek krytych, dających milsze i łagodniejsze tony, niż otwarte. Języczki dodaje się do niektórych piszczałek dla obniżenia ich tonów.

Flet, pikulina i flageolet przedstawiają piszczałki wargowe otwarte. W instrumentach tych, dających słabe tylko i bardzo nieliczne przytony, jedna i ta sama rura służy do wytwarzania wszystkich tonów gamy chromatycznej; dokonywa się zaś tego przez zamykanie lub otwieranie otworów bocznych, wskutek czego zmienia się długość drgającego słupa powietrza (oraz położenie węzłów), a więc i wysokość odnośnego tonu. W flageolecie mundsztuk jest tak urządzony, że powietrze wchodzi do jego wnętrza tylko w kierunku, przy którym powstaje najprzyjemniejszy ton. We flecie zaś i pikulinie kierunek prądu, wzbudzającego drgania, a do pewnego stopnia także rodzaj dźwięku i nawet wysokość tonu znajdują się pod kontrolą grającego.

Z instrumentów dętych języczkowych, harmonika ustna i fisharmonia nie posiadają wcale czar głosowych, lecz tylko pudła rezonansowe, które działają jako pośredniki i większą swą powierzchnią przenoszą słabe drgania języczków na otaczające pudło powietrze. Języczkowe piszczałki organów zaopatrzone są w czary głosowe (patrz fig. 216, str. 320), wzmacniające ton zasadniczy, jakoteż przytony języczka, który w tych instrumentach jest sztywny, tak że długość czary musi być przystosowana do jego rozmiarów (patrz str. 320). Brzmienia języczkowe są ostre i grzechotliwe, stosowne jednak czary głosowe mogą znacznie złagodzić ostrość brzmienia.

Zupełnie inaczej zachowują się instrumenty dęte o języczku lekkim i giętkim, wyrabianym po większej części z trzciny włoskiej; języczek taki przystosowuje się do drgań słupa powietrza, zawartego w połączonej z nim fujarce (patrz str. 322); ta sama piszczałka służy do wytwarzania różnych tonów, podobnie jak to się dzieje we flecie. Tu należą: klarnet, obój, fagot, zwykła

fujarka wierzbowa i inne podobne instrumenty. Klarnet, z powodu jednostajnej szerokości fujarki, zachowuje się jak piszczałka kryta; daje on tony, o oktawę wyższe od tonów fletu równej długości, z przytonów zaś daje tylko nieparzyste; przeciwnie obój i fagot, z powodu ostrokręgowego rozszerzenia fujarek, zbliżają się więcej do piszczałek otwartych. Mundsztuk klarnetu posiada pojedyńczy języczek trzcinowy, który przy zadęciu prawie zupełnie zamyka otwór ustny; obój zaś i fagot mają podwójny języczek, podobnie jak i fujarka wierzbowa, która może być uważana za pierwowzór tych ostatnich instrumentów.

Blaszane (mosiężne) instrumenty dęte, jak: różne trąby, róg, bombardon, ofikleida, cornet à piston i t. d. są to również piszczałki języczkowe otwarte, chociaż nie mają wcale języczków. Te ostatnie zastąpione są tu przez wargi grającego, które podczas grania silnie się przyciska do mundsztuka, tak jednak, ażeby pomiędzy niemi pozostała jeszcze wązka szpara dla przepuszczenia powietrza, wdymanego przez płuca. Brzegi warg przy zadęciu zostają wprawione w drgania, powietrze zaś, zawarte w instrumencie, odbrzmiewa; w podobny sposób tłómaczy się także zwykłe świstanie wargami, językiem i zębami. Mniej lub więcej zgięta albo skręcona rura tych instrumentów jest bardzo wązka w stosunku do jej długości tak, że nie daje ona nigdy tonu zasadniczego, lecz tylko tony harmoniczne, zależnie od sposobu i siły zadęcia oraz napięcia warg. Ponieważ jednak długość rury, a zatem i objętość drgającego powietrza można zmieniać, przeto każdy ton w obrębie pewnej skali można uczynić tonem harmonicznym pewnego tonu zasadniczego. Zmiany te grający uskutecznia za pomocą wysuwania rury (jak np. w trombonach), albo za pomocą tłoków, które wydłużają rurę o pewną z góry określoną wielkość (np. w trąbce lub w cornet à piston), albo wreszcie za pomocą drążków, które skracają rurę (np. w ofikleidzie). Niektóre jednak instrumenty, jak róg francuzki, dają tylko pewien ton zasadniczy oraz jego przytony; objętość drgającego w nich powietrza można atoli zmieniać przez używanie t. zw. nadstawek, których wymiary są tak dobrane, aby zmieniały ton zasadniczy o pewien z góry określony interwal, zależny

od wielkości nadstawki. Oprócz tego wydawany ton można jeszcze zmieniać w pewnych granicach, zarówno co do wysokości, jak i brzmienia, przez stosowne ułożenie warg, jakoteż przez zasłanianie prawą ręką wylotu instrumentu lub przez granie przy otwartym wylocie. Instrumenty te dają tony tej samej wysokości, co i piszczałki otwarte równej długości. Dźwięki ich są nader bogate w tony harmoniczne, zwłaszcza wyższe.

Organ głosowy człowieka i wielu zwierząt przedstawia również pewnego rodzaju piszczałkę języczkową: płuca tworzą miech; tchawica — przewód powietrzny; krtań — nóżkę, której górna część, zamiast języczka, zawiera wiązadła elastyczne; gardziel i jama ustna — czarę głosową.

Tchawica stanowi, jak wiadomo, długą rurę, przez którą wdychane powietrze dostaje się do płuc; składa się ona z pewnej liczby chrząstkowatych obrączek, umieszczonych jedna nad drugą. Górną część tchawicy tworzy *krtań* — najważniejsza część organu głosowego, składająca się z chrząstek: pierścieniowej, tarczowej i dwóch czerpakowych, oraz kilku innych mniejszych; są one połączone z sobą i z górną obrączką tchawicy i mogą się zbliżać lub oddalać od siebie pod wpływem działania pewnych mięśni. Wpoprzek krtani ciągną się dwa elastyczne paski, zwane *wiązadłami* albo *strunami głosowemi*, przyczepione od przodu do chrząstki tarczowej, od tyłu zaś do chrząstek czerpakowych tak jednak, że pomiędzy temi wiązadłami pozostaje jeszcze szpara, przepuszczająca powietrze — *szpara głosowa* czyli *głośnia* (glottis) (1). Ponad temi wiązadłami znajdują się dwie boczne workowate jamistości (ventriculi Morgagni), których górne brzegi, zbliżone do siebie, tworzą jakby drugą szparę głosową, nakrywaną przez t. zw. *nagłośnię* (epiglottis) (2) — chrząstkę, leżącą tuż za językiem i przyczepioną jednym końcem do przedniej części gardzieli. Przy oddychaniu lub wydawaniu głosu nagłośnia się podnosi, przeciwnie przy połykaniu opuszcza się i nakrywa górną szparę, powstrzymując pokarm lub napój od wejścia do

(1) Przez wyraz *glottis* grecy oznaczali górną część fletu.

(2) *Epi* znaczy po grecku *na, nad.*

krtani i tchawicy. Figura 243 przedstawia część krtani i część tchawicy (w pionowym przekroju), widzianych z tyłu: *a* – przekrój chrząstki pierścieniowej, *b* – chrząstki tarczowej, *c* – dolnych strun głosowych, *d* – górnych strun głosowych, *e* – ventriculi Morgagni.

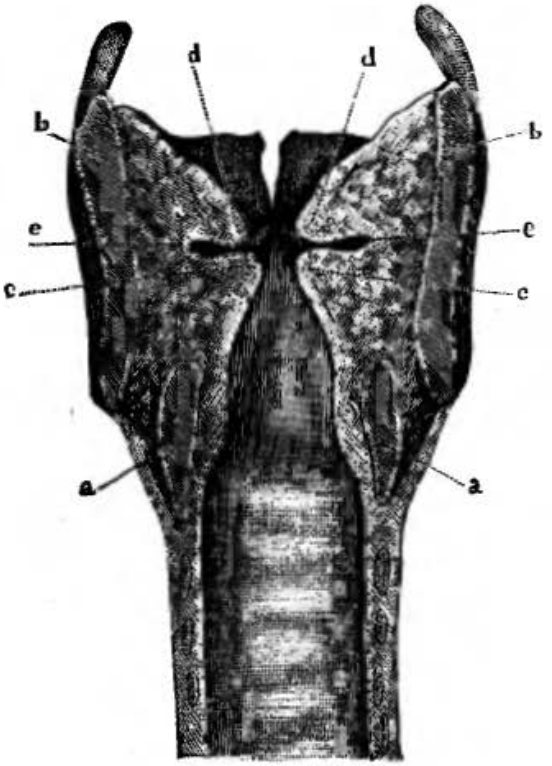
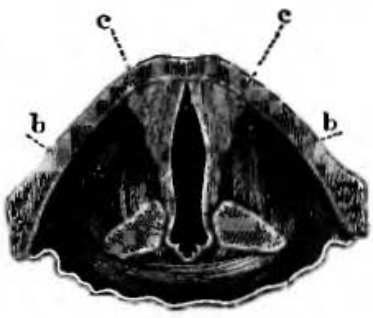


Fig. 243. Pionowy przekrój krtani i części tchawicy.

Przy zwykłem oddychaniu głośnia jest znacznie rozszerzona (figura 244) i przepływający przez nią prąd powietrza nie wytwarza żadnego dźwięku, podczas mówienia natomiast albo śpiewania struny głosowe odpowiednio się naprężają, szpara zaś pomiędzy niemi się zwęża (fig. 245) i wchodzące przez nią powietrze wprawia struny w drgania. Peryod tych drgań, a więc i wysokość tonu zmienia się wraz ze stopniem naprężenia strun; bardzo wielką rolę odgrywa tu także, jak to po-



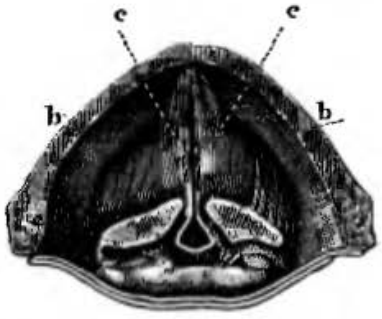


Fig. 244 i 245. Poprzeczny przekrój krtani, widzianej z góry: podczas oddychania (244) i śpiewu (245).

niżej wyłuszczymy, rezonans jamy ustnej, który, wzmacniając te lub owe tony strun, warunkuje koloryt głosu. Gładkość i mięk-

kość głosu pochodzi ztąd, że podczas drgań, głośnia, wskutek zachodzenia na siebie strun głosowych, w równomiernych odstępach czasu zamyka się. Szybkość i dokładność, z jaką struny głosowe zmieniają swe naprężenie oraz kształt i wielkość szpary, w połączeniu z dostosowywaniem się jamy ustnej dla wzmocnienia tych lub owych tonów, czynią z organu głosowego człowieka najdoskonalszy instrument muzyczny.

Sławny uczony Johannes Müller, opierając się na pracach swych poprzedników Ferraina, Biota i Cagnard-Latour'a, ostatecznie wykazał analogię między wytwarzaniem głosu w krtani i powstawaniem dźwięku w piszczałkach języczkowych, w których rolę języczka odgrywają drgające elastyczne błony. Naśladował on działalność strun głosowych: kauczukowe błony tak były napięte nad otworem szklanej rury, że pomiędzy niemi pozostawała jeszcze wązka szpara; przy przepychaniu powietrza przez tę szparę, błony zaczynały drgać i wydawać ton muzykalny. Helmholtz posługuje się stosowniejszą do tego celu rurą, u góry z dwóch stron skośnie ściętą i nakrytą dwiema słabo wyprężonemi błonami kauczukowemi, pozostawiającemi między sobą bardzo wązką szparę, od dołu zaś otwartą. Wysokość tonu, wydawanego przez taki przyrząd, zależy od stopnia naprężenia błon.

Tworzenie się samogłosek w organie głosowym człowieka oddawna stanowi ulubiony przedmiot badań dla wielu uczonych. Liczne doświadczenia wykonane były w tej mierze przez Kratzensteina, Kempelena, zwłaszcza zaś przez Willisa; teoretycznie kwestya ta opracowaną została przez Wheatstone'a, bardziej wyczerpująco zaś przez Helmholtza, który obrał ją za przedmiot wyczerpujących studyów. Proste doświadczenia, wykonane po raz pierwszy przez Willisa, pozwolą nam poznać przyczynę pewnych właściwości głosu ludzkiego.

Weźmy stosowny języczek, nie połączony z czarą głosową (porównaj np. fig. 217, str. 320) i wdymajmy za pomocą miechów do nóżki powietrze, a otrzymamy głośny i ostry dźwięk. Połączmy teraz z języczkiem ostrokręgowo ku górze rozszerzającą się czarę głosową,— wówczas koloryt dźwięku się zmieni

i jeżeli będziemy przesuwali dłoń wpoprzek wylotu czary, to otrzymamy dźwięk bardzo podobny do głosu ludzkiego. Zakryjmy np. zupełnie wylot czary dłonią i następnie podnieśmy szybko tę ostatnią dwa razy do góry, a usłyszymy wyraz „mama," jakby wymawiany przez dziecko. Użyjmy do doświadczenia krótszej niż poprzednia czary, a usłyszymy rzeczony wyraz tak, jak gdyby wymówiony przez dziecko o zatkanych nozdrzach. Łącząc więc z drgającym języczkiem odpowiednią piszczałkę (czarę głosową), możemy dźwiękom jego nadać właściwości głosu ludzkiego.

Otóż w organie głosowym człowieka rolę języczka odgrywają struny głosowe, rolę zaś czary—jama ustna, której kształt możemy dowolnie zmieniać tak, że wzmacnia ona ton zasadniczy albo niektóre przytony strun głosowych; rozmaitym też kombinacyom tych tonów różnej wysokości i natężenia należy przypisać różnice w brzmieniu samogłosek. Możemy się o tem przekonać za pomocą następujących doświadczeń: Trzymajmy przed otworem ust drgający kamerton, nastrojony na ton *f* i zmieniajmy układ jamy ustnej dopóty, dopóki nie zacznie ona silnie odbrzmiewać na ton stroika; po osiągnięciu tego, usuńmy na stronę kamerton i, nie zmieniając w niczem kształtu jamy ustnej, wydychajmy powietrze z płuc przez głośnię: usłyszymy wówczas samogłoskę „u," a nie żadną inną. Przy wymawianiu „u" jama ustna jest więc nastrojona na ton *f*. W podobny sposób daje się wykazać, jak tego pierwszy dowiódł Donders, że przy wymawianiu „o" jama ustna nastrojona jest na ton *b'*, przy „a"—na ton *b''* aż do *d'''* i t. d., przyczem same struny głosowe mogą we wszystkich tych wypadkach być nastrojone na ten sam ton zasadniczy.

Analizę dźwięków samogłoskowych możemy wykonać za pomocą przyrządu Koeniga, opisanego na str. 364: gdy w pobliżu rezonatorów wymawiamy daną samogłoskę, wtedy niektóre z nich odbrzmiewają i widzimy, że pewne smugi świetlne w obracającem się zwierciedle są mniej lub więcej wyraźnie zazębione, inne zaś—nie. Z drugiej strony Helmholtz zdołał, za pomocą przyrządu, przedstawionego na fig. 240, str. 372, sztucznie od-

tworzyć różne samogłoski przez stosowne kombinacye tonów stroików.

Jednakże wypada nadmienić, że kwestya powstawania dźwięków samogłoskowych bynajmniej jeszcze nie jest ostatecznie załatwiona i nie przestała być przedmiotem badań teoretycznych, jakoteż doświadczalnych dla wielu fizyków i fizyologów. Co się tyczy spółgłosek, to powstają one wskutek hałasów, wytwarzanych przez wargi, zęby, język i t. d. i towarzyszących początkowi oraz końcowi dźwięków samogłoskowych. Hałasy te są o wiele mniej intensywne, niż tony dające początek samogłoskom, wskutek czego pierwsze cichną już na takiej odległości od mówiącego, przy której samogłoski doskonale jeszcze słyszymy. Z tego wynika, że przy mówieniu do osób o słabym słuchu, niekonieczne jest podnoszenie głosu, wystarcza już dobitnie i wyraźnie wymawiać spółgłoski.

§ 3. Ucho.

Na zakończenie niniejszej księgi musimy jeszcze rozważyć ów misternie zbudowany organ, za pośrednictwem którego odbieramy wrażenia słuchowe. Organ ten u człowieka składa się z ucha zewnętrznego, środkowego i wewnętrznego. Pierwsze utworzone jest z konchy usznej i zewnętrznego przewodu słuchowego, zamkniętego przez błonę, drugie stanowi jamę, komunikującą bezpośrednio z jamą gardzielową, a więc z zewnętrznem powietrzem; nareszcie ucho wewnętrzne tworzy również oddzielną jamę, wypełnioną wodnistą cieczą, w której znajdują się zakończenia nerwu słuchowego.

Koncha uszna (fig. 246) *A* służy do zbierania fal dźwiękowych i przenoszenia ich wzdłuż *zewnętrznego przewodu słuchowego B* na zamykającą takowy *błonę bębenkową C*, która oddziela ucho zewnętrzne od środkowego. Błona ta, dzięki bardzo kunsztownemu urządzeniu, może przejmować najrozmaitsze drgania dźwiękowe, zachodzące w otoczeniu, podobnie jak to czyni błona w fonautografie (patrz fig. 239, str. 366) i za pomocą nader delikatnego przyrządu przenosi je na ciecz, zawartą

w uchu wewnętrznem. Przyrząd ten, umieszczony w środkowej części ucha, t. zw. *jamie bębenkowej*, składa się z trzech kosteczek, przypominających z postaci swej *młotek*, *kowadło* i *strzemię*.

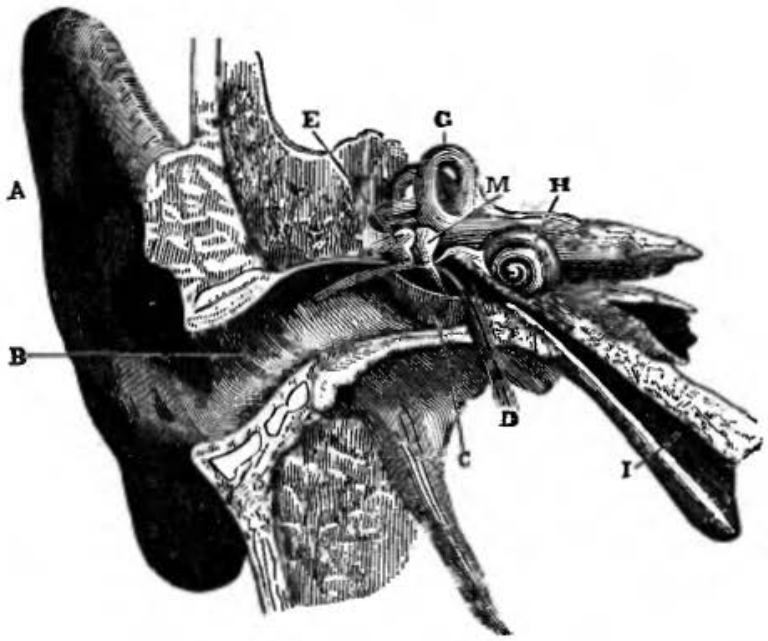


Fig. 246. Wnętrze organu słuchowego.

Drgania błony bębenkowej udzielają się przylegającemu do niej trzonkowi młotka *M*, który główką swą, wchodzącą w panewkę kowadła *E*, wprawia takowe w ruch oscylacyjny. Kowadło posiada dość długi wyrostek, połączony stawowo z główką strzemienia *L* (fig. 247), którego stopa *K* przylega do błonki, rozpiętej wpoprzek niewielkiego otworu, zwanego *okienkiem owalnem*, prowadzącego do wewnętrznego ucha. Mechanizm rzeczonych kosteczek jest dźwigniowy i sprawia, że ruchy strzemienia są silniejsze, aniżeli powodujące je drgania błony bębenkowej. Oprócz tych kosteczek w przestrzeni, zawartej pomiędzy uchem zewnętrznem i wewnętrznem, znajdują się jeszcze mięśnie, służące

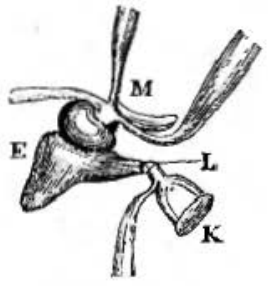


Fig. 247. Układ kosteczek w jamie bębenkowej.

do większego lub mniejszego naprężania błony bębenkowej i do ochraniania jej od zbyt gwałtownych wstrząśnień. Przestrzeń ta łączy się nadto za pomocą wązkiego kanaliku *I—rurki Eustachego* z jamą gardzielową; głównem przeznaczeniem tego kanaliku jest odprowadzanie możliwych wydzielin z jamy bębenkowej i odmienianie zawartego w niej powietrza, gdyby bowiem to ostatnie znajdowało się w jamie zewsząd zamkniętej, wówczas uległoby wessaniu, do utworzonej zaś przez to próżni wysiękałyby soki ze krwi i tkanek.

Opisane dotychczas części organu słuchowego służą, jak się zdaje, do wzmacniania drgań dźwiękowych, za czem przemawia okoliczność, że utrata błony bębenkowej i wyżej wymienionych kosteczek nie sprowadza głuchoty, lecz tylko osłabienie słuchu. Najważniejszą część tego organu stanowi ucho wewnętrzne, t. z *labirynt*. Jestto dziwacznie ukształtowana jama, zbudowana z błoniastych ścian, umieszczonych wśród bardzo twardej tkanki kostnej. Powiedzieliśmy już wyżej, że stopa strzemienia bezpośrednio przylega do błonki, zamykającej owalne okienko wewnętrznej jamy ucha. Otóż drgania dźwiękowe, zachodzące w otaczającem powietrzu, przenoszą się za pośrednictwem błony bębenkowej, młotka, kowadła i strzemienia na ostatnio wymienioną błonkę i wprawiają ciecz wodnistą, wypełniającą labirynt, w ruch falisty, odpowiadający pierwotnym drganiom. Ciecz ta, jako ciało trudno ściśliwe, będąc zamknięta w mocnych ścianach ucha wewnętrznego, paraliżowałaby jednak ruch stopy strzemienia, a więc także wszystkie poprzedzające ruchy, gdyby ucho wewnętrzne nie posiadało jeszcze drugiego—*okrągłego okienka*, zamkniętego podatną błonką, która mniej lub więcej ustępując naciskowi falującej cieczy wodnistej, pozwala swobodnie rozegrywać się ruchom kosteczek i wytwarzać fale cieczy, zawartej w labiryncie.

Labirynt składa się z 3 komunikujących z sobą części: ze środkowej, stanowiącej t. zw. *przedsionek* do dwu części skrajnych, z których jedna tworzy 3 *półkuliste kanały* (fig. 246 *G*), druga zaś przedstawia kanał, zwinięty w postaci *ślimaka H*. Przekrój ślimaka przedstawiony jest oddzielnie na fig. 248.

Falowania wodnistej cieczy, zawartej w labiryncie—zachodzące pod wpływem oscylacyj błonki, która zakrywa owalne okienko—przenoszą się na delikatne zakończenia nerwu słuchowego, wnikające do wnętrza kanałów półkulistych, przedsionka, najwięcej zaś do wnętrza ślimaka. Przenoszenie to nie dokonywa się jednak bezpośrednio. W pewnem mianowicie miejscu labiryntu wyrastają pomiędzy włóknami nerwowemi nader delikatne, ostro zakończone *włoski*—odkryte przez Maksa Schultzego—doskonale się nadające do współdrgania z oscylacyami cieczy. Będąc wprawione w drgania przez ciecz, włoski te pobudzają leżące pomiędzy ich korzeniami włókienka nerwowe, a za ich pośrednictwem odnośne ośrodki mózgowe, wywołując w tych ostatnich pewne zmiany, którym towarzyszy wrażenie dźwięku. W innem znowu miejscu labiryntu znajdują się małe utwory krystaliczne, zwane *otolitami* czyli *kamykami słuchowemi*, które podczas drgania wywierają przerywane ciśnienie na sąsiednie włókienka nerwowe i pobudzają je jak wyżej. Kamyki te służą prawdopodobnie do innego celu, niż rzeczone włoski słuchowe: podczas gdy pierwsze, z powodu swego ciężaru, nadają się głównie do przenoszenia najlżejszych szmerów oraz do przejmowania szybko przemijających tonów, których bez ich pomocy nie moglibyśmy, jak się zdaje, wcale odczuć, to przeciwnie włoski słuchowe, wskutek swej lekkości, wydają się być najwłaściwszemi pośrednikami do przenoszenia brzmień głośniejszych i ciągłych. Jeszcze ważniejszą, zdaje się, rolę w przenoszeniu falowań rzeczonej cieczy na zakończenia nerwu słuchowego odgrywa nader misternie zbudowany *organ Corti'ego* (zwany tak od imienia odkrywcy), umieszczony we wnętrzu ślimaka. Organ ten utworzony z oddzielnych włókienek, których liczba według Koellikera wynosi około 3000, przedstawia jakby instrument muzyczny, coś w rodzaju harfy, której oddzielne struny (włókienka) są tak naprężone, że z łatwością mogą przejmować oscylacye

Fig. 248. Przekrój ślimaka.

o najrozmaitszym peryodzie drgania i przenosić je na przebiegające ten organ włókna nerwowe. Od tysięcy więc lat, powiada Tyndall, w uchu wewnętrznem człowieka istniała już ta harfa o 3000 strunach i bez naszej wiedzy i udziału przejmowała muzykę otaczającego nas świata, aby ją w odpowiedni sposób przygotować dla mózgu. Każde bowiem drganie dźwiękowe, padające na ten organ, wybiera sobie z pomiędzy jego odrębnie nastrojonych włókienek te, które mogą z niem współdrgać i wprawia je w oscylacye. Dzięki temu kunsztownemu urządzeniu, ucho nasze samo analizuje każdy, chociażby najbardziej złożony, dźwięk, rozkładając go na ton zasadniczy oraz tony górne i udostępnia nam w ten sposób całe bogactwo świata tonów (1).

Jakkolwiek nie udało się jeszcze dostatecznie wyjaśnić wielu punktów procesu słyszenia i rozróżniania dźwięków, to jednak w ostatnich dziesiątkach lat gałęź ta wiedzy ludzkiej, dzięki zwłaszcza gruntownym badaniom Helmholtza, znakomicie posunęła się naprzód i można się spodziewać, że bezustanne poszukiwania fizyków i fizyologów zdołają usunąć pozostałe jeszcze wątpliwości. W całym wszakże procesie słyszenia najbardziej wzbudza nasz podziw owa nieskończona zda się różnorodność wrażeń, do jakich zdolne jest ucho. Dzięki właśnie tej okoliczności, że zmysł słuchu umożliwia odczuwanie najsubtelniejszych odcieni dźwięków, zyskuje on wespół z organem głosowym ową wielką doniosłość dla całego życia umysłowego ludzi, staje się pośrednikiem przy wymianie ich myśli i uczuć.

---

(1) Bliższe szczegóły, dotyczące organu słuchu, czytelnik może znaleźć w przystępnem i zajmującem dziełku d-ra Henryka Nusbauma „O wrażeniach zmysłowych."

KSIĘGA TRZECIA.

ŚWIATŁO.

ROZDZIAŁ I.

Światło w przyrodzie.

§ 1. Zjawiska ogólne.

Podczas gdy państwo dźwięku dostarcza naszemu duchowemu życiu koniecznych wrażeń słuchowych, gdy daje człowiekowi najlepsze środki do uzewnętrzniania myśli jego i uczuć, światło pozwala nam widzieć całą piękność i przepych otaczającej przyrody i—co ważniejsze—stanowi niezbędny warunek życia, zarówno naszego, jak i w ogóle całego organizowanego świata. Roślina zwraca się do słońca i rozwija pod jego dobroczynnym wpływem, w ciemności zaś zanika stopniowo; my sami czujemy budzącego się ducha po przejściu nocy i pojawieniu się światła dziennego.

Światło dnia, wywołujące tak różnorodne zjawiska, pochodzi wprawdzie z jedynego tylko, lecz niezmiernie potężnego źródła. Oko nasze nie może znieść bezpośredniego jego działania, oślepione odwraca się od słońca, nie zasłoniętego przez chmurę; nawet części nieba, najbliżej słońca leżące, wysyłają do nas zbyt jeszcze wielką ilość światła, ażebyśmy mogli bezkarnie spoglądać na nie gołem okiem. Zupełnie inaczej rzeczy się mają, gdy światło słoneczne pada najprzód na ciała nas otaczające i dopiero

po odbiciu się od nich wchodzi do naszego oka: nietylko że traci ona przez to tak wiele ze swego natężenia, iż nie obraża już naszego zmysłu wzroku, ale ulega jeszcze innej, bardzo zadziwiającej i ważnej zmianie. Mianowicie bezpośrednie światło słoneczne jest pozornie proste czyli jednorodne, posiada bowiem tylko jednę barwę; w razie zaś, gdy ulega odbiciu od rozmaitych ciał, przedstawia tak wielką mnogość odcieni i taką rozmaitość barw, jakiej zaledwie moglibyśmy się spodziewać. Jesteśmy tak przyzwyczajeni do tej zmiany, że w ogóle nie zwracamy na nią uwagi; zdaje się nam, iż każde ciało posiada samo przez się swą barwę, zwykle też sądzimy, że jakiekolwiekbądź źródło światła tylko ujawnia dla nas tę swoistą własność ciał. Zobaczymy jednak, że barwa tych ostatnich zależy jedynie od sposobu, w jaki odbijają one lub przepuszczają padające na nie światło. Światło i barwy wywierają na oko nasze właściwy im czar tak, że nawet niektórzy z malarzy popełnili błąd, nadając w swych obrazach zbyt wielką wagę świetności barw i zaniedbując przytem sam rysunek, podobnie jak to ma miejsce w nowoczesnej muzyce, gdzie świetność tonu bierze niekiedy górę nad jasnością melodyi. Wszakże gdy chcemy napawać się pięknością barw, nie mamy zaiste potrzeby udawać się do muzeów i podziwiać tam obrazy Rembrandta, Lorrain'a i innych mistrzów pędzla, albowiem w naturze samej istnieją tego rodzaju skarby, na które należy tylko umieć patrzeć. Promień słoneczny, załamany przy przejściu przez wodę, czerwień porannego i wieczornego nieba, błyszczące krople rosy na trawie, wspaniałe barwy bańki mydlanej oraz wiele innych podobnych zjawisk mogą z jednej strony posłużyć malarzowi jako odpowiednie wzory, z drugiej zaś stanowią dla myślącego człowieka potężną pobudkę do badania tajemnic natury. Cóż dziwnego, że w obec tych czarów, pierwotne ludy w swej naiwnej nieświadomości powzięły najgłębszą cześć dla słońca, od którego otrzymują największe dobrodziejstwo, a mianowicie światło i ciepło, że uważały je za wyższą istotę i czciły jako wszechwładne bóstwo świata. Z mniejszą czcią, lecz z większem za to zrozumieniem nauka obserwowała zjawiska świetlne, a przez subtelne i pilne badania udało się jej wy-

kryć prawa tych zjawisk. Zanim przystąpimy do opisu rzeczonych praw, postarajmy się poznać najprzód najważniejsze źródła światła.

§ 2. Źródła światła.

Źródła światła można, pod względem ich rozmieszczenia, podzielić na dwie grupy: jedna obejmuje te, które znajdują się zdala od ziemi w przestworach wszechświata, druga zaś—źródła bardziej dostępne dla nas, mieszczące się na powierzchni naszej planety lub w jej atmosferycznej powłoce. Do pierwszej należy słońce, którego blask, według Wollastona, przewyższa 800,000 razy blask księżyca w pełni. Jeżeli porównamy natężenie światła słonecznego ze światłem, wysyłanem do nas przez najjaśniejszą na niebie gwiazdę stałą— Syryusza — wynoszącem tylko $^1/_{7000}$ część światła księżycowego, to dojdziemy do wniosku, że potrzebaby było 5600 milionów takich gwiazd, ażeby dostarczyć ziemi tej ilości światła, jaką obecnie od słońca otrzymuje.

Wskutek obrotu ziemi około osi i około słońca, natężenie światła słonecznego w różnych punktach na ziemi ulega peryodycznym zmianom w ciągu każdej doby i każdego roku. W ogóle natężenie światła słonecznego zależy od wysokości, na jakiej słońce znajduje się nad danym horyzontem, a fakt ten, znany nam dobrze z codziennego życia, zrozumiemy dopiero wtedy, gdy poznamy prawa, według jakich zmienia się natężenie światła. Obecność w powietrzu pary, pod postacią mgły lub chmury, wywiera wielki wpływ na natężenie dochodzącego nas światła słonecznego i znacznie je osłabia. Pomiędzy ciałami świecącemi na sklepieniu niebieskiem, niektóre wysyłają do nas nie własne światło, lecz zapożyczone od innych źródeł; księżyc naprzykład, tak żywo oświecający od czasu do czasu noce nasze, otrzymuje światło od słońca i pośrednio dopiero odbija promienie jego na ziemię. To samo stosuje się do wszystkich planet i ich satelitów. Przeciwnie tysiące gwiazd, błyszczące podczas jasnych nocy na niebie, wysyła do nas, podobnie jak słońce, swe własne światło, które przybywa na ziemię znacznie osłabione z powodu olbrzy-

miej odległości, jaką przebiega. Również i mgławice, a po części także i komety, stanowią istotne źródła światła.

Zobaczymy w księdze o cieple, że każde ciało, ogrzane do dostatecznie wysokiej temperatury, nabiera zdolności świecenia i może stać się samodzielnem źródłem światła. Otóż właśnie słońce i gwiazdy stałe posiadają bez wątpienia niezmiernie wysoką temperaturę i znajdują się w stanie silnego rozżarzenia. Źródła światła, znajdujące się na powierzchni ziemi albo w jej atmosferze, można podzielić na naturalne i sztuczne. Do pierwszych należy błyskawica, ogień przy wybuchu wulkanicznym, zorze północne, pojawiające się tak często w okolicach biegunowych, wreszcie meteory i kule ogniste. Można tutaj zaliczyć także światło, pochodzące z niektórych istot żyjących, jak np. robaczków świętojańskich i wielu morskich zwierząt, oraz niektórych roślin; wreszcie pewne minerały, a także gnijące materye organiczne, również należą do tej kategoryi naturalnie świecących ciał.

Co do źródeł światła, sztucznie przez człowieka wytwarzanych, to wszystkie one polegają na tem, że pewne ciała zostają doprowadzane do mniej lub więcej wysokiej temperatury, przyczem albo szybko się spalają, albo też dłużej żarzą się tylko. Naprzykład płomień zwykłego gazu, oświetlającego nasze miasta i domy, powstaje przez to, że cząstki głównego jego składnika, utworzone z węgla i wodoru, będąc silnie ogrzane, spalają się czyli łączą z tlenem powietrza; częściowo także cząstki te rozkładają się na swoje elementy, przyczem węgiel wydziela się pod postacią niezmiernie delikatnego pyłku, unoszącego się wśród płomienia. Stałe cząstki tego pyłku węglowego zostają silnie rozżarzone i im też płomień gazowy, sam przez się słabo świecący, zawdzięcza swe żywe światło. Płomienie świec i lamp nie różnią się zasadniczo od płomienia zwykłego gazu, w nich bowiem także spala się pewne połączenie węgla i wodoru, one również zawdzięczają swe światło głównie znajdującym się w ich wnętrzu rozżarzonym cząstkom węgla. Jeżeli do płomienia słabo świecącego, lecz mającego bardzo wysoką temperaturę (w księdze o cieple zobaczymy, że płomień taki można otrzymać przez

silny dopływ tlenu) wprowadzimy naprzykład drut żelazny, to metal ten spali się i stopi, dając przytem wspaniałe iskry. Jeżeli natomiast do takiego bardzo gorącego płomienia wprowadzimy ciało niepalne i nietopliwe, naprzykład wapień, wtedy rozżarza się ono nadzwyczaj silnie i daje olśniewające światło, które—od jego wynalazcy—nazywamy światłem Drummonda. Najpotężniejsze wszakże sztuczne światło, dające się nawet porównać do światła słonecznego, otrzymuje się, gdy prąd elektryczny przebiega pomiędzy dwoma stosownie przygotowanemi węglami: W przerwie, oddzielającej te ostatnie, zjawia się świetlny łuk, utworzony przez niezmiernie drobne pyłki węglowe, które odrywają się od jednego z węgli i które, wskutek tego że przeprowadzają prąd elektryczny, znajdują się w stanie bardzo silnego rozżarzenia. W księdze, traktującej o elektryczności, pomówimy obszerniej o tym przedmiocie.

ROZDZIAŁ II.

Rozprzestrzenianie się światła w środkach jednorodnych.

§ 1. Prostolinijne rozprzestrzenianie się światła.

Gdy światło pada na przedmiot, sam przez się ciemny, wtedy zwykle zostaje ono przezeń odbite, przyczem ulega pewnej modyfikacyi, przedmiot zaś staje się źródłem światła zapożyczonego. Wiele jednak ciał przepuszcza w mniejszym lub większym stopniu padające na nie światło; powiadamy wtedy o nich, że są *przezroczyste*. Przezroczystość z jednej i nieprzezroczystość z drugiej strony nigdy jednak nie jest absolutna. Światło, przechodząc przez najbardziej nawet przezroczyste ciała, jak powietrze, woda, szkło, zostaje w części pochłonięte i to tem bardziej, im grubsza jest warstwa tego ciała. Po przez szklaną płytę lub warstwę wody nieznacznej grubości możemy zupełnie

dokładnie widzieć przedmioty, coraz mniej wyraźnie jednak w miarę wzrastającej grubości szkła lub wody. Jednocześnie samo ciało pochłaniające światło, z początku zupełnie bezbarwne, przybiera barwę coraz wyrazistszą i pełniejszą, aż w końcu, gdy światło zostaje całkowicie pochłonięte, widzimy już tylko to ciało, nie dostrzegamy zaś wcale przedmiotów, po za niem umieszczonych. W celu stwierdzenia tego na drodze doświadczalnej, Cialdi zanurzał w morzu, w blizkości brzegu Civita-Vechia, tam gdzie woda była nadzwyczajnie czysta, białą płytę i zauważył, że najwyżej na głębokości 45 metrów znikła ona dla oczu jego. „Biała barwa płyty z początku przeszła w zielonawą, następnie w czysty błękit, który stawał się stopniowo coraz ciemniejszy, w miarę większego pogłębiania przyrządu, aż wreszcie nie można było wcale odróżnić barwy płyty od barwy otaczającego środka.“ Płyty żółte lub mające kolor morskiego mułu, stawały się niewidzialne w tych samych warunkach już na głębokości 17 lub 24 metrów.

Przezroczystość gazów i bardzo czystego powietrza atmosferycznego jest o wiele większa tak, że stojąc podczas jasnej pogody na wysokiej górze, możemy napawać się bardzo rozległym widokiem i rozróżniać przedmioty, znajdujące się na znacznej od nas odległości. Według zdania Martins'a, możnaby, przy zupełnie przezroczystem powietrzu, objąć wzrokiem z wierzchołka góry Mont-Blanc koło, którego promień równałby się 210 kilometrom, możnaby więc dostrzedz jeszcze zatokę genueńską, lecz już na odległości większej niż 100 kilometrów przedmioty, z powodu par w powietrzu, wydają się jakby pokryte zasłoną, są niejasne i tylko na odległości 60 kilometrów można je wyraźnie rozróżnić.

Obok ciał, istotnie przezroczystych, są jeszcze takie, które wprawdzie przepuszczają światło, w zbyt jednak słabym stopniu, ażeby można było przez nie rozróżniać wyraźnie barwy i kontury przedmiotów; ciała takie nazywamy *przeświecającemi;* do nich należy szkło matowe, papier, róg, alabaster i niektóre ciecze, jak np. mleko. Papier, zmoczony lub nasycony oliwą, staje się bardziej przeświecający, a nawet—gdy jest dostatecznie cienki—przezroczysty. Podobnie znamy minerał—hydrofan—

który w stanie suchym nie przepuszcza światła, prześwieca zaś po wyjęciu go z wody, w której przeleżał przez pewien czas. Jeżeli z ciał, uchodzących za zupełnie nieprzezroczyste, np. z niektórych kamieni, drzew lub metali, przygotujemy sobie bardzo cienkie blaszki, to światło przejdzie przez nie, jakkolwiek w słabym tylko stopniu. Najbardziej zadziwiające pod tym względem jest złoto, które przez złotników może być doprowadzone do takiej cienkości, że 10000 blaszek tego metalu, ułożonych jedna na drugiej, tworzą razem warstwę grubości zaledwie

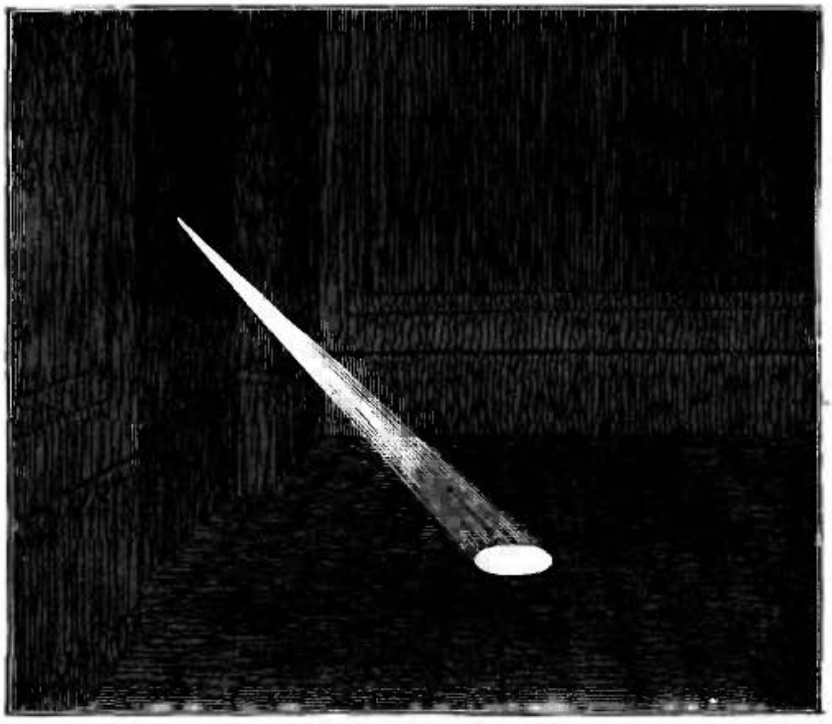


Fig. 249. Prostolinijne rozprzestrzenianie się światła.

jednego milimetra. Gdy na blaszkę taką będziemy patrzyli pod światło świecy, blaszka wyda się pięknego zielonego koloru, co dowodzi, że przepuszcza ona światło, przyczem to ostatnie nie przechodzi przez szczeliny, jakie ewentualnie w blaszce przy ubijaniu porobić się mogły, gdyż w takim razie nie przyjęłaby ona barwy odmiennej.

Zachodzi teraz pytanie, jaką drogę przebywa światło, gdy rozprzestrzenia się w danym środku? Rozpatrzmy najprzód wypadek, gdy środek ten jest jednorodny, w którym to razie bar-

dzo proste doświadczenia dadzą nam odpowiedź na powyższe pytanie. Gdy pomiędzy płomieniem świecy a okiem umieścimy szereg nieprzezroczystych ekranów, z których każdy posiada niewielki otwór, wtedy zobaczymy płomień tylko w tym razie, gdy wszystkie otwory znajdują się na jednej prostej linii z okiem i płomieniem. Przez długą i zgiętą rurę światło przechodzi tylko wtedy, gdy zgięcia są tak małe, że można od jednego końca rury do drugiego poprowadzić linię prostą, nie dotykając przytem ścian rury. Wreszcie, gdy znajdujemy się w ciemnym, ze

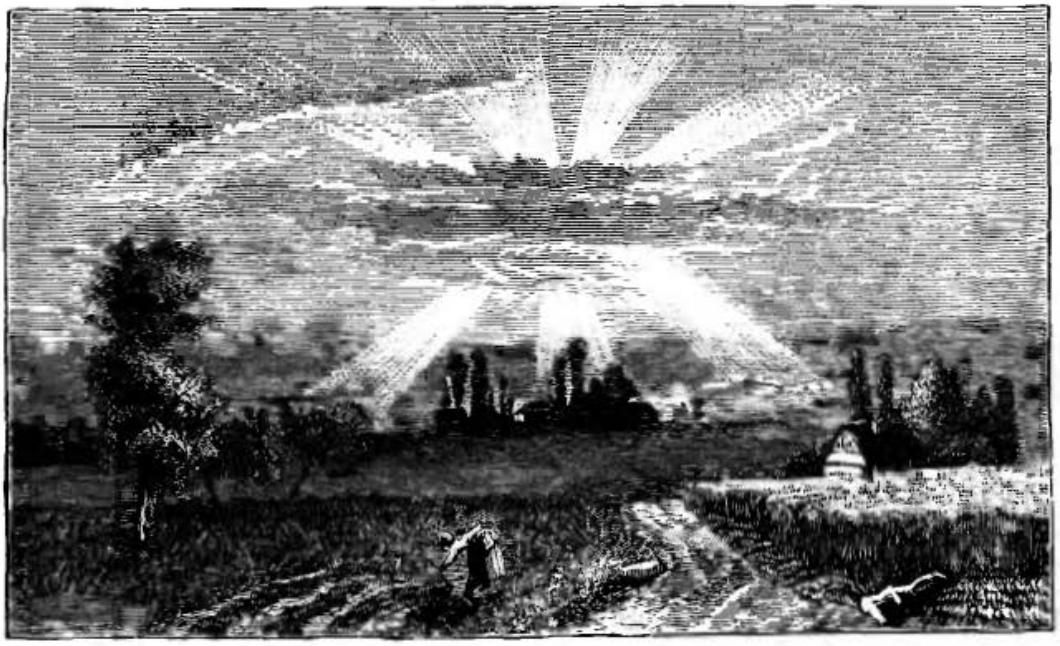


Fig. 250. Prostolinijny kierunek promieni słonecznych.

wszech stron zamkniętym pokoju, do którego światło słoneczne przenika tylko przez mały otwór w okiennicy, wtedy spostrzegamy, iż rozprzestrzenia się ono pod postacią stożka, uwidocznionego przez oświetlone pyłki, drżące w powietrzu, a ściany tego stożka są zupełnie proste (fig. 249, str. 401). W razie, gdy źródło światła znajduje się bardzo daleko od nas, promienie zaś jego biegną blizko siebie, uważamy je za równoległe, wiązkę zaś ich— jako walec lub pryzmat. Takiem naprzykład źródłem światła jest dla nas słońce. Kilka tych doświadczeń dowodzi, iż świa-

tło w środku jednorodnym rozprzestrzenia się prostolinijnie i że gdy w biegu swym napotyka ciało nieprzezroczyste, wtedy ominąć go nie może. Kierunek, w jakim światło rozchodzi się, nazywamy *promieniem* świetlnym. Gdy słońce zasłonięte jest chmurą, przez szczeliny której przechodzą wiązki promieni, wtedy te ostatnie przedstawiają się w powietrzu jako proste smugi, przynajmniej w bliskości chmury (fig. 250). Jeżeli promienie są bardzo długie, wtedy wydają się nam złamane czyli krzywe, a zjawisko to nie polega jedynie na złudzeniu naszego oka, lecz posiada istotną fizyczną przyczynę, albowiem światło słoneczne zanim pada na ziemię, przechodzi przez warstwy powietrza rozmaitej gęstości, a więc rozprzestrzenia się w środku niejednorodnym i dlatego zbacza od pierwotnego kierunku prostolinijnego. Zobaczymy bowiem dalej, że prawo, dotyczące prostolinijnego rozchodzenia się światła, stosuje się tylko do wypadku, gdy promień świetlny przebiega środek jednorodny, a więc między innemi, jednostajnie gęsty.

§ 2. Cień i półcień.

Gdyby na świecie istniały same ciała świecące oraz środki zupełnie przezroczyste, wtedy światło rozprzestrzeniałoby się we wszelkich kierunkach bez przeszkody i widzielibyśmy tylko ciała świecące w właściwy sobie sposób. W istocie jednak napotyka ono różne ciemne przedmioty, tamujące bieg jego i odrzucające je na wszystkie strony, przez co dopiero przedmioty te, jak już wiemy, stają się widoczne. Gdy nieprzezroczyste ciało znajduje się naprzeciw światła i w pewnej odeń odległości, wtedy tylko część ciała, zwrócona do niego, jest jasna, druga zaś — odwrócona pozostaje ciemną; przestrzeń po za nieoświeconą częścią ciała również jest ciemna. Jeżeli w tyle po za ciałem umieścimy ekran, na ten ostatni padną tylko te promienie, które przechodzą mimo ciała, podczas gdy pewna płaszczyzna na ekranie pozostaje ciemna; tworzy ona to, co zowiemy *cieniem* ciała. Promienie, poprowadzone w myśli od punktu świecącego (fig. 251, str. 404) do brzegów cienia, stykają się z powierzchnią ciała, cień rzucającego,

tworząc figurę stożkowatą albo piramidalną, której wierzchołek znajduje się w punkcie świecącym; cień jest właśnie miejscem przecięcia się tej figury z ekranem. Postać cienia zależy od położenia źródła światła, od kierunku ekranu oraz od kształtu samego przedmiotu; oko nasze nieświadomie śledzi ten stosunek geometryczny pomiędzy kształtem cienia a kształtem przedmiotu i dlatego cienie stanowią dla nas drogocenną wskazówkę przy oryentowaniu się co do kształtów ciała w przestrzeni. Zasada ta jest ważna np. dla malarzy, którzy muszą dbać o to, ażeby przedmioty, przedstawione na płótnie, wydawały się tak, jak

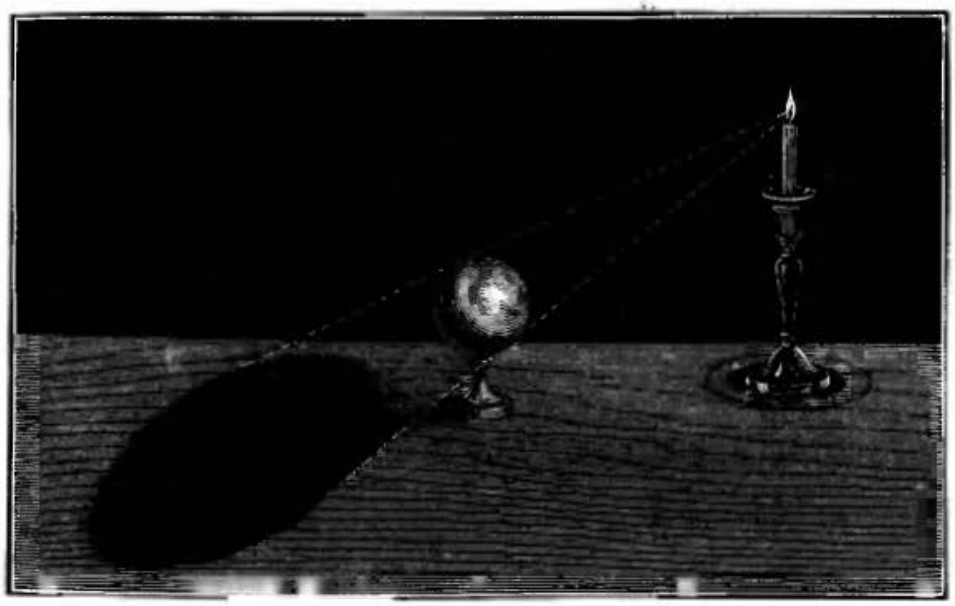


Fig. 251. Cień rzucany przez ciało nieprzezroczyste.

w przestrzeni, ażeby obraz miał, jak mówią, perspektywę. Techniczne rysunki maszyn, gmachów i t. p. składają się zwykle ze zwyczajnego oraz z t. zw. „rysunku konturowego," które razem dopiero pozwalają wykonawcy oryentować się co do przestrzeniowych stosunków mającego się budować przedmiotu; lecz gdy do zwykłego rysunku dodane są ściśle geometrycznie oznaczone cienie, wtedy w wielu wypadkach rysunek konturowy jest zbyteczny.

Gdy promienie świetlne pochodzą nie z punktu świecącego, lecz z powierzchni większych rozmiarów, wtedy zjawisko cienia

przedstawia się inaczej, niż w powyższym wypadku. Na fig. 252 widzimy pośrodku ciało świecące, po obu zaś jego stronach—nieprzezroczyste. I tutaj także pewna część oświecanego przedmiotu otrzymuje światło ze wszystkich punktów źródła świetlnego, inna zaś część pozostaje w zupełnej ciemności, lecz pomiędzy obydwiema widzimy pośrednią, słabo tylko oświetloną część, a więc ani zupełnie jasną, ani też zupełnie ciemną. Po za przedmiotem widzimy przestrzeń całkowicie ciemną, do której żaden promień się nie przedziera, otoczoną przestrzenią, częściowo oświetloną przez skrajne promienie i tworzącą *półcień;* zewnątrz półcienia przestrzeń jest już całkowicie oświetlona. Je-

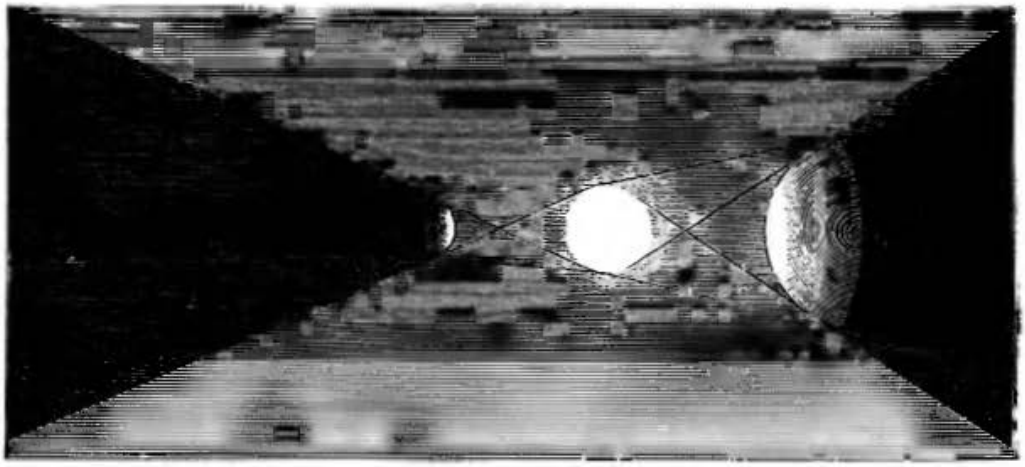


Fig. 252. Cień i półcień.

żeli ciało świecące jest większe niż przedmiot, wtedy cień jest ostro zakończony; gdy obadwa mają jednakową wielkość, cień ma kształt walcowaty; wreszcie gdy przedmiot jest większy, niż świecące ciało, cień rozszerza się coraz bardziej w miarę odległości. Co do półcienia, to średnica jego zawsze się powiększa w miarę odległości od światła. Na ekranie, umieszczonym tuż za przedmiotem, szeroki cień otoczony jest zaledwie wązkim półcieniem, który w słabym tylko stopniu zaciera kontury pierwszego; na znaczniejszej zaś odległości półcień jest większy niż cień i otrzymujemy wtedy na ekranie niewyraźną sylwetkę przedmiotu. Gdy w świetle słonecznem będziemy trzymali szpilkę tuż nad arkuszem papieru, rzuci ona nań wyraźnie zakreślony

cień; gdy oddalimy nieco papier, cień szpilki straci na wyrazistości i trudno będzie rozróżnić jego kontury.

Księżyc, ciało ciemne, oświetlone przez słońce, rzuca cień, którego długość równa prawie promieniowi orbity księżyca około ziemi; gdy więc księżyc znajduje się między słońcem a ziemią, co zdarza się niekiedy podczas nowiu, cień jego może dosięgnąć ziemi. Wtedy dla tych miejsc na powierzchni ziemi, na które pada ten cień, księżyc zupełnie zasłania sobą słońce i tam przypada całkowite zaćmienie tegoż; z miejsc zaś, na które pada półcień, widać jeszcze część słońca i zaćmienie tam jest tylko częstkowe. Cień ziemi rozciąga się po za nią na odległość 216 promieni ziemskich, sięga więc daleko po za orbitę księżyca, której promień jest równy tylko 60 promieniom ziemskim. Podczas pełni może się zdarzyć, że księżyc całkowicie lub częściowo wchodzi w cień, rzucany przez ziemię, a wtedy mamy zjawisko zaćmienia księżyca (1).

Powróćmy teraz do doświadczenia, gdzie światło słoneczne wpada do ciemnego pokoju przez otwór w okiennicy (fig. 249, str. 401). Gdy świetlny stożek przetniemy ćwiartką papieru, wtedy na tym ostatnim otrzymamy obraz słońca, który zawsze będzie posiadał formę okrągłą lub eliptyczną, zależnie od tego, czy płaszczyzna papieru będzie prostopadła lub pochyła do osi stożka. Kształt zaś otworu, przez który wpada światło, nie ma tutaj żadnego wpływu, pod warunkiem wszakże, że otwór ten jest bardzo mały w stosunku do odległości, na jakiej znajduje się od niego papier. Oddalając papier od okiennicy, powiększamy przez to obraz słońca nań rzucony. Jeżeli naprzeciwko świecy, umieszczonej w ciemnym pokoju, ustawimy ekran, a następnie pomiędzy tym ostatnim i świecą będziemy trzymali nieprzezroczystą przegrodę, zaopatrzoną w niewielki otwór dowolnego kształtu, zobaczymy na ekranie wyraźny obraz świecy, który wszakże jest odwrócony (fig. 253). Powód tego odwrócenia łatwo zrozumieć, promienie bowiem, wychodzące z górnej części świecy, muszą,

(1) Lommel—„Das Wesen d. Lichts."

jeżeli mają po za otworem zachować kierunek prostolinijny, padać na dolną połowę ekranu; podobnie także promienie z dolnej części świecy padają na górną połowę ekranu. W taki sam sposób każdy punkt świecy wysyła oddzielnie swe światło na inne miejsce ekranu, na którym wskutek tego powstaje niezliczona ilość jasnych punktów, zlewających się w jeden obraz, który, jak wiemy, jest tem większy, im większa jest odległość ekranu od otworu. Oprócz tego jasność obrazu jest tem mniejsza, im większym jest obraz, wtedy bowiem ta sama ilość światła oświeca

Fig. 253. Odwrócony obraz świecy.

większą płaszczyznę. Kształt otworu, gdy ten jest dostatecznie mały, nie wpływa na postać obrazu dlatego, że jakkolwiek każdy z oddzielnych jasnych punktów, tworzących obraz, posiada formę otworu, to jednak zachodzą one jeden na drugi swemi brzegami, przez co własne ich kontury zupełnie się zacierają. Gdy znajdujemy się w gęsto ocienionym lesie, do którego promienie słoneczne wdzierają się przez otwory pomiędzy liśćmi drzew, wtedy w każdem oświeconem miejscu ziemi widzimy obraz słońca okrą-

gły lub eliptyczny, zależnie od tego, czy promienie padają na dane miejsce prostopadle lub pochyło (fig. 254). Podczas cząstkowego zaćmienia słońca obrazy te posiadają kształt wyraźnie sierpowaty; sierp ten staje się coraz węższy, w miarę jak zaćmienie wzrasta, a kierunek jego jest przeciwny kierunkowi sierpa słonecznego.

Fig. 254. Obrazy słońca na ziemi w lesie.

To, cośmy powiedzieli o świetle słońca lub świecy, stosuje się także do wszelkich promieni, pochodzących od jakiegokolwiek ciała. Gdy w ciemnym pokoju ustawimy, naprzeciwko niewielkiego otworu w okiennicy, biały ekran, ujrzymy na nim odwrócony obraz całego krajobrazu, znajdującego się po za oknem, pod warunkiem, że oświetlenie jest dostatecznie silne. Im mniejszy

przytem jest otwór, tem wyraźniejszy, ale i tem mniej jasny jest obraz; przez większe zaś otwory wpada wprawdzie więcej światła, lecz zarysy obrazów zacierają się przez to, lub też znikają zupełnie. Albowiem tylko przy dostatecznie małym otworze każdy punkt świecącego ciała wysyła swe promienie do jednego tylko miejsca na ekranie tak, że w ogóle biegną one oddzielnemi wiązkami, a to stanowi główny warunek utworzenia się obrazu. Przy większym otworze każdy punkt ekranu otrzymuje promienie ze wszystkich lub z bardzo wielu punktów świecącego ciała i dlatego obraz tego ostatniego nie może się utworzyć.

§ 3. Natężenie światła.

Wiemy dobrze, że jasność oświetlenia danego przedmiotu jest tem mniejsza, im większa jest jego odległość od źródła światła. Czytając wieczorem książkę przy lampie lub świecy, możemy łatwo przekonać się, że stopień oświetlenia zmienia się znacznie, gdy nadajemy książce inne względem promieni położenie, nawet gdy nie zbliżamy się, ani też oddalamy od świecy. Wreszcie jasność oświetlenia jest różna, zależnie od natury źródeł światła, przyczem wszystkie inne warunki mogą być te same: płomień gazowy wysyła znacznie więcej światła, niż płomień lampy olejnej, chociaż obadwa mogą być jednakowo wielkie; światło księżyca jest bez porównania słabsze, aniżeli światło słoneczne, pomimo, iż oba te ciała niebieskie przedstawiają się dla nas jako tarcze, o jednakowej prawie średnicy.

Chcąc porównać natężenie dwóch źródeł światła, należy ściśle odróżniać to, co leży w samej ich naturze, od warunków związanych z położeniem oświeconego przedmiotu, to jest z jego odległością oraz nachyleniem względem źródła i kierunku światła. Część optyki, zwana *fotometryą*, zajmuje się badaniem związku, istniejącego pomiędzy temi warunkami i jasnością oświetlenia danego przedmiotu oraz porównaniem natężenia rozmaitych źródeł światła. Mierzyć to natężenie nie jest zadaniem łatwem i pomimo całego dotychczasowego postępu optyki, nie posiadamy żadnego przyrządu, pozwalającego określać tę wielkość

z taką samą dokładnością, z jaką oznaczono inne wielkości fizyczne, np. ciśnienie powietrza za pomocą barometru, temperaturę przez użycie termometru, ilość drgań dla pewnego tonu przez syrenę lub wibroskop. Fotometrya jest jeszcze bardzo od tego daleka, a nasz sposób porównywania natężenia dwóch świateł pozostawia wiele do życzenia. Zkąd jednak pochodzi ta niedokładność, gdzie jest źródło tej niepewności? Otóż leży ono w tem, że do oceniania stopnia oświetlenia nie posiadamy żadnego innego kryterjum, oprócz subjektywnego wrażenia w organie wzroku; pomimo, że oko odczuwa odcienia barw, widzi nadzwyczaj delikatne linie i punkty, to jednak nie może ono wskazać nam dokładnego stosunku natężenia świateł, jednocześnie lub też kolejno nań działających. Nawet gdy chodzi tylko o to, czy dwa światła posiadają lub nie jednakową siłę, trudność jest niemała, a wzrasta ona jeszcze bardziej wtedy, gdy obydwie obserwacye nie mogą być dokonywane jednocześnie, lecz w pewnym odstępie czasu. W większości wypadków bezpośrednio rozpatrywane światło oślepia i razi oko nasze, dlatego też fizycy chętniej porównywują ze sobą jednorodne powierzchnie, oświetlane przez badane źródła światła i z jednakowej lub niejednakowej jasności tego oświetlenia wnoszą, czy natężenia ich są równe lub nie, Wreszcie jeszcze jeden warunek niedokładności, zaledwie dający się uniknąć, leży w różnicy barw tych świateł, które mamy porównać: niepewność naszego sądu jest tem większa, im znaczniejsza jest ta różnica pomiędzy barwami.

Pomimo tych trudności, starano się jednak znaleźć, po części na drodze teoretycznej, po części zaś na doświadczalnej, pewne prawa, dotyczące natężenia światła. Pierwsze już próby, czynione w tym celu, miały charakter czysto naukowy, albowiem w XVII już stuleciu Auzout i Huyghens, a w następnym Celsius, Bouguer i Wollaston próbowali wyrazić w liczbach stosunek natężenia światła rozmaitych ciał niebieskich, np. słońca i księżyca, lub księżyca i Syryusza.

Pierwsze prawo, odkryte przez owych fizyków, łatwo będziemy mogli zrozumieć, gdy wykonamy następujące proste doświadczenie: Postawmy przed ekranem *M* (fig. 255), umieszczonym w ciemnym pokoju, nieprzezroczysty pręt *c*, przed prętem

zaś—zapaloną świecę *a;* wtedy na ekranie utworzy się cień *n* pręta. Następnie obok świecy *a* umieśćmy drugą taką samą *b*, również zapaloną, a otrzymamy drugi cień *m* pręta. Cienie te wszakże obecnie nie są tak ciemne, jak poprzedni jedyny cień *n*, a to dlatego, że każdy z nich jest teraz oświecony przez stojącą naprzeciw niego świecę: *b* oświeca cień *n*, zaś *a* oświeca cień *m*. Gdy oddalamy świecę *b*, cień *n* staje się ciemniejszy, a więc oświeca go ona teraz słabiej; jeżeli zaś odległość świecy *b* od ekranu stanie się dwa razy większa od takiejże odległości świecy *a*, to chcąc, ażeby obadwa cienie *n* i *m* były jednakowo oświecone, należy naprzeciw cienia *n* zamiast 1 świecy *b*, postawić 4 takie same świece (fig. 256). W miarę dalszego odsuwa-

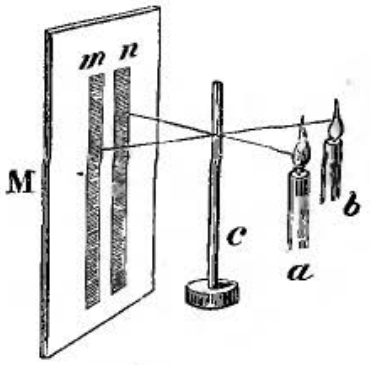


Fig. 255. Cienie pręta oświeconego przez dwie świece.

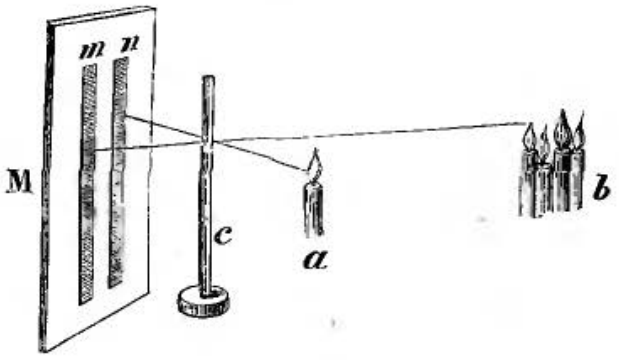


Fig. 256. Doświadczalne stwierdzenie prawa natężenia światła.

nia tych ostatnich, cień *n* znów staje się ciemniejszy od cienia *m*, a gdy świece *b* znajdą się na odległości 3 razy większej, niż w początku doświadczenia, wtedy dla zrównania jasności dwóch cieni, należy cień *n* oświecić 9 świecami. Z tego widzimy, że świeca postawiona 2 razy dalej, oświeca 4 razy słabiej, postawiona 3 razy dalej—9 razy słabiej i t. d. W ogóle więc *natężenie światła, padającego na daną powierzchnię, jest odwrotnie proporcyonalne do kwadratów z odległości tej powierzchni od źródła światła.* Prawo to stanie się dla nas zupełnie jasne, gdy przypomnimy sobie, że światło zwykle rozprzestrzenia się we wszystkie strony, że więc promienie jego są rozbieżne. Przypuśćmy, że źródło światła znajduje się w środku kuli nieprzezroczystej,

której promień jest równy 1; wtedy wewnętrzna powierzchnia kuli otrzymuje całkowitą ilość światła, wysyłanego przez to źródło. Gdybyśmy usunęli pierwszą kulę i na jej miejscu umieścili inną, mającą promień równy 2, wtedy ta sama co poprzednio ilość światła rozeszłaby się po większej powierzchni, a mianowicie 4 razy większej; albowiem gdy stosunek promieni dwóch kul jest jak 1 do 2, stosunek powierzchni tychże kul jest jak 1 do 4. Każda więc jednostka powierzchni kuli, 2 razy więcej oddalonej od źródła światła, będzie 4 razy słabiej oświeconą, 3 razy więcej oddalonej—9 razy słabiej oświeconą i t. d. Rozumie się, że prawo powyższe jest słuszne tylko wtedy, gdy pomijamy pochłanianie, jakiemu światło ulega przy przejściu przez dany środek. Natężenie światła zależy także od kąta, jaki tworzą promienie z powierzchnią, na którą padają. Fig. 257 przedstawia jednę i tę samą powierzchnię w pięciu rozmaitych położeniach, w których padające promienie słoneczne trafiają ją pod różnemi kątami. W położeniu *a f* promienie padają prostopadle i wtedy też powierzchnia najsilniej jest oświecona; w położeniu *b f*, nachylonem względem płaszczyzny, prostopadłej do drogi promieni, niektóre z nich omijają ją, a widzimy, że liczba tych omijających promieni jest coraz większa, w miarę jak powierzchnia przyjmuje coraz bardziej nachylone położenia *c f*, *d f*, *e f*. Ponieważ od większej lub mniejszej ilości promieni, padających na daną powierzchnię, zależy natężenie jej oświecenia, to widzimy, iż najsilniej oświecają ją promienie prostopadłe, najbardziej ukośne—najsłabiej; promienie zaś równoległe ślizgają się tylko po niej, nie oświecając jej wcale. Gdy do powierzchni oświecanej wystawimy prostopadłą czyli t. zw. *normalną*, wtedy promienie padające prostopadle na powierzchnię, tworzą z normalną kąt równy zeru, gdy zaś padają równolegle do niej, stanowią z normalną kąt prosty. Nazywając kąt pomiędzy normalną i promieniem padającym kątem

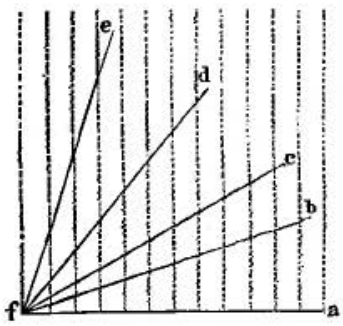


Fig. 257. Natężenie światła zależy od kąta nachylenia promieni.

padania powiemy, że *natężenie światła jest tem mniejsze, im większy jest jego kąt padania.* Słońce pozornie wschodzi codziennie, podnosi się coraz wyżej nad poziom, w południe zajmuje najwyższe położenie, poczem obniża się i znika pod poziomem. Podczas gdy słońce u nas stoi najwyżej, t. j w południe, promienie jego najbardziej zbliżone są do kierunku prostopadłego, wtedy też świecą najsilniej, najsłabiej zaś świecą podczas wschodu i zachodu, t. j. gdy padają najbardziej ukośnie. Oprócz tego, w ciągu roku ziemia jest coraz inaczej ku słońcu pochylona, wskutek czego i oświecenie jej zmienia się w ciągu tego okresu czasu; dana miejscowość, będąc pod coraz to innym kątem nachylona, jest też silniej lub słabiej oświecana i ogrzewana, czyli ulega tak zwanym zmianom pory roku. Nachylenie osi ziemskiej do jej orbity, t. j. do drogi, jaką ziemia opisuje naokoło słońca, powoduje właśnie podział powierzchni ziemi na strefy, odróżniające się warunkami oświecenia przez promienie słoneczne.

Natężenie światła, wysyłanego przez dany element świecącej powierzchni, również zależy od kąta, jaki tworzą promienie z prostopadłą do tego elementu. Przyglądając się w ciemności rozpalonej do czerwoności kuli armatniej, nie dostrzegamy wcale kulistego jej kształtu, lecz zdaje nam się, iż mamy przed oczyma płaską okrągłą tarczę, której wszystkie punkty świecą z jednakowem natężeniem; podobne zjawisko ma także miejsce, gdy zamiast kuli, bierzemy pryzmatyczną sztabę z żelaza lub srebra i ogrzewamy ją do białości. W żadnem położeniu nie rozróżniamy krawędzi pryzmatu, a blask wszędzie jest jednakowy, niezależnie od tego, czy widzimy ściany pryzmatu w położeniu pionowem albo mniej lub więcej pochyłem; obserwatorowi zdaje się, iż ma przed sobą tylko płaską powierzchnię czworoboczną. Gdy obracamy sztabę około jej osi, ruch ten staje się widoczny tylko przez to, że szerokość dostrzeganej smugi świetlnej zmienia się, lecz blask każdego punktu pozostaje ten sam. Słońce jest olbrzymią świecącą kulą, a jednak przedstawia się nam jako tarcza, która przy powierzchownem badaniu, wydaje się wszędzie jednakowo jasna; to samo stosuje się do księżyca. Wszelako od bocznych elementów kuli promienie wychodzą gęściej i dlatego

gdyby nie istniała różnica w natężeniu wysyłanych promieni, obwodowe części kuli wydawałyby się jaśniejsze, niż jej środek. Niechaj A (fig. 258) wyobraża świecącą kulę, O—oko obserwatora, $n\ O$ i $m\ O$—dwie wiązki promieni; wiązka $n\ O$ tworzy z normalną do elementu n kąt równy zeru, czyli że promienie te wychodzą prostopadle; wiązka zaś $m\ O$ tworzy z normalną do elementu m kąt ostry, to znaczy, że wychodzą pochylone. Przypuśćmy, że przecięcie wiązki $m\ O$ jest równe przecięciu wiązki $n\ O$: jeżeli tak, to na pierwszą składa się więcej promieni, niż na drugą, albowiem element m, będąc pochylony i wysyłający wiązkę promieni, tej samej, co $n\ O$ szerokości, musi ich wysłać więcej, jak to czytelnik łatwo z figury zrozumie. Ponieważ jednak jasność obu elementów n i m jest jednakowa, wynika z tego, że natężenie światła z m jest mniejsze, niż natężenie światła z n. Nazywając kąt pomiędzy promieniem wychodzącym i normalną do elementu, wysyłającego światło, kątem wyjścia, powiemy, że *natężenie światła jest tem mniejsze, im większy jest jego kąt wyjścia.*

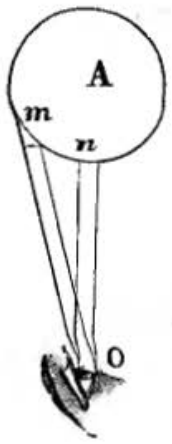


Fig. 258. Ilustracya prawa zależności natężenia światła od kąta wyjścia.

Przyrządy, służące do porównania natężenia światła, pochodzącego z różnych źródeł, zowią się *fotometrami*, zasada zaś ich w ogóle jest następująca: dwa źródła świetlne, które mamy porównać z sobą, ustawia się w taki sposób, ażeby oświecały dwie przyległe części tego samego ekranu, następnie zaś odsuwa się silniejsze światło dopóty, dopóki dwie te oświecone części nie wydadzą się nam jednakowo jasne; wtedy, według powyższego prawa, *natężenia dwóch źródeł są prosto proporcyonalne do kwadratów z ich odległości od ekranu.* W *fotometrze Rumford'a* (fig. 259) światła, które chcemy porównać, np. lampę i świecę, stawia się w ciemnym pokoju na pewnej odległości od ekranu $A\ B$, przed którym umieszczony jest nieprzezroczysty pręcik c; wtedy na ekranie tworzą się dwa cienie a i b, przyczem cień od świecy jest oświecony przez lampę i naodwrót. Nastę-

pnie odsuwamy jedno ze świateł, w danym razie lampę, tak długo, dopóki jasność obu cieni nie staje się jednakową i mierzymy odległość świecy oraz lampy od ekranu; przypuśćmy, że pierwsza oddalona jest odeń na 1 metr, druga zaś na 2 m., to natężenie światła lampy jest 4 razy silniejsze od natężenia światła świecy. Gdyby stosunek odległości tych dwóch świateł od ekranu był jak 1 do 3, to przy jednakowem oświeceniu dwóch cieni *a* i *b*, natężenia świecy i lampy miałyby się jak 1 do 9. Zauważymy tutaj, że natężenie światła danego źródła wyrażamy, porównywując je z natężeniem takiego światła, które przyjmujemy za jednostkę.

Fotometr Bunsena (fig. 260, str. 416), dokładniejszy, niż wyżej opisany, składa się z papierowego białego ekranu *s*, mającego pośrodku tłustą plamę od stearyny, która w tem miejscu czyni papier przezroczystym. Jeżeli światło umieścimy po za ekranem,

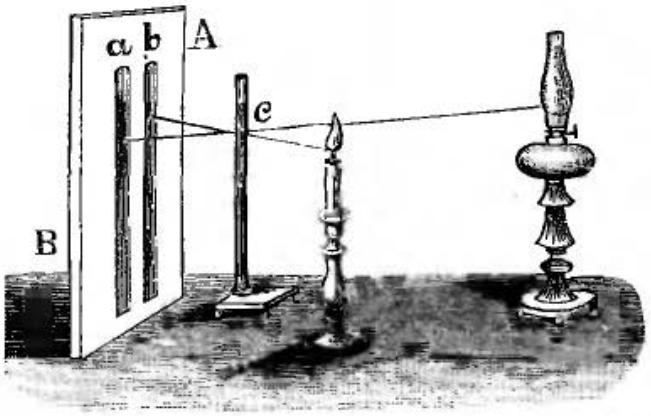


Fig. 259. Fotometr Rumford'a.

plama stearynowa wyda się jaśniejszą od otaczającej powierzchni, albowiem papier, nasiąknięty tłustością, przepuszcza więcej promieni; przeciwnie, gdy ustawimy światło przed ekranem, plama przedstawi się ciemno na jaśniejszem tle, albowiem tłusty papier gorzej odbija światło, niż papier suchy. Umieściwszy tedy ekran pomiędzy dwoma światłami, możemy tak ustosunkować ich odległość od niego, że plama stearynowa i pozostała powierzchnia będą jednakowo oświecone, co poznajemy po tem, że plama znika dla oka i nie odróżnia się wcale od reszty papieru. Postawmy za ekranem np. lampkę gazową (*b*), przed nim zaś— świecę (*a*) i przesuwajmy go dopóty, dopóki plama nie zniknie; wtedy natężenia dwóch świateł mają się jak kwadraty z ich od-

ległości od ekranu, którą to odległość mierzy się na skali fotometru.

Przy opisanych pomiarach fotometrycznych, oko nasze, jak już wspomnieliśmy, jest głównym sędzią, ono to bowiem ocenia stopień oświecenia, wskutek czego pomiary takie są czysto subjektywne. Dokładność ich zależy więc od mniejszej lub większej ścisłości, z jaką sądzimy o tem, czy dwie powierzchnie są lub nie są jednakowo oświecone, a to zależy znowu od indywidualnej zdolności oceniania różnicy w natężeniu dwóch świateł. Z odnośnych badań, przy których posługiwano się fotometrem, wynika, że oko nasze może odczuwać różnice w natężeniu światła tylko do pewnej granicy. Przypuśćmy, że część ekranu jest

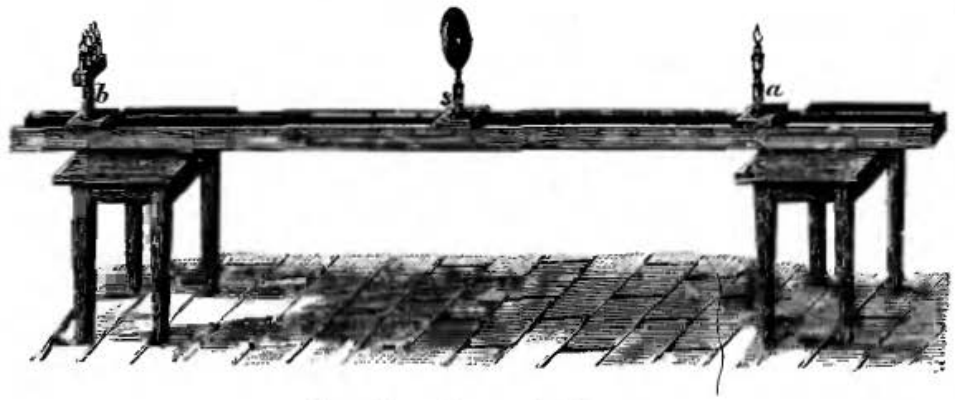


Fig. 260. Fotometr Bunsena.

oświecona tylko przez jedno światło, znajdujące się od niego na odległości 1 metra, część zaś—przez to samo światło i jeszcze przez drugie, o jednakowem natężeniu, lecz znajdujące się na odległości 10 metrów; stosunek tedy oświecenia tych dwóch części jest jak 1 do 1,01. Otóż w tych warunkach oko ludzkie nie może dostrzedz różnicy w jasności części ekranu, na którą pada tylko jedno światło i części oświeconej przez obadwa jednocześnie, czyli innemi słowy, nie jest ono w stanie ocenić natężenia światła z przybliżeniem większem, jak do $^1/_{100}$ istotnej jego wartości (Fechner). Bouguer i Wollaston starali się porównać światło słoneczne z księżycowem, biorąc za jednostkę światło świecy woskowej i znaleźli zgodnie, że słońce świeci tak silnie, jak 5600

świec woskowych, umieszczonych na odległości 30 centymetr. Dalej Wollaston znalazł, że światło księżyca w pełni wynosi tylko 144 część światła świecy woskowej na rzeczonej odległości, z czego wynikałoby, że słońce świeci 800000 razy silniej, aniżeli księżyc w pełni; Bouguer zaś podaje cyfrę o wiele mniejszą od ostatniej. W każdym razie przedmiot ten stanowi szerokie pole do badań, na którem dużo jeszcze zdziałać potrzeba, zanim rezultaty zdołają wzbudzić zupełne nasze zaufanie.

§ 4. Prędkość światła.

W starożytności już przypuszczano, że światło potrzebuje pewnego czasu na przebycie danej drogi, że nie dosięga naszego oka, ani też pada na przedmiot w tej samej chwili, w której wysłane zostaje przez odnośne źródło, znajdujące się na znaczniejszej od nas odległości. Lecz przypuszczenie to zamieniło się w pewność nie dalej jak 200 lat temu, gdyż wszystkie doświadczenia, urządzane do owego czasu z ziemskiemi źródłami światła, nie doprowadziły do żadnego rezultatu, a to z powodu nadzwyczajnej prędkości światła. W ciągu jednej sekundy przebiega ono niemniej jak 300000 kilom. czyli prawie 41000 mil geograficznych tak, że na przebycie drogi od księżyca do ziemi potrzebuje tylko $1^1/_4$ sekundy, od słońca zaś do nas przybywa w ciągu 8 minut i 13 sekund. Jak nieznacznym jest ten czas, można się przekonać z tego, że kula armatnia, biegnąca z szybkością 400 m. na sekundę, potrzebowałaby na przebycie drogi od ziemi do słońca przeszło 12 lat. Porównywując prędkość światła z prędkością dźwięku, znajdujemy, że pierwsza jest około 900000 razy większa, aniżeli druga, jest ona nadto 10000 razy większa od prędkości ziemi na jej orbicie.

Obecnie zajmiemy się opisem metod, które pozwalają obliczyć prędkość światła, a rozpoczniemy od metody najdawniejszej; przedtem jednak zrobić musimy kilka uwag przedwstępnych. Przypuśćmy, że gdziekolwiek dają sygnały świetlne w równych odstępach czasu, że np. co 10 minut zapalają tam proch i wyobraźmy sobie, że obserwator, znajdujący się w pewnej od-

ległości, nie zmieniający swego miejsca, widzi każdy sygnał nieco później, niż on powstaje rzeczywiście; opóźnienie jest dla wszystkich tych sygnałów jednakowe, to znaczy, że obserwator widzi je zawsze w odstępach dziesięciominutowych, bez względu na to, czy światło biegnie z większą lub mniejszą prędkością. Gdy zaś obserwator po zanotowaniu czasu, w którym zobaczył jeden z sygnałów, przejdzie do punktu bardziej oddalonego i tam będzie oczekiwał następnego sygnału, wtedy zobaczy on ten ostatni nieco później, niż po 10 minutach, albowiem światło musi przejść teraz dłuższą drogę. Ażeby rozumowanie to uczynić przystępniejszem, przyjmijmy prędkość światła o wiele mniejszą, niż jaka ona jest w istocie i przypuśćmy, że po danym sygnale obserwator oddalił się na 20 kilometrów, przyczem czas pomiędzy ujrzeniem owego sygnału a zobaczeniem następnego wynosił 10 minut i 2 sekundy. Obserwator słusznie wniósłby z tego, że 2 sekundy, o które następny sygnał się spóźnił, stanowią właśnie czas, jakiego wymaga światło na przebycie dodatkowych 20 kilometrów, czyli że prędkość światła wynosi 10 kilom. na sekundę. Gdyby przeciwnie obserwator był się zbliżył o 20 kilom., wtedy czas pomiędzy dwoma następującemi po sobie sygnałami byłby o 2 sekundy krótszy.

W istocie jednak prędkość światła jest bez porównania większa i dlatego nie możnaby w powyższy sposób dojść do celu za pomocą ziemskich sygnałów świetlnych i odległości, dających się bezpośrednio zmierzyć. Starano się tedy zużytkować do tych oznaczeń zjawiska, prawidłowo zachodzące w systemie słonecznym. Posługując się nowowynalezionym teleskopem, Galileusz i Simon Marius już w początku XVII stulecia pokazali, że wokoło najświetniejszej planety rzeczonego systemu—Jowisza—krążą cztery księżyce. Obiegają one w dość krótkich odstępach czasu to wielkie centralne dla nich ciało niebieskie po orbitach, które tylko nieznacznie zbaczają od płaszczyzny równika Jowisza. To, co w ogóle z naszym księżycem dzieje się rzadko, z księżycami Jowisza zdarza się przy każdym prawie obrocie: wchodzą one w przestrzeń ciemną, znajdującą się po stronie Jowisza, odwróconej od słońca i ulegają wskutek tego

zaćmieniu. Przy pomocy teleskopów umiarkowanie powiększających, można z łatwością obserwować te zaćmienia, dość często, przynajmniej z trzema bliższemi Jowisza księżycami, się zdarzające. Fig. 261 objaśni nas, przy jakich warunkach to zanurzanie się

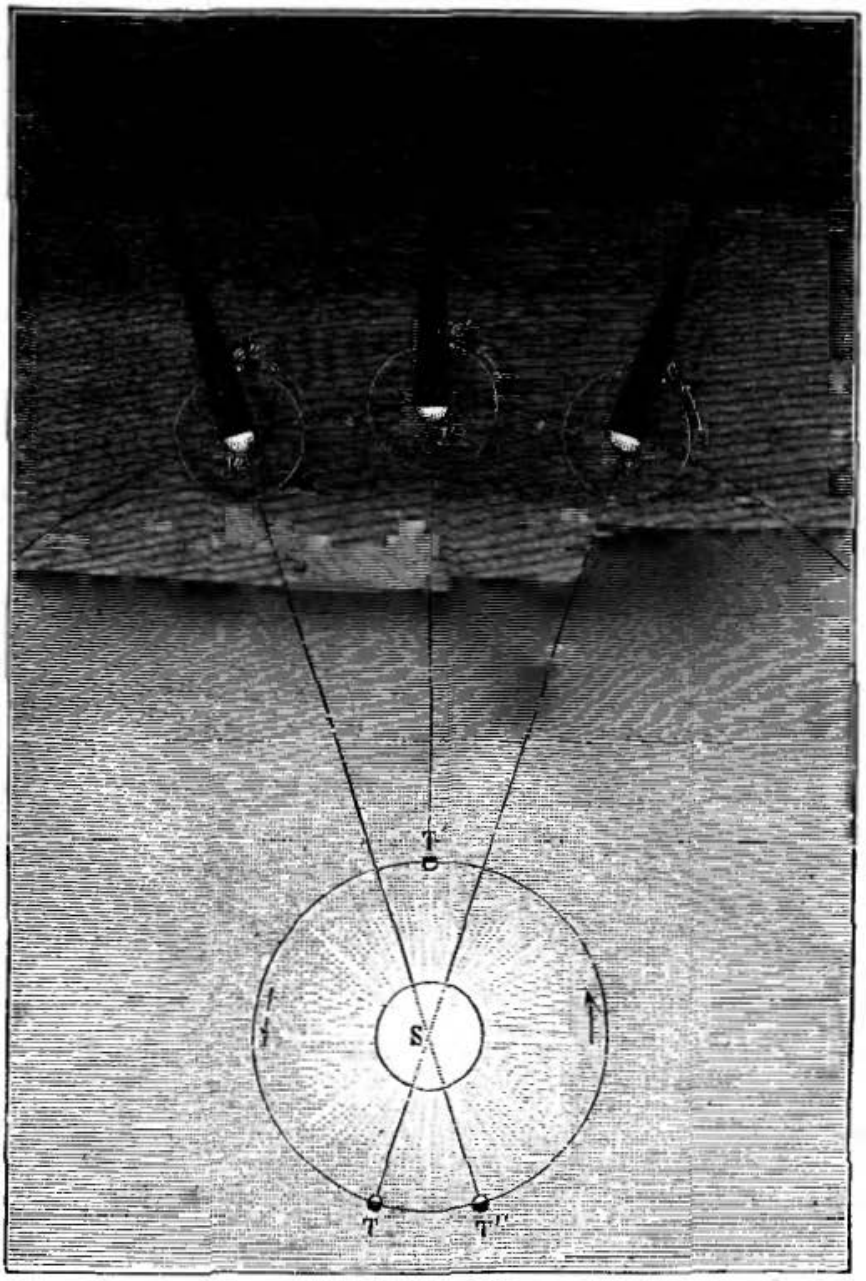


Fig. 261. Oznaczenie prędkości światła z obserwacyi zaćmień księżyców Jowisza.

rzeczonych księżyców w cieniu, lub też wynurzanie z niego, staje się w danej chwili widocznem dla mieszkańców ziemi.

Podczas gdy ziemia T biegnie po swej drodze naokoło słońca, bardziej odległy od tego ostatniego Jowisz J, porusza się

w tym samym kierunku, lecz o wiele wolniej tak, że wykonywa on zaledwie jedenastą część obrotu w tym samym czasie, kiedy ziemia robi całkowity obrót. Gdy ziemia znajduje się w T, Jowisz zaś w J, to jest wraz z ziemią na jednej prostej linii ze słońcem S, lecz po dwóch przeciwnych jego stronach, wtedy Jowisz jest dla nas niewidzialny. Ponieważ jednak Jowisz porusza się w tym samym co i ziemia kierunku (oznaczonym na figurze strzałkami), lecz wolniej, to po upływie pewnego czasu na rannem niebie przed wschodem słońca dostrzegamy Jowisza i możemy obserwować zanurzanie się bliższego jego księżyca w cieniu; wynurzanie zaś jego jest dla nas wtedy niedostrzegalne z powodu przeszkadzającej temu kuli samej planety. Im dalej poruszamy się po wskazanej drodze, tem bardziej odległym od słońca wydaje się Jowisz, aż wreszcie ziemia dochodzi do T', Jowisz zaś do J', a wtedy dwie te planety znajdują się znów na jednej prostej linii ze słońcem, lecz obydwie po tej samej stronie. W tym czasie Jowisz przedstawia się nam w najświetniejszym blasku, lecz zaćmienia jego księżyców są dla nas zupełnie niewidoczne, ponieważ cały stożkowaty cień po za Jowiszem jest przezeń zakryty. Następnie dopiero zaćmienia te możemy znów obserwować, lecz nie ich początek czyli zanurzanie się w cieniu, ale koniec, a więc wynurzanie się z niego, dopóki ziemia i Jowisz nie zajmą położeń T'' i J''.

Wieloletnie obserwacye pozwoliły z wielką dokładnością obliczyć czas obrotu księżyców; oprócz tego znaleziono, że zaćmienia księżyców Jowisza mogą służyć jako sygnały naturalne do porównania zegarów i dlatego chwile zaćmień tych ściśle obliczano. Ponieważ podczas ruchu ziemi od T ku T' zbliżamy się wciąż do Jowisza, to czas pomiędzy dwoma zaćmieniami jest coraz krótszy, niż wypada z obliczenia, aż wreszcie w niewielkiej odległości od T' różnica ta dochodzi do 16 minut i 30 sekund; gdy następnie, poruszając stę od T do T'', oddalamy się od Jowisza, wtedy odstęp czasu pomiędzy dwoma następnemi zaćmieniami wzrasta i w niewielkiej odległości od T''' dochodzi znów do pierwotnej obliczonej wielkości tak, że różnica owa wyrównywa się zupełnie. Łatwo zrozumieć, że ta różnica w czasie wynosi wła-

śnie tyle, ile go wymaga światło na przebycie dłuższej drogi, a więc że jest ona równa czasowi, w ciągu którego światło przebiega średnicę orbity ziemskiej naokoło słońca, z czego wynika, że promień wychodzący od słońca, dosięga ziemi po upływie połowy tego czasu (16 minut i 30 sek.), to jest po 8-miu minutach i 15 sekundach; odległość ziemi od słońca wynosi 299,270,000 kilometrów, prędkość więc światła równa się $\frac{299,270000 \text{ kil.}}{8 \text{ min. } 15 \text{ sek.}}$ czyli 302300 kilometrów na sekundę.

Za pomocą wyżej opisanej metody, duński astronom Olaf Roemer pierwszy w roku 1675 oznaczył czas, jakiego wymaga światło na przebycie drogi od słońca do nas. Inne, również ważne odkrycie, pozwalające oznaczyć prędkość światła, zostało dokonane pięćdziesiąt lat później przez astronoma Bradley'a; dla lepszego wyjaśnienia zasady metody Bradley'a posłużymy się porównaniem. Przypuśćmy tedy, że pada gęsty deszcz w kierunku dokładnie prostopadłym do ziemi i że na niej ustawiliśmy pionowo prostą otwartą rurę; wtedy kropla deszczu, wpadająca do niej przez sam środek górnego jej otworu, padnie także na środek otworu dolnego, dopóki rura będzie stała w miejscu. Lecz gdy poczniemy przesuwać rurę z jednostajną prędkością i w pewnym określonym kierunku, wtedy kropla taka nie spotka już środka dolnego jej otworu, lecz w razie, gdy prędkość ruchu jest dostatecznie wielka—będzie podczas spadania uderzała o ścianę rury. Chcąc więc, ażeby kropla i w tym razie trafiła środek podstawy rury, należy tę ostatnią nieco pochylać w stronę, w którą się porusza i to w taki sposób, ażeby górny jej koniec wyprzedzał dolny o taką samą odległość, na jaką przesunęła się rura w ciągu czasu, użytego przez kroplę na przebycie długości rury. Pochylenie rury pozwala nam tedy porównać prędkość spadania kropli z prędkością przesuwania rury; gdy naprzykład długość tej ostatniej równa się 1 metrowi, górny zaś jej koniec wyprzedza dolny o 1 centymetr, wtedy prędkość kropli jest 100 razy większa od prędkości rury. Gdybyśmy oprócz tego umieścili rurę na łodzi i płynęli z nią dokoła wyspy, to wskutek ciągłego pochylania rury w kierunku naszego ruchu, opisałaby ona podczas całkowitego obrotu stożek, zwrócony wierzchołkiem ku

ziemi i mający oś prostopadłą do płaszczyzny wyspy i stawu, po którym płynęlibyśmy.

Stosując obecnie to porównanie do systemu ciał niebieskich powiemy, że łódź wyobraża ziemię, wyspa—słońce, powierzchnia stawu—płaszczyznę ekliptyki, w której ziemia obraca się naokoło słońca, deszcz zaś—promienie świetlne, wysyłane przez gwiazdę stałą, znajdującą się na linii prostopadłej do tej płaszczyzny, a więc w tak zwanym biegunie ekliptyki. Obserwując taką gwiazdę przez teleskop, musimy, wskutek ciągłego ruchu ziemi, nachylać go tak, ażeby kierunek, w jakim widzimy wtedy

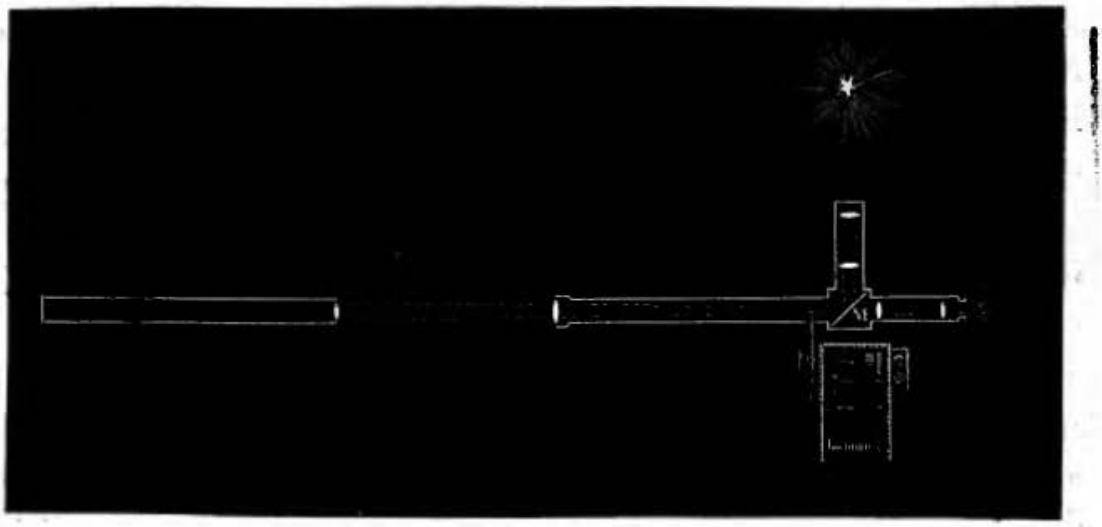


Fig. 262. Przyrząd Fizeau do bezpośredniego oznaczania prędkości światła.

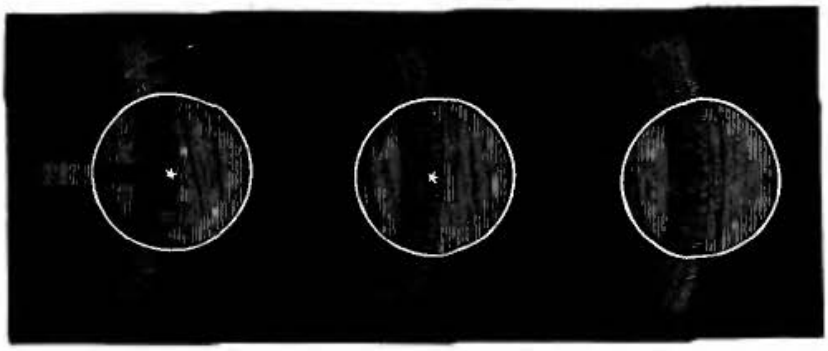
gwiazdę, stanowił z istotnym jej kierunkiem kąt równy 20″,445; w ciągu roku całego teleskop opisuje stożek, gwiazda zaś pozornie opisuje na niebie koło. Zjawisko opisane zowie się *aberracyą gwiazd stałych* i odkryte zostało, jak już powiedzieliśmy, przez Bradley'a w r. 1728, który objaśnił je na podstawie rocznego ruchu ziemi oraz tem, że światło do swego rozprzestrzeniania się wymaga czasu. Przy kącie nachylenia teleskopu równym 20″,445, górny jego koniec wyprzedza dolny o długość, wynoszącą $^1/_{10000}$-ną część długości rury teleskopowej, a więc światło porusza się z prędkością 10000 razy większą od prędkości ziemi na jej orbicie około słońca. Liczba, w ten sposób dla prędkości

światła znaleziona, nie bardzo się różni od tej, którą otrzymał Roemer z obserwacyj zaćmień księżyców Jowisza.

Wreszcie w nowszych czasach udało się uczonym francuzkim Fizeau i Foucault dokazać tego, czego nadaremnie próbował Galileusz, a mianowicie oznaczyć prędkość światła przy względnie małych odległościach na ziemi, za pomocą sztucznie wywołanych ruchów. Opiszemy tutaj tylko metodę Fizeau. Obrał on Suresnes za miejsce obserwacyi i umieścił tam przyrząd, przedstawiony na fig. 262. Promienie bardzo silnego światła sztucznego, po wejściu do bocznej rury, gdzie ulegały nieznacznemu skupieniu przez dwa szkła dwuwypukłe (działanie takich szkieł poznamy niebawem), padały pod kątem 45^0 na nieposrebrzone zwierciadło szklane M, od którego odbijały się w kierunku rury poziomej, t. j. lunety. Na końcu tej ostatniej znajdowała się również soczewka dwuwypukła, czyli objektyw, tak umieszczona, że czyniła ona wychodzące z lunety promienie równoległemi i takiemi też dochodziły one do drugiej stacyi obserwacyjnej w Montmartre; tam przechodząc przez soczewkę w drugiej lunecie, znów ulegały skupieniu, padały na zwierciadło (na rysunku opuszczone), które odbijało je napowrót do tego samego punktu, zkąd przyszły. Powracające promienie zbierały się w pierwszej lunecie, przechodziły przez nieposrebrzone (a więc przezroczyste) zwierciadło szklane M i mogły być widziane za pośrednictwem soczewki, zwanej okularem, po przebyciu przez nie drogi od Suresnes do Montmartre i napowrót.

Zadanie polegało więc na dokładnem określeniu czasu, jakiego wymagały promienie na przebycie tej podwójnej drogi; w tym celu Fizeau, przez boczny otwór w ścianie pierwszej lunety, umieścił na drodze promieni, w miejscu, gdzie one najsilniej były skupione, koło zębate, które za pomocą mechanizmu zegarowego mogło być wprawione w bardzo szybki i jednostajny ruch obrotowy. Ile razy ząb koła stanął na drodze światła, przeszkadzał on rozprzestrzenianiu się jego, podczas gdy przez przerwę między dwoma zębami przechodziło ono swobodnie. Gdy przed rozpoczęciem ruchu obrotowego położenie koła jest takie, że światło może przejść pomiędzy dwoma zębami, wtedy także

i powracający z Montmartre promień znajdzie drogę otwartą i dosięgnie oka obserwatora w Suresnes, który widzi punkt świetlny w całym jego blasku (fig. 263, strona lewa). Gdy koło rozpoczyna swój obrót z niezbyt wielką prędkością, wtedy niektóre z promieni, które przeszły przez lukę między dwoma zębami, napotykając przy powrocie z Montmartre ząb, zostają zatrzymane w swym biegu i nie dochodzą do oka obserwatora; dla tego ostatniego więc punkt świetlny traci na intensywności i wydaje się bledszy, niż przedtem (fig. 263 środek). Im prędzej obraca się koło, tem więcej promieni zostanie zatrzymanych w swym biegu, aż wreszcie przy dostatecznie wielkiej szyb-



Fig, 263. Doświadczenie Fizeau, służące do oznaczenia prędkości światła; rysunek lewy—punkt swietlny, widziany po przez lukę między dwoma zębami koła; rysunek środkowy—częściowe zaćmienie punktu świetlnego; rysunek prawy—całkowite zaćmienie punktu świetlnego.

kości obrotu wszystkie promienie, które przeszły przez lukę między dwoma zębami, napotykają przy powrocie na jeden z tych zębów, a wtedy następuje całkowite zaćmienie punktu świetlnego (fig. 263, strona prawa). Łatwo zrozumieć, że w tym ostatnim wypadku światło potrzebuje na przebycie drogi od Suresnes do Montmartre i napowrót tyle czasu, ile go upływa, zanim na miejsce luki przypadnie sąsiedni ząb.

Do doświadczeń swych Fizeau używał koła o 720 zębach i przekonał się, że całkowite zaćmienie następowało wtedy, gdy koło to robiło 12,6 obrotów na sekundę. W ciągu więc jednej sekundy wszystkie 720 zębów przechodziły przed okiem 12,6 razy, czyli że przewijało się w ciągu tego czasu 9072 zębów

(720 × 12,6); każdy więc pojedyńczy ząb był zastępowany przez następny po upływie $^1/_{3072}$ sekundy, ażeby zaś na miejsce odstępu między zębami znalazł się najbliższy ząb, potrzeba było tylko połowy tego czasu, to jest $^1/_{18144}$ sekundy. W ciągu tego czasu światło, jak wiemy, przebiegało drogę od Suresnes do Montmartre, wynoszącą 8633 metrów i napowrót, czyli razem 17266 metrów; w ciągu więc całej sekundy przebyłoby drogę 18144 razy większą, t. j. w okrągłej liczbie 313000 kilometrów. Rezultat ten, jak widzimy, prawie zupełnie się zgadza z rezultatem powyższych astronomicznych obserwacyj. Również i inne doświadczenia, dokonane przez Foucault'a za pomocą obracających się zwierciadeł, dały wielkość, mało się różniącą od wartości wspomnianych. Według ostatnich doświadczeń Cornu, światło przebiega 300400 kilometrów na sekundę,

---

ROZDZIAŁ III.

Odbijanie się światła (Katoptryka).

§ 1. Prawa odbicia.

Długi czas zanim człowiek pomyślał o tem, ażeby polerować metale i szkła w celu zamiany ich w zwierciadła, mające służyć potrzebom życia codziennego i nauki, albo także i ludzkiej próżności, można było w naturze obserwować liczne zjawiska, zależne od odbijania się światła. Powierzchnia każdego stawu, każdego jeziora przedstawia zwierciadło, dające wierny obraz otoczenia, błękitnego sklepienia niebios, chmur, słońca lub gwiazd, drzew, skał i istot żyjących. Już sama obserwacya tych zjawisk naturalnych mogłaby nas objaśnić co do drogi, jaką przebywa światło, gdy, wychodząc z punktów świecących, pada na powierzchnię, która je odbija; jednakże ścisłe prawa odbicia światła odkryto dopiero za pomocą sztucznych zjawisk—doświadczeń.

W poprzednim rozdziale wyłuszczyliśmy obszernie, że promień światła zachowuje kierunek prostolinijny tak długo, dopóki

rozprzestrzenia się w jednym i tym samym przezroczystym środku, bez względu na to, czy jest on ciałem gazowem, ciekłem lub też stałem. Lecz gdy wiązka światła uderza o powierzchnię, odgraniczającą dwa środki różnej gęstości, wtedy zjawisko się zmienia: jedna mianowicie część promieni wraca od powierzchni odgraniczającej napowrót do środka, w którym poprzednio się poruszała, to jest ulega *odbiciu*, inna zaś część przenika do drugiego środka, gdy ten jest przezroczysty , ulegając zboczeniu od pierwotnego kierunku czyli *załamaniu*. Obecnie zajmiemy się zbadaniem dwóch tych rodzajów zjawisk i rozpoczniemy od odbijania się światła.

Sposób, w jaki promienie świetlne zostają odbite przez daną powierzchnię, zależy od wielu okoliczności, w pierwszej linii od budowy samej powierzchni. Gdy ta ostatnia z natury jest gładka i równa, jak np. powierzchnia cieczy zupełnie spokojnej, szczególnie rtęci, albo gdy za pomocą środków mechanicznych nadano jej wielką gładkość, jak powierzchni szkła, wielu metali i t. p., wtedy promienie odbijają się w określonym kierunku i według stałych praw. Oku naszemu zdaje się wtedy, że promienie wychodzą z punktów, leżących po za powierzchnią odbijającą, wydaje się nam, jakoby przedmiot znajdował się za tą ostatnią. Kształt, wielkość i położenie tworzących się obrazów zależą od kształtu powierzchni odbijającej, zwanej *zwierciadłem*. Jeżeli natomiast powierzchnia ciał jest matowa i chropawa, wtedy promienie odbijają się od niej nieprawidłowo, obrazy przedmiotów wysyłających światło, wcale się nie tworzą, albowiem każdy element samej powierzchni staje się punktem wyjścia wielu promieni, z różnych miejsc ciała świecącego pochodzących tak, że widzimy tylko tę oświeconą powierzchnię.

Co się tyczy drogi, jaką przebywa promień odbity od płaskiego zwierciadła, to rzecz oczywista, że musi ona być prostolinijna, albowiem promień ten zostaje napowrót odrzucony do środka, według założenia naszego zupełnie jednorodnego; zachodzi tedy jeszcze pytanie, jaki jest kierunek promienia odbitego. W celu zbadania tego, obserwujmy np. promienie, dochodzące do nas od gwiazdy, a więc promienie, które ze względu na odległość

punktu świecącego możemy uważać za równoległe i pozwólmy im odbić się od powierzchni rtęci. Niechaj *S I* przedstawia jeden taki promień (fig. 264), padający w *I* i odbity w kierunku *I R*. Umieśćmy z boku naczynia z rtęcią przyrząd, składający się z pionowo osadzonego koła, podzielonego na stopnie, na którem

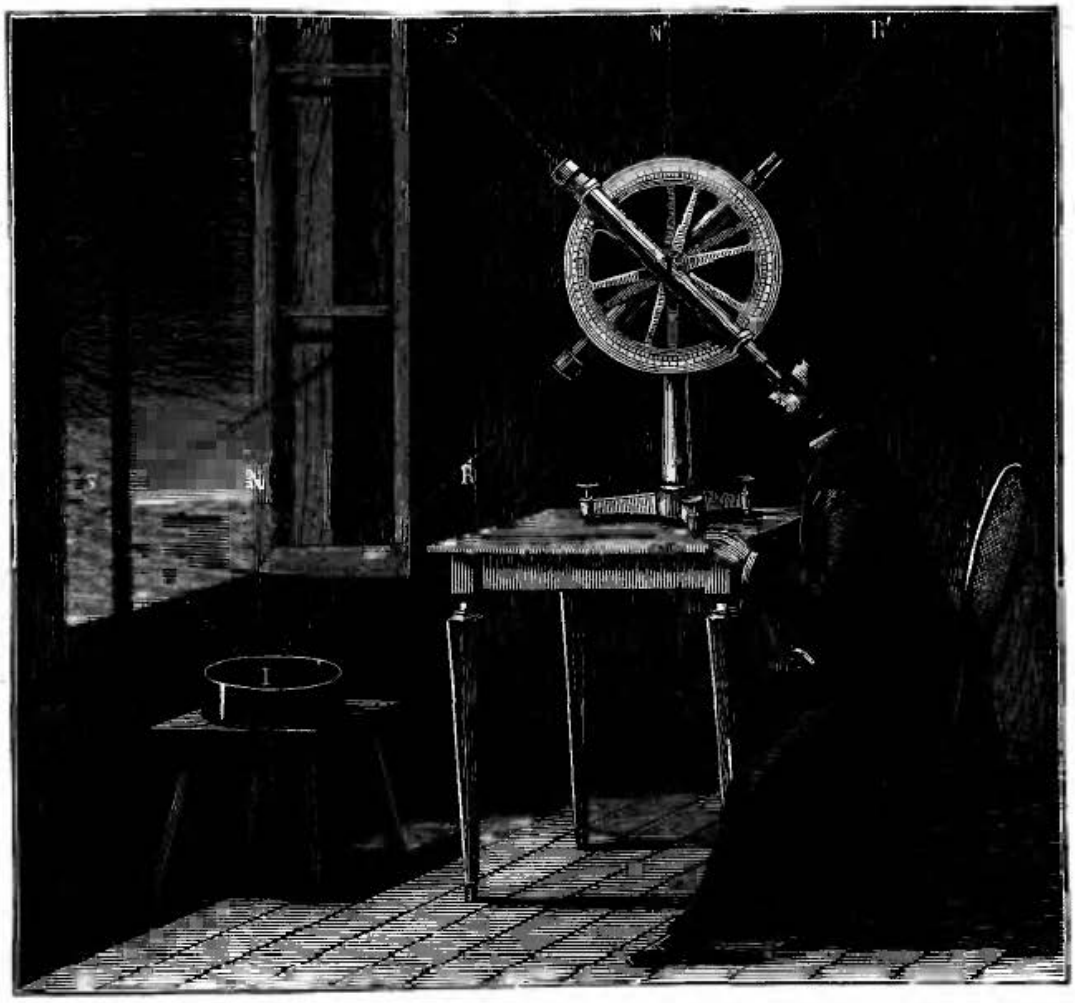


Fig. 264. Doświadczalny dowód praw odbicia światła.

znajdują się dwie lunety, mogące się obracać w płaszczyznie tegoż koła, około jego środka. Koło to i lunety ustawione są w jednej płaszczyznie z promieniem padającym, oraz z prostopadłą czyli tak zwaną normalną w punkcie padania *I*. Jednę z tych lunet skierujmy na powierzchnię rtęci tak, ażebyśmy w niej dostrzegli obraz gwiazdy, innemi słowy, ustawmy lunetę w kie-

runku odbitego promienia; drugą lunetę skierujmy wprost na gwiazdę, a więc nadajmy jej położenie równoległe do kierunku promienia padającego. Jeżeli teraz ze środka I' koła wystawimy normalną $I'N'$, to dokładne odczytanie stopni pokaże nam, że osie obydwóch lunet tworzą z tą normalną kąty równe, czyli że $S'I'N' = R'I'N'$. Z geometryi wiadomo, że kąty o odpowiadających sobie bokach równoległych, są równe; ponieważ tedy $I'N'$ jest równoległy do IN, a $S'I'$ równoległy do SI, to kąt $S'I'N'$ jest równy kątowi SIN. Dalej równoległe $I'N'$ i IN przecięte są jedną prostą linią IR', a geometrya pokazuje, że wtedy kąt $R'I'N'$ jest równy kątowi RIN, a więc $SIN = RIN$. Kąt SIN pomiędzy promieniem padającym i normalną w punkcie I nazywa się *kątem padania;* kąt zaś RIN pomiędzy promieniem odbitym i tą normalną nazywa się *kątem odbicia.* Rezultat więc powyższy możemy ująć w następujące prawo: *Kąt odbicia jest równy kątowi padania.* Za pomocą powyższego przyrządu możemy przekonać się także, że promień odbity od powierzchni rtęci widzimy przez lunetę tylko wtedy, gdy koło znajduje się istotnie w jednej płaszczyznie pionowej z promieniem padającym i normalną w punkcie padania, z czego wyprowadzamy drugie prawo: *Promień padający i odbity leżą w jednej płaszczyznie z prostopadłą w punkcie padania do powierzchni odbijającej.* Dwa wymienione tutaj prawa stanowią podstawę całej nauki o odbiciu światła.

§ 2. Odbicie od zwierciadeł płaskich.

Rozpatrzmy obecnie zjawiska odbicia od zwierciadeł płaskich i powstające wskutek tego obrazy, które tworzą się w zwierciadłach i mają kształt rozmaity, zależnie od położenia przedmiotu oraz od rodzaju samej powierzchni odbijającej. Przykład zwierciadła płaskiego przedstawiają np. zwykłe pokojowe lustra, lub też spokojna powierzchnia niewielkiej masy cieczy.

Gdy jakikolwiek przedmiot znajduje się przed płaskiem zwierciadłem, wtedy w tem ostatniem, jak wiadomo, widzimy wierny obraz przedmiotu, zgodny z nim zupełnie co do kształtu,

wielkości i barwy; jedyna różnica polega na tem, że przedmiot i obraz są symetryczne względem siebie, czyli że lewa strona jednego jest prawą drugiego i naodwrót. Dalej pozorna odległość obrazu po za powierzchnią odbijającą jest dokładnie taka sama, jak istotna odległość przedmiotu od tejże powierzchni. Ze wszystkich tych zjawisk łatwo można sobie zdać sprawę, przy pomocy fig. 265; widzimy tutaj wiązkę promieni, które, rozbiegając się od wierzchołka płomienia, padają na płaskie zwierciadło, odbijają się odeń i wpadają do oka obserwatora, jako wiązka również rozbieżnych promieni. Obraz wierzchołka płomienia może powstać albo tam, gdzie promienie z wierzchołka tego wy-

Fig. 265. Zwierciadło płaskie. Kształt i położenie obrazu.

chodzące, istotnie się przecinają po odbiciu, albo też w miejscu, gdzie przecinają się tylko przedłużenia promieni odbitych. Pierwszy wypadek nie może mieć tutaj miejsca, albowiem promienie odbite, w miarę odległości od zwierciadła, rozchodzą się coraz bardziej, przecinają się też tylko ich przedłużenia, a oku, znajdującemu się na ich drodze, zdaje się, jakoby promienie wychodziły z punktu po za zwierciadłem, leżącego, jak pokazuje rachunek, na tej samej wysokości co i wierzchołek świecy i na równej z nim odległości od powierzchni odbijającej. To, cośmy powiedzieli o wierzchołku płomienia, stosuje się zarówno do wszystkich pozostałych punktów świecy: każdemu z nich odpo-

wiada obraz po za zwierciadłem, a obrazy te tak się zlewają, że tworzą całość zupełnie zgodną z przedmiotem. Obrazy takie w płaskich zwierciadłach zowią się *urojonemi* dlatego, że w rzeczywistości nie istnieją, po za zwierciadło bowiem promienie przejść nie mogą i nam tylko wydaje się, iż one ztamtąd wychodzą. Figura 266 pokazuje, że można w zwierciedle zobaczyć także obraz przedmiotu, nie znajdującego się naprzeciw powierzchni odbijającej, lecz z boku; potrzeba tylko, ażeby oko zostało uderzone przez promienie odbite, a więc żeby znajdowało się wewnątrz przestrzeni, ograniczonej liniami *M Q* i *M' P*. Przestrzeń tę nazywamy *polem widzenia* przedmiotu, odbitego w zwierciedle. Nadmienimy jeszcze, że w razie, gdy przy użyciu zwyczajnych zwierciadeł, obraz niezupełnie dokładnie odpowiada co do kształtu i barwy, przedmiotowi, zależy to od powierzchni odbijającej, którą nadzwyczaj trudno uczynić doskonale płaską i gładką. Niezupełnie płaska powierzchnia odbijająca daje obrazy wykrzywione, wskutek zaś niedostatecznego wypolerowania, nieprawidłowo odbite czyli rozproszone promienie mieszają się z odbitemi prawidłowo i modyfikują barwę obrazu zależnie od barwy materyału, z którego zrobione jest zwierciadło. Oprócz tego, jak zobaczymy niżej, natężenie promienia odbitego jest zawsze mniejsze, aniżeli promienia padającego.

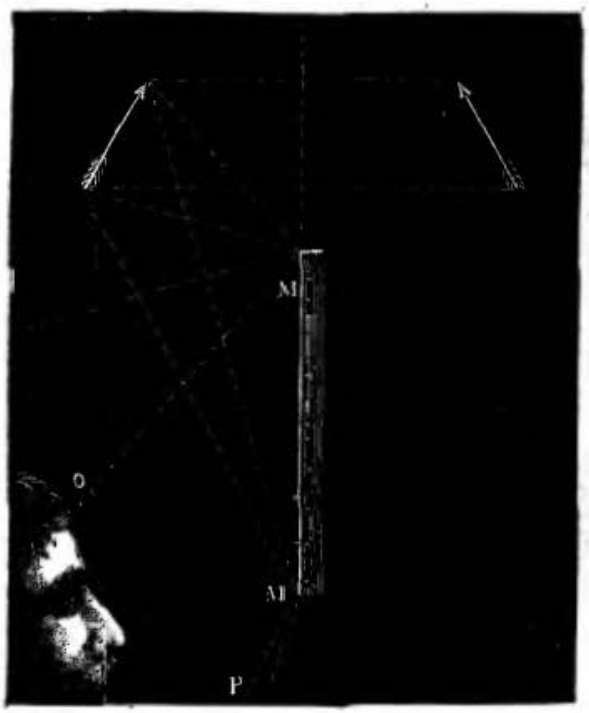


Fig. 266. Zwierciadło płaskie. Wielkość pola widzenia.

Przez połączenie kilku zwierciadeł płaskich można wywołać pewne ciekawe zjawiska, które dają się objaśnić za pomocą

wielokrotnego odbicia światła, podobnie jak objaśniamy podwójne lub potrójne echo przez kilkakrotne odbicie dźwięku. Jeżeli przedmiot O umieścimy pomiędzy dwoma równoległemi zwierciadłami (fig. 267), to z początku powstają w nich obrazy a_1 i o_1, które z kolei wywołują obrazy a_{11} i o_{11}, te wywołują obrazy a_{111} i o_{111} i t. p. tak, że oko, znajdujące się we właściwym punkcie, dostrzegałoby nieograniczoną liczbę obrazów, gdyby bardziej oddalone nie traciły, wskutek powtarzanego odbicia, tyle na

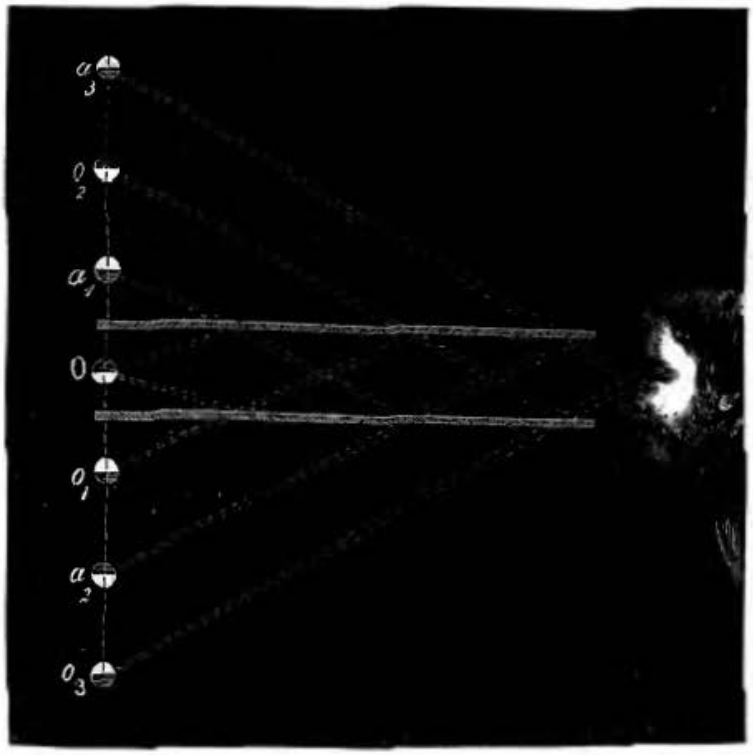


Fig. 267. Wielokrotne obrazy w dwóch równoległych zwierciadłach.

swem natężeniu świetlnem, iż nie wywierają na oko żadnego wrażenia. Gdy przeciwległe ściany salonu utworzone są przez dobre, równoległe zwierciadła, liczba ich pozornie rośnie nieograniczenie wskutek ogromnego mnóztwa obrazów, jakie wtedy dostrzegamy.

Jeżeli zwierciadła płaskie tworzą ze sobą kąt, to liczba obrazów danego przedmiotu jest ograniczona i zależy od stopnia nachylenia zwierciadeł. Fig. 268 (str. 432) przedstawia ilość i układ obrazów przedmiotu, umieszczonego między dwoma pro-

stopadłemi do siebie zwierciadłami; obrazów jest, jak widzimy, trzy, a leżą one na okręgu koła, środek którego znajduje się na linii przecięcia zwierciadeł. Gdy nachylenie wynosi tylko 60°, powstaje pięć obrazów, przy nachyleniu równem 45°, obrazów jest siedem; w ogóle liczba ich wzrasta w miarę zmniejszania kąta nachylenia obu zwierciadeł.

Na przytoczonej tylko co zasadzie opiera się znany powszechnie *kalejdoskop*, wynaleziony przez Brewster'a. Wewnątrz niewielkiej rury znajdują się trzy jednakowo szerokie zwierciadełka szklane, zwrócone powierzchnią odbijającą ku wnętrzu i tworzące razem trójkątny pryzmat równoboczny. Jeden koniec rury jest zamknięty przez dwie równoległe tafelki szklane, z których wewnętrzna jest przezroczysta, zewnętrzna zaś—matowa; pomiędzy temi tafelkami umieszcza się rozmaite przedmioty, jako to: różnobarwne kawałki szkła, perełki, pióra, cienkie druciki, gałązki mchu i t. p. Patrząc przez otwór w denku, zakrywającem drugi koniec rury, widzimy niektóre z tych przedmiotów bezpośrednio, lecz jednocześnie także spostrzegamy ich obrazy w zwierciadełkach, grupujące się w prawidłowe trójpromieniste gwiazdy. Przy obracaniu rury drobne przedmioty, umieszczone pomiędzy tafelkami, grupują się coraz to inaczej i coraz to inne gwiazdy stają się widoczne tak, że różnorodność obrazów jest tutaj niewyczerpana.

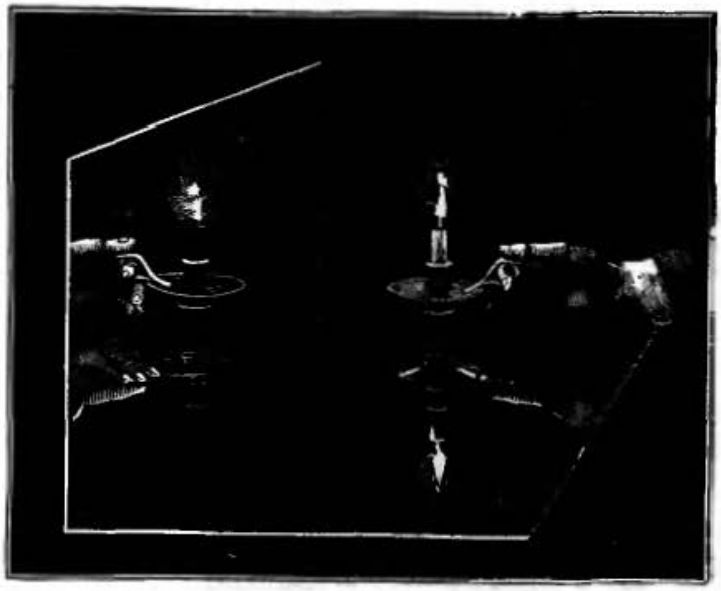


Fig. 268. Obrazy w dwóch zwierciadłach, nachylonych do siebie pod kątem prostym.

Na zakończenie niniejszego § dodamy jeszcze, że zwierciadła szklane, pomimo swej wielkiej kruchości, mają jednak zna-

czną przewagę nad metalowemi, ostatnie bowiem łatwo się utleniają i wymagają wielu starań, podczas gdy szklane przechowują się bez zmiany w ciągu lat całych, jeżeli tylko nie są umieszczone w szczególnie dla nich szkodliwych warunkach, jak np. na wilgotnej ścianie. Im bielsza, albo raczej im bezbarwniejsza jest tafla szklana, tem lepiej nadaje się ona do użycia jako zwierciadło, wtedy bowiem promienie świetlne—które muszą dwa razy przejść przez grubość tafli, zanim po odbiciu od gładkiej powierzchni amalgamatu, pokrywającej tylną jej ścianę, dojdą do oka,—nie ulegają zmianie barwy, ani też żadnemu znaczniejszemu osłabieniu pod względem natężenia światła. Wprawdzie promienie zawsze odbijają się głównie od amalgamatu, część ich jednak odbija się także od przedniej powierzchni szkła, wskutek czego przy uważnem wpatrzeniu się, można dostrzedz przed właściwym obrazem przedmiotu, drugi znacznie słabszy jego obraz, szczególniej gdy patrzymy dość ukośnie na zwierciadło. Dwa te obrazy są tem dalej jeden od drugiego, im grubsze jest szkło zwierciadła. Oprócz tego, nie wszystkie promienie, odbite od amalgamatu, przechodzą zaraz przez szkło, część ich bowiem odbija się od wewnętrznej (odwróconej od amalgamatu) strony szkła, pada na amalgamat i daje nowy obraz. W ten sposób powstaje po za głównym obrazem przedmiotu jeszcze kilka mniej lub więcej wyraźnych, co czyni zwierciadła szklane nie bardzo przydatnemi do poszukiwań naukowych.

§ 3. Sekstant.

Zwierciadła płaskie znalazły bardzo ważne zastosowanie w wielu przyrządach naukowych, jak w *goniometrze*, służącym do mierzenia kątów kryształu, w *heliostacie*, odbijającym w pewnym określonym kierunku światło słoneczne, w *sekstancie*, pozwalającym oznaczyć odległość kątową dwóch punktów dalekich, np. dwóch gwiazd, oraz w wielu innych. Opis wszystkich podobnych przyrządów za daleko odwiódłby nas od celu niniejszego dzieła, dlatego ograniczymy się na jednym z nich, najważniejszym, a mianowicie na *sekstancie*, bez którego oznaczenia astro-

nomiczne na morzu nie mogłyby wcale być dokonywane. Wynalazek tego przyrządu został stopniowo przygotowany przez to, że różni fizycy, jak Newton, Hooke, Godfrey i Harris używali instrumentów mierniczych, które w przybliżeniu polegały na tej samej, co i sekstant zasadzie. Za właściwego jednak wynalazcę tego ostatniego uważać należy Hadley'a, który w r. 1731 pierwszy umożliwił praktyczne zbudowanie zwierciadlanego sekstantu.

Najważniejszą część tego przyrządu stanowią dwa płaskie zwierciadła M i N (fig. 269), zwrócone ku sobie odbijającemi powierzchniami; jedno z nich (N) jest stale umocowane, drugie zaś (M) może być obracane naokoło pionowej swej osi. Przy odpowiedniem położeniu zwierciadła M, padający nań promień $S\,I$, wysyłany przez odległy świecący punkt, odbija się od tego zwierciadła w kierunku $I\,P$ tak, że kąt i pomiędzy powierzchnią odbijającą i promieniem odbitym $I\,P$ jest równy kątowi, jaki tworzy z tąże powierzchnią promień padający $S\,I$. Następnie promień $I\,P$ odbija się od zwierciadła N, poczem przyjmuje kierunek $P\,O$ i dosięga oka obserwatora, znajdującego się przypuszczalnie w O. Patrząc tedy z tego punktu w kierunku $O\,P$, widzimy tamże przez odbicie w zwierciedle N obraz świecącego ciała, z którego promień początkowo wyszedł i znajdującego się właściwie w kierunku $O\,S$ od obserwatora; jednocześnie także oko może widzieć bezpośrednio po przez (w części przezroczyste) zwierciadło N drugie świecące ciało, istotnie znajdujące się w kierunku $O\,P$. Jeżeli tedy przyrząd jest tak ustawiony, że obserwator widzi w tymże kierunku dwie np. gwiazdy: jednę przez podwójne odbicie od zwierciadeł M i N, drugą zaś wprost po przez zwierciadło N, to $S\,O\,P$ stanowi kąt, jaki tworzą z sobą kierunki, po-

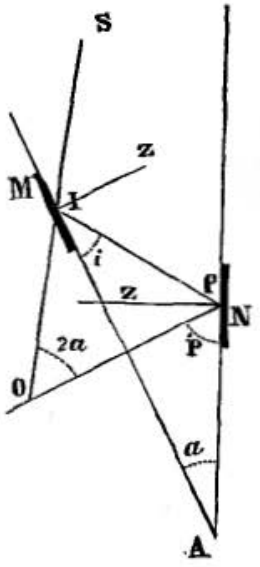


Fig. 269. Objaśnienie zasady zwierciadlanego sekstantu.

prowadzone od oka do dwóch tych gwiazd. Geometrycznie można dowieść, że kąt $S\ O\ P$ jest zawsze dwa razy większy od kąta a, pod jakim nachylone są do siebie zwierciadła M i N, czyli że $S\ O\ P = 2\ a$.

Mając tedy sposób mierzenia kąta, jaki tworzą z sobą dwa opisane zwierciadła przy podanych wyżej warunkach, możemy łatwo otrzymać kątową odległość dwóch gwiazd czyli kąt, jaki tworzą z sobą linie poprowadzone od nich do oka obserwatora.

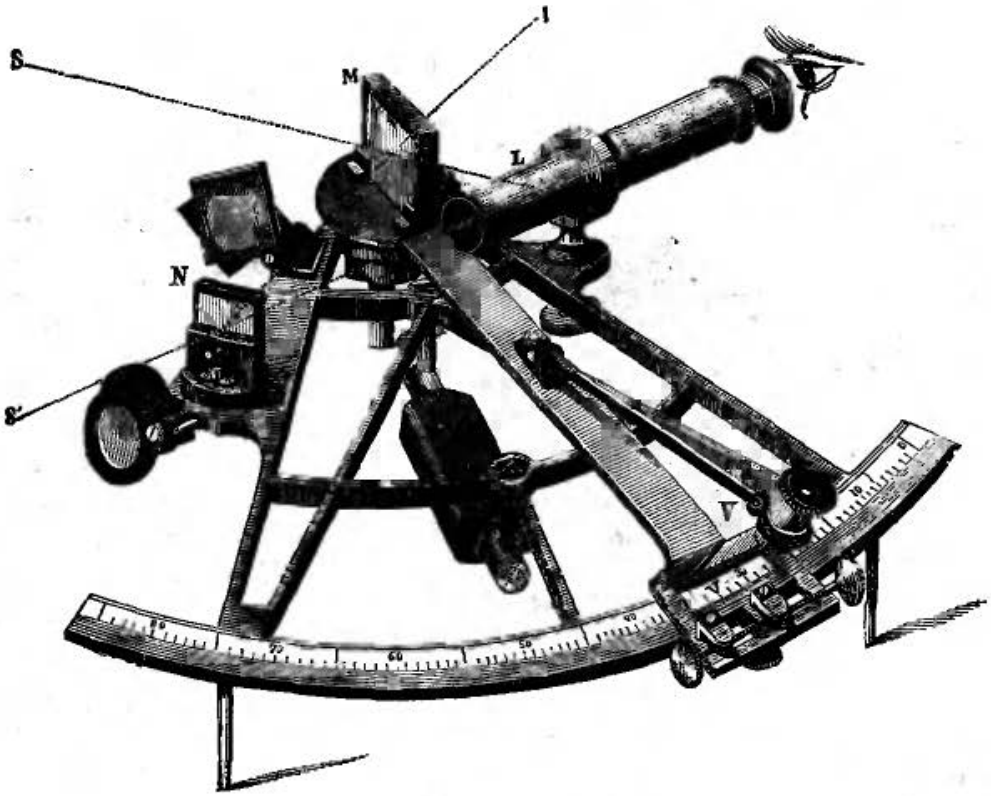


Fig. 270. Sextant zwierciadlany.

Zobaczmy teraz, jak jest urządzony sam przyrząd, przedstawiony w całości na fig. 270. Widzimy tutaj łuk, stanowiący szóstą część koła (1), przytwierdzony do mocnej mosiężnej ramy. W środku koła, którego łuk ten jest częścią, znajduje się krążek, który obracając się, przesuwa wskutek tego stale przymocowaną doń płaską linię, tak zwaną alidadę, po łuku. Ta ostatnia kończy się małym przyrządem V—*noniusem*, który umożli-

(1) Od łacińskiego wyrazu *sextus*—szósty, przyrząd nazwano sextantem.

wia bardzo dokładne odczytywanie podziałek skali; nad noniusem widzimy jeszcze szkło powiększające czyli lupę I, przez którą patrzymy na te podziałki. Na drugim końcu alidady znajduje się małe ruchome zwierciadło M, stanowiące jej przedłużenie i prostopadłe do płaszczyzny krążka; gdy alidada stoi na zerze łuku, zwierciadło M jest równoległe do drugiego stałego zwierciadła M'. Na to ostatnie, w górnej połowie przezroczyste, w dolnej zaś amalgamowane, skierowana jest luneta L w taki sposób, że widać przez nią jednocześnie obydwie te części. Gdy przez obracanie krążka ustawimy zwierciadło M tak, że dostrzeżemy przez lunetę w górnej polowie zwierciadła M' jakibądź przedmiot, a jednocześnie także w dolnej jego połowie ujrzymy obraz drugiego przedmiotu, powstający tam przez podwójne odbicie (od M i M'), wtedy odczytujemy kąt, na jaki przesunęła się po łuku alidada, licząc od zera; kąt ten (jak można łatwo dowieść geometrycznie) pokazuje nam zarazem nachylenie zwierciadeł M i M'. Podwajając takowy otrzymujemy, jak już wyżej powiedzieliśmy, kąt $S\,L\,S'$, jaki tworzą z sobą kierunki $L\,S$ i $L\,S'$, prowadzące do dwóch rozpatrywanych przedmiotów.

Fig. 271. Obserwacye z sextantem.

Chcąc za pomocą opisanego przyrządu zmierzyć np. kątową odległość dwóch gwiazd, należy go ująć za rękojeść, znajdującą się pod ramą i tak skierować lunetę, ażeby można było dostrzedz jednę z tych gwiazd bezpośrednio przez górną, przezroczystą część zwierciadła M' (fig. 271). Następnie pochylamy ramę przyrządu (przez co nie zmieniamy bynajmniej położenia lunety, al-

bowiem ona wtedy obraca się tylko około podłużnej swej osi) tak długo, dopóki druga gwiazda nie znajdzie się w płaszczyznie tej ramy, a więc i łuku. Wtedy dopiero obracamy krążek, a więc i zwierciadło *M* dopóty, dopóki nie zobaczymy przez lunetę obrazu tej drugiej gwiazdy w dolnej połowie zwierciadła *M'*, które przy przechylaniu ramy również obróciło się tylko około osi, będącej przedłużeniem osi lunety. Podwajając kąt, na jaki przesunęła się alidada wskutek obracania zwierciadła *M*, otrzymujemy szukaną odległość kątową dwóch gwiazd. Gdy chodzi o znalezienie takiejże odległości pomiędzy gwiazdą a księżycem, co jest bardzo ważne dla żeglarzy, albowiem przez to mogą oni określić szerokość geograficzną, pod jaką się znajdują, wtedy postępuje się tak, jak wyżej podano. Dotyczy to również mierzenia kątowej odległości księżyca i słońca, należy tylko używać wtedy szkieł poczernionych, ażeby uniknąć oślepiającego działania promieni słonecznych.

Z pośród innych przyrządów do mierzenia kątowych odległości, sextant wyróżnia się tem, że nie wymaga specyalnego ustawiania, gdyż podczas mierzenia może być, jak widzieliśmy, swobodnie trzymany w ręku. Dlatego właśnie na morzu stanowi on tak nieoceniony przyrząd; dwa niepozorne jego zwierciadełka pozwalają żeglarzowi oryentować się na bezmiernym wód obszarze.

§ 4. Odbicie od zwierciadeł krzywych.

Gdy promienie świetlne padają na zwierciadło krzywe, wtedy odbijają się one według praw, wymienionych wyżej dla zwierciadeł płaskich, należy tylko wyobrazić sobie, że przez każdy punkt, w którym promień spotyka powierzchnię odbijającą, czyli przez punkt padania przechodzi płaszczyzna, dotykająca tejże powierzchni tylko w tym właśnie punkcie i że w nim na owej płaszczyznie wystawiamy normalną. Promienie padający i odbity leżą w jednej płaszczyznie z tą normalną i tworzą z nią kąty równe. Jeżeli rozbieżne promienie padają na taką krzywą powierzchnię, to po odbiciu rozchodzą się silniej lub słabiej, niż

poprzednio, zależnie od wielkości krzywizny, mogą one nawet, jak zobaczymy, stać się równoległemi lub też zebrać się. Dlatego obrazy w krzywych zwierciadłach mają bardzo rozmaity kształt, wielkość i położenie, zależnie od rodzaju krzywizny z jednej strony oraz położenia przedmiotu z drugiej.

Rozważmy z początku obrazy w takich zwierciadłach, które stanowią odcinki kuli i zowią się *kulistemi*. Rozróżniamy dwa ich rodzaje: *zwierciadła wklęsłe*, gdy odbija wewnętrzna powierzchnia kuli i *zwierciadła wypukłe*, gdy zewnętrzna jej powierzchnia jest odbijająca. Fig. 272 przedstawia szematycznie zwierciadło wklęsłe: A jestto jego środek, C— środek kuli, którego zwierciadło jest odcinkiem, czyli t. zw. środek jego krzywizny; CA lub CI stanowi promień krzywizny, zawsze prostopadły do powierzchni zwierciadła w punkcie (A, I), do którego jest doprowadzony. Linia, przechodząca przez środek zwierciadła i środek jego krzywizny, stanowi *główną oś* zwierciadła, każda zaś linia przechodząca przez jakibądź inny punkt zwierciadła oraz punkt C stanowi jego *oś boczną*. Promień padający np. SI, tworzący z prostopadłą CI w punkcie padania kąt SIC, odbija się w kierunku IR tak, że kąt odbicia RIC jest równy kątowi padania SIC.

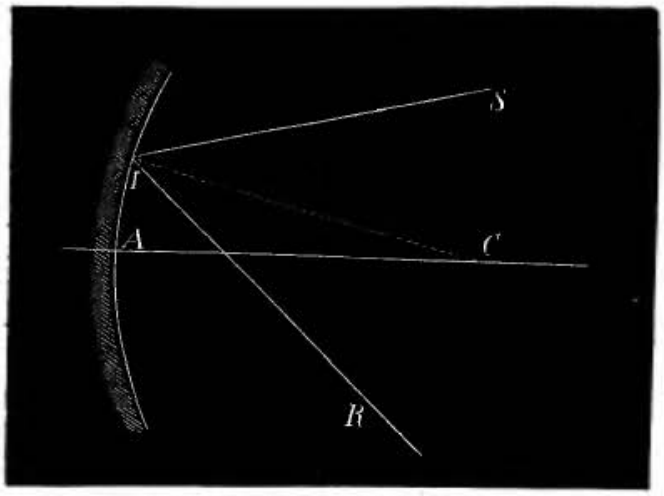


Fig. 272. Zwierciadło wklęsłe.

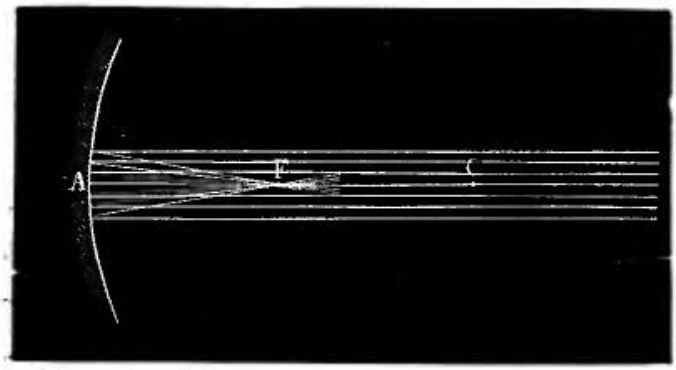


Fig. 273. Główne ognisko zwierciadła wklęsłego.

Przypuśćmy, że punkt świecący znajduje się na głównej osi i w tak wielkiej od zwierciadła odległości, że wszystkie promienie, padające nań z tego punktu, możemy uważać za równoległe do głównej osi (fig. 273, str. 438). Gdybyśmy dla każdego z tych promieni znaleźli kąt padania oraz kierunek, jaki przyjmuje po odbiciu, przekonalibyśmy się, że wszystkie promienie odbite przecinają główną oś w jednym punkcie F, który zowie się *głównem ogniskiem* zwierciadła wklęsłego; leży ono na połowie drogi między A i C. W ognisku głównem powstaje tedy obraz owego odległego punktu na osi; obraz ten jest rzeczywisty, albowiem tworzy się wskutek przecięcia promieni odbitych i można go otrzymać na ekranie. Gdy naodwrót punkt świecący znajduje się w głównem ognisku, to promienie po odbiciu biegną równolegle do osi głównej, a obraz punktu powstaje *nieskończenie* daleko od nas. Rozważmy teraz wypadek, gdy punkt świetlny znajduje się na głównej osi zwierciadła nie w nieskończenie wielkiej odeń odległości, lecz nieco przed środkiem krzywizny, np. w S (fig. 274). Poprowadziwszy promienie padające i znalazłszy kierunek ich po odbiciu, widzimy, że przecinają one oś główną w punkcie s, leżącym między ogniskiem głównem i środkiem krzywizny; w s tedy powstaje obraz punktu S; gdy zaś punkt świecący znajdzie się w s, to obraz jego utworzy się w S, albowiem kąty odbicia staną się kątami padania i naodwrót. Dlatego też punkty S i s zowią się *ogniskami sprzężonemi*. W miarę zbliżania punktu świetlnego S do środka C krzywizny, zmniejsza się kąt padania promieni, a więc odbijają się one także pod mniejszym kątem i ognisko sprzężone s zbliża się również do C. Wreszcie gdy świecący punkt znajduje się w samym środku krzywizny C, wtedy wszystkie promienie padają na zwier-

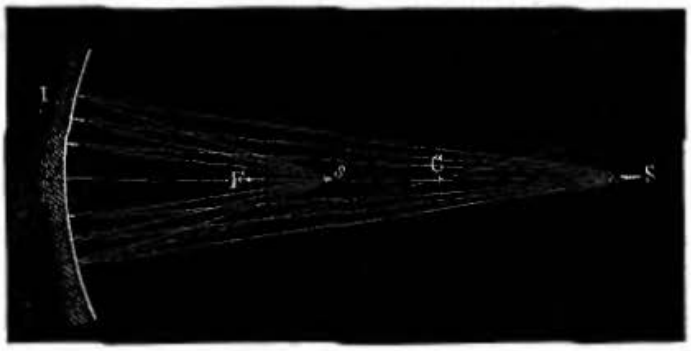


Fig. 274. Sprzężone ogniska.

ciadło prostopadle, a więc odbijają się w tym samym kierunku i ognisko sprzężone tworzy się także w środku krzywizny. Widzieliśmy zaś dopiero co, że ognisko sprzężone dla punktu świetlnego w ognisku głównem, znajduje się w nieskończoności.

Niechaj teraz świecący punkt S znajduje się pomiędzy ogniskiem głównem a zwierciadłem (fig. 275), przyczem $S\,I$ wyobraża jeden z promieni padających. Gdyby w I padał promień, wychodzący z ogniska głównego, to po odbiciu biegłby równolegle do głównej osi, ponieważ jednak promień pada w I pod kątem większym, niż jak gdyby wyszedł z F, to promień odbity $I\,R$ oddala się coraz bardziej od tejże osi, wskutek czego nie przecina jej przed zwierciadłem, lecz przedłużenie jego spotyka oś główną po za zwierciadłem w punkcie s. To samo dotyczy innych promieni, które wychodząc z S, padają na zwierciadło; wszystkie one po odbiciu tworzą wiązkę rozbieżnych promieni, których tylko przedłużenia przecinają się na głównej osi po za zwierciadłem, we wspomnianym punkcie s; punkt taki zowie się *ogniskiem urojonem*, dla odróżnienia od ognisk rzeczywistych, gdzie promienie odbite istotnie się przecinają. Jeżeli oko znajduje się na drodze owych rozbieżnych promieni, będzie mu się zdawało, iż one wychodzą z s, tutaj też zobaczy on obraz punktu świetlnego, podobnie jak to ma miejsce w zwierciedle płaskiem (patrz str. 429). Zobaczmy teraz, w jaki sposób tworzą się obrazy nie pojedyńczych punktów świecących, lecz całych przedmiotów większych rozmiarów. Przypuśćmy, że przedmiot $A\,B$ (fig. 276, str. 441) znajduje się dalej od zwierciadła, niż jego środek C krzywizny. Poprowadźmy najprzód z A promień w kierunku bocznej osi, czyli promień przechodzący przez C, a więc padający prostopadle na zwierciadło; odbija się on, jak wiemy, w tym samym kierunku, w jakim przyszedł; drugi zaś promień z A, biegnący równolegle do głównej osi, przechodzi

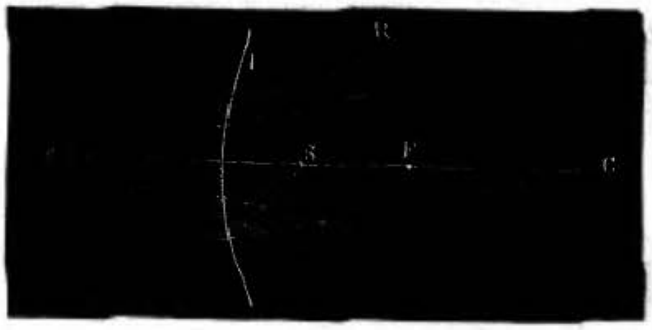


Fig. 275. Ognisko urojone.

po odbiciu przez ognisko główne F i przecina się z tamtym promieniem w punkcie a. W tym ostatnim przecinają się także inne promienie, wychodzące z A tak, że w a powstaje obraz punktu A. W podobny sposób znajdujemy, że obraz punktu B tworzy się w b, obrazy zaś wszystkich pośrednich między A i B punktów, powstają między a i b, wskutek czego w ab, między ogniskiem głównem i środkiem krzywizny, otrzymujemy obraz przedmiotu $A\,B$, który, jak to widzimy na figurze, jest *rzeczywisty*, *odwrócony* i *zmniejszony*.

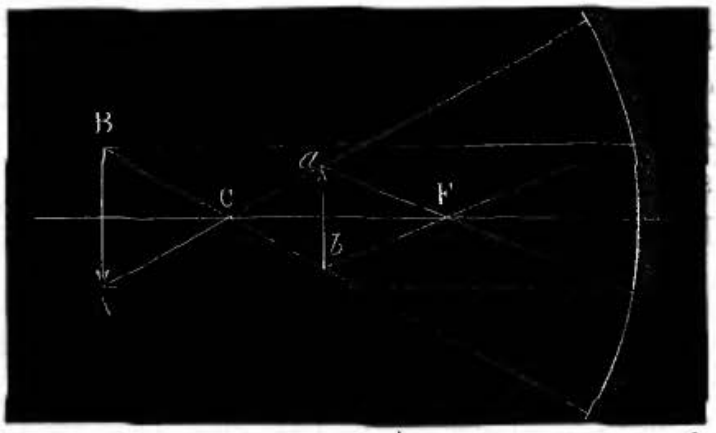


Fig. 276. Szemat tworzenia się obrazu przedmiotu większego niż punkt.

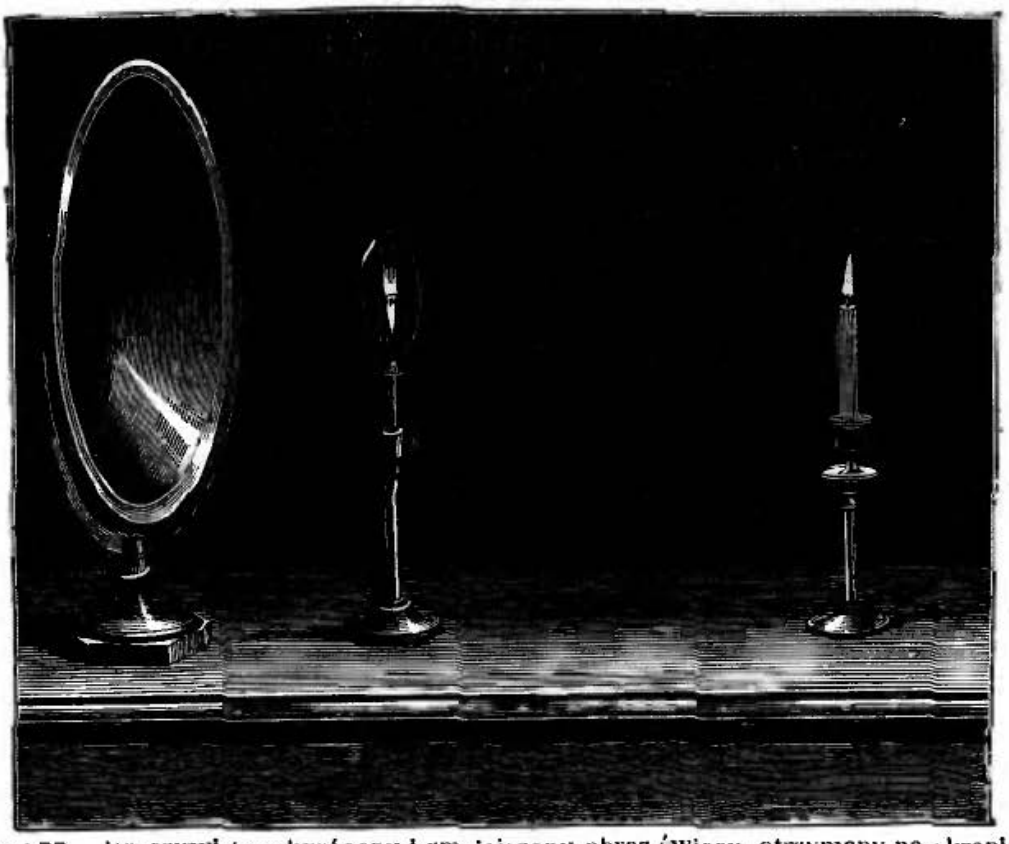


Fig. 277. Rzeczywisty odwrócony i zmniejszony obraz świecy, otrzymany na ekranie.

Jeżeli obserwator znajduje się wprost zwierciadła tak, że promienie, *rozbiegające się z a b, wpadają do jego oka, wtedy widzi*

on obraz w powietrzu przed zwierciadłem; stojący zaś z boku obrazu nie dostrzegają; w razie zaś, gdy w miejscu, gdzie powstaje obraz, ustawimy ekran (fig. 277, str. 441), to promienie padające na ten ostatni, odbijają się od niego we wszystkich kierunkach i obraz na ekranie widziany jest ze wszech stron. Podobne doświadczenie, które należy urządzać w mocno przyciemnionym pokoju, może nam także pokazać, że gdy przedmiot świecący znajduje się pomiędzy ogniskiem głównem a środkiem krzywizny, wtedy obraz tworzy się w punkcie bardziej oddalo-

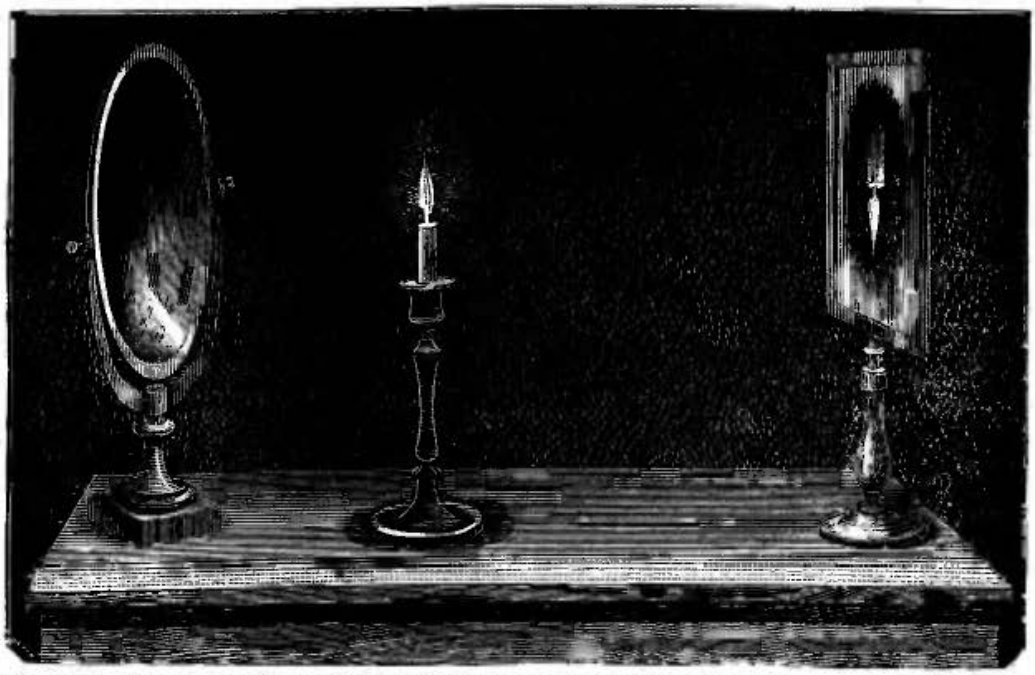


Fig. 278. Rzeczywisty, odwrócony i powiększony obraz przedmiotu, umieszczonego między głównem ogniskiem i środkiem krzywizny wklęsłego zwierciadła.

nym od zwierciadła, niż tenże środek; obraz ten jest *rzeczywisty*, *odwrócony* i *powiększony* (fig. 278). Przedmiot świecący, postawiony w samem ognisku głównem, wcale nie daje obrazu, albo raczej daje go w nieskończenie wielkiej od nas odległości, gdyż promienie, wychodzące z danego punktu przedmiotu, biegną po odbiciu równolegle do siebie, t. j. ani one same, ani ich przedłużenia nie przecinają się wcale. Wreszcie rozważmy jeszcze ostatni wypadek, gdy przedmiot znajduje się między ogniskiem głównem i zwierciadłem (fig. 279, stronica 443). Poprowadziwszy z punktu *A* promień równoległy do głównej osi oraz promień w kierunku osi bocznej, widzimy, iż po odbiciu dwa te promienie nie

przecinają się przed zwierciadłem, lecz przedłużenia ich spotykają się po za niem w punkcie *a*, który jest urojonym obrazem *A*. To samo stosuje się do punktu *B* oraz wszystkich pozostałych tak, że w *a b* powstaje obraz *urojony, prosty* i *powiększony* przedmiotu *A B*. Rezultat ten łatwo sprawdzić, stawiając, jak wyżej, w ciemnym pokoju zapaloną świecę przed zwierciadłem wklęsłem, bliżej niż jego ognisko główne; zobaczymy wtedy w zwierciedle powiększony i prosty obraz świecy (fig. 280), który jest urojony, tak jak w zwierciedle płaskiem, nie może więc być otrzymany na ekranie.

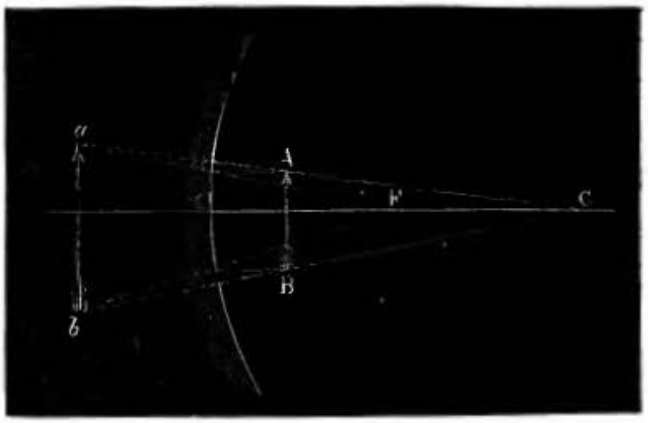


Fig. 279. Szemat tworzenia się urojonego obrazu.

Fig. 280. Urojony, prosty i powiększony obraz przedmiotu, umieszczonego między głównem ogniskiem i zwierciadłem wklęsłem.

W zwierciadłach kulistych wypukłych obrazy są zawsze urojone, albowiem promienie, z których się składa wiązka padającego na nie światła, rozbiegają się po odbiciu, jak to uwidocznia fig. 281, str. 444. Niechaj *A B* przedstawia przedmiot, umieszczony przed wypukłem zwierciadłem. Poprowadźmy z *A* i *B* promienie równoległe do głównej osi, a po odbiciu będą one miały taki kierunek, że tylko przedłużenia ich po za zwierciadłem przetną oś w punkcie *F*,

który stanowi *urojone ognisko główne* zwierciadła wypukłego; to samo stosuje się do innych promieni równoległych do osi. Następnie poprowadźmy z *A* i *B* promienie prostopadłe do zwierciadła w punkcie padania, a zobaczymy, że i one także po odbiciu nie przetną osi, lecz tylko przedłużenia ich spotkają się z nią w środku *C* krzywizny. Promienie tedy, wychodzące z *A*, po odbiciu od zwierciadła, rozbiegają się tak, jak gdyby przychodziły z punktu *a*, leżącego po za zwierciadłem; to samo stosuje się do promieni z *B* tak, że więc *a b* stanowi obraz przedmiotu *A B*. W miarę, jak przysuwamy przedmiot do zwierciadła wypukłego, urojony jego prosty obraz powiększa się i zbliża do tylnej powierzchni tegoż zwierciadła, zawsze jednak jest on mniejszy od przedmiotu, jak to widać na fig. 281.

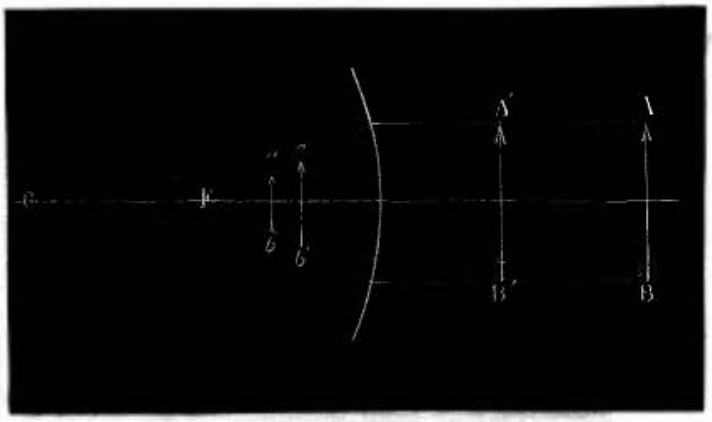
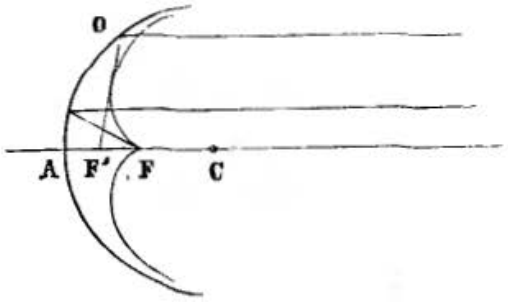


Fig. 281. Zwierciadło wypukłe. Obraz jest urojony, prosty i mniejszy od przedmiotu.

Jeżeli zwierciadło posiada względnie duże rozmiary, jak np. posrebrzone kule, używane często jako ozdoba w ogrodach, wtedy odbicia otaczających przedmiotów są dziwacznie powykrzywiane, a to dlatego, że części odleglejsze są bardziej zmniejszone i zdają się leżeć dalej w tyle po za powierzchnią odbijającą, aniżeli części bliższe.

Musimy tu zauważyć, że promienie odbite od zwierciadła kulistego, wtedy tylko dość dokładnie przecinają się w jednym punkcie, gdy padają niezbyt daleko od jego głównej osi i dlatego też zwierciadłu takiemu nie należy nadawać zbyt wielkich rozmiarów. Gdy warunek ten nie jest zachowany, wtedy wprawdzie promienie równoległe do osi i odbite w blizkości środka *A* (fig. 282, str. 445) przecinają oś w ognisku głównem *F*, lecz promienie, padające w punkcie *O*, dla których kąt padania jest o wiele większy, przecinają oś w *F'*, to jest bliżej zwierciadła; zboczenie *F F'* zowie się *aberracyą kulistości*. Wynika z tego, że promienie od-

bite przecinają się tak, że nie wszystko światło koncentruje się w jednem miejscu, lecz tworzy się powierzchnia, wierzchołek której znajduje się w ognisku głównem i tutaj też jest ona najsilniej oświetlona; powierzchnia ta (przecięcie jej widzimy na fig. 282) zowie się *kaustyką*. Trzymając przed zwierciadłem wklęsłem, mniej więcej w kierunku jego osi, arkusz papieru, otrzymujemy na nim przecięcie tej powierzchni, przedstawiające się jako świetlna linia, zwana linią ogniskową. Do podobnych doświadczeń nadają się także walcowate zwierciadła wklęsłe, półkoliste brzegi metalowe lub też wewnętrzne ściany szklanych naczyń. Na pełniwszy szklankę w części jaką *nieprzezroczystą cieczą*, *naprzykład mlekiem*, kawą, a najlepiej atramentem i wystawiwszy ją na działanie promieni słonecznych, które z góry padają ukośnie na jej wewnętrzną ścianę, otrzymujemy bardzo wyraźną linię ogniskową na powierzchni cieczy (fig. 283). Wskutek aberracyi kulistej, obrazy większych przedmiotów są bardzo niewyraźne, często też używa się przy zwierciadłach kulistych przepon czyli diafragm, które nie przepuszczając promieni peryferycznych (bardziej oddalonych od głównej osi), dają możność otrzymywania obrazów, mniej wprawdzie jasnych, lecz za to wyrazistszych.



Fig, 282. Aberracya kulistości. Kaustyka przez odbicie.

Fig. 283. Linia ogniskowa, otrzymana na powierzchni cieczy.

Zwierciadła wklęsłe lub wypukłe, stanowiące odcinki walca, odbijają światło w taki sposób, że wymiary odbijającego się

przedmiotu nie ulegają zmianie w kierunku długości walca, albowiem w kierunku tym zwierciadła są płaskie, to znaczy, że idące po sobie elementy powierzchni odbijającej leżą jakby na jednej prostej linii. Dlatego też promienie, odbite wzdłuż jednego i tego samego boku walca biegną tak, jak gdyby odbiły się od zwierciadła płaskiego. Inaczej rzecz się ma w kierunku prostopadłym do poprzedniego, czyli w kierunku poprzecznego przecięcia walca: promienie padające w płaszczyznie tego samego przecięcia odbijają się jak od zwierciadła kulistego tak, że gdy walec jest wypukły, obraz będzie zawsze miał mniejszą szerokość, niż przedmiot, gdy zaś walec jest wklęsły, szerokość obrazu będzie mniejsza lub większa, niż szerokość przedmiotu, zależnie od położenia tego ostatniego względem zwierciadła. Podobnie i obrazy w zwierciadłach stożkowatych są zmienione w kierunku obwodu stożka; ponieważ przytem krzywizna obwodów oddzielnych poprzecznych przekrojów powiększa się, idąc od podstawy do wierzchołka, to i zmiana obrazu będzie tem większa, im bliżej wierzchołka; jeżeli stożkowate zwierciadło jest wypukłe, to zmiana polega na zmniejszeniu szerokości obrazu.

Gdy światło odbija się od przezroczystej tafli zwierciadlanej, wtedy obrazy wydają się nieco blade, albowiem znaczna część padającego światła przechodzi przez taflę, nie uległszy wcale odbiciu; z tego mianowicie powodu pokrywa się tafle zwierciadlane amalgamatem cyny lub też srebrem, przez co obrazy stają się tak wyraźne, jak gdyby były odbite w doskonale polerowanej powierzchni nieprzezroczystego ciała. Zwierciadeł nieamalgamowanych używa się natomiast do wywoływania pewnych efektownych zjawisk, jak np. do ukazywania duchów na scenie. Polegają one na tem, że dana osoba, odpowiednio ubrana i silnie oświetlona, której widzowie dostrzedz nie mogą, gdyż jest ukryta w zagłębieniu poniżej sceny (fig. 284), odbija się w zwierciedle przezroczystem, zawieszonem pochyło przed samą sceną. Ta ostatnia, również jak i sala, są słabo oświetlone tak, że widzowie nie dostrzegają samego zwierciadła, lecz widzą tylko obraz odbitej w niem osoby oraz aktorów, znajdujących się po za zwierciadłem na scenie.

Jeżeli powierzchnia danego ciała jest doskonale wypolerowaną, to wszystkie padające na nią promienie odbijają się podług omówionych wyżej praw i powstaje, jak widzieliśmy, obraz przedmiotu wierny lub skrzywiony, zmniejszony lub powiększony i t. p. Sama powierzchnia odbijająca zdaje się nie wysyłać promieni i jest dla nas tem mniej widoczna, im lepiej jest wypolerowana. W słabo oświetlonym pokoju nie widzimy samych zwierciadeł, lecz tylko odbite w nich przedmioty; gdybyśmy mogli np. spoglądać z księżyca na ziemię, morza jej wydawałyby się zapewne ciemne i tylko w miejscu, gdzie odbija się obraz słońca, wi-

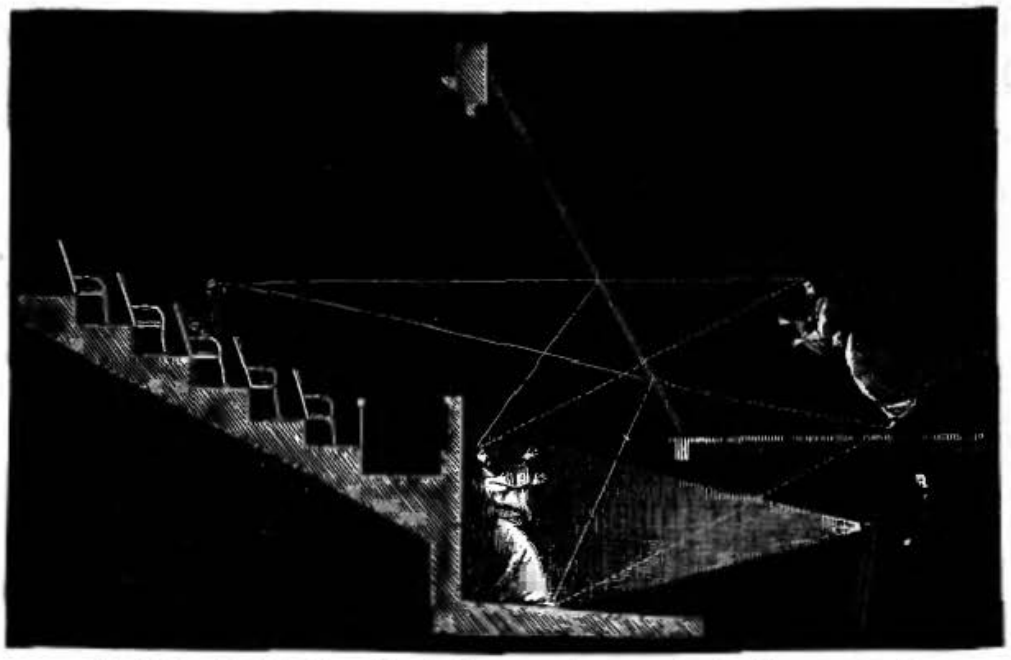


Fig. 284. Położenie zwierciadła przy ukazywaniu duchów na scenie.

dzielibyśmy jasno oświetlony krążek. Ponieważ księżyc przedstawia się nam jako powierzchnia we wszystkich swych punktach oświetlona, wnosimy z tego, iż niema na nim znacznych obszarów wodnych.

Jeżeli tedy same powierzchnie zwierciadeł są dla nas widoczne, zależy to od niezupełnej ich gładkości; wtedy bowiem część padającego na nie światła odbija się nieprawidłowo na wszystkie strony, t. j. zostaje rozproszona, tak, jak przez ciała chropawe, które w wysokim stopniu posiadają tę własność. Gdy powiadamy, że światło rozproszone jest nieprawidłowo odbite, nie

znaczy to, że ono ulega innym prawom odbicia, niż te, które wyżej opisaliśmy; nieprawidłowość polega na tem, że nierówności powierzchni mają kierunek najrozmaitszy i odbijają światło pod najrozmaitszemi też kątami (fig. 285).

Wiadomo, że jedno i to samo ciało może stanowić zwierciadło, albo odbijać nieprawidłowo, zależnie od stopnia politury: polerowane szkło zamienia się w zwierciadło, matowe zaś rozprasza tylko światło; to samo stosuje się do marmuru i innych minerałów, do rogu, kości słoniowej, niektórych gatunków drzewa i wielu innych ciał. Siła odbitego światła zależy także od kąta padania; tak np. gdy kąt ten równa się 50°, woda odbija 72 procent, szkło 54 pr., marmur 60 pr., rtęć i metalowe zwierciadło 70 pr. padającego światła. Jeżeli kąt padania się powiększa, ilość odbitych promieni maleje nadzwyczajnie przy dwóch pierwszych z wymienionych tutaj ciał tak, że wynosi ona tylko 2—3 pr., gdy np. kąt padania dochodzi prawie do 90°, podczas gdy rtęć w tych warunkach odbija jeszcze 60 pr. światła. Ciała ciemne w słabym stopniu odbijają światło; tak np. ilość promieni, odbitych od sadzy, nawet błyszczącej, jest nader nieznaczna.

Fig. 285. Nieprawidłowe odbicie światła od chropawej powierzchni.

Niewiele więcej jak sto lat temu poczęto stosować prawa odbicia do przesyłania na odległość oraz spotęgowania blasku świateł, palących się na latarniach morskich, które w nocy chronią okręty od niebezpieczeństw, grożących im w blizkości brzegów ze strony ostrych skał, ławic piaskowych i t. p., oświetlając drogę do bezpiecznego portu. W dawniejszych czasach palono w tym celu na wieżach ognie, później dopiero pomyślano o tem, ażeby ognie zastąpić lampami; wreszcie dodano do lamp zwierciadła z polerowanego metalu, od których promienie światła odbijały się w przestrzeń daleką. Lecz latarnie te o wklęsłych

zwierciadłach, czyli *latarnie katoptryczne*, pozostawiały dużo do życzenia, po pierwsze dlatego, że same lampy były bardzo niedoskonałe, powtóre zaś, że zwierciadła wklęsłe kuliste, w ognisku głównem których ustawione jest światło, nie odbijają go pod postacią snopa równoległych promieni, biegnącego w pewnym żądanym kierunku, lecz rozpraszają je mniej lub więcej, zależnie od swej wielkości. Czytelnik bowiem rozumie zapewne, że tak samo, jak promienie równoległe, padające na względnie duże zwierciadło (patrz str. 445), nie przecinają się wszystkie po odbiciu w ognisku głównem, tak też i promienie, wychodzące z ogniska głównego, odbijają się tak, że biegną potem jako snop rozbieżnych promieni. Dopiero gdy podług wskazówek inżyniera Teulera, zastąpiono zwierciadła kuliste *parabolicznemi*, t. j. odcinkami paraboloidów, latarnie morskie dosięgły wielkiego znaczenia. Zwierciadła paraboliczne dokładniej, niż kuliste, skupiają promienie równoległe w jednem ognisku, co wynika z geometrycznych własności paraboli; naodwrót także, promienie wychodzące z ogniska paraboli, po odbiciu są dokładnie równoległe tak, że natężenie ich mało się zmienia w miarę odległości, albowiem nie rozpraszają się one na coraz większej przestrzeni. Zwierciadło paraboliczne działa tedy odnośnie do światła w podobny sposób, jak trąbka akustyczna odnośnie do dźwięku, a zmniejszenie natężenia, które wreszcie następuje, pochodzi ztąd, że promienie przechodzą przez powietrze, gdzie zostają częściowo pochłonięte, szczególniej podczas mgły. Obecnie używane latarnie katoptryczne składają się zwykle z grupy lamp, z których każda znajduje się w ognisku parabolicznego metalowego zwierciadła. Ponieważ lampy wraz ze swemi zwierciadłami obracają się za pomocą przyrządu zegarowego około pionowej osi, to podczas całkowitego obrotu spostrzega się w jakim oddalonym punkcie kilka razy pojawiające się światło, w przerwach zaś panuje tam ciemność.

Zwierciadła paraboliczne mogą przesyłać światło na bardzo znaczną odległość; podług badań Biot'a i Arago, światło odbite od takiego zwierciadła 81 cm. szerokiego, było widziane przez lunetę, przy sprzyjającej pogodzie, jeszcze na odległości 24 mil

geograficznych. Pomimo to jednak strata na sile oświetlającej wcale nie jest mała, wynosi bowiem co najmniej połowę promieni, padających na zwierciadło; oprócz tego, powierzchnia zwierciadeł metalowych psuje się dość prędko od par zawierających sole i napełniających ustawicznie powietrze w blizkości morza. Z tych powodów zarzucono nieco w nowszych czasach system latarń katoptrycznych, używając ich głównie do oświetlania wązkich odnóg morskich lub cieśnin, albo też do powiększenia siły innego, potężniejszego źródła światła. W latarniach morskich pierwszorzędnych znalazł zastosowanie system inny, który poznamy w końcu następnego rozdziału.

ROZDZIAŁ IV.

Załamanie światła (Dioptryka).

§ 1. Ogólne zjawiska i prawa załamania.

Gdy koniec prostego drążka zanurzymy w czystej wodzie, nadając mu przytem położenie pochyłe względem powierzchni cieczy, wówczas wydaje się on nam jakby złamany w miejscu, w którem wchodzi do wody, zanurzona zaś jego część wydaje się podniesioną i skróconą. Gdy trzymamy drążek prostopadle do powierzchni wody, albo gdy stajemy tak, że nie dostrzegamy jego pochylenia, wtedy załamanie znika dla naszych oczu i tylko skrócenie zanurzonej części jest jeszcze wyraźne. Doświadczenie podobne można łatwo wykonać, zanurzając np. ołówek w szklance wody. Albo też ustawmy przed sobą nieprzezroczyste naczynie, na dnie którego znajduje się np. niewielka moneta *a* i umieśćmy oko tak, ażebyśmy tej ostatniej nie mogli dostrzedz (fig. 286), t. j. ażeby promień *a d c*, idący od monety, przechodził powyżej oka (*b*). Po nalaniu wody do naczynia, ujrzymy monetę, pomimo iż oko nie zmieniło swego położenia: będzie się nam zdawało, że moneta się podniosła, że znajduje się w *m* (fig. 287). Każdy zresztą łatwo może zauważyć, że przedmioty, wi-

dziane po przez warstwę wody, zdają się być zmienione pod względem kształtów i leżeć w innem miejscu, niż to, w jakiem istotnie się znajdują. Wszystkie podobne zjawiska zależą od tego, że światło, przechodząc z jednego środka do drugiego, z wody np. lub szkła do powietrza, *zmienia swój kierunek*, to jest zbacza z dotychczasowej drogi czyli, jak powiadamy, *załamuje się*.

Gdy światło rozchodzi się ze świecącego lub oświetlonego punktu, wtedy w środku jednorodnym rozprzestrzenia się, jak wiemy, prostolinijnie; po przejściu do drugiego, również jednorodnego środka, biegnie tak samo prostolinijnie, lecz ta ostatnia droga nie stanowi przedłużenia pierwszej, a całkowity kierunek promienia przedstawia się jako linia złamana, obydwie części której tworzą kąt, mający swój wierzchołek na granicy obu środków. Powtarza się to przy każdem przejściu światła z jednego środka do drugiego, niezależnie od tego, czy są one stałe, ciekłe lub gazowe; wielkość zaś zboczenia zależy od natury tego drugiego środka. Zjawisko załamania światła było zapewne znane od najdawniejszych czasów, albowiem tak często narzuca się uwadze ludzkiej, iż trudno go nie dostrzedz; nawet niektórzy starożytni astronomowie, jak np. Ptolomeusz, znali wpływ załamania w atmosferze, to jest zboczenie, jakiemu ulega promień świetlny, gdy z t. zw. próżnej przestrzeni przechodzi przez warstwy atmosfery ziemskiej. Lecz przyczynę tego zboczenia oraz prawa załamania wykrył dopiero w początku XVII stulecia holenderski matematyk Snellius. Zajmijmy się tedy zbadaniem

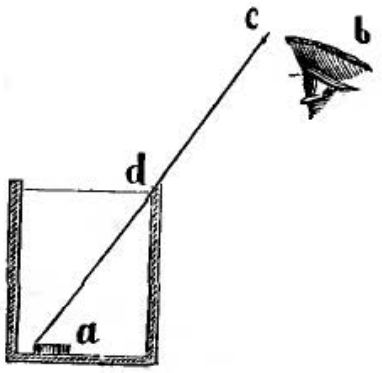


Fig. 286. Moneta (*a*) niewidoczna dla oka.

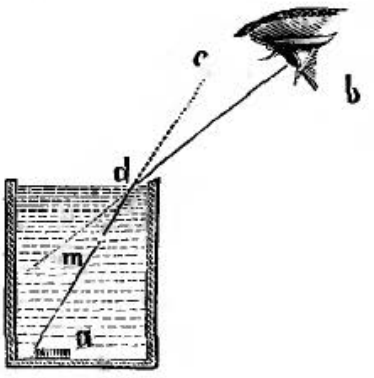


Fig. 287. Pozorne podniesienie monety w naczyniu z cieczą.

tych praw, oznaczanych także mianem praw Kartezyusza, który zgłębił je dokładniej i nadał im bardziej określone znaczenie.

Fig. 288 przedstawia przyrząd, służący do doświadczeń nad załamaniem światła. Składa się on z pionowo osadzonego koła, podzielonego na stopnie, do którego przymocowane jest szklane naczynie, mające kształt krótkiego lecz szerokiego walca, którego oś jest pozioma i przechodzi przez środek koła. Po napełnieniu tego ostatniego naczynia do połowy wodą lub inną jaką

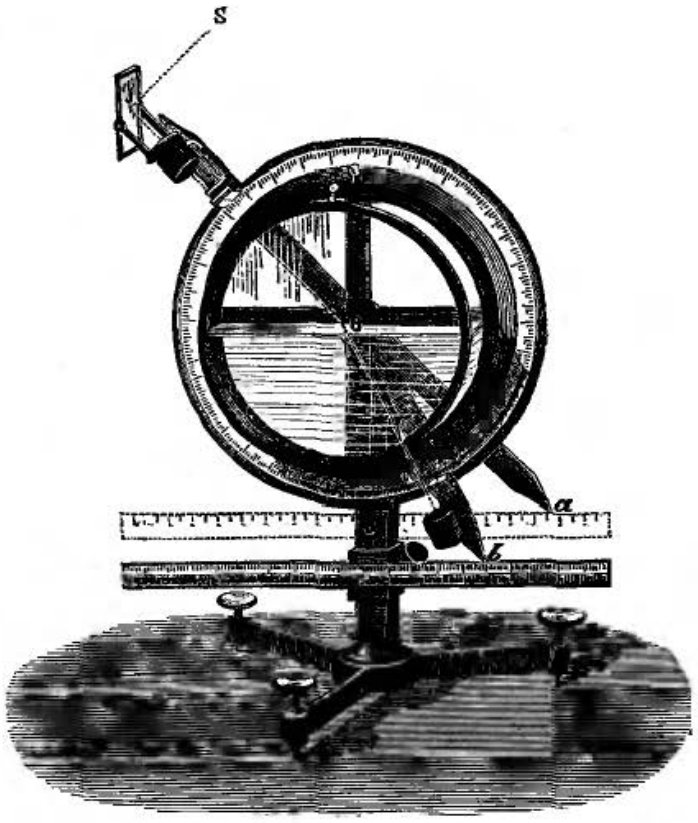


Fig. 288. Przyrząd do doświadczeń nad załamaniem światła.

cieczą, poziom jej sięga wysokości środka koła, a normalna do tego poziomu zlewa się z pionową jego średnicą. Do środka koła przymocowany jest płaski, dający się obracać liniał (alidada); na górnym jego końcu widzimy krótką rurkę, od której odchodzą dwa ramiona, podtrzymujące ruchome zwierciadło płaskie, drugi zaś koniec rurki, bliższy koła, jest zamknięty przez dno, posiadające mały otwór. Zwierciadło należy tak ustawić, ażeby padający nań promień słoneczny po odbiciu przeszedł przez otwór

i trafiał punkt powierzchni cieczy, znajdujący się dokładnie naprzeciwko środka *O* koła. W tem miejscu promień przenika do wnętrza cieczy i opuszcza takową w określonym punkcie dolnej części naczynia. W celu dokładnego określenia kierunku wychodzącego promienia, umieszcza się obok pierwszego liniału drugi, zaopatrzony na końcu w taką samą rurkę, zakrytą przez dno o małym otworze; oprócz tego, na każdym liniale znajduje się wskaźnik, posuwający się wzdłuż stopni koła i pozwalający dokładnie odczytywać położenie danego liniału. Ustawmy najprzód zwierciadło i górną rurkę tak, ażeby promień po odbiciu od zwierciadła padał prostopadle na powierzchnię wody w punkcie *O*, a przekonamy się, że po przejściu przez wodę, wyjdzie on z dolnej rurki tylko wtedy, gdy ta ostatnia znajduje się na jednej prostej pionowej ze środkiem *O*, z czego wynika, *że promień, padający prostopadle do powierzchni odgraniczającej dwa środki nie załamuje się, lecz biegnie dalej w tym samym kierunku.*

Następnie zmieńmy położenie zwierciadła i górnej rurki tak, ażeby promień padający w punkcie *O* tworzył z normalną pewien kąt, a zobaczymy, że wtedy i promień wychodzący z wody tworzy z tą normalną *kąt załamania*, mniejszy od *kąta padania*, lecz powiększający się wraz z tym ostatnim. W każdem jednak położeniu promień załamany wtedy tylko trafia na otwór w dolnej rurce, gdy obadwa otwory leżą w jednej płaszczyznie z normalną do powierzchni cieczy w punkcie padania, z czego wynika następujące prawo: *promień padający i promień załamany leżą w jednej płaszczyznie, prostopadłej w punkcie padania do powierzchni, rozdzielającej dwa środki.* Ażeby módz oznaczać stosunek kąta padania do kąta załamania, zaopatruje się dolny koniec każdego liniału w ostrze, przesuwające się wzdłuż poziomej ruchomej skali z podziałkami, przyczem ostrza znajdują się na jednakowej odległości od środka *O* koła. Ustawiwszy przyrząd tak, ażeby promień, który przenika przez otwór w górnej rurce i pada w punkcie *O* na powierzchnię wody, przechodził po załamaniu przez dolny otwór, mierzymy odległość ostrzy *a* i *b* od normalnej do powierzchni cieczy w punkcie padania, a to przez posuwanie w górę skali aż do *a* i następne jej

opuszczanie do *b*. Powtarzając takie mierzenia przy rozmaitych kątach padania i załamania, przekonywamy się, że stosunek rzeczonych odległości, dla jednego i tego samego środka załamującego, jest ilością stałą. Należy tutaj nadmienić, że odległości ostrzy *a* i *b* od normalnej dają jednocześnie miarę tego, co w trygonometryi oznaczamy jako *wstawy* odpowiednich kątów, w danym wypadku—kątów padania i załamania tak, że stosunek tych odległości daje nam zarazem stosunek wstaw rzeczonych kątów. Gdy np. powyższe doświadczenia wykonywamy z wodą, znajdujemy zawsze, niezależnie od kąta padania, że odległość ostrza *a* od normalnej jest 1,335 razy większa, niż takaż odległość ostrza *b;* stosunek tedy wstawy kąta padania do wstawy kąta załamania dla powietrza i wody jest jak 1,335 do 1. Dla innych dwóch środków znajdujemy stosunek odmienny, lecz także stały; np. dla powietrza i siarku węgla wynosi on 1,67; dla powietrza i alkoholu—1,37 i t. d. Zauważmy mimochodem, że zarzut, jaki możnaby zrobić przeciwko opisanym doświadczeniom, a mianowicie, iż promień, wychodzący z cieczy, ulega powtórnemu załamaniu przy przejściu przez dno naczynia usuwa się tem, że, jak to widać z fig. 288, każdy promień wewnątrz cieczy, jako prostopadły do walcowatej powierzchni dna, przechodząc przez takowe, nie ulega wcale załamaniu. Możemy więc wyniki tych doświadczeń ująć w następujące prawo: *stosunek wstawy kąta padania do wstawy kąta załamania jest dla dwóch danych środków ilością stałą.* Stosunek ten zowie się *spółczynnikiem załamania.* Jeżeli promień przechodzi ze środka mniej gęstego optycznie do bardziej gęstego optycznie, to spółczynnik załamania jest większy od jedności, innemi słowy, kąt załamania jest mniejszy od kąta padania, gdyż promień załamany zbliża się do normalnej. I tak spółczynnik załamania dla wody odnośnie do powietrza wynosi, jak powiedzieliśmy wyżej $^4/_3$, dla szkła równa się on $^3/_2$, dla dyamentu $^5/_2$. Jeżeli zaś promień przechodzi z próżni do danego środka, wtedy spółczynnik jego załamania zowie się absolutnym; dla ciał stałych i ciekłych absolutny spółczynnik załamania różni się bardzo mało od spółczynnika odnośnie do powietrza i dlatego ten ostatni przyjmujemy za ich spółczynnik załamania.

Znając drogę promienia przy przejściu z jednego środka do drugiego, łatwo zrozumieć, że ten sam promień, wychodząc z drugiego środka do pierwszego, musi odbyć tę samą drogę, lecz w kierunku przeciwnym. Chcąc przedstawić to w sposób szematyczny, nakreślmy promień $R\ I$ (fig. 289), padający na powierzchnię wody w punkcie I i przedłużmy go, to jest zaznaczmy drogę, po jakiej biegłby, gdyby nie uległ załamaniu; następnie promieniem, równym jedności, zakreślmy z punktu I koło. Widzimy, że to ostatnie przecina przedłużenie promienia padającego w punkcie R'; jeżeli tedy z tego punktu poprowadzimy prostopadłą $R'\ P'$ do normalnej, to daje nam ona wstawę kąta padania. Długość $R'\ P'$ skróćmy w stosunku spółczynnika załamania dla powietrza i wody, a więc prawie zupełnie dokładnie w stosunku 4 : 3 i znajdźmy na okręgu koła taki punkt S, którego odległość $S\ P$ od normalnej równa się skróconej linii, co łatwo można wykonać na drodze geometrycznej; wtedy $S\ P$ jest wstawą kąta załamania, a połączywszy punkt I z punktem S, otrzymujemy promień załamany $I\ S$. Przeciwnie gdy promień wychodzi z wody w kierunku $S\ I$, to w powietrzu biegnie dalej w kierunku $I\ R$, inaczej mówiąc, przy przejściu z wody do powietrza promień oddala się od normalnej. W ogóle przechodząc ze środka optycznie bardziej gęstego A do środka optycznie mniej gęstego B, promień oddala się od normalnej i spółczynnik załamania równa się odwrotnemu spółczynnikowi przy przejściu z B do A; tak np. przy przejściu z wody do powietrza wynosi on $^3/_4$, ze szkła do powietrza $^2/_3$, z dyamentu do powietza $^2/_5$.

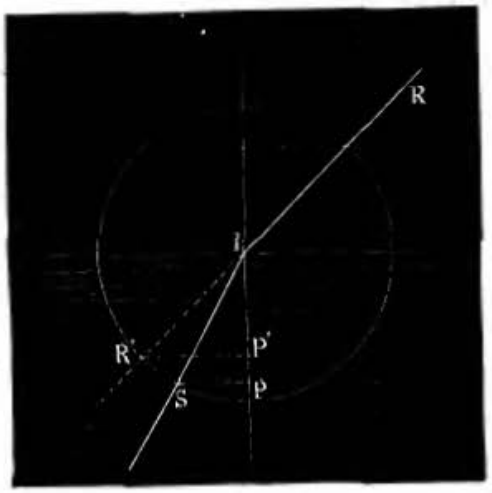


Fig. 289. Prawo załamania.

Prawa te załamania zdają sprawę ze zjawisk, opisanych na początku niniejszego §. Ażeby np. oko b (patrz fig. 287, str. 451) ujrzało monetę, znajdującą się na dnie naczynia, promienie

świetlne, odbite od niej, muszą dojść do powierzchni wody i wyjść w powietrze, tutaj jednak, oddalając się od normalnej w punkcie padania, przyjmują kierunek bardziej pochyły, wskutek czego dochodzą do oka, które widzi monetę w kierunku przedłużenia tych promieni.

To samo stosuje się do części drążka, znajdującej się pod wodą: cała zanurzona część wydaje się nieco wzniesiona i jakby zgięta względem części, wystającej z wody (fig. 290). W podobny sposób objaśnia się także, dlaczego gdy patrzymy ukośnie na powierzchnię stawu lub jeziora, zawierającego przezroczystą wodę, wydają się one płytsze, aniżeli są w rzeczywistości.

§ 2. Zupełne wewnętrzne odbicie. Załamanie światła przy zjawiskach astronomicznych.

Gdy przy przejściu ze środka mniej gęstego do bardziej gęstego kąt padania się powiększa, wzrasta także kąt załamania,

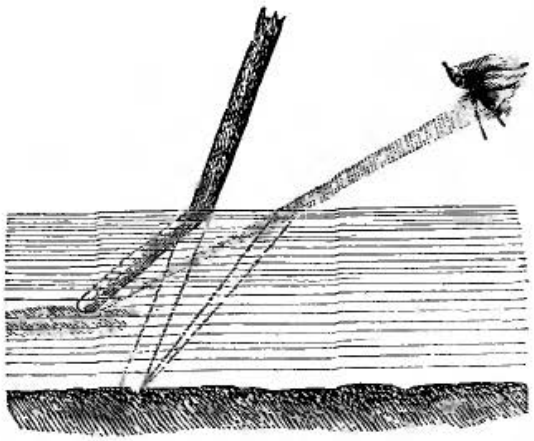


Fig. 290. Objaśnienie zjawiska załamania.

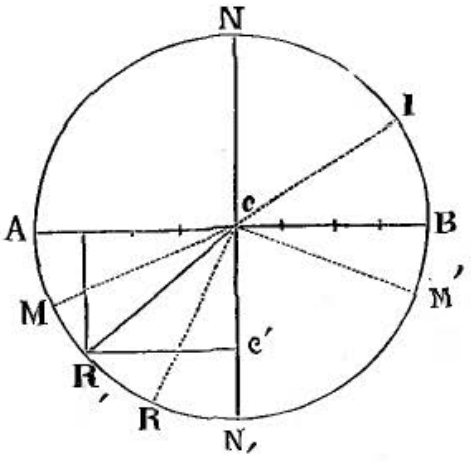


Fig. 291. Graniczny kąt padania.

lecz nie tak szybko, jak pierwszy. Znajdźmy kierunek promienia załamanego, gdy promień padający na powierzchnię wody, tworzy z normalną kąt prosty (90°), to jest gdy pada np. na punkt c (fig. 291) wzdłuż samej powierzchni $B\ A$, oddzielającej oba środki; wtedy linia $N\ c$, lub też równa jej $B\ c$ jest wstawą kąta padania $N\ c\ B$, jeżeli koło zakreślone z punktu c, ma pro-

mień równy jedności. Niechaj wstawa ta równa się czterem jednakowym częściom. Ponieważ spółczynnik załamania dla powietrza i wody wynosi $^4/_3$, to w naszym przykładzie promień w wodzie utworzy z normalną kąt, którego wstawa powinna równać się trzem takim samym częściom; warunkowi temu odpowiada promień $c\ R'$, tworzący z normalną kąt $N'\ c\ R'$, mniejszy od prostego. A więc gdy kąt padania zmienia się od 0^0 do 90^0, kąt załamania zmienia się od 0^0 do pewnej granicy, mniejszej niż 90^0; kąt załamania, odpowiadający kątowi padania—90^0, zowie się *granicznym*. Dla wody wynosi on $48^0\ 35'$, dla szkła $41^0\ 48'$, dla dyamentu $23^0\ 35'$.

Zobaczmy teraz, co zachodzi, gdy promienie przechodzą ze środka bardziej gęstego do mniej gęstego, np. z wody do powietrza. Gdy promień biegnie w wodzie wzdłuż normalnej $N'c$, wtedy, przechodząc do powietrza, posuwa się wzdłuż normalnej $N\ c$, czyli nie ulega załamaniu; w miarę jednak powiększania kąta padania w wodzie, powiększa się także kąt załamania w powietrzu, lecz daleko szybciej niż pierwszy (jak to widać np. na promieniach $R\ c$ i $I\ c$). Jeżeli kąt padania stanie się równym granicznemu $N'\ c\ R'$, wtedy promień załamany będzie się ślizgał po samej powierzchni $A\ B$. Nareszcie w razie, gdy jakiś promień $c\ M$ pada pod kątem większym od granicznego, wtedy wcale nie wychodzi z wody, lecz odbija się od powierzchni $A\ B$, tworząc z normalną kąt odbicia $M'\ c\ N'$ równy kątowi padania $M\ c\ N'$. Tutaj całkowita ilość światła odbija się i dlatego zjawisko to zowie się *zupełnem wewnętrznem odbiciem*, przy mniejszych bowiem kątach padania na powierzchnię $A\ B$, część tylko światła odbija się i powraca, inna zaś przechodzi do drugiego środka. Następujące proste doświadczenie pokazuje zupełne wewnętrzne odbicie: nalejmy do szklanego naczynia rtęci, a nad nią wody, następnie umieśćmy w a (fig. 292), na jednakowej odległości od poziomów rtęci i wody, jakiś przedmiot. Patrząc nań $z\ o$ przez naczynie, widzimy dwa

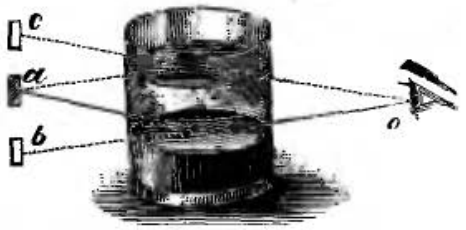
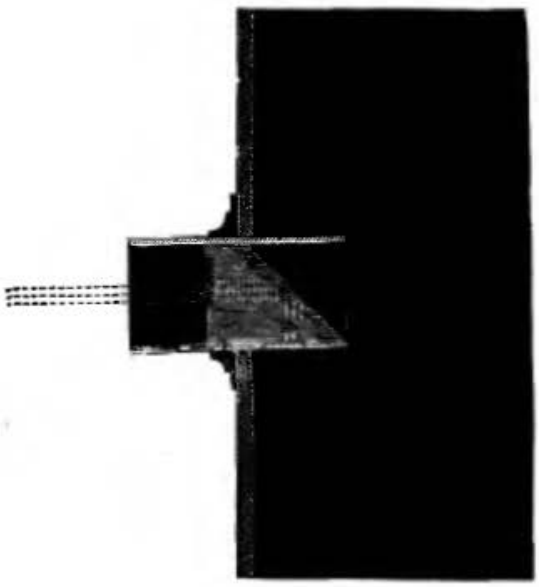


Fig. 292. Obrazy widziane wskutek zwykłego odbicia i zupełnego wewnętrznego odbicia.

jego obrazy: jeden *b* wskutek zwykłego odbicia od powierzchni rtęci, drugi *c* wskutek zupełnego wewnętrznego odbicia od powierzchni wody. Albo napełnijmy szklankę wodą i trzymajmy ją tak, ażeby poziom cieczy znajdował się nieco wyżej, niż oko nasze, a wtedy powierzchnia wody wyda nam się błyszczącą i srebrzysto-białą, jak zwierciadło metalowe i ujrzymy w niej bardzo dokładne obrazy przedmiotów zanurzonych w cieczy, albo też umieszczonych z boku, nieco niżej poziomu. Za pomocą zupełnego wewnętrznego odbicia tłómaczymy również fakt, dlaczego światło nie przenika do ciemnego pokoju, gdy w otworze jego okiennicy znajduje się szklany trójgraniasty pryzmat, którego dwie płaszczyzny są do siebie prostopadłe, trzecia zaś nachylona jest do każdej z nich pod kątem 45° i gdy otwór zamknięty jest przez jednę z płaszczyzn, tworzących z sobą kąt prosty (fig. 293). Promienie padające prostopadle na przednią powierzchnię, przechodzą przez nią niezałamane i padają pod kątem 45° na przeciwległą ukośną powierzchnię. Ponieważ graniczny kąt dla szkła wynosi 41° 48′, to promienie te ulegają zupełnemu wewnętrznemu odbiciu, poczem padają na trzecią płaszczyznę pryzmatu, przez którą wprawdzie przechodzą, lecz tworzą tak wązką smugę światła wzdłuż ściany pokoju, że ten ostatni właściwie nie jest wcale przez nie oświecony; przez załamanie zaś, przy powyżej podanem ustawieniu pryzmatu, ani jeden promień do pokoju nie przenika.



Flg. 293. Zupełne wewnętrzne odbicie światła przy przejściu przez prostokątny trójgraniasty pryzmat.

Ponieważ światło słońca, księżyca i gwiazd, które przybywa do nas, przechodzi z t. zw. przestrzeni próżnej do atmosfery ziemskiej, składającej się z warstw powietrza zmiennej gę-

stości, to ulega ono ciągłemu załamywaniu, dlatego też gwiazd nie widzimy (1) nigdy w kierunku linii prostych, łączących istotne ich miejsce z okiem, znajdującem się np. w *o* (fig. 294), wyjąwszy tylko te, które leżą dla nas w zenicie, promień bowiem padający prostopadle na atmosferę, nie ulega załamaniu, jak to ma miejsce np. dla gwiazdy *a*. Inaczej się dzieje z gwiazdą *b*: światło jej przechodzi ukośnie przez warstwy atmosfery coraz to gęstsze i ulega ciągłemu załamywaniu; kierunki załamanego promienia tworzą razem linię krzywą (2) i obserwatorowi w *o* gwiazda *b* przedstawia się w kierunku ostatniego załamania, zobaczy

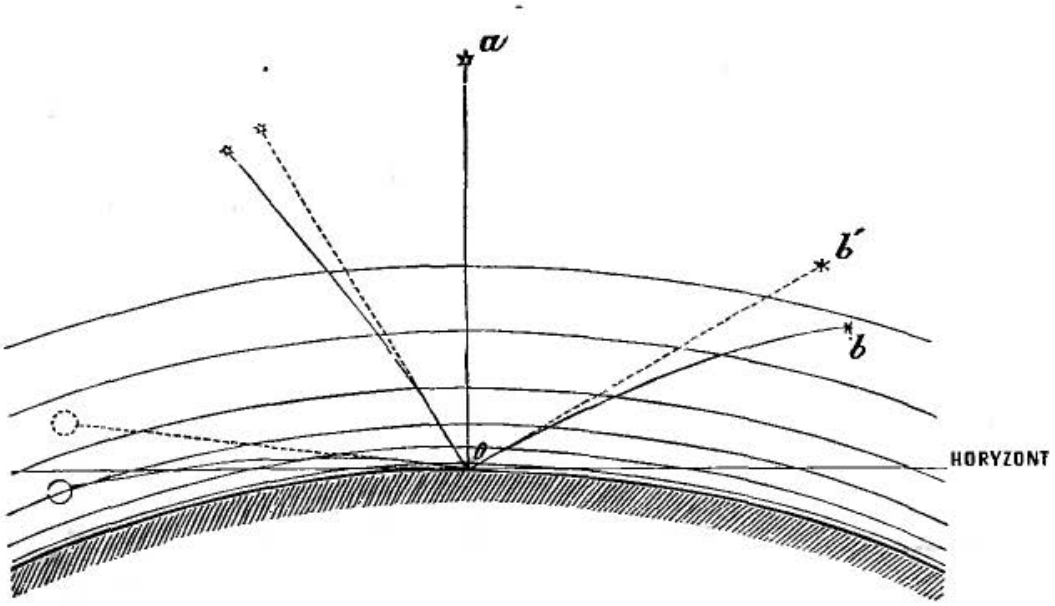


Fig. 294. Załamanie światła przy zjawiskach astronomicznych.

ją tedy w *b'*, a więc bliżej zenitu czyli wyżej nad horyzontem, niż w rzeczywistości. Największego zaś załamania doznają promienie, wychodzące od gwiazd, leżących przy samym horyzoncie, te bowiem muszą przechodzić przez najgrubszą warstwę atmosfery. Wielkość załamania przy zjawiskach astronomicznych zależy nietylko od wysokości gwiazdy nad poziomem, ale także od

(1) Patrz także wpływ aberracyi światła (str. 422).

(2) Linia ta właściwie jest łamana, z powodu jednak nieznacznie wzrastającej gęstości powietrza, możemy ją uważać za krzywą.

gęstości, grubości i rozmieszczenia warstw powietrznych, a ponieważ nie można zbadać dokładnie tych ostatnich warunków, należałoby wyrzec się ścisłego oznaczenia rzeczonego załamania, gdyby nie można go było dokonać za pomocą samych obserwacyj astronomicznych. Te ostatnie pozwalają mianowicie na każdą chwilę obliczyć wysokość nad horyzontem, na jakiej widzielibyśmy gwiazdę, gdyby nie było załamania, a różnica pomiędzy obliczoną wysokością a tą, jaką otrzymujemy patrząc na gwiazdę, daje nam wielkość załamania, jakiemu uległ promień przy przejściu przez atmosferę. Brano także pod uwagę stan barometru i termometru, dopiero też po długich i starannych badaniach udało się ułożyć tablice załamania dla danych wysokości, przy określonem ciśnieniu barometrycznem i temperaturze.

Przy poziomie załamanie dochodzi do 34′, a więc wynosi więcej, niż kąt, jaki tworzą z sobą linie, poprowadzone od dwóch przeciwległych punktów tarczy słonecznej do naszego oka (t. zw. kąt widzenia tarczy sł.). Gdy znajdujemy się np. na morzu, cała tarcza słoneczna przedstawia się nam nad poziomem już wtedy, gdy w istocie górny jej brzeg do właściwego poziomu wcale jeszcze nie doszedł; podobne zjawisko ma także miejsce przy zachodzie słońca tak, że wskutek załamania, niezależnie od zmroku — który powstaje przez odbicie promieni słonecznych, idących z pod poziomu, o górne warstwy powietrza — trwanie dnia przedłuża się, a wielkość tego przedłużenia zależy od danego punktu na ziemi. Tak np. pod naszą szerokością geograficzną (około 52°) dzień jest przedłużony prawie o 8 minut. W czasie całkowitego zaćmienia księżyca, promienie słoneczne tak się w atmosferze ziemskiej załamują, że część ich dosięga księżyca i dlatego też nie znika on wtedy dla nas zupełnie, widzimy go jeszcze w słabem czerwonem świetle. Planeta Wenus, rozpatrywana przez lunetę, przedstawia tarczę w części tylko oświetloną, co zależy od jej położenia względem słońca; w wyjątkowych tylko wypadkach, gdy przechodzi przed tarczą słońca, widać ją na tle tej ostatniej jako czarną kulę. Otóż w r. 1882 podczas przejścia Wenery przed tarczą słońca, spostrzeżono wokoło planety pier-

ścień jasny, który może pochodzić tylko od załamania promieni słonecznych w atmosferze, otaczającej Wenerę (1).

§ 3. Załamanie światła w środkach, ograniczonych płaszczyznami równoległemi i nierównoległemi.

Gdy po przez szklaną płytę o ścianach równoległych będziemy patrzyli *na jaki świecący punkt w kierunku prostopadłym* do tychże ścian, wtedy zobaczymy punkt ów w tem samem miejscu, w jakiem istotnie się znajduje, przeciwnie—przy ukośnem patrzeniu, punkt wyda się przesunięty. Można to łatwo stwierdzić za pomocą następującego prostego doświadczenia: *Nakreślmy na papierze kilka linii i nakryjmy je* w części szklaną płytą (fig. 295); patrząc na papier prostopadle, zobaczymy, że części linii, zakryte przez szkło, stanowią przedłużenie linii, widzianych bezpośrednio (strona lewa), gdy zaś spoglądamy ukośnie, linie wydają się przerwane na granicy szkła; części pod niem leżące (strona prawa) wydają się jakby przesunięte w górę.

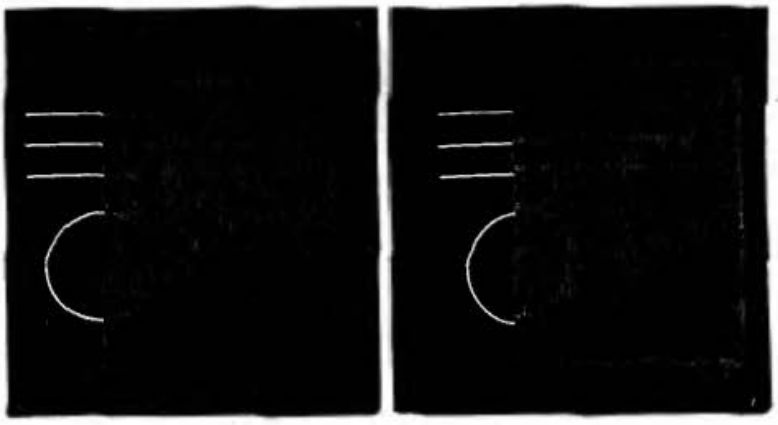


Fig. 295. Przesunięcie promieni przy przejściu ich przez środek ograniczony płaszczyznami równoległemi.

(1) Jędrzejewicz—„Kosmografia".

Przesunięcie to jest tem większe, im ukośniej patrzymy na płytę, im grubsza jest ta ostatnia, oraz im większy jest jej spółczynnik załamania. Płyty cienkie, jak np. nasze szyby okiennic, powodują tylko nader nieznaczne przesunięcie promieni świetlnych tak, że przez nie widzimy przedmioty w ich właściwem miejscu.

Z fig. 296 czytelnik zrozumie wpływ takiego środka (niechaj to będzie jeszcze szkło) o ścianach równoległych na bieg przechodzącego przezeń promienia. Gdy ten ostatni pada w kierunku $S' R$, wtedy po wejściu do szkła ulega załamaniu i zbliża się do normalnej $N' R$; wychodząc ze szkła w punkcie I, załamuje się powtórnie, *oddalając się od normalnej $N I$ o tyleż, o ile poprzednio zbliżył się do $N' R$.* Promień wychodzący $I S$ pozostaje równoległym do promienia wchodzącego $S' R$, nie stanowiąc wszakże jego prostolinijnego przedłużenia. Widzimy tedy, że istotnie promień nie ulega zboczeniu od pierwotnej drogi, lecz tylko bocznemu przesunięciu. To ostatnie nie ma miejsca, gdy promień pada prostopadle na szkło, wtedy bowiem przechodzi przez nie bez załamania. Doświadczenie pokazuje także, że jeżeli promienie przechodzą przez kilka środków, których wszystkie powierzchnie są równoległe do siebie, to z ostatniego wychodzą one równolegle do kierunku, jaki posiadały przed wejściem do środka pierwszego.

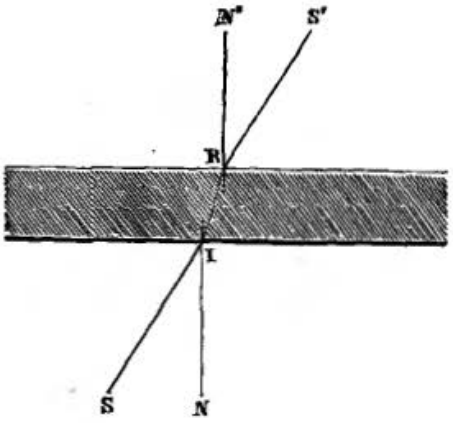


Fig. 296. Droga promienia przebiegającego środek, ograniczony płaszczyznami równoległemi.

Rozważmy teraz wypadek, gdy promień przechodzi przez środek, ograniczony płaszczyznami nierównoległemi. Jeżeli np. promień $S C$ (fig. 297) wchodzi z powietrza do środka bardziej odeń gęstego B, wówczas załamuje się i zbliża do normalnej $m n$ w punkcie padania, poczem biegnie w kierunku $C D$; wycho-

dząc napowrót w powietrze, znów się załamuje i oddala od normalnej $p\ q$ w punkcie wyjścia. Widzimy, że kierunek promienia wychodzącego $D\ E$ nie jest równoległy do pierwotnego—$S\ C$.

W optyce każdy przezroczysty środek ograniczony płaszczyznami nierównoległemi, nazywamy *pryzmatem;* kąt, utworzony przez płaszczyznę pryzmatu, na którą pada promień i tę, z której wychodzi, zowie się *kątem załamującym;* krawędź, gdzie przecinają się dwie te płaszczyzny, jestto *krawędź załamująca* czyli *wierzchołek* pryzmatu; płaszczyzna zaś, przeciwległa wierzchołkowi, nazywa się *podstawą pryzmatu.* Figura 298, str. 464 przedstawia szklany pryzmat, zwykle używany do doświadczeń; z boku oddzielnie przedstawione jest jego t. zw. *przecięcie główne*, otrzymane przez przekrój pryzmatu płaszczyzną, prostopadłą do jednej z trzech jego krawędzi; jak widzimy, przedstawia ono trójkąt, którego każdy kąt może być uważany jako załamujący. Pryzmat umieszcza się zwykle na stosownej podstawce, na której można mu nadawać rozmaite położenie, zależnie od celu doświadczenia.

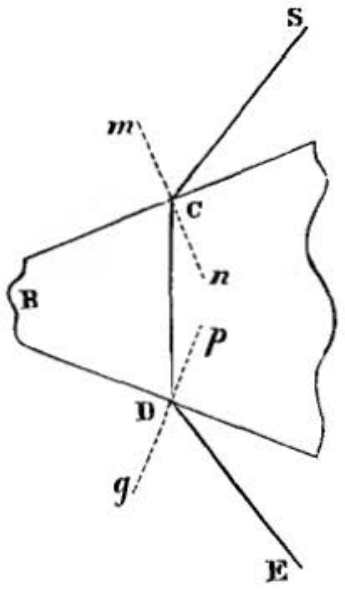


Fig. 297. Droga promienia przez środek ograniczony płaszczyznami nierównoległemi.

Niechaj $B\ A\ C$ (fig. 299, str. 464) przedstawia główne przecięcie szklanego pryzmatu, A—jego wierzchołek, $B\ C$—podstawę. Promień $R\ T$, padający w płaszczyznie głównego przecięcia, po wejściu z powietrza do pryzmatu zbliża się do normalnej $T\ N$ i biegnie w kierunku $T\ T'$; wychodząc z pryzmatu w powietrze, oddala się od normalnej $T'\ N'$ i biegnie w kierunku $T'\ S$. Kąt $S\ D\ E$, na jaki zmienia się kierunek padającego pro-

mienia, zowie się *kątem odchylenia pryzmatu.* Promień tedy, przechodząc przez pryzmat, bardziej gęsty, niż środek otaczający, *zostaje odchylony ku podstawie.* Oko, umieszczone na drodze wychodzącego promienia, zobaczy przedmiot, z którego promień pierwotnie wyszedł, w kierunku $S\,T'$, a więc bliżej wierzchołka pryzmatu. Można się o tem przekonać, umieszczając pomiędzy okiem a zapaloną świecą, szklany pryzmat tak, ażeby jego krawędź załamująca była pozioma i zwrócona do góry; płomień świecy wyda się wtedy wzniesiony (fig. 300, str. 465); gdy zaś krawędź załamująca zwrócona jest ku dołowi, płomień wydaje się obniżony.

Fig. 298. Pryzmat i jego przecięcie główne.

Przeciwnie, jeżeliby pryzmat był zrobiony z substancyi, słabiej załamującej, niż środek otaczający, natenczas *odchylałby on promienie ku wierzchołkowi* i widziane przezeń przedmioty wydawałyby się obniżone ku podstawie. Im większy jest kąt załamujący pryzmatu, tem większe jest, przy tym samym kącie padania, odchylenie promieni. Jeżeli zaś dla jednego i tego samego pryzmatu zmienia się kąt padania, wtedy zmienia się także kąt, pod jakim promień ten opuszcza drugą płaszczyznę, a więc także—kąt odchylenia; wreszcie możemy dojść do kąta granicznego, przy którym, jak już wiemy, następuje zupełne wewnętrzne odbicie; w tym wypadku promień

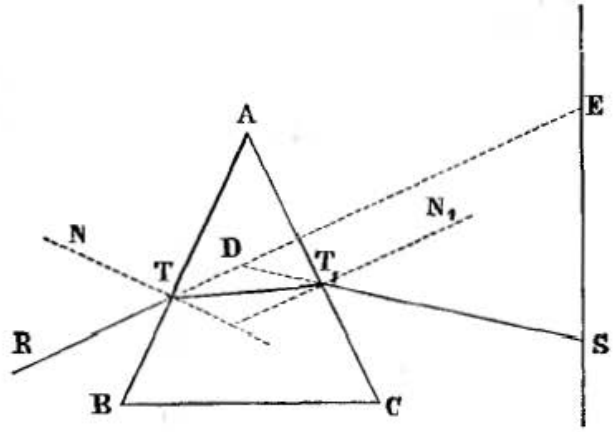


Fig. 299. Droga promienia, przechodzącego przez pryzmat gęstszy, niż środek otaczający.

z pryzmatu wcale nie wyjdzie (patrz str. 458). Przy jakim zaś kącie padania podobne zjawisko ma miejsce, zależy to od spółczynnika załamania tej substancyi, z której zrobiony jest pryzmat oraz od jego kąta załamującego.

Umieśćmy teraz na drodze wiązki S promieni słonecznych szklany pryzmat BAC tak, ażeby część ich przeszła mimo krawę-

Fig. 300. Obrazy przedmiotów, widzianych przez szklany pryzmat.

dzi A i zachowała pierwotny swój kierunek AD (fig. 301), inna zaś ażeby została załamaną i odchyloną w kierunku AE. Jak powiedzieliśmy wyżej, kąt odchylenia DAE zmienia się wraz z kątem, pod jakim padają promienie na pryzmat. Otóż obracając ten ostatni w jednę lub drugą stronę, można znaleść takie jego położenie, przy którem odchylenie, to jest kąt DAE jest *mniejsze*, aniżeli przy każdem innem. Gdy wyprowadzamy pryzmat z tego swoistego położenia, odchylenie zawsze się powiększa, zupełnie niezależnie od tego, w jaką stronę go obracamy, a więc także bez względu na to, czy pro-

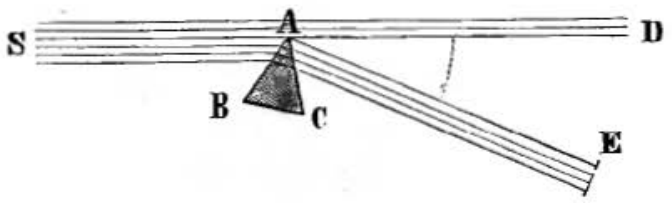


Fig. 301. Najmniejsze odchylenie pryzmatu.

mienie padają nań ukośniej lub mniej ukośnie, niż w położeniu *najmniejszego odchylenia*. Otóż za pomocą mierzenia można się przekonać, że najmniejsze odchylenie ma miejsce wtedy, gdy *kąt wejścia do pryzmatu jest równy kątowi wyjścia*. Najmniejsze odchylenie pryzmatu jest bardzo ważne dla praktycznej optyki; znając takowe oraz kąt załamujący, można z wielką dokładnością oznaczyć spółczynnik załamania substancyi, z której zrobiony jest pryzmat. Chcąc znaleść ten spółczynnik dla danego ciała, należy przygotować zeń pryzmat, zmierzyć za pomocą kątomiaru jego kąt załamujący, a następnie określić przez doświadczenie kąt najmniejszego odchylenia; po dokonaniu tego, mamy już dane, potrzebne do obliczenia żądanego spółczynnika. Zauważymy jeszcze, że gdy w zadaniu takiem chodzi o ciało płynne, wtedy napełnia się niem naczynie, którego dwie przeciwległe ściany, nachylone do siebie pod pewnym kątem, utworzone są przez płaskie, starannie wyszlifowane tafelki szklane, ograniczone płaszczyznami równoległemi. Oto spółczynniki załamania dla niektórych środków: *dyament*—2,47 do 2,75; *krownglas*—1,5; *flintglas* (szkło, zawierające tlenek ołowiu)—1,6; *alkohol*—1,37; *woda*—1,33; *cukier lodowaty*—1,53; *lód*—1,31.

§ 4. Załamanie światła w soczewkach.

Kawałek szkła lub innego jakiego przezroczystego ciała, ograniczony dwiema krzywemi powierzchniami, stanowi instrument optyczny, zwany *soczewką*. Jako przykład może służyć przyrząd, otrzymany z dwóch szkiełek zegarkowych, złożonych w ten sposób, że wypukłe ich powierzchnie są zwrócone na zewnątrz; tworzą one wtedy soczewkę dwuwypukłą. Zobaczymy wkrótce, że istnieją rozmaite rodzaje soczewek, lecz dwuwypukła czyli t. zw. *lupa*, jest najbardziej rozpowszechniona i oddaje nieocenione usługi badaczom przyrody oraz pracownikom na polu przemysłu i sztuki. Można przyjąć z dostateczną pewnością, że soczewki i ich własność powiększania obrazów przedmiotów są znane od bardzo dawna: w gruzach Herkulanum i Pompei znaleziono ciała, które zaledwie można uważać za co innego, jak za

lupy. Okulary, również nie będące niczem innem, jak soczewkami, są używane w Europie już od początku IV stulecia. Lecz zaledwie trzy wieki upłynęły od czasu, jak prawa załamania światła zostały poznane o tyle dokładnie, że pozwoliły odpowiednio kombinować różne szlifowane szkła, przez co dopiero można było otrzymać bardzo ważne, nieznane do owej chwili, rezultaty. Nazwa soczewki została przez fizyków uogólnioną do wszystkich przezroczystych ciał, ograniczonych z jednej przynajmniej strony przez krzywą powierzchnię, niezależnie od tego, czy jest ona wypukła, czy też wklęsła. W większości wypadków obydwie powierzchnie są kuliste, albo też jedna jest kulista, druga zaś płaska; takie soczewki nazywamy kulistemi. Pod względem kierunku, jaki soczewki nadają promieniom, przez nie przechodzącym, można je podzielić na dwie główne grupy: na *zbierające*, które skupiają promienie oraz *rozpraszające*, czyniące te ostatnie bardziej rozbieżnemi. Z pierwszych najważniejszą jest lupa, ograniczona, jak już powiedzieliśmy, dwiema powierzchniami wypukłemi, mającemi zwykle jednakową krzywiznę; następnie idzie soczewka *płasko-wypukła*, której jedna strona jest krzywa, druga płaska; wreszcie używa się jeszcze soczewka *wklęsło-wypukła*, o jednej powierzchni wypukłej, drugiej wgłębionej, tak jednak, że krzywizna pierwszej jest większa, niż drugiej

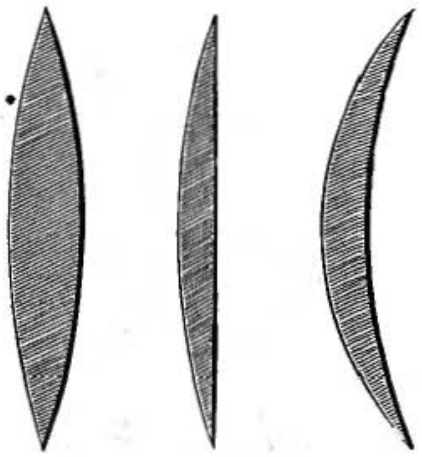


Fig. 302. Soczewki zbierające: dwuwypukła, płaskowypukła i wklęsłowypukła.

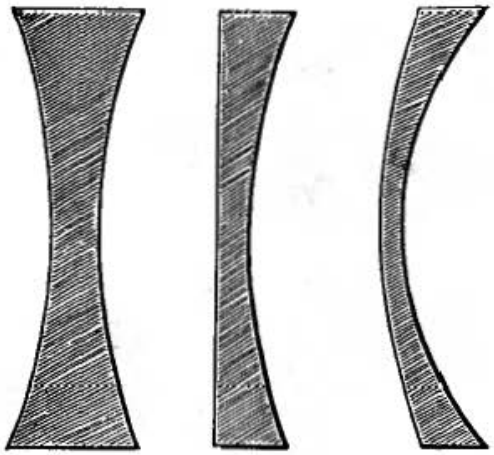


Fig. 303. Soczewki rozpraszające: dwuwklęsła, płasko-wklęsła i wypukło-wklęsła.

Fig. 302 (str. 467) przedstawia w przecięciu trzy wymienione rodzaje soczewek. Na fig. 303 widzimy w przecięciu soczewki rozpraszające, mianowicie *dwuwklęsłą* o obu powierzchniach wgłębionych, *płasko-wklęsłą* o jednej powierzchni wgłębionej, drugiej zaś płaskiej i *wypukło-wklęsłą*, której jedna powierzchnia jest wgłębiona, druga zaś wypuklona, przyczem jednak krzywizna wgłębionej jest większa. Linia prosta, łącząca środki kul, których powierzchnie te stanowią odcinki, czyli t. zw. środki krzywizny, zowie się *główną osią* soczewki; jeżeli jedna z powierzchni jest płaska, wtedy główną oś otrzymuje się, gdy ze środka krzywizny drugiej powierzchni prowadzi się linię prostopadłą do owej płaskiej. W soczewkach zbierających główna oś przechodzi przez najgrubszą część, w rozpraszających zaś przez najcieńszą część soczewki (fig. 304).

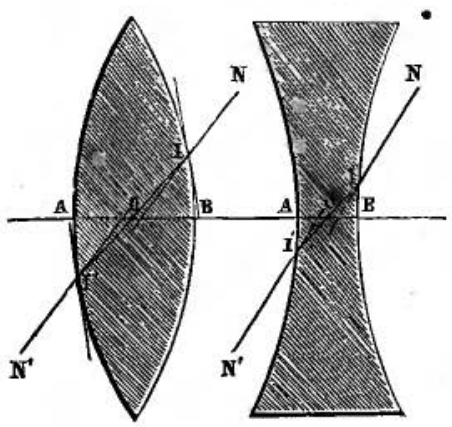


Fig. 304. Optyczny środek soczewki.

Linia prosta, przechodząca przez punkt O, lecz nachylona do osi głównej, łączy takie dwa elementy powierzchni soczewki (np. I i I'), które, jak łatwo można dowieść, są równoległe do siebie. Jeżeli tedy promień padający NI biegnie po załamaniu w kierunku II', to promień wychodzący $I'N'$ jest równoległy do NI. Gdy grubość soczewki jest nieznaczna i gdy promień padający tworzy niewielki kąt z osią główną, wówczas możemy przyjąć, że promień wychodzący $I'N'$ jest przedłużeniem padającego NI. Żaden więc promień, przechodzący przez punkt O soczewki, nie ulega załamaniu. Punkt ten zowie się *środkiem dotycznym* so-

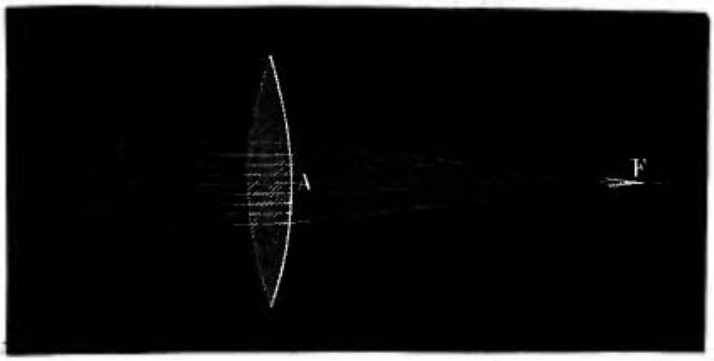


Fig. 305. Ognisko główne soczewki dwuwypukłej.

czewki, linia prosta, przechodząca przez ten punkt i pochyła do osi głównej, stanowi *boczną oś*. Ustawmy soczewkę dwuwypukłą *A* na drodze promieni słonecznych w taki sposób, ażeby biegły one równolegle do jej osi głównej, a zobaczymy na ekranie, umieszczonym po za soczewką, jasną okrągłą plamę, której wielkość i wyrazistość będą zależały od odległości ekranu od soczewki. Odsuwając lub przysuwając ten ostatni do soczewki, znajdziemy wreszcie takie jego położenie, w którem rysująca się na nim świetlna plama będzie posiadała najmniejsze wymiary, prawie zredukowane do punktu i najsilniejszy blask. Świetlny ten punkt powstaje przez to, że padające na soczewkę promienie, równoległe do osi głównej, tak zostają przez nią załamane, że zbierają się wszystkie w jednym punkcie *F* (fig. 305), leżącym na tejże osi, lecz po stronie przeciwnej, niż ciało wysyłające promienie. Punkt *F* zowie się *głównem ogniskiem*, a odległość jego od soczewki (odległość ogniskowa) zależy od substancyi, z której ta jest zrobiona oraz od krzywizny jej powierzchni.

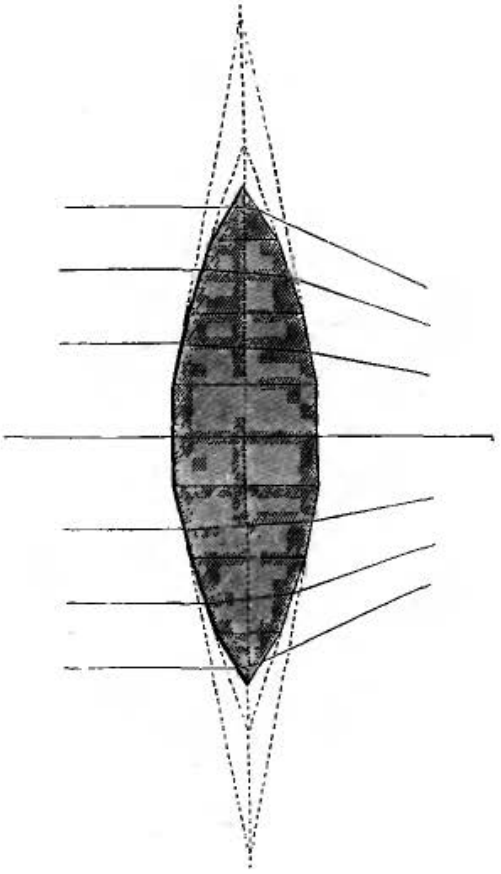


Fig. 306. Soczewka jako system pryzmatów.

Śledząc bieg pojedyńczych promieni, przy przejściu ich przez soczewkę, widzimy, że każdy z nich załamuje się tak, jak w pryzmacie, którego krawędź załamująca czyli wierzchołek jest odwrócony od osi głównej, z tą wszakże różnicą, że każdemu oddzielnemu promieniowi odpowiada inny kąt załamujący. Jako taki należy uważać mały kąt, utworzony przez kierunki dwóch elementów soczewki: jeden, przez który dany promień wchodzi do tej ostatniej, drugi zaś, przez który z niej wychodzi. Kąt po-

między dwoma takiemi elementami jest tem większy, im bardziej oddalamy się od głównej osi, jak to wyraźnie widać na fig. 306 (str. 469). Soczewka działa więc zupełnie tak samo, jak gdyby każdy promień padał na pryzmat o ostrej krawędzi i kącie załamującym tym większym, im dalej od osi głównej leży punkt padania. Rozumiemy tedy, dlaczego z wiązki promieni równoległych do osi głównej, ten który biegnie dalej od niej, zostaje silniej załamany w kierunku podstawy pryzmatu, czyli bardziej zbliżony do tejże osi, wskutek czego wszystkie te promienie zbiegają się w jednym jej punkcie. Promień biegnący wzdłuż samej osi głównej, jest prostopadły w punktach padania i wyjścia, dlatego też przechodzi niezałamany. Gdyby wiązka promieni równoległych padała na soczewkę od strony F, zebrałyby

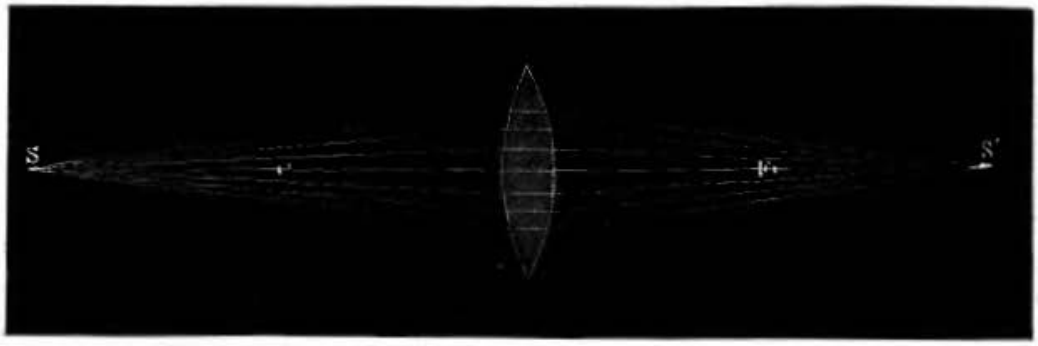


Fig. 307. Punkty sprzężone.

się one po stronie przeciwnej w jednym punkcie osi, tak samo odległym od soczewki, jak punkt F, albowiem promienie napotykałyby ten sam kąt załamujący i uległyby wskutek tego temu samemu odchyleniu. Każda soczewka posiada tedy dwa główne ogniska, leżące z jednej i z drugiej strony.

Jeżeli punkt świetlny znajduje się w głównem ognisku soczewki, wtedy z drugiej jej strony wychodzi wiązka promieni równoległych do osi głównej, które możemy tedy uważać jako zbierające się w nieskończenie oddalonym jej punkcie. Odsuńmy źródło światła od soczewki np. do punktu S (fig. 307), a zobaczymy po drugiej jej stronie wychodzącą wiązkę promieni, które zbierają się na osi w punkcie S', przedstawiającym *rzeczywisty* obraz punktu S. Jeżeli ten ostatni znajduje się od soczewki na

podwójnej odległości ogniskowej, to i obraz *S* tworzy się po drugiej stronie soczewki na takiejże odległości; naodwrót, gdy źródło światła jest w *S'*, obraz jego powstaje w *S*. Punkty np. *S* i *S'* będące w takim z sobą związku, że w jednym z nich powstaje obraz źródła światła, umieszczonego w drugim, zowią się *sprzężonemi*. Gdy punkt świecący leży dalej, niż podwójna odległość *ogniskowa, obraz jego tworzy się po przeciwnej stronie* na odległości, mniejszej niż podwójna, lecz większej niż pojedyńcza odległość ogniskowa. Wreszcie gdy punkt świetlny *S* leży pomiędzy ogniskiem głównem *F* a soczewką (fig. 308), wtedy nie może już ona mocno rozbieżnych promieni zebrać, ani nawet uczynić równoległemi, lecz zmniejsza tylko ich rozbieżność; w tym wypadku tylko przedłużenia załamanych promieni, nie zaś one same, przecinają się na osi głównej przed soczewką w punkcie *S'*, bardziej odległym od tej ostatniej, niż punkt *S*. Promienie więc, wysyłane przez *S*, po wyjściu z soczewki rozbiegają się tak, jak gdyby pochodziły z *S'*; w tym ostatnim powstaje przeto *urojony* obraz punktu *S*.

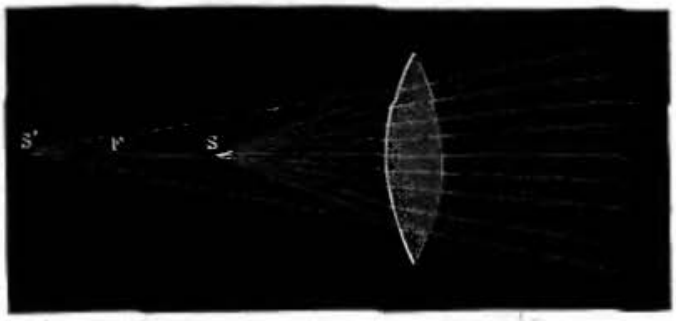


Fig. 308. Obraz urojony punktu świecącego.

Czytelnik zauważył już zapewne analogię między działaniem soczewki wypukłej i zwierciadła wklęsłego; otóż dalsze szczegóły, jak zobaczymy, jeszcze bardziej potwierdzą tę analogię. Rozważmy tworzenie się obrazów w wypadku, gdy, zamiast punktu świecącego, przed soczewką wypukłą stoi jakiś *przedmiot większych rozmiarów A B (fig. 309, str. 472)*, którego odległość od soczewki niechaj będzie większa, niż podwójna odległość ogniskowa. Promień, przechodzący przez środek optyczny *O* soczewki, nie ulega załamaniu; promień zaś równoległy do osi głównej, jak już wiemy, po załamaniu przechodzi przez ognisko główne *F;* dwa te promienie przecinają się w punk-

cie a, który jest rzeczywistym obrazem A. To samo stosuje się do promieni wychodzących z punktu B tak, że $a\ b$ przedstawia rzeczywisty, odwrócony i zmniejszony obraz przedmiotu $A\ B$. Przy zbliżaniu tego ostatniego do soczewki, promienie równoległe do osi głównej zachowują swój kierunek, te zaś, które przechodzą przez środek optyczny, padają bardziej ukośnie i przeci-

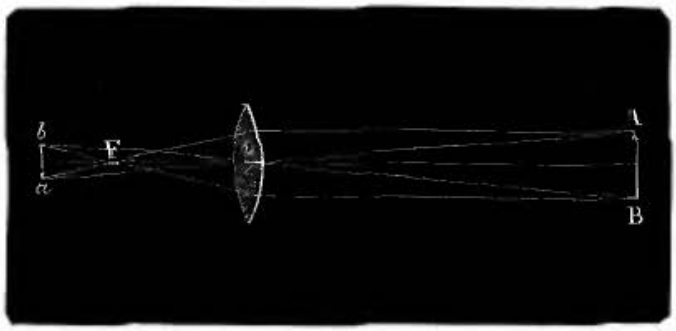


Fig. 309. Szematyczne przedstawienie sposobu tworzenia się obrazu rzeczywistego, odwróconego i zmniejszonego.

nają tamte na większej odległości od soczewki, niż w poprzednim wypadku tak, że obraz oddala się od niej i rozmiary jego się zwiększają. Gdy w pewnem położeniu obraz posiada wielkość

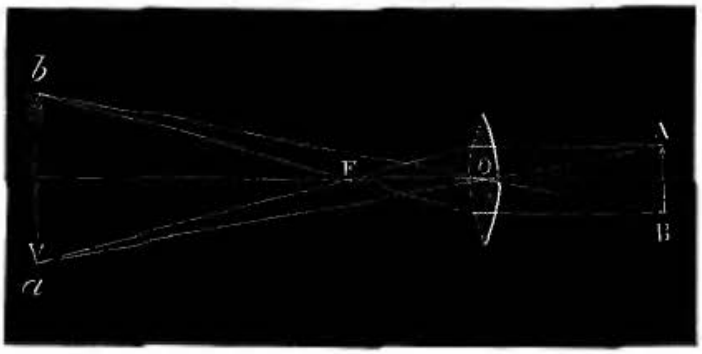


Fig. 310. Szematyczne przedstawienie sposobu tworzenia się obrazu rzeczywistego, odwróconego i powiększonego.

przedmiotu, wtedy mierząc odległości obydwóch od soczewki, przekonywamy się, iż są one równe. Przedmiotowi, umieszczonemu na odległości, nieco tylko większej, niż ogniskowa, odpowiada obraz rzeczywisty i odwrócony, lecz powiększony (fig.310), gdy zaś przedmiot znajduje się w samem ognisku głównem, promienie po wyjściu z soczewki biegną równolegle do osi głównej

i obraz wcale się nie tworzy. Wreszcie jeżeli przedmiot *A B* stoi pomiędzy ogniskiem głównem a soczewką (figura 311), wtedy promienie wychodzące z *A* i *B*, po przejściu przez soczewkę nie przecinają się wcale, są bowiem rozbieżne, przedłużenia ich tylko w tę samą stronę, po której znajduje się przedmiot, spotykają się w odpowiednich punktach *a* i *b*, wskutek czego oko, umieszczone przed soczewką, zobaczy po za nią, w *a b* urojony, prosty i powiększony obraz przedmiotu *A B*. Soczewka, używana w sposób ostatnio opisany, stanowi *lupę* czyli *szkło powiększające*. Przy jeszcze większem zbliżeniu przedmiotu do soczewki, promienie, przechodzące przez środek tej ostatniej, padają bardziej ukośnie, wskutek czego urojony obraz jest bliższym so-

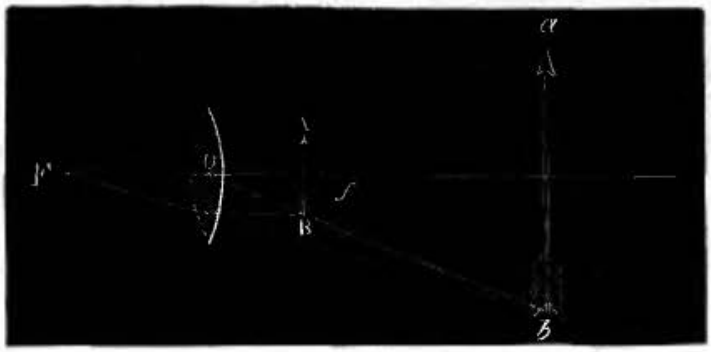


Fig. 311. Szematycznie przedstawiony obraz urojony, prosty i powiększony.

czewki, rozmiary zaś jego są mniejsze, niż w poprzednim wypadku. Rezultaty, które przedstawiliśmy tutaj graficznie, można stwierdzić za pomocą doświadczenia, jeżeli zapaloną świecę będziemy kolejno umieszczali w rozmaitem położeniu względem soczewki dwuwypukłej, przyczem odnośny obraz (naturalnie w wypadku, gdy jest rzeczywisty) może być otrzymywany na ekranie. Np. fig. 312 (str. 474) przedstawia świecę, ustawioną przed soczewką dwuwypukłą na odległości nieco większej, niż ogniskowa; tworzący się po drugiej stronie obraz jest rzeczywisty, odwrócony i powiększony.

Soczewki rozpraszające nie posiadają wcale rzeczywistych ognisk i dlatego też nie dają nigdy rzeczywistych obrazów, lecz tylko urojone. Jeżeli na soczewkę taką pada wiązka promieni równoległych (fig. 313, str. 474), wtedy wychodzą one z niej rozbieżnie, albowiem każdy z nich, po załamaniu, zbliża się do najgrub-

szej części soczewki (czyli do podstawy odpowiadającego tej części pryzmatu), a więc oddala się od osi głównej. Przedłużenia tych załamanych promieni w tę samą stronę, po której znajduje się ciało świecące, przecinają się na osi głównej w punkcie F (na fig. 313), który zowie się *urojonem ogniskiem głównem* dwu-

312. Rzeczywisty obraz świecy, otrzymany za pomocą dwuwypukłej soczewki.

wklęsłej soczewki. Każda taka soczewka posiada dwa urojone ogniska główne, leżące po obu jej stronach i jednakowo od niej oddalone; mają one dla niej takie samo znaczenie, jak rzeczywiste

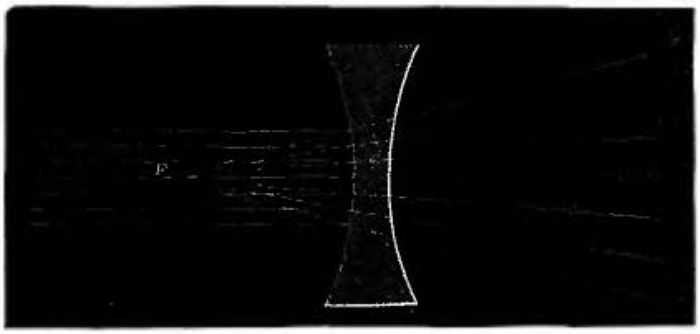


Fig. 313. Ognisko urojone dwuwklęsłej soczewki.

ogniska główne dla soczewki wypukłej. Z fig. 314 (str. 475) można powziąć wyobrażenie o położeniu i kształcie obrazu przedmiotów, umieszczonych przed soczewką dwuwklęsłą. Promień $A\ O$, jako przechodzący przez środek soczewki, nie zostaje załamany, promień zaś z tegoż punktu A, równoległy do osi głównej, ma po za-

łamaniu taki kierunek, że przedłużenie jego przechodzi przez ognisko urojone *F*. Dwa te promienie po wyjściu z soczewki rozbiegają się tak, jak gdyby wychodziły z punktu *a*, który też jest urojonym obrazem *A*. To samo stosuje się do promieni, wychodzących z *B*, którego obraz tworzy się w *b*. W ten sposób tłómaczy się powstanie obrazu *a b*, który jest urojony, prosty *i zmniejszony, leży po tej samej stronie co* i przedmiot, przytem bliżej soczewki, niż ten ostatni.

Z wielu form soczewek rozpatrzyliśmy bliżej tylko dwuwypukłą i dwuwklęsłą, gdyż pozostałe, co do swego działania, są zupełnie podobne do tych dwóch głównych przedstawicielek odpowiednich grup.

Obecnie po zbadaniu zasadniczych własności soczewek kulistych, musimy jeszcze zauważyć, że tylko działania soczewek

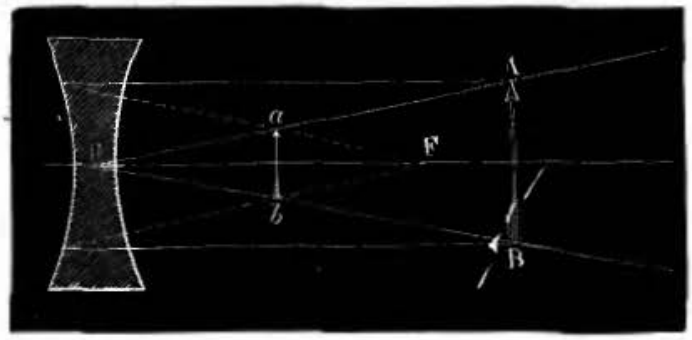


Fig. 314. Szematycznie przedstawiony sposób tworzenia się obrazu urojonego, prostego i zmniejszonego.

nieznacznych rozmiarów ściśle odpowiadają wyżej wyłuszczonym prawom. W razie bowiem gdy rozmiary soczewki są dość znaczne, w stosunku do promienia krzywizny jej powierzchni, t. j. do promienia kuli, której powierzchnia ta stanowi odcinek, wtedy nie wszystkie promienie świetlne, równoległe do osi głównej, przecinają się po załamaniu w jednym i tym samym punkcie, t. j. *w ognisku głównem. Czynią to tylko te, które* biegną nader blizko osi głównej, przecinając ją w rzeczonym punkcie; promienie zaś biegnące od niej dalej, dla których kąt padania jest większy, spotykają oś po załamaniu bliżej soczewki i to tem bliżej, im bardziej są oddalone od osi. Same także promienie wychodzące przecinają się wzajemnie, wskutek czego w każdej

płaszczyznie, przechodzącej przez oś soczewki, otrzymujemy jasną linię krzywą (fig. 315), składającą się z dwóch ramion, symetrycznych względem osi. W przestrzeni te punkty przecięcia załamanych promieni tworzą powierzchnię krzywą, zwaną *kaustyką przez załamanie*. Podobne zjawisko ma także miejsce i wtedy, gdy promienie, padające na soczewkę, są rozbieżne; jest ono znane pod nazwą *aberracyi kulistej (sferycznej)*. Wskutek aberracyi, obrazy otrzymane za pomocą soczewki, nie są zupełnie wyraźne, albowiem obrazem punktu nie jest punkt, lecz mały krążek, zachodzący brzegami na obrazy punktów sąsiednich. Wpływ aberracyi sferycznej maleje wraz ze zmniejszeniem rozmiarów soczewki i dlatego brzeg jej zasłania się zwykle, szczególniej w przyrządach optycznych, nieprzezroczystą zasłoną, zwaną *diafragmą*, która nie przepuszcza wcale promieni, zbyt daleko biegnących od głównej osi. Nadmienimy także, że można zupełnie usunąć aberracyę przez stosowną kombinacyę dwóch szkieł, które razem tworzą złożoną soczewkę, zwaną *aplanatyczną*.

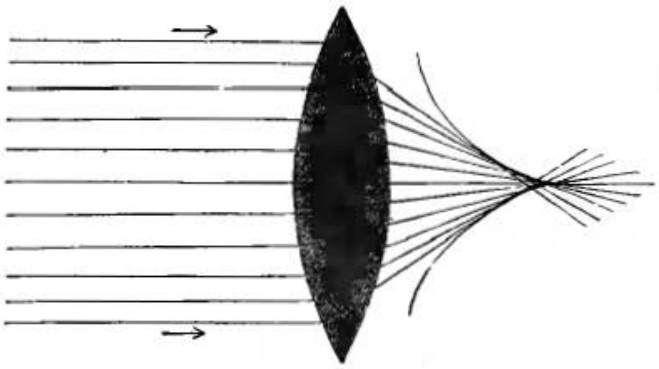


Fig. 315. Aberracya kulista. Kaustyka przez załamanie.

Soczewki dwuwypukłe, podobnie jak zwierciadła wklęsłe, mogą być użyte do spotęgowania w żądanym kierunku oświetlenia, wytwarzanego przez daną lampę, gdyż tak pierwsze, jak i drugie zbierają promienie i nie pozwalają im rozbiegać się na coraz szerszej przestrzeni. Ponieważ zaś zwierciadła wklęsłe, zastosowane do pewnych celów, jak np. do latarni morskiej, przedstawiają wiele niewygód (patrz str. 449), zastąpiono je więc przez soczewki dwuwypukłe, szczególniej w latarniach morskich pierwszorzędnych. Urządzenie takich latarni dioptrycznych datuje właściwie dopiero od czasu, gdy znakomity fizyk

Fresnel wynalazł w roku 1822 soczewkę tak zbudowaną, że pochłania tylko nieznaczną ilość światła, przez nią przechodzącego, podczas gdy w innych zbierających soczewkach większych rozmiarów, pochłanianie to, szczególniej przez środkową, a więc najgrubszą ich część, jest bardzo wielkie. Oprócz tego, soczewka Fresnel'a pozwala usunąć drugi jeszcze błąd zwyczajnych soczewek, a mianowicie kulistą aberracyę. Dzięki innym jeszcze ulepszeniom, zastosowanym przez Fresnel'a wspólnie z Arago, do samych lamp latarni morskich, światło ich otrzymało ten stopień intensywności i równomierności, który jest tak pożądany przy podobnem urządzeniu. Wreszcie w nowszych czasach zaczęto używać, zamiast lamp, światła elektrycznego, przez co blask latarni, nawet na znaczną odległość, został jeszcze bardziej spotęgowany, przyczem sam aparat soczewkowaty nie uległ zmianie. Cały aparat świecący umieszcza się na wysokiej wieży; niektóre z takich wież, jak np. na wyspie Cordouan, leżącej przy *ujściu Żyrondy, zbudowane są całe z kamienia i mają* prawdziwie pomnikowy wygląd.

ROZDZIAŁ V.

Przyrządy optyczne.

§ 1. Ciemnia optyczna. Mikroskop słoneczny.

Soczewki znalazły bardzo szerokie zastosowanie przy budowie najrozmaitszych przyrządów optycznych. Obecnie zajmiemy się opisem tych ostatnich, przyczem będziemy zwracali uwagę na ważniejsze z nich, pomijając mniej ważne.

Wspomnieliśmy już wyżej, że można otrzymać na ekranie odwrócony obraz krajobrazu, oświeconego przez słońce, jeżeli ekran ten umieszczony jest w ciemnym pokoju, naprzeciwko otworu jego okiennicy. Obraz ten wszakże, jak wiemy, posiada przy małym otworze nader słabe świetlne natężenie, przy dużym zaś jest niewyraźny. W celu usunięcia tej niedogodności, pe-

wien fizyk imieniem Porta, żyjący w XVII stuleciu, pierwszy spróbował rzucić najprzód promienie świetlne, wpadające przez otwór, na kuliste zwierciadło wklęsłe, a następnie dopiero odbite promienie zebrać na ekranie; wkrótce potem zastąpił on zwierciadło przez soczewkę zbierającą, którą umieszczał w samym otworze okiennicy i w ten sposób doszedł do zadziwiających rezultatów. Od owego czasu datuje odkrycie tak zwanej *ciemni optycznej* (camera obscura), której obecnie nadaje się rozmaite kształty i nazwy, zależnie od celu, do jakiego ma służyć. Zawsze jednak przyrząd taki polega na własności soczewek wypukłych dawania rzeczywistego powiększonego obrazu przedmiotu, umieszczonego

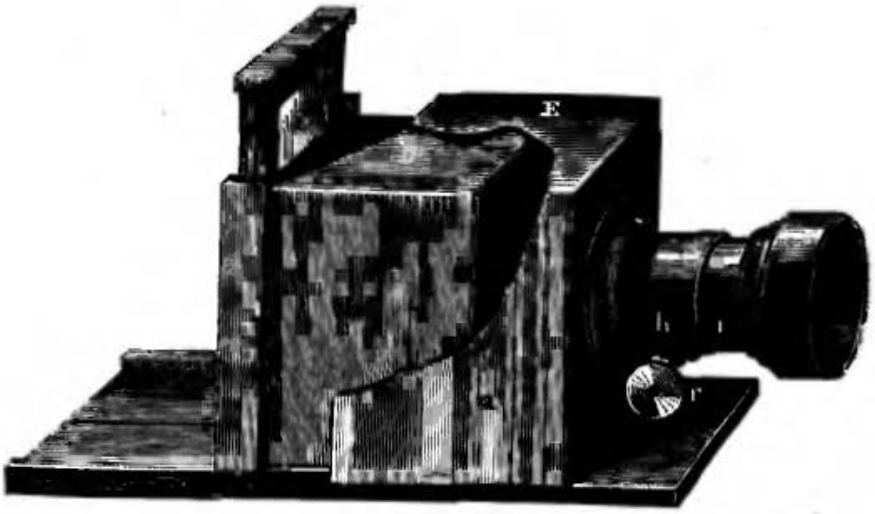


Fig. 316. Ciemnia optyczna.

przed nią na odległości większej, niż pojedyńcza i mniejszej, niż podwójna odległość ogniskowa. Gdy np. chodzi o otrzymanie powiększonej podobizny danego krajobrazu, wtedy naprzeciw tego ostatniego, w otworze, wiodącym do ciemnego pokoju, umieszcza się soczewkę zbierającą, przyczem na odpowiednio ustawionym ekranie tworzy się żądany obraz. Ponieważ części krajobrazu znajdują się na bardzo rozmaitej odległości od soczewki, przeto nie wszystkie rysują się na ekranie z jednakową wyrazistością. Brak ten wszakże nie jest zbyt wielki, wiemy bowiem, że gdy przedmiot odsuwa się od soczewki, począwszy od podwójnej odległości ogniskowej do nieskończoności, obraz jego

przesuwa się tylko od podwójnej do pojedyńczej odległości ogniskowej, czyli że wielkiej różnicy w oddaleniu przedmiotu odpowiada tylko nieznaczna różnica w położeniu obrazu. Przyciemnienie pokoju, mające na celu usunięcie wpływu bocznego światła, zacierającego kontury obrazu, może być zastąpione przez użycie pewnego rodzaju skrzynki, wewnątrz poczernionej, składającej się z dwóch części (fig. 316); soczewka wstawiona jest w metalową rurkę *i*, przesuwającą się przy obracaniu guzika *r* wzdłuż obejmującego ją rękawa *h*. W części *E a*, otwartej od tyłu, przesuwa się inna *D b*, z przodu otwarta; w tę ostatnią wstawia się matową tafelkę szklaną *g*, służącą jako ekran do przyjmowania obrazów. Im bliżej znajduje się przedmiot, któ-

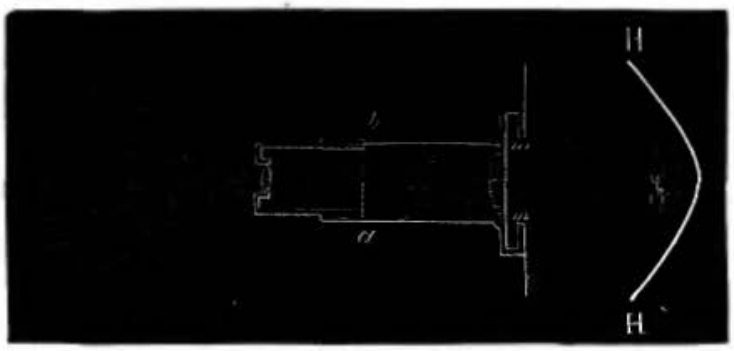


Fig. 317. Szemat latarni czarnokslęzkiej.

rego obraz ma być rzucony na tafelkę, tembardziej należy wysuwać część *D b* z *E a;* nieznaczne zaś zmiany w położeniu przedmiotu względem soczewki osiąga się za pomocą obracania guzika *r*. Przyrząd ten—jedyny, który z pomiędzy wszystkich instrumentów, opartych na tej samej zasadzie, zachował nazwę ciemni optycznej—stanowił przez długi czas tylko zabawkę, lecz gdy udało się utrwalić obrazy, powstające na tylnej jego ścianie, t. j. gdy pojawiła się sztuka fotograficzna, zajął on bardzo ważne miejsce w rzędzie instrumentów optycznych. O tem jego znaczeniu pomówimy obszernie w rozdziale o fotografii.

Podobne do powyższego urządzenie przedstawia *latarnia czarnoksięzka*, szematycznie przedstawiona na fig. 317. Jako przedmioty służą tutaj fotografie lub malowidła na szkle, umieszczone w *a b* i silnie oświecone przez promienie świecy lub lam-

py, ustawionej wewnątrz latarni pomiędzy zwierciadłem wklęsłem $H\,H$ i soczewką zbierającą $m\,m$. Na przodzie, w części wysuwalnej, znajduje się soczewka wypukła, która rzuca powiększony obraz przedmiotu na ekran. Latarnia czarnoksięzka może niekiedy służyć nietylko do ulubionych przedstawień z fantasmagoryami, obrazami niknącemi i t. p., lecz także podczas odczytów naukowych, do ukazywania, w znacznem powiększeniu, pouczających rysunków, które w ten sposób stają się widocznemi dla wszystkich uczestników. Na tej samej także zasadzie polega *mikroskop słoneczny* (fig. 318), służący wyłącznie do celów naukowych. W rurce L znajduje się soczewka wypukła o krótkiej odległości ogniskowej; w m, nieco przed ogniskiem głównem tej-

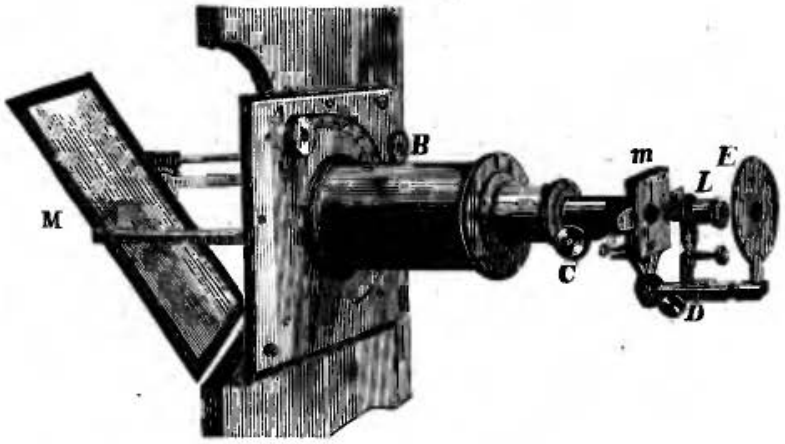


Fig. 318. Mikroskop słoneczny.

że soczewki, umieszcza się pomiędzy dwiema szklanemi tafelkami dany mały przedmiot, którego olbrzymi obraz odtwarza się na ekranie. Ponieważ światło, wysyłane przez ten przedmiot, rozchodzi się na względnie bardzo wielką płaszczyznę, zajętą przez obraz, to ażeby ten ostatni był dosyć jasny, należy nader silnie oświecić przedmiot. Do tego celu służy inna wielka soczewka, umieszczona na końcu szerszej rurki przyrządu i zbierająca w swem ognisku głównem promienie, które mają oświecić przedmiot. Za pomocą guzika C można ten ostatni sprowadzić do wspomnianego ogniska, guzik zaś D służy do przesuwania soczewki w L, gdy chodzi o rzucenie obrazu dokładnie na dany ekran. Przyrząd opisany wstawia się, jak pokazuje fig. 318,

w otwór rury B tak zwanego *heliostatu*, którego zwierciadło M może, za pośrednictwem guzików A i B tak być obracane, że padające nań promienie słoneczne odbijają się w kierunku rury B, poczem zostają zebrane i oświecają przedmiot, umieszczony w m. Do oświecenia może, rozumie się, także służyć lampa elektryczna lub światło Drumond'a, lecz wtedy nazwa mikroskopu słonecznego nie jest już zupełnie właściwa. Mikroskopy takie są bardzo pożyteczne, zwłaszcza przy wykładach nauk przyrodniczych, pozwalają bowiem przedstawić na ekranie, w olbrzymiem powiększeniu, mikroskopijnie małe preparaty. W czasie oblężenia Paryża używano tych przyrządów, oświeconych elektrycznością, do rzucania na ścianę obrazu maleńkich fotografowanych telegramów, przynoszonych przez gołębie pocztowe.

§ 2. Mikroskop prosty i złożony.

W poprzednim paragrafie opisaliśmy przyrządy optyczne, dające powiększone rzeczywiste obrazy, które mogą być rzucone na ekran. Lecz oprócz nich, istnieje jeszcze inna grupa przyrządów, daleko obszerniejsza, dająca obrazy urojone, widoczne tylko dla jednego obserwatora. Najprostszą formą szkła powiększającego tego rodzaju jest lupa, t. j. soczewka płasko-wypukła lub dwuwypukła, ujęta w odpowiednią oprawę: daje ona, jak już wiemy, powiększony i urojony obraz przedmiotu, umieszczonego pomiędzy nią a jej ogniskiem głównem. Właściwy zaś *mikroskop prosty* (fig. 319) składa się z metalowej podstawy, do której u góry przymocowana jest lupa, pod nią widzimy rodzaj stolika, zwanego przedmiotowym, na który kładzie się przedmiot, mający być rozpatrywanym. Stolik jest pośrodku przedziurawiony, a nad otworem układa się szkiełko z danym preparatem; potrzebne światło przychodzi od dołu, wskutek odbicia od umieszczonego tamże ruchо-

Fig. 319. Mikroskop prosty.

mego zwierciadełka wklęsłego, któremu przez stosowny obrót można nadać żądane położenie. Należyte ustawienie lupy względem badanego przedmiotu osiąga się przez obracanie bocznego guzika, połączonego z mechanizmem, ukrytym wewnątrz podstawy. Lupa i mikroskop prosty oddały naukom przyrodniczym wielkie usługi, szczególniej zaś ostatni, często używany przy preparowaniu i badaniu roślin. W taki sposób zastosowana lupa rzadko może powiększać więcej, jak 60 razy, albowiem przy jeszcze znaczniejszej zdolności powiększania, ognisko główne wypadałoby tak blizko soczewki, że pomiędzy nią a przedmiotem preparowanym nie byłoby już miejsca dla narzędzi, ułatwiających preparowanie.

Fig. 320. Szemat mikroskopu złożonego.

Jeżeli niekiedy lupa lub mikroskop prosty składają się z kilku soczewek, to jednak wszystkie one działają w podobny sposób tak, że system przez nie utworzony, zastępuje tylko jedną silniej załamującą soczewkę. Przeciwnie, *mikroskop złożony* składa się z dwóch wypukłych soczewek lub też z dwóch systemów soczewek, z których każda działa w sposób zupełnie odmienny. Umieszcza się je na wspólnej osi, a odległość pomiędzy niemi dobiera się tak, aby była większą, niż suma ich odległości ogniskowych. Soczewka *a b* (fig. 320), o bardzo małej odległości ogniskowej, znajduje się bliżej przedmiotu i zowie się *objektywem;* przed nim, nieco dalej niż jego ognisko główne, widzimy mały przedmiot *r s*, którego odwrócony, powiększony i rzeczywisty obraz tworzy się po za objektywem w *S R*. Obraz ten odgrywa względem drugiej soczewki *c d*, bliższej oka obserwatora i zwanej *okularem*, rolę ciała wysyłającego światło; ponieważ wypada on pomiędzy okularem a jego ogniskiem głównem, to patrząc z góry przez okular, widzimy w *S' R'* powiększony, prosty i urojony obraz pierwszego obrazu *S R*. Przedmiot tedy *r s* ukazuje się nam

w podwójnem powiększeniu, spowodowanem najprzód przez objektyw, a następnie dopiero—przez okular. Fig. 321 przedstawia mikroskop złożony w całości. Okular n i objektyw o ujęte są we wspólną metalową rurę, przesuwającą się z lekkiem tarciem wzdłuż metalowego również rękawa h; nieznaczne zaś zmiany w jej położeniu osiąga się przez obracanie śrubki k. Przedmiot, zwykle przezroczysty, umieszcza się na szkiełku i kładzie to ostatnie na stoliku $p\,p$, mającym pośrodku otwór, przez który z dołu dochodzi potrzebne światło, odbite od ruchomego zwierciadła $s\,s'$. Gdy zaś przedmiot jest nieprzezroczysty, oświeca się go z góry za pomocą promieni, zebranych przez stosowną soczewkę. Rurę mikroskopową można wyciągnąć tak wysoko, że pierwszy obraz $S\,R$ (patrz fig. 320) wypada przed ogniskiem głównem okularu, a wtedy ten ostatni daje z obrazu $S\,R$ powtórny *rzeczywisty* i *powiększony* obraz, który można rzucić na ekran. Ażeby tak rzucony obraz uczynić dostatecznie jasnym, należy na przedmiot, leżący na stoliku mikroskopu, skierować światło słoneczne, elektryczne, lub światło Drumond'a. W tym celu zbiera się promienie jednego z tych źródeł, za pomocą soczewki l oraz zwierciadła s' (fig. 322, str. 484), na przedmiocie $r\,s$, z którego objektyw o daje rzeczywisty obraz $S\,R$. Powtórny rzeczywisty obraz $S'\,R'$, jaki daje okular n, pojawiłby się jednak przy pionowej rurze mikroskopowej, na suficie pokoju; otóż dla zwrócenia obrazu w kierunku bocznym, ku ekranowi, umieszcza się nad mikroskopem pryzmat p tak, aby wchodzące doń od dołu promienie uległy zupełnemu wewnętrznemu odbiciu. Widzimy tedy, że w pewnych warunkach, każdy mikroskop złożony może także służyć do objektywnego przedstawienia preparatów, a więc do rzucania rzeczywistych ich obrazów na ekran (1).

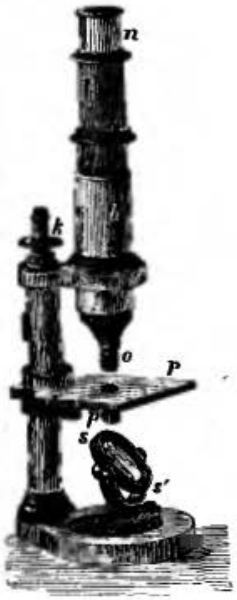


Fig. 321. Mikroskop złożony.

(1) Lomel, l c,

Powiększenie, jakie daje mikroskop złożony, równa się iloczynowi z powiększeń objektywu i okularu. Istnieje formuła matematyczna, pozwalająca z odległości ogniskowych tych dwóch soczewek, z odległości przedmiotu od objektywu i wreszcie z odległości dokładnego widzenia dla obserwatora (ten ostatni punkt objaśnimy bliżej w rozdziale o oku) obliczyć teoretycznie powiększenie, jakie można otrzymać za pomocą danego mikroskopu. Doświadczalnie zaś oblicza się to w sposób następujący: przed objektywem umieszcza się szklany mikrometr czyli tafelkę, na

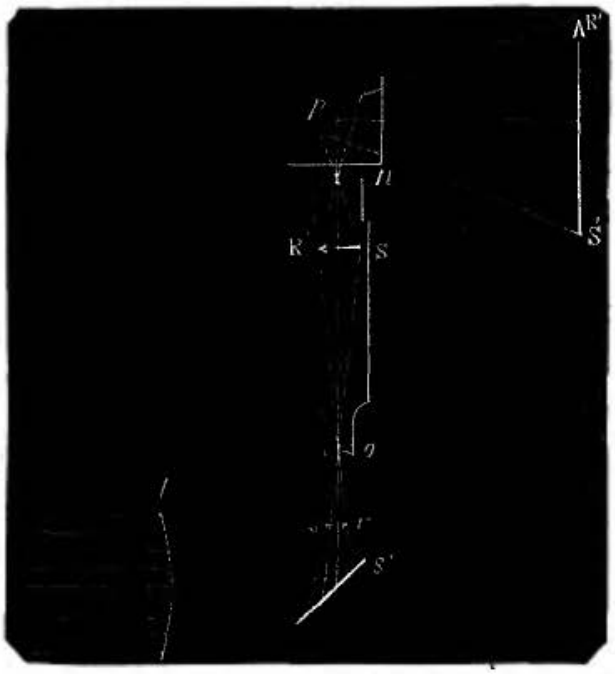


Fig. 322. Objektywne przedstawienie obrazu, powiększonego przez mikroskop złożony.

której znajdują się bardzo drobne podziałki, np. setne części milimetra; następnie przy pomocy pryzmatu o zupełnem wewnętrznem odbiciu otrzymuje się powiększony obraz tego mikrometru na ekranie. Przypuśćmy, że odrysowało się 10 podziałek, które zajmują na ekranie długość 25 milimetrów, jedna więc podziałka zajmuje tam 2,5 milim., a że na mikrometrze równa się ona 0,01 milim., wynika z tego, że dany mikroskop powiększa 250 razy. Oczywiście otrzymuje się przytem tylko powiększenie linijne, t. j. w kierunku średnicy; powiększenie zaś w płaszczyznie równa się linijnemu, podniesionemu do kwadratu. Gdy np.

pierwsze wynosi 50, 100 lub 500, wtedy drugie równa się 2500, 10000 i 250000.

W celu usunięcia wpływu aberracyi kulistej, pochodzącej od promieni bardzo ukośnie padających na okular, pomieszcza się w rurze mikroskopowej, nieco dalej tego miejsca, gdzie powstaje pierwszy obraz *S R* (patrz fig. 320, str. 482) *diafragmę*, t. j. nieprzezroczystą zasłonę z okrągłym otworem pośrodku; diafragma, jak wiemy, zatrzymuje bardziej skrajne promienie. Oko, patrząc przez okular, widzi jednocześnie obraz przedmiotu i wyraźne brzegi otworu diafragmy; poprowadziwszy od nich proste linie do optycznego środka objektywu i przedłużywszy je po drugiej jego stronie, otrzymuje się powierzchnię stożkowatą, ograniczającą przestrzeń, która może być widziana przez okular. Przestrzeń tę nazywamy *polem widzenia* mikroskopu.

W większości mikroskopów rura jest pionowa, lecz istnieją także przyrządy, w których można ją nachylać, albo nawet nadać położenie poziome, co nadzwyczaj jest wygodne dla obserwatora, uwalnia go bowiem od ciągłego opuszczania głowy. W celu umożliwienia kilku badaczom jednoczesnego rozpatrywania danego przedmiotu, Nachet zbudował mikroskop o jednym wspólnym objektywie, lecz o trzech okularach, z których każdy znajduje się w oddzielnej rurze; światło, przechodzące przez objektyw, zostaje skierowane ku trzem okularom za pomocą stosownych pryzmatów. Tenże optyk zbudował dalej podwójne mikroskopy, przez które można patrzeć jednocześnie obu oczyma, przyczem dla każdego oka przedmiot przedstawia się nieco inaczej, co pozwala, jak zobaczymy następnie, widzieć go przez mikroskop, jakby nie na płaszczyznie, lecz jako ciało w przestrzeni.

§ 3. Lunety. Teleskopy.

Jeżeli mikroskop otwiera dla nas tajemnice nieskończenie małego świata, jeżeli pozwala nam widzieć przedmioty, wprawdzie blizkie, lecz z powodu swej małości nie mogące bezpośrednio być obserwowane, to z drugiej strony lunety i teleskopy

odgrywają rolę analogiczną względem ciał, które znów z powodu swej znacznej od nas odległości nie mogą być gołem okiem dostrzeżone, niezależnie od tego, jaka jest istotna ich wielkość. Przy pomocy lunety możemy przeniknąć okiem do głębin wszechświata i odkryć tam gwiazdy, które bez tego przyrządu pozostałyby dla nas na zawsze niewidoczne; oprócz tego, ciała niebieskie, widzialne bezpośrednio, zostają przy użyciu lunety tak do nas przybliżone, że możemy niekiedy zdać sobie sprawę ze szczegółów ich budowy, przez co z kolei znakomicie powiększa się zakres naszych badań.

Przyrządy, służące do rzeczonego celu, polegały z początku jedynie na załamaniu światła w soczewkach; na pewien czas lunety te, czyli t. zw. *refraktory*, wyszły z użycia, lecz gdy następnie odkryto sposoby usunięcia wpływu aberracyi światła, powrócono znów do nich. Na rzeczonej zasadzie zbudowana jest *luneta astronomiczna*, zwana także lunetą Keplera. Składa się ona z objektywu *o* (fig. 323), t. j. soczewki dwuwypukłej o znacznej odległości ogniskowej i z umieszczonego po za objektywem, na wspólnej z nim osi, okularu *o'*—drugiej soczewki dwuwypukłej, o mniejszej odległości ogniskowej. Objektyw daje z jakiegobądź odległego przedmiotu mały rzeczywisty i odwrócony obraz, który następnie rozpatruje się przez okular, jak przez lupę, ostatni więc powinien być tak ustawiony, ażeby obraz wypadł pomiędzy nim a jego ogniskiem głównem. Jeżeli *a b* przedstawia ten obraz, to oko umieszczone po za okularem, widzi go w *A B*, jako obraz urojony, powiększony i prosty względem *a b*,

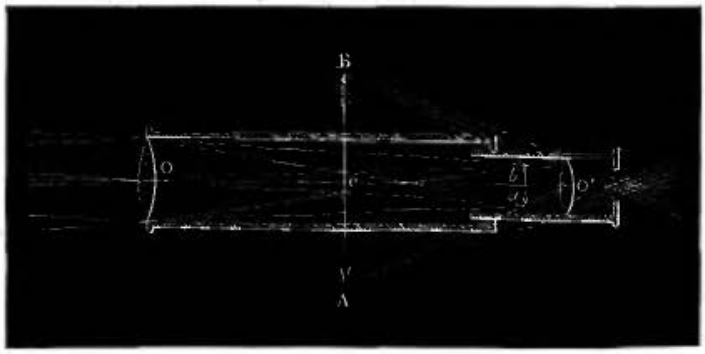


Fig. 323. Szemat lunety astronomicznej.

lecz odwrócony względem samego rozpatrywanego przedmiotu, co jednak przy poszukiwaniach astronomicznych nie ma wielkiego znaczenia. Kąt, jaki tworzą linie, poprowadzone od oka obserwatora do punktów obrazu A i B jest większy, aniżeli podobnyż kąt, pod jakim widziany jest przedmiot przez oko nieuzbrojone; na tem właśnie polega powiększające, a właściwie przybliżające działanie lunety, zobaczymy bowiem następnie, że przedmiot wydaje nam się tem bliższy, im większy jest kąt, utworzony przez linie, idące od oka do dwóch krańcowych jego punktów, czyli t. zw. kąt widzenia. Fig. 324 przedstawia ze-

Fig. 324. Luneta astronomiczna czyli Keplera.

wnętrzny wygląd lunety Keplera. Objektyw umieszczony jest na przednim końcu A odpowiednio długiej rury; na przeciwnym końcu, w węższej rurce A', przesuwającej się w jednę lub drugą stronę, znajduje się okular. Żądane położenie objektywu, przy którem obraz wypada na odległości dokładnego widzenia, osiąga się przez obracanie guzika V, połączonego z mechanizmem, ukrytym w szerszej rurze lunety. Położenie to zależy od powiększenia, jakie daje luneta i od odległości rozpatrywanych przedmiotów, jeżeli ta jest względnie nieznaczna. Dla wszystkich zaś przedmiotów na niebie, których odległość, w stosunku do wymiarów lunety, można zawsze uważać za nieskończenie wielką, po-

łożenie szkła zależy tylko od stopnia użytego powiększenia oraz od oka obserwatora. Co do wpływu aberracyi kulistości, to i tutaj zostaje on po części usunięty przez kilka przepon (diafragm), umieszczonych w różnych miejscach lunety.

Przy badaniach astronomicznych należy koniecznie mieć wewnątrz lunety pewien stały punkt, do którego możnaby odnosić położenie rozpatrywanego ciała. W tym celu w węższej rurce A', w miejscu, gdzie powinien wypaść obraz $a\ b$ (patrz fig. 323), ażeby był dokładnie przez okular widziany, naciągnięte są dwie nadzwyczaj cienkie nitki pajęcze lub platynowe, wzajemnie prostopadłe do siebie i przecinające się dokładnie na osi lunety. Jeżeli obraz gwiazdy np. powstaje w punkcie przecięcia tych nitek, to oczywiście oś lunety jest dokładnie na nią skierowana tak, że położenie tej osi pokazuje wtedy kierunek tak zwanej *linii widzenia*, poprowadzonej od oka do gwiazdy. Luneta Keplera służy też często do oznaczenia kierunku linii widzenia nietylko przy użyciu przyrządów astronomicznych, lecz także fizycznych i inżynierskich.

W lunecie tej można tak wysunąć okular, że obraz $a\ b$ wypada przed nim dalej, niż jego ognisko główne, a wtedy otrzymuje się obraz rzeczywisty i prosty względem samego przedmiotu, a więc taki, który można rzucić na ekran. W podobny sposób np. otrzymuje się na ekranie obraz tarczy słonecznej, znacznie powiększonej, na której widzowie mogą wtedy dokładnie rozróżnić niektóre szczegóły budowy słońca.

Do opisanego tutaj przyrządu dodaje się zwykle małą lunetkę l (fig. 324), której oś jest równoległa do osi dużej lunety i w ognisku której znajdują się również dwie wzajemnie prostopadłe nitki. Gdy luneta silnie powiększa, wtedy pole widzenia, jakie można objąć przez nią okiem, jest bardzo ograniczone tak, że chcąc odszukać jakiś przedmiot na niebie, dość trudno jest wprowadzić go w pole widzenia. To ostatnie zaś jest dość rozległe w nie tak silnie powiększającej lunetce l; za jej też pomocą daleko łatwiej znaleść dany przedmiot na niebie; gdy obraz jego wypada w punkcie przecięcia wspomnianych nitek, wtedy znajduje się on także w polu widzenia głównej lunety, równoległej

do lunetki *l*. Powiększenie lunety, przy tym samym objektywie, zależy od okularu i jest tem większe, im mniejsza jest odległość ogniskowa tego ostatniego. Właściwie jednak dobroć lunety i jej siła powiększająca zależą głównie od objektywu: wpływa tutaj czystość materyału, z którego zrobiona jest odnośna soczewka, następnie jej oszlifowanie i gładkość powierzchni. Przy jednakowych wymienionych warunkach, objektyw o największej średnicy oraz odległości ogniskowej powoduje najsilniejsze powiększenie. Dalej przy rozpatrywaniu gwiazd stałych, natężenie światła obrazu nie zmniejsza się wskutek powiększenia, teoretycznie bowiem jasność wzrasta wtedy w stosunku kwadratu ze średnicy objektywu oraz źrenicy naszego oka. Praktycznie zaś

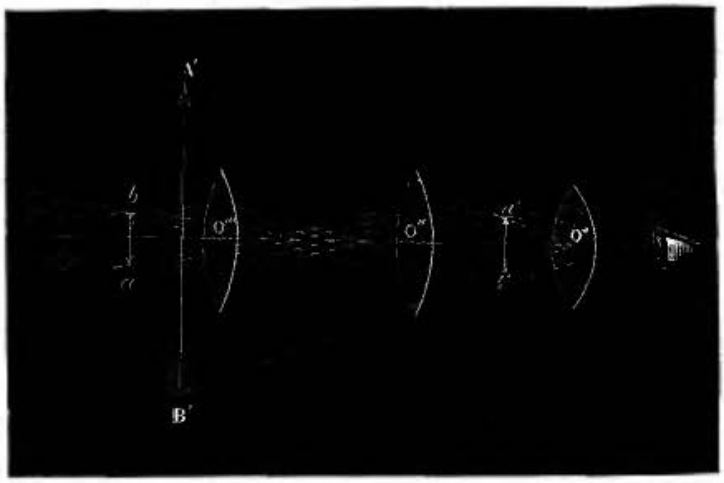


Fig. 325. Droga promieni w lunecie ziemskiej.

jasność ta jest mniejsza, niż wypada z takiego obliczenia, a to z powodu dość znacznego pochłonięcia, jakiemu ulegają promienie świetlne przy przejściu przez atmosferę ziemską. W każdym razie to wzmożenie jasności po części tłómaczy nam, dlaczego za pomocą lunety można w biały dzień znaleść na niebie gwiazdy, które dla gołego oka są widzialne tylko w nocy.

W lunecie Keplera przedmioty są widziane w odwróceniu, co, jak powiedzieliśmy, nie ma znaczenia przy badaniach astronomicznych, lecz co przedstawia wiele niewygód podczas rozpatrywania odległych przedmiotów na ziemi. Dlatego też w *lunecie ziemskiej* postarano się usunąć tę wadę; tutaj odwraca się

obraz za pomocą dwóch jednakowych i równoległych do siebie soczewek O''' i O'' (fig. 325, str. 489), które umieszcza się pomiędzy objektywem i okularem; $a\ b$ przedstawia *odwrócony* obraz dany przez objektyw. Promienie, wychodzące z punktu b, znajdującego się w ognisku bocznej osi soczewki O''', po przejściu przez tę soczewkę stają się równoległe do bocznej jej osi, następnie zaś przechodzą przez O'' i skupiają się w b'; to samo stosuje się do promieni z punktu a tak, że w $a'\ b'$ powstaje obraz równy co do wielkości obrazowi $a\ b$, lecz *prosty*. Ten właśnie prosty obraz rozpatruje się przez okular O' jak przez lupę; przedstawia się on oku powiększony i prosty ($A'\ B'$). Zamiast jednej środkowej soczewki, zwykle używa się obecnie dwóch soczewek płasko-wypukłych, przez co liczba ich, składająca oku-

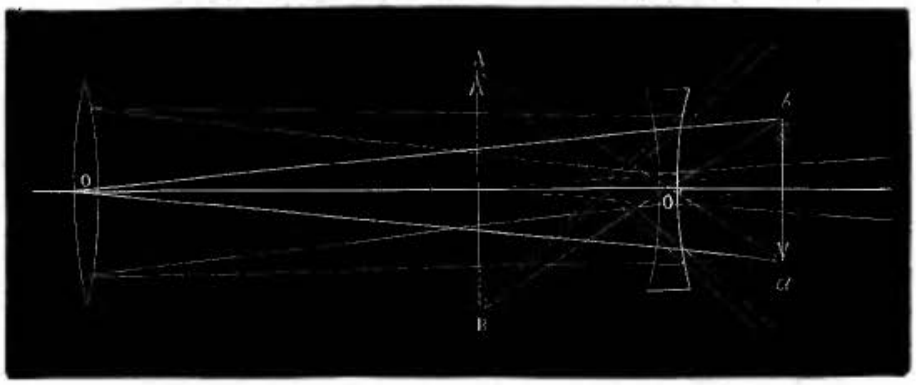


Fig. 326. Droga promieni w lunecie Galileusza.

lar, urosła do czterech; są one ujęte razem w jedną wspólną rurę. Należy dodać wszakże, że w podobnie urządzonej lunecie ziemskiej, jasność obrazu znacznie się zmniejsza tak, że przy tym samym objektywie nie można wybrać równie silnego powiększenia, jak przy użyciu lunety do celów astronomicznych. Powód osłabienia jasności leży w tem, że promienie świetlne muszą przechodzić przez dodatkowe dwie soczewki, w których ulegają częściowemu pochłonięciu.

W *lunecie Galileusza*, zwanej także lunetą holenderską, obrazy przedmiotów są również proste. Tutaj rzeczywisty obraz $a\ b$ (fig. 326), jaki dałby objektyw O, wcale się nie tworzy, albowiem promienie, zbiegające się ku miejscu tegoż obrazu, napotykają po drodze swej dwuwklęsły okular O', który załamuje je

w taki sposób, że zdają się wychodzić z prostego urojonego obrazu *A B*. Ażeby obraz ten wypadł na odległości dokładnego widzenia, należy nadać obydwom soczewkom odpowiednie wzajemne położenie, przedstawia się zaś on pod większym kątem widzenia, niż przedmiot, widziany gołem okiem, gdy odległość urojonego ogniska okularu od niego jest mniejsza od odległości ogniskowej objektywu.

Ponieważ rzeczywisty obraz od objektywu wcale w lunecie tej się nie tworzy, to niema w niej także owych krzyżujących się nitek, wskutek czego nie może ona służyć do oznaczania kierunku linii widzenia; oprócz tego, nie daje także silnego powiększenia, obecnie też w astronomii zupełnie nie bywa używaną. Natomiast, dzięki swej nieznacznej długości, nadaje się ona bardzo dobrze do obserwacyi niezbyt oddalonych przedmiotów, bywa

Fig. 327. Działanie teleskopu Newtona,

też często używana przez strategików i myśliwych, jako t. zw. luneta polowa, dająca 20—30-krotne powiększenie. Również i lornetka teatralna przedstawia lunetę Galileusza, powiększającą 2—3 razy. Ponieważ większość osób nie jest przyzwyczajona patrzeć tylko jednem okiem i trzymać drugie zamknięte, to w lornetce takiej zwykle są połączone dwie lunety. Za pomocą odpowiedniego śrubowego mechanizmu można okulary oddalać lub zbliżać do objektywów tak, że szkła te mogą służyć dla każdego oka.

Teleskopy czyli *reflektory* różnią się od dotychczas opisanych lunet, należących do refraktorów pod tym względem, że w pierwszych objektywu nie stanowi soczewka, lecz zwierciadło wklęsłe, dające rzeczywisty odwrócony obraz badanego przedmiotu, który to obraz rozpatruje się przez okular. W *teleskopie*

Newtona (fig. 327, str. 491) zwierciadło wklęsłe *S S* umieszczone jest w głębi odpowiednio szerokiej rury, z przodu otwartej. Promienie świetlne, wysyłane przez jakikolwiek odległy przedmiot, po odbiciu od zwierciadła zebrałyby się i dałyby w *a* rzeczywisty i odwrócony obraz, lecz przed zebraniem się tamże, zostają zwrócone w kierunku bocznej ściany rury, a to przez powtórne odbicie od płaskiego zwierciadła *p*. To ostatnie jest nachylone do osi rury pod kątem 45° tak, że ów obraz tworzy się w *b*; rozpatruje go się przez okular *o*, jak przez lupę. Zwrócenie promieni ku bocznemu otworowi rury jest konieczne dlatego, że gdyby obraz był rozpatrywany z przodu rury, wtedy głowa obserwatora zatrzymywałaby znaczną ilość światła, padającego od przedmiotu na zwierciadło. Z drugiej wszakże strony, wskutek tego podwójnego odbicia od dwóch zwierciadeł, natężenie świa-

Fig. 328. Działanie teleskopu Herschel'a.

tła znacznie się zmniejsza, z tego też powodu sławny astronom William Herschel tak urządził swój teleskop, że powtórne odbicie zupełnie zostało w nim usunięte. Mianowicie w olbrzymich teleskopach Herschel'a, a także lorda Rosse, zwierciadło wklęsłe jest nieco pochylone względem osi rury teleskopowej tak, że rzeczywisty obraz *a* tworzy się nad samym brzegiem rury (fig. 328), gdzie też jest rozpatrywany przez okular dwuwypukły *o*. Wprawdzie i tutaj głowa obserwatora zasłania sobą część otworu rury tak, że pewien odcinek zwierciadła wcale nie otrzymuje promieni od rozpatrywanego świecącego ciała, lecz odcinek ten jest nieznaczny w obec wielkiej średnicy samego zwierciadła, dochodzącej do 1—2 metrów. Wreszcie w *teleskopie Gregory'ego* (fig. 329) zwierciadło wklęsłe *S S* posiada pośrodku okrągły otwór, po za którym, w zwężonej części rury znajduje się oku-

lar *o*. Zwierciadło *S S* daje rzeczywisty i odwrócony obraz *a* odległego przedmiotu, przyczem obraz ten powstaje nieco przed ogniskiem głównem drugiego zwierciadła wklęsłego *V*. To ostatnie daje powtórny obraz *b*—także rzeczywisty i odwrócony względem *a*, lecz prosty względem badanego przedmiotu—który rozpatruje się przez okular *o*. Odpowiednie położenie zwierciadła *V* osiąga się za pomocą pręta *m n*, na którym nacięta jest linia śrubowa, przesuwająca przy obracaniu pręta podstawę, podtrzymującą toż zwierciadło. Tutaj więc obserwator patrzy istotnie, jak przy lunetach, w tym samym kierunku, w jakim znajduje się przedmiot badany, przyczem nie zatrzymuje głową swoją części promieni świetlnych. Natężenie światła w tym teleskopie ulega znacznemu osłabieniu po pierwsze dlatego, że powierzchnia

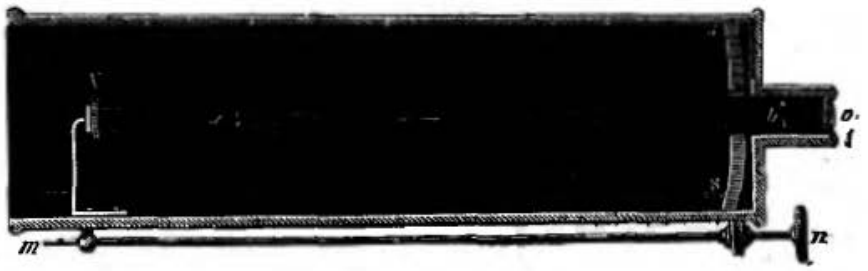


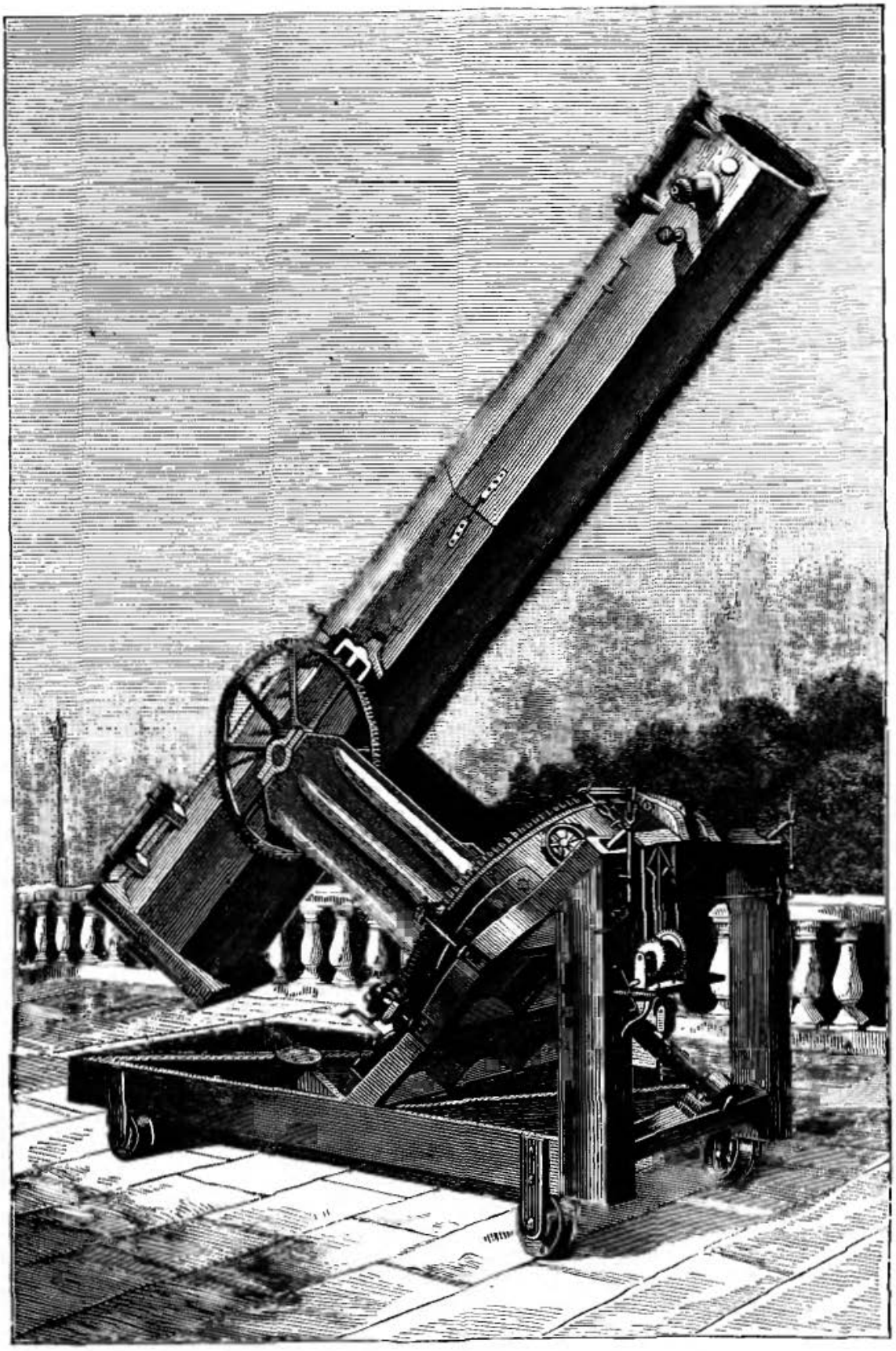
Fig. 329. Działanie teleskopu Gregory'ego.

zwierciadła nie jest ciągła, lecz w samym środku przedziurawiona, powtóre zaś głównie z powodu powtórnego odbicia od małego zwierciadła *V*. W zamian teleskop Gregory'ego przedstawia tę korzyść, że pozwala objąć dość szerokie pole widzenia tak, że względnie łatwo jest za pomocą tego przyrządu odszukać pojedyńcze przedmioty na niebie. Oprócz tego, widziany przezeń obraz jest prosty tak, że może on także służyć jako teleskop ziemski.

Teleskopy o zwierciadłach metalowych przedstawiają kilka znacznych niedogodności: najprzód objektyw jest bardzo ciężki w razie, gdy rura posiada dość duży otwór; następnie zwierciadło metalowe często musi być odpolerowywane, albowiem psuje się pod wpływem wilgoci atmosferycznej, to zaś wymaga ciężkiej i zmudnej pracy. Niedogodności te zmniejszył znakomity fizyk

Foucault; przygotował on objektyw nie z metalu, lecz ze szkła i nadał mu kształt prawie dokładnie paraboliczny tak, że jednocześnie zmniejszył jego ciężar i usunął wpływ kulistej aberracyi. Zwierciadło szklane pokrywał bardzo cienką warstwą srebra, która łatwo daje się odnawiać. Foucault zbudował w r. 1862 podobny przyrząd, urządzenie którego jest takie same, jak w teleskopie Newtona. Przedstawia go w całości oboczna tablica. Znajduje się on w obserwatoryum astronomicznem w Marsylii, gdzie oddał nauce wielkie usługi. Objektyw jego ma w średnicy 80 cm., a odległość ogniskowa równa się 4,50 metra; okular zaś posiada dokładnie budowę złożonego mikroskopu i jest wolny od wszelkiej aberracyi. Sam teleskop ustawiony jest paralaktycznie, to znaczy, że obraca się około osi, równoległej do osi ziemskiej; dzięki temu, można z łatwością śledzić gwiazdy podczas pozornego dziennego obrotu nieba. Do przyrządu dodany jest mechanizm zegarowy, który sprawia, że szybkość tego obrotu jest równa pozornej szybkości nieba, przez co dana gwiazda, na którą raz skierowano teleskop, pozostaje ciągle w jego polu widzenia.

Chcąc mieć dokładne wyobrażenie o tem, jak wielkie usługi oddały lunety i teleskopy naukom przyrodniczym, a szczególniej astronomii, należałoby napisać całą historyę tych nauk. Przytem nie możnaby się ograniczyć na zadziwiających zjawiskach, które instrumenty te uwidoczniły dla nas, ani na mnogości światów, przez nie odkrytych, lecz musielibyśmy sobie także uprzytomnić, że dokładność obserwacyi w astronomii, jakoteż w innych pokrewnych naukach, wzrosła niesłychanie, dzięki zastosowaniu tychże przyrządów, oraz że teorye i prawa o ruchach ciał we wszechświecie dosięgły przez nie znakomitego rozwoju. Na uczynienie zaś tego nie pozwalają nam rozmiary niniejszego dzieła.



Tabl. VII. **Teleskop Foucault'a.**

Wyższa Szkoła Religijna
Biblioteka
w Olsztynie

ROZDZIAŁ VI.

Rozszczepienie światła.

§ 1. Rozkład i skład białego światła.

Dotychczas rozpatrywaliśmy zjawiska optyczne niezależnie od jakości samego światła. Obecnie zobaczmy, jak się zachowują rozmaite rodzaje tego ostatniego, gdy różniąc się np. pod względem swej barwy, ulegają jednemu z wyżej opisanych zjawisk, a mianowicie—załamaniu przy przejściu przez pryzmat. Takie różne co do barwy światło można między innemi sztucznie otrzymywać przez wprowadzanie do płomienia lampy pewnych ciał; umieszczając np. na dolnym z dwóch węgli lampy elektrycznej maleńki kawałek metalu, zwanego *sodem*, zabarwiamy przez to płomień na piękny żółty kolor. W celu ułatwienia odnośnych doświadczeń, lampa jest tak urządzona, że światło wychodzi z niej przez pionową szczelinę pod postacią wązkiej smugi równoległych promieni. Ustawmy na ich drodze, w stosownem miejscu, wypukłą soczewkę, a otrzymamy na ekranie wyraźny obraz szczeliny, o barwie, zależnej od ciała, jakie w danym razie do płomienia zostało wprowadzone. Przypuśćmy, że płomień został zabarwiony przez sód na żółto, obraz więc na ekranie wypada żółty. Jeżeli teraz, tuż po za soczewką, stanie pryzmat, to owe promienie zostaną odchylone ku jego podstawie, a żółty obraz szczeliny utworzy się na ekranie w innem, niż poprzednio, miejscu. Wprowadziwszy zaś do płomienia lampy takie ciało, które zabarwia go na kolor czerwony, np. metal *litym* i otrzymawszy najprzód, jak powyżej, bezpośredni obraz szczeliny, potem zaś jej obraz odchylony przez tenże sam pryzmat, przekonamy się, że odchylenie promieni czerwonych jest mniejsze, niż to, jakiemu przedtem uległo światło żółte. Podobne doświadczenia, wykonywane ze światłem innej barwy, np. zielonem (metal *tal*), błękitnem (metal *ind*) i t. d. przekonywają, że promienie zielone zostają bardziej odchylone niż żółte i że najsilniejszemu odchyleniu ulegają promienie fioletowe. Łamliwość tedy różnych

rodzajów promieni jest niejednakowa: *w jednym i tym samym pryzmacie światło czerwone załamuje się najsłabiej, fioletowe zaś— najsilniej.* Można się o tem przekonać także za pomocą następujących, daleko prostszych doświadczeń. Zabarwia się mianowicie jednę połowę kawałka papieru na czerwono, drugą zaś na niebiesko i rozpatruje go przez pryzmat, którego krawędź załamująca zwrócona jest ku górze; wydaje się wtedy, że obydwie połowy papieru nie leżą w jednej płaszczyznie; niebieska wydaje się wyżej położona od czerwonej, co dowodzi, że promienie niebieskie zostają silniej odchylone, niż czerwone (fig. 330). Umieściwszy ten sam dwubarwny papier, dobrze oświecony, przed ogniskiem głównem dwuwypukłej soczewki, otrzymamy rzeczywisty jego obraz na białym ekranie, przyczem przekonamy się, że ekran musi znajdować się na różnej od soczewki odległości, zależnie od tego, czy obraz czerwonej lub też niebieskiej połowy ma na nim wystąpić w całej swej wyrazistości. Znajdziemy też z łatwością, że odległość, na jakiej obraz niebieski zupełnie wyraźnie się pojawia, jest mniejsza od tej, przy której osiągamy to samo dla czerwonego obrazu, a zatem światło niebieskie załamuje się silniej, niż czerwone. Dwa opisane tutaj doświadczenia należą do najpierwszych, jakie podaje Newton w swej optyce.

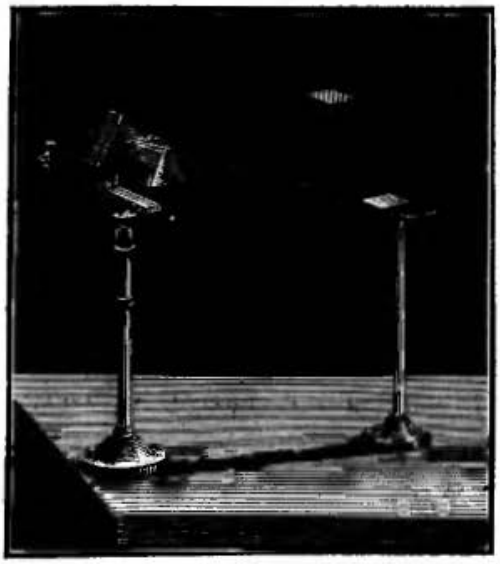


Fig. 330. Niejednakowa łamliwość promieni o różnej barwie.

Gdy warunki doświadczenia w taki sposób są zmodyfikowane, że do płomienia zostają wprowadzone jednocześnie wszystkie cztery powyższe metale, wtedy bezpośredni obraz szczeliny, jaki soczewka rzuca na ekran, nie jest zabarwiony na żaden z wymienionych czterech kolorów, lecz posiada barwę *białą*. Przy udziale zaś pryzmatu, zamiast pojedyńczego białego, tworzą się na ekranie cztery różnie zabarwione obrazy: *czerwony*, *żółty*, *zielony* i *niebieski*, każdy na właściwem sobie miejscu.

Widzimy tedy, że owe białe światło, wychodzące z lampy, składa się w istocie z różnych co do barwy i zmieszanych razem promieni; przy przejściu przez pryzmat rozkłada się ono na swoje prostsze składniki, albowiem każdy z tych ostatnich załamuje się inaczej. Taki rozkład światła zowie się *rozszczepieniem*. Każdemu zjawisku załamania światła złożonego towarzyszy rozszczepienie jego na składniki prostsze, a ta sama metoda, którą widzieliśmy wyżej zastosowaną do rozkładu światła lampy elektrycznej, gdy w płomieniu jej znajdują się pary różnych metali, może także służyć do rozkładu czystego, elektrycznego, albo też jakiegokolwiek innego światła. Co do światła słonecznego, to rozkład jego pierwszy zauważył i zbadał Newton. Wpuścił on

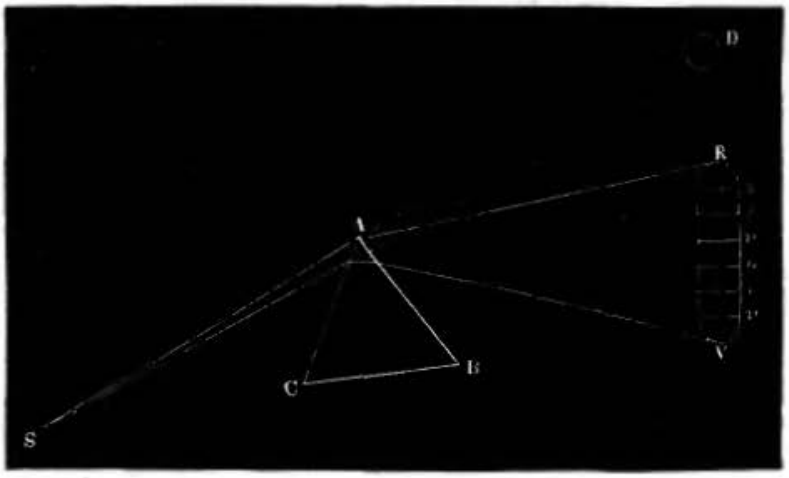


Fig. 331. Rozkład światła słonecznego przy przejściu przez pryzmat.

do ciemnego pokoju, przez bardzo mały okrągły otwór (S) poziomą wiązkę promieni słonecznych, które na przeciwległym ekranie w D utworzyły biały i okrągły obraz słońca (fig. 331). Następnie na drodze tych promieni umieścił pryzmat $C\,A\,B$ (krawędź załamująca jest w A), a wtedy wiązka światła nie tylko uległa odchyleniu, lecz także rozszczepiła się, tworząc na ekranie wydłużony prostokąt $R\,V$ o zaokrąglonych brzegach i szerokości, równej średnicy białego obrazu w D, długość zaś szła w kierunku głównego przecięcia pryzmatu. Prostokąt ten, zabarwiony na całej swej długości najwspanialszemi kolorami, stanowi pewną formę t. zw. *widma słonecznego*. Przedstawia ono najprzód w R

ciemną czerwień, która staje się stopniowo coraz jaśniejsza i przechodzi nieznacznie w barwę pomarańczową. Z kolei ta ostatnia przechodzi w żółtą, ta—w zieloną, zielona—w jasno-niebieską, poczem idą: ciemno-niebieska (błękit) i fiolet. Właściwie liczba odcieni barw jest tutaj nieskończenie wielka, odróżnia się wszakże tylko siedem głównych, idących po sobie we wskazanym porządku (patrz tablicę chromolitografowaną, widmo № 1). Newton, w celu objaśnienia powstawania widma przyjął, że białe światło składa się z nieskończonej ilości promieni pojedyńczych, których łamliwość wzrasta stopniowo, począwszy od czerwonych, aż do fioletowych i które odszczepiają się jeden od drugiego przez załamanie. Doświadczenia, opisane na początku niniejszego § pokazują, jak należy sobie tłómaczyć tworzenie się widma słonecznego. Każdy pojedyńczy rodzaj promieni, zawartych w wiązce białego światła słonecznego, padającego na pryzmat, daje na ekranie obraz dokładnie w tem miejscu, które odpowiada jego łamliwości. Widmo należy tedy uważać za nieskończony szereg takich obrazów, zlewających się w jedną smugę. To samo dotyczy sposobu powstawania widm innych źródeł światła. Widmo światła elektrycznego składa się z tych samych barw i idących w tym samym porządku, co i słoneczne. Niekiedy też widmo może się składać z kilku tylko barwnych linij, albo nawet z jednej, np. widmo pierwiastku *talu*, utworzone jest z jednej zielonej linii. Liczba różnobarwnych linii zależy oczywiście od ilości rodzajów pojedyńczych promieni, wchodzących w skład danego światła. Takie widmo z kilku lub kilkunastu linii, nazywamy *przerywanem* w przeciwstawieniu do *ciągłego*, jakiem jest np. widmo światła elektrycznego. Łatwo można pokazać, że oddzielne barwy widma są jednorodne czyli pojedyńcze, to znaczy, iż więcej nie dają się już rozszczepić. W tym celu rzućmy

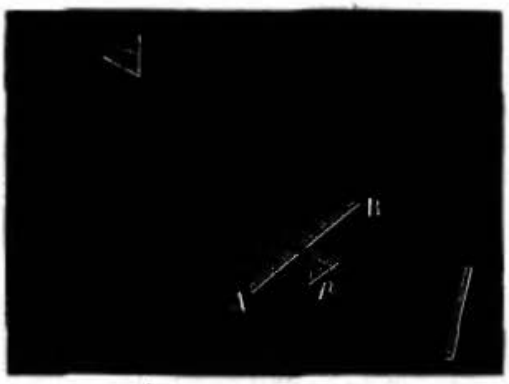


Fig. 332. Barwy widma nie rozszczepiają się.

widmo białego światła na ekran *A B* (fig. 332), w którym znajduje się wązka pionowa szczelina; niechaj ta ostatnia wypada np. tam, gdzie jest barwa żółta, wtedy tylko światło żółte, odpowiadające temu miejscu, przejdzie po za ekran. Ustawmy za nim drugi pryzmat *p*, a przekonamy się, że rzeczone światło nie ulegnie już rozszczepieniu: po wyjściu z drugiego pryzmatu zachowa ono pierwotną swą żółtą barwę i zostanie tylko jeszcze bardziej odchylone. To samo ma miejsce ze wszystkiemi pozostałemi barwami widma.

Z powyższego wynika, że chcąc przy poszukiwaniu praw załamania światła być niezależnym od wpływu rozszczepienia, należy zawsze posługiwać się światłem jednorodnem.

Jeżeli białe światło daje się rozłożyć na oddzielne barwy widmowe, tó naodwrót, przy połączeniu wszystkich tych barw, powinno powstać także światło białe. Doświadczenia w zupełności potwierdzają ten wniosek. Najprostsze z nich polega na tem, że na drodze wiązki białego światła, rozszczepionej przez pryzmat (fig. 333), stawia się dużą dwuwypuklą soczewkę *l*, a po za nią ekran, umieszczony w punkcie *f*, sprzężonym z punktem *s*, w którym promienie opuszczają pryzmat. Soczewka zbiera padające na nią promienie i rzuca na ekran obraz tylnej płaszczyzny pryzmatu; *obraz ten jest biały*. A oto inne, bardzo często pokazywane doświadczenie: Krążek tekturowy, podzielony promienisto na wycinki, którym nadano kolejno główne barwy widma słonecznego, wprawia się w bardzo szybki ruch obrotowy (fig. 334, str. 500). Barwa jego podczas tego ruchu *wydaje się białą*, albo przynajmniej jasnoszarą, pod warunkiem wszakże, że kolory są dobrze dobrane i że pojedyńcze wycinki mają odpowiednią względną szerokość. Po-

Fig. 333. Połączenie barw widma w białe światło.

chodzi to ztąd, że oko, podobnie jak ucho, zachowuje przez pewien przeciąg czasu otrzymane wrażenie; wrażenie jednej barwy krążka jeszcze nie przeszło, gdy już wszystkie pozostałe zdołały

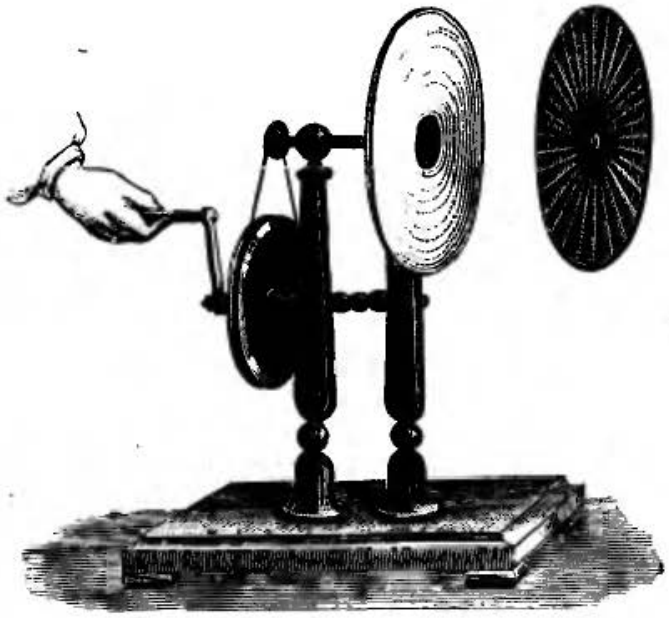


Fig. 334. Połączenie barw obracającego się krążka w barwę białą.

wywrzeć nowe wrażenia, które zlewają się z pierwszem w jedno; wpływ jest taki sam, jak gdyby z każdego punktu dochodziły do oka promienie wszystkich barw i dlatego krążek wydaje się białym, albo (przy słabszem natężeniu światła) szarym.

§ 2. Barwy dopełniające. Klasyfikacya barw. Teorya tęczy.

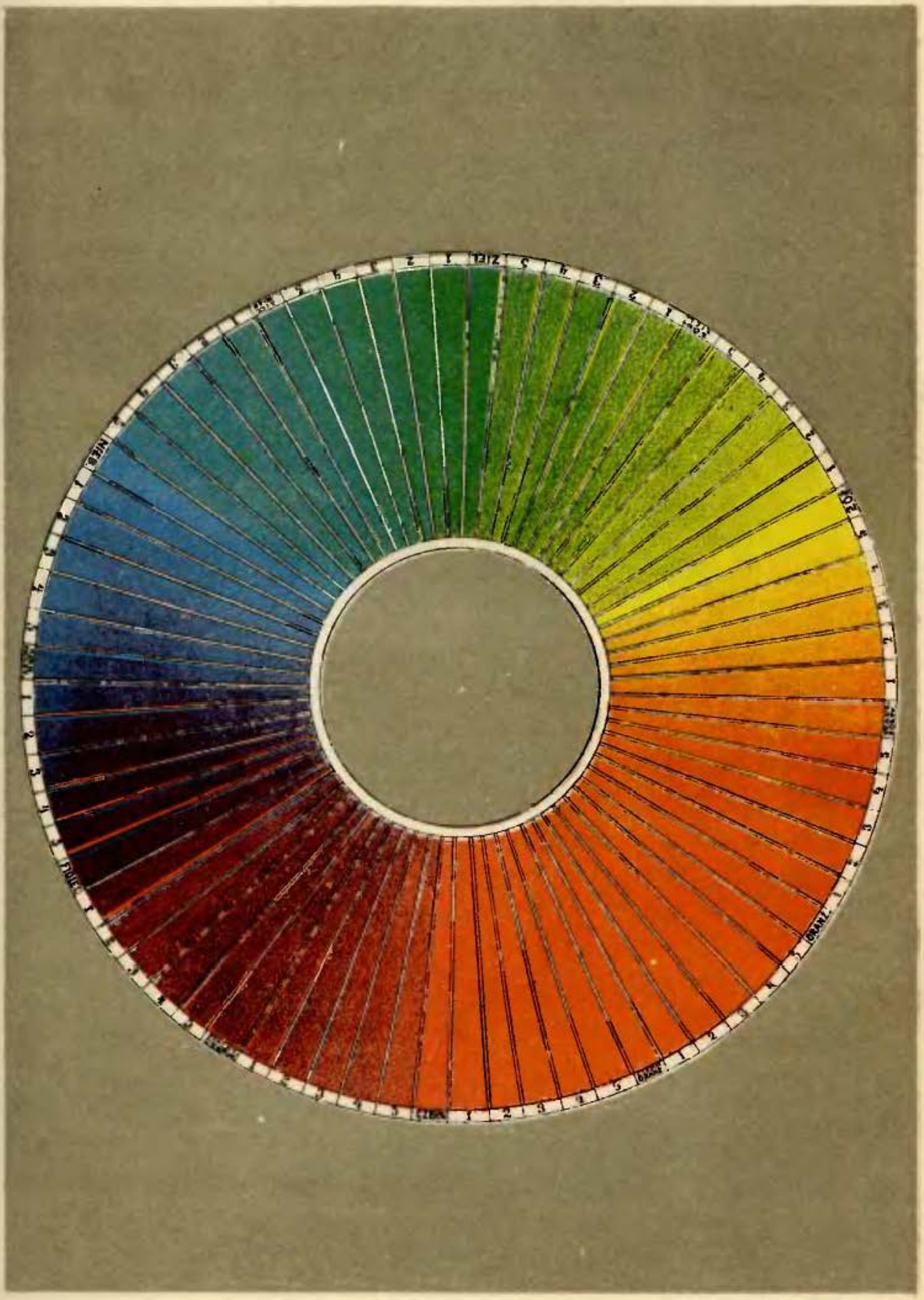
Widzieliśmy, że biel jest mieszaniną barw widma słonecznego. Jeżeli zaś z tego ostatniego odejmiemy pewną barwę, to pozostałe nie dadzą już bieli, jak o tem przekonać się można w następujący sposób: ustawmy za soczewką *l*, na drodze wychodzącej z niej wiązki rozszczepionego białego światła, pryzmat *p* (fig. 335, str. 501) tak, ażeby padły nań np. promienie czerwone i pomarańczowe; te ulegają odchyleniu i tworzą na ekranie w *n* *czerwonawy* obraz. Pozostałe zaś promienie, wychodzące z soczewki, to jest żółte, zielone, niebieskie i fioletowe zbierają

się w *f* i dają tutaj obraz *zielonawy*. Dwie te mieszaniny: czerwonawa i zielonawa, połączone w jedną, muszą dać biel, albowiem każda z nich zawiera promienie, których brak w drugiej do uzupełnienia bieli. Dwie barwy, które, zmięszane z sobą, dają biel, zowią się *dopełniającemi*. Przesuwając pryzmat *p* wzdłuż soczewki i odchylając coraz to inne promienie, przekonywamy się, że oprócz zielonawo-niebieskiej z czerwoną, dopełniają się także: żółta z ciemno-niebieską, zielonawo-żółta z fioletową, pomarańczowa z jasno-niebieską. Z tego wynika, że dla wywołania w oku naszem wrażenia bieli, nie koniecznem jest jednoczesne działanie wszystkich barw widma słonecznego; w tym celu wystarczają już, jak to ostatecznie wykazał Helmholtz, dwie odpowiednio dobrane barwy jednorodne. Począwszy od czerwieni widma do miejsca, gdzie pojawia się zieleń, można znaleść barwę dopełniającą dla każdej z tych, które ciągną się od początku niebieskiej do końca fioletu. Tylko barwa zielona w widmie nie posiada pojedyńczej barwy dopełniającej, lecz złożoną, a mianowicie purpurową. Należy dodać jeszcze, że dwie barwy dopełniające dają także biel wtedy, gdy mięsza się je z dowolną ilością białej barwy; gdy natężenie światła bieli jest słabe, to odbieramy wrażenie szarości; czerń zaś oznacza mniej lub więcej zupełny brak wszelkiego światła.

Fig. 335. Barwy dopełniające.

Jakkolwiek należy przyjąć, że liczba pojedyńczych i złożonych barw jest ogromna, oraz że przez ich kombinacye można ją jeszcze bez końca powiększać, to jednak zaprzeczyć się nie da, że wrażliwość pod tym względem oka naszego nie jest nieskończona, może ono bowiem dokładnie odróżnić tylko ograniczoną ilość odcieni barwnych. Lecz nawet i ta ograniczona skala oka jest jeszcze bardzo rozległa; dość przypomnieć niezmierne bo-

gactwo barw w naturze, wyraźnie przez oko rozróżnianych: kolory liści i kwiatów u roślin, pokrycia u zwierząt, upierzenia u ptaków, skrzydeł u motyli i innych owadów, wreszcie delikatne barwne odcienia niektórych minerałów i muszli stanowią ogniwa długiego szeregu barw naturalnych, nieznacznie, zaledwie dostrzegalnie, przechodzących jedna w drugą i składających się na owo bogactwo. Liczba barw, używanych w sztuce i przemyśle, jest o wiele mniejsza, zawsze jednak tak znaczna, że wymaga koniecznie racyonalnej klasyfikacyi, która pozwalałaby, według pewnych zasad, sprowadzić każdy odcień do kilku typów głównych i wytłómaczyć, w jaki sposób on z nich powstał. Znakomity chemik Chevreul podał kilka takich zasad, podług których możliwie dokładnie odróżniać można rozmaite barwy w ich przeróżnych stopniowaniach. W celu wprowadzenia określonych nazw dla modyfikacyi barw, Chevreul nazywa stopniowania jednej i tej samej barwy, różniące się tylko przymieszką bieli lub czerni, *tonami* tejże barwy, szereg takich tonów stanowi *gamę*, jej zaś tony, począwszy od czystej barwy do zupełnie białej, są coraz wyższe, w kierunku zaś czerni—coraz niższe. Zmiana, jaka zachodzi wskutek przymieszki innej czystej barwy, nie powodującej przyciemnienia, zowie się *odcieniem*. Ażeby otrzymać najprzód wielką liczbę odcieni, dzieli on powierzchnię krążka na 72 jednakowe wycinki i umieszcza na trzech z nich, wzajemnie równo oddalonych od siebie, wełniane prążki, z których jeden zabarwiony jest na czerwono, drugi na żółto, trzeci na niebiesko i to możliwie czystemi barwami, o jednakowem natężeniu. Pomiędzy te prążki wsuwa on dalej, w równych odstępach, jeden pomarańczowy—pomiędzy czerwony i żółty, jeden zielony—pomiędzy żółty i niebieski i jeden fioletowy—pomiędzy niebieski i czerwony. W podobny sposób wstawia on ustawicznie nowe odcienie pomiędzy dwa już znalezione i otrzymuje przez to krążek czystych barw, który w pewnej mierze może być uważany jako naśladowanie widma słonecznego (patrz Tablicę chromolitografowaną); zawiera on 72 odcienie, a dla każdego z nich istnieje całkowita gama z dwudziestu tonów, różniących się, jak już powiedzieliśmy, większą lub mniejszą przymieszką



IV. Klasyfikacyja barw

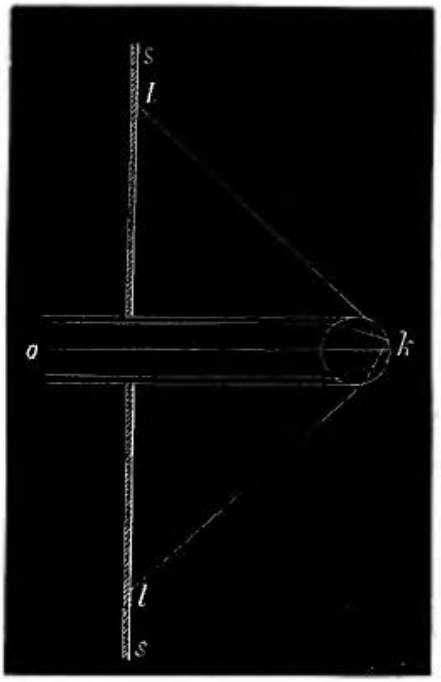
według systemu Chevreula

Czyste barwy.

Wyższa Szkoła Biblioteka Pedagogiczna

bieli albo czerni, przyczem dziesiąty ton gamy zawsze przedstawia czysty odcień. Oczywiście, że tak rozległa skala powinna w zupełności wystarczyć do wszystkich celów nauki i przemysłu oraz zadawalniać wszelkie wymagania artystów malarzy przez długi jeszcze przeciąg czasu.

W jednym z dalszych dopiero rozdziałów zajmiemy się obszernie wyjaśnieniem całej różnorodności barw, jaką przedstawiają ciała nas otaczające, tymczasem zaś postaramy się wytłómaczyć bliżej jedno z najwspanialszych zjawisk rozszczepienia światła słonecznego, tak jak ono zachodzi w naturze. Mówimy tutaj o *tęczy*, którą dostrzegamy na niebie gdy, zwróceni plecami do niezakrytego słońca, patrzymy na chmurę deszczową. Następujące piękne doświadczenie (1) pokazuje, w jaki sposób powstaje tęcza przez załamanie i wewnętrzne odbicie promieni słonecznych w kulistych kroplach deszczu. Na szklaną kulę *k*, mającą 4 centym. w średnicy i napełnioną wodą, skierowuje się poziomą wiązkę promieni słonecznych, której szerokość równa się średnicy kuli (fig. 336); przed kulą zaś ustawiony jest duży ekran *s s*, mający pośrodku otwór do przepuszczania padających nań promieni. Na ekranie tym pojawia się wówczas wspaniałe wielobarwne koło, otaczające otwór; jestto koliste widmo, którego barwy ułożone są współśrodkowo, najbardziej na zewnątrz widać czerwoną, na wewnątrz zaś—fioletową. Nieco dalej od środka ekranu widać drugie takie koło, lecz



Fig, 336. Dwukrotne załamanie, połączone z wewnętrznem odbiciem w kuli, napełnionej wodą,

(1) Opis tego doświadczenia, wykonanego przez Lomela, wyjmujemy z kilkakrotnie już przytoczonego wyżej dzieła jego, którem w ogóle przy opracowaniu niniejszej księgi często się posługujemy.

o znacznie słabszem natężeniu świetlnem i którego barwy idą w odwrotnym niż w pierwszem kole porządku: czerwona znajduje się na wewnątrz, fioletowa zaś na zewnątrz.

W jaki sposób powstają dwa te widma koliste? Pierwsze powstaje z promieni, które uległy dwukrotnemu załamaniu, t. j. przy wejściu i wyjściu z kuli oraz jednorazowemu wewnętrznemu odbiciu od tylnej jej ściany. Padają one na ekran dopiero po przebyciu tej łamanej drogi, są więc odchylone od pierwotnego swego kierunku. Jedynie promień *o* czyli środkowy nie ulega odchyleniu, gdyż padając prostopadle na przednią i tylną powierzchnię kuli, powraca też tą samą drogą, jaką przyszedł. Co się tyczy pozostałych promieni, to zostają one odchylone tem więcej, im dalej biegną od środkowego, w pewnej zaś odeń odległości odchylenie ich osiąga *największą* wartość, poczem znów stopniowo się zmniejsza aż do najbardziej skrajnych. Posuwając się stopniowo od promieni najbardziej odchylonych do najskrajniejszych z jednej i do środkowego z drugiej strony, spostrzegamy, że *odchylenie z początku zmienia się bardzo nieznacznie, następnie zaś bardzo szybko.* Z tego wynika, że promienie, sąsiadujące z temi, które mają uledz największemu odchyleniu, po wyjściu z kuli biegną również blizko tych ostatnich, towarzyszą im jakby i wzmacniają ich natężenie świetlne na ekranie. Przeciwnie te, które padają blizko jeden drugiego, w innych miejscach kuli, po powtórnem załamaniu wychodzą z niej jako silnie rozbieżne i padając na ekran, nie wywołują na nim żadnego znaczniejszego oświetlenia. Promienie więc najsilniej odchylone, tworzące na ekranie obwód koła barwnego, powodują tutaj oświetlenie bez porównania silniejsze, niż w jakimkolwiek punkcie wewnątrz koła. Jeżeli do doświadczenia służy światło jednorodne, np. czerwone, wtedy na ekranie widać *słabo oświetloną* kolistą powierzchnię, ograniczoną przez *bardzo jasną* okrągłą linię czerwoną: tworzą ją oczywiście promienie najbardziej odchylone. Kąt największego odchylenia, t. j. kąt, jaki tworzą kierunki *o k* i *k l* (fig. 336), wynosi dla promieni czerwonych 42°. Światło pomarańczowe, żółte, zielone i t. d. wywołałoby zjawisko zupełnie analogiczne, z tą tylko różnicą, że koła przez nie

na ekranie utworzone, byłyby coraz mniejsze, w miarę coraz to większej łamliwości odnośnych promieni: najmniejsze koło dałyby fioletowe, dla których kąt największego odchylenia jest prawie o 1° mniejszy, niż dla czerwonych. Jasnem więc jest teraz, dlaczego przy użyciu światła białego, na ekranie pojawiają się współśrodkowe koła wszystkich barw widma słonecznego: czerwone najdalej, fioletowe zaś najbliżej środka tych kół.

Fig. 337. Dwukrotne załamanie połączone z dwukrotnem wewnętrznem odbiciem w kuli, napełnionej wodą.

Drugie barwne koło powstaje przez promienie, które ulegają dwukrotnemu załamaniu i dwukrotnemu także wewnętrznemu odbiciu od ścian kuli (fig. 337); znacznie słabsze natężenie jego pochodzi właśnie od tego wielokrotnego odbicia. Odchylenie, do jakiego zdolne są takie promienie, wynosi najmniej około 51° dla czerwonych, nieco zaś więcej dla fioletowych.

Każda kropla deszczu działa podobnie jak szklana kula w powyższem doświadczeniu. Niechaj O wyobraża oko obserwatora, patrzącego na przeciwległą słońcu chmurę deszczową, której oddzielne krople przedstawione są pod postacią grubych kropek (fig. 338). Z rzeczonych kropel tylko te, których odległość kątowa od punktu S nieba, przeciwległego słońcu, wynosi mniej więcej 42°, wysyłają do oka jednorazowo odbite w nich dostatecznie silne promienie; wychodzące zaś z innych kropel, przechodzą mimo oka niedostrzeżone. Warunkowi temu odpowiadają np. krople $A\,A'$ i $B\,B'$; z tych pierwsze, jako bardziej oddalone od punktu S, wysyłają

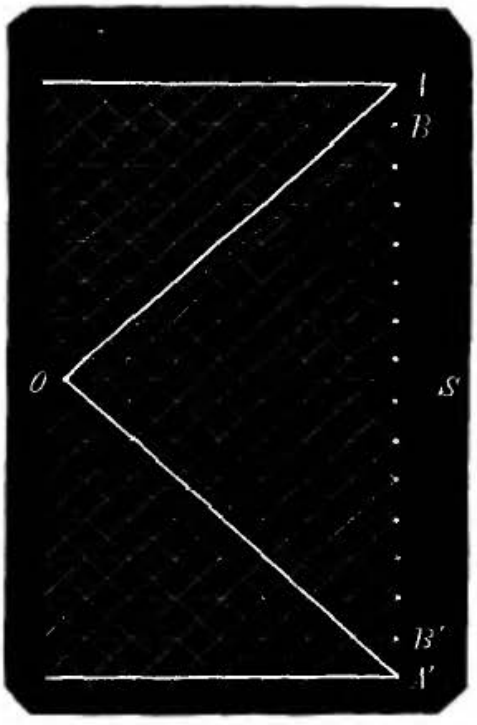


Fig. 338. Tworzenie się tęczy.

promienie czerwone, z kropel zaś $B\,B'$ przychodzą słabiej odchylone promienie fioletowe. Oko widzi tedy wokoło S łuk, którego barwy idą w takim porządku, jak ich łamliwość: fioletowa najbardziej na wewnątrz, czerwona—na zewnątrz. Ten łuk tęczowy zowie się *głównym*, w odróżnieniu od drugiego, znacznie bledszego i powstającego przez promienie, które w kroplach deszczowych uległy dwukrotnemu załamaniu i takiemuż wewnętrznemu odbiciu (patrz wyżej fig. 337); jego odległość kątowa od punktu S wynosi 51^0. Czytelnik, na podstawie powyższych objaśnień łatwo już zrozumie, dlaczego w tym łuku tęczowym barwy idą w odwrotnym porządku: czerwona na wewnątrz, fioletowa zaś na zewnątrz—niż w głównym. Tęcza, widziana przez nas, stanowi większą lub mniejszą część koła, zależnie od wysokości słońca na niebie. Ta, którą dostrzegamy prawem okiem, utworzona jest przez inne krople, niż widziana okiem lewem, lub okiem innego człowieka.

§ 3. Achromatyzm.

Pryzmaty z rozmaitych substancyj posiadają niejednakową zdolność rozszczepiania przechodzącego przez nie złożonego światła. Np. pryzmaty: flintglasowy, krownglasowy oraz wydrążony i napełniony wodą—każdy o kącie załamującym równym 60^0—powodują nietylko różne odchylenie, ale dają także rozmaicie długie widma: najwięcej odchylone i najdłuższe daje pryzmat z flintglasu; najmniej zaś odchylone i najkrótsze—pryzmat wodny. Można przygotować pryzmat krownglasowy, który odchyla pewien określony rodzaj światła na tyleż, co i krownglasowy o kącie załamującym równym 60^0; pierwszy pryzmat musi jednak wówczas posiadać mniejszy kąt załamujący, niż drugi, mianowicie kąt równy tylko 52^0. Otóż pryzmat flintglasowy daje wtedy widmo prawie dwa razy dłuższe, niż krownglasowy, z czego wynika, że zdolność rozszczepiania światła jest dla pierwszego gatunku szkła prawie dwa razy większa, niż dla drugiego. Dwa zaś pryzmaty z jednakowego materyału i o kątach załamujących równych (krownglasowe np. o kącie 60^0) powodują

jednakowe odchylenie oraz widma. Jeżeli tedy ustawimy je obok siebie, lecz tak, ażeby wierzchołek jednego był zwrócony ku dołowi, drugiego zaś ku górze (fig. 339), wtedy działania ich znoszą się wzajemnie: białe światło, które wchodzi do pierwszego pryzmatu, gdzie ulega odchyleniu i rozszczepieniu, doznaje w drugim pryzmacie równego odchylenia, lecz w kierunku wprost przeciwnym, a promienie rozszczepione łączą się napowrót. Światło wychodzi więc z drugiego pryzmatu równolegle do pierwotnego swego kierunku i daje na ekranie obraz *biały*. Widzimy, że owe skombinowane dwa pryzmaty działają tak samo, jak tafla szklana o ścianach równoległych, która nie powoduje odchylenia, ani też rozszczepienia światła. Gdy natomiast w podobny sposób kombinuje się pryzmat krownglasowy o 60^0 z flintglasowym o 52^0 (fig. 340), wtedy odchylenie przechodzącego przez nie białego światła, dla niektórych przynajmniej promieni, zostaje prawie zupełnie usunięte, lecz światło to wychodzi z drugiego pryzmatu jako rozszczepione, dlatego, że jak powiedzieliśmy wyżej, flintglas posiada dwa razy większą zdolność rozszczepiania, niż krownglas. Na ekranie pojawia się wtedy w kierunku bezpośrednich promieni widmo, prawie tak długie, jak to, które dałby sam pryzmat krownglasowy, lecz o barwach, idących w porządku odwrotnym. System szkieł, nie wywołujący odchylenia, składa się zwykle z trzech lub pięciu pryzmatów; stanowi on jakby jeden pryzmat bez odchylenia (à vision directe). Części jego składowe sklejone są razem za pomocą przezroczystego t. zw. balsamu kanadyjskiego. Pryzmat flintglasowy, którego kąt załamujący wynosi około połowy takie-

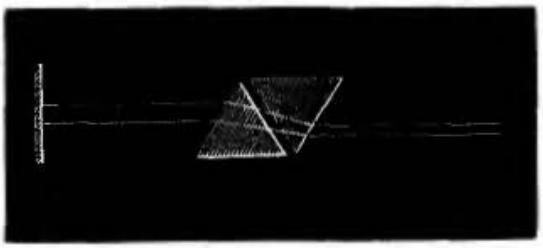


Fig. 339. Kombinacya dwóch jednakowych pryzmatów, przy której nie zachodzi żadne odchylenie ani rozszczepienie światła.

Fig. 340. Kombinacya pryzmatu krown- z flintglasowym, przy której światło ulega rozszczepieniu i nieznacznemu tylko odchyleniu.

goż kąta w pryzmacie krownglasowym, daje widmo tej samej długości, co i ten ostatni. Jeżeli tedy dwa takie pryzmaty (krownglasowy o 60° i flintglasowy o 30° prawie) skombinujemy jak w dwóch poprzednich wypadkach, t. j. odwrotnie je ustawimy (fig. 341), wtedy drugi z nich usunie rozszczepienie światła, spowodowane przez pierwszy, odchylenie zaś zostanie tylko zmniejszone. Na ekranie pojawi się nieznacznie tylko odchylony i *biały* obraz. System pryzmatów, nie wywołujący rozszczepienia, zowie się *achromatycznym* (bezbarwnym).

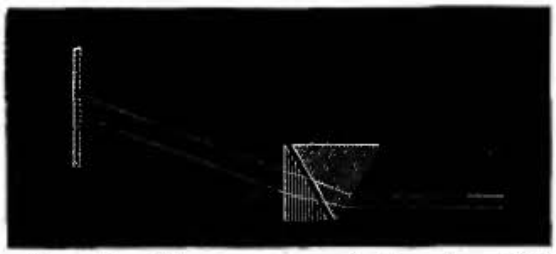
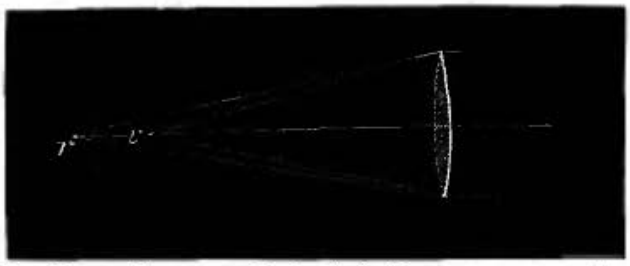


Fig. 341. Kombinacya pryzmatu krown- z flintglasowym, przy której zachodzi tylko odchylenie, lecz nie rozszczepienie światła (pryzmat *achromatyczny*).

Przechodząc obecnie do soczewek, jako do ciał załamujących światło, musimy raz jeszcze rozważyć dotyczące ich działania prawa: (poznaliśmy je już wyżej, patrz str. 466); są one mianowicie ścisłe tylko w razie, gdy przechodzące przez soczewkę światło jest jednorodne. W przeciwnym razie, gdy np. pada na nią światło białe, wtedy oddzielne jego promienie, po wyjściu z niej, nie przecinają już osi soczewki w jednym punkcie, rzeczone bowiem światło zostaje przytem rozszczepione na mnóztwo pojedyńczych promieni, o różnej łamliwości. Fioletowe, jako najbardziej łamliwe, przecinają oś najbliżej soczewki, w punkcie v (fig. 342); czerwone zaś, jako najmniej łamliwe—najdalej w punkcie r, a promienie o innych barwach zbiorą się między v i r. W ogóle tedy soczewka nie może w jednym punkcie zebrać promieni, wychodzących z białego lub w ogóle z wielobarwnego punktu. Zjawisko to jest znane pod nazwą *aberracyi chromatycznej*. Ono to stanowi przyczynę, dla której obrazy, rzucane przez zwykłe so-



Fig, 342. Rozszczepienie światła przez soczewkę.

czewki, nie są nigdy ostro odgraniczone, lecz otoczone niejasną barwną obwódką. Względna wielkość miejsc, zajętych przez te barwy, a nadto ich ilość oraz porządek, w *jakim występują na* obrazie, zależą oczywiście od odległości ekranu od soczewki. Jeżeli np. ten ostatni znajduje się bliżej soczewki, niż ognisko *v* dla fioletowych promieni, to obwódka będzie przedstawiała wszystkie barwy widma, z czerwienią najbardziej na zewnątrz wysuniętą; gdy natomiast ekran odsuniemy aż po za ognisko *r* dla czerwonych promieni, wtedy barwy obwódki będą szły w porządku *odwrotnym i fiolet wypadnie na zewnątrz.*

Luneta lub mikroskop, w których obrazy byłyby zabarwione, przedstawiałyby wskutek aberracyi chromatycznej niewielką tylko wartość naukową. Usunięcie rozszczepienia światła w soczewkach—w możliwość czego Newton zupełnie był zwątpił—stanowiło dla praktycznej optyki zadanie pierwszorzędnej wagi; dopiero też, gdy Hall (r. 1733) i Dollond (r. 1757) zdołali zadanie to rozwiązać, można było zbudować refraktory, odpowiadające wymaganiom nauki. Powyższe dane o pryzmacie achromatycznym z łatwością *objaśnią nas co do* sposobu, w jaki przygotowuje się soczewkę achromatyczną. Pojedyńczą oczywiście być ona nie może, składa się też zwykle z dwóch soczewek, które muszą być tak dobrane, ażeby wzajemnie usuwały swe rozszczepienia. W tym celu, po za daną soczewką, umieszcza się inną o działaniu wprost przeciwnem, która, posiadając taką samą zdolność rozszczepiania, co i tamta, powoduje jednak *inne odchylenie, a to z powodu różnej odległości* ogniskowej. Kombinuje się np. wypukłą soczewkę krownglasową z wklęsłą flintglasową; ażeby obydwie wywołały jednakowe rozszczepienie, lecz w kierunkach przeciwnych, urojona odległość ogniskowa dla tej ostatniej musi być prawie dwa razy większa, niż rzeczywista odległość ogniskowa dla soczewki wypukłej. Kombinacya taka daje *soczewkę achromatyczną* (fig. 343), za pomocą której otrzymuje się biały obraz danego punktu, je-

Fig. 343. Soczewka achromatyczna.

żeli promienie, padające na nią z tego ostatniego, są białe. Soczewki, wchodzące w skład podobnego systematu achromatycznego, były z początku dobierane w sposób empiryczny, to jest przez próbowanie. Ściślejszą jednak i doskonalszą drogą, prowadzącą do tego celu, jest uprzednie wyliczenie najodpowiedniejszego kształtu obydwóch soczewek. Do tego zaś potrzebna jest dokładna znajomość spółczynników załamania danych gatunków szkła dla rozmaitych pojedyńczych czyli jednorodnych promieni. Otóż Fraunhofer'owi udało się, na podstawie pewnych zasad, które wkrótce poznamy, ściśle zmierzyć rzeczone wielkości, przez co z kolei mógł on przygotować achromatyczne szkła pierwszorzędnej wartości.

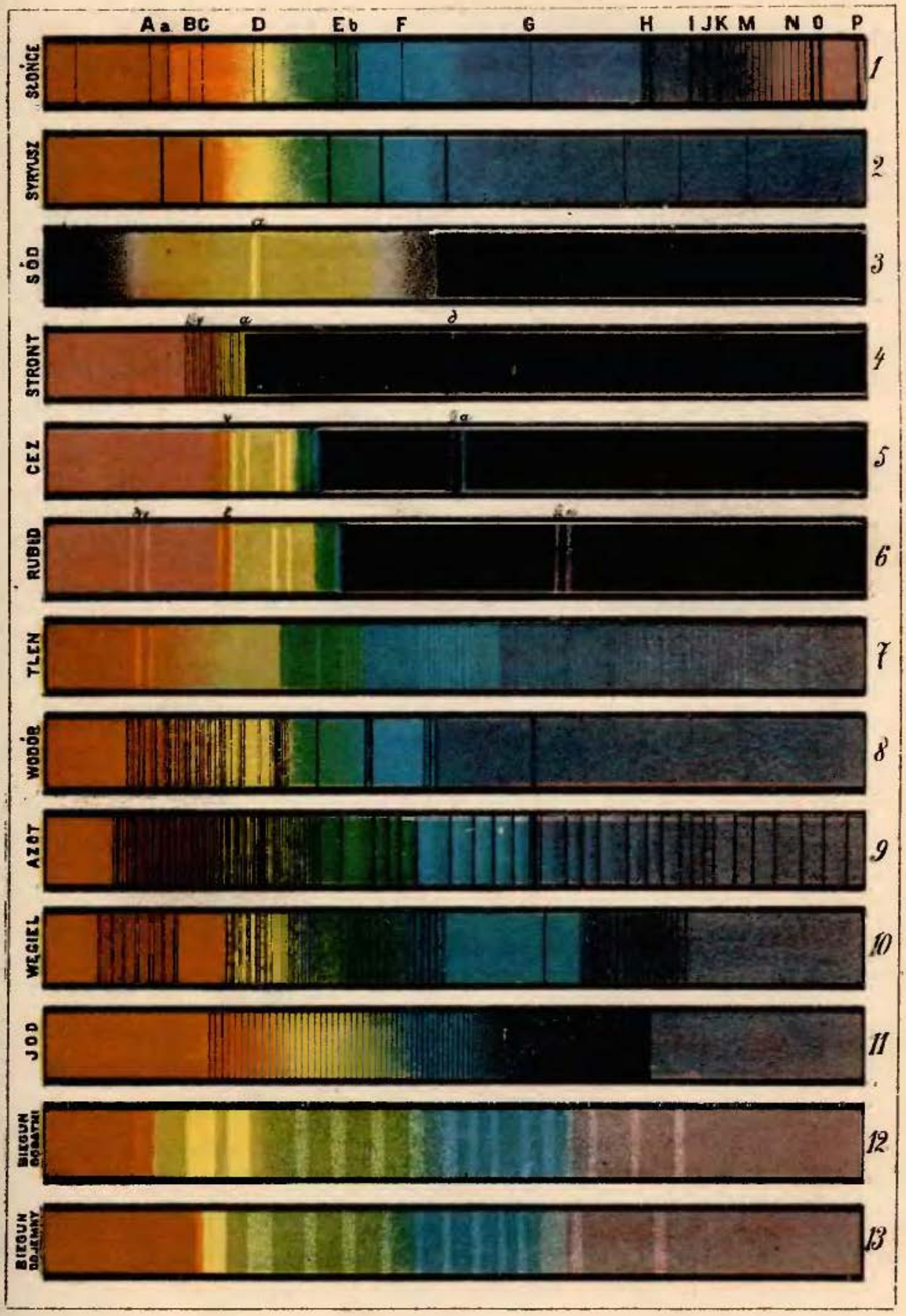
W dobrych przyrządach optycznych aberracya chromatyczna zwykle bywa usuniętą. Zwyczajna nawet lupa może składać się z kilku rozmaitych soczewek, które tworzą z niej system achromatyczny; jeżeli przytem krzywizny jej powierzchni tak są dobrane, że znika także aberracya kulistości, wtedy lupa jest jednocześnie i aplanatyczną. Objektyw i okular w dokładnym mikroskopie złożonym również są aplanatyczne i achromatyczne. To samo dotyczy dobrych lunet i teleskopów.

ROZDZIAŁ VII.

Analiza spektralna.

§ 1. Linie Fraunhofer'a. Widmo słońca.

Jednem z największych odkryć Newtona w zakresie optyki było wykazanie, że wiązka białego słonecznego światła, przechodząc przez pryzmat, rozkłada się na mnóztwo pojedyńczych promieni i tworzy widmo słoneczne. Metoda, jakiej z początku użył uczony angielski do otrzymania tego widma (patrz str. 497), odpowiadała celowi, była jednak niewystarczającą do ściślejszych badań nad składem światła słonecznego i nie mogła wykazać, czy w widmie tego ostatniego brak lub nie pewnych barwnych



w Lit. „Zofija" B. A. Buszty-Królewska.

II. Widma różnych źródeł światła:

1) słońca, 2) gwiazdy stałej, 3—11) niektórych pierwiastków chemicznych, 12—13) światła elektrycznego na obu biegunach.

Wyższa Szkoła Rolnicza
Biblioteka
Olsztyn

linii. Przy powyższej metodzie tworzy się bowiem na ekranie mnóztwo okrągłych i jednakowo wielkich obrazów słońca, o różnej barwie, które zachodzą jedne na drugie tak, że w danem miejscu widma znajduje się ich jednocześnie wielka ilość, co uniemożliwia skonstatowanie ewentualnego braku pewnego barwnego odcienia. Fig. 344 illustruje to szematycznie, lecz bardzo wyraźnie. W obec tego nie można się dziwić, że Newton sądził, iż widmo słoneczne stanowi *ciągłą* smugę barwnych linii, o wszelkiej łamliwości. Obecnie używana metoda różni się od poprzedniej pod tym głównie względem, że potrzebne światło słoneczne przepuszcza się przez wązką pionową szczelinę i że zanim pada na pryzmat, przechodzi ono przez achromatyczną soczewkę zbierającą; urządzenie więc jest takie same, jak w doświadczeniach, opisanych na początku rozdziału VI. Widmo słoneczne, otrzymane w podobnych warunkach, jest tem czystsze i tem doskonalej rozszczepione na pojedyńcze barwy, im węższą jest owa szczelina. W każdem miejscu widma, obrazy tej ostatniej są ułożone jeden obok drugiego, nie zachodząc na siebie wzajemnie; jeżeliby zaś w świetle, padającem na ekran, brakowało promieni o pewnej łamliwości, wtedy miejsce, odpowiadające tym promieniom, powinnoby odznaczać się jako ciemna linia lub prążek na jasnem, barwnem tle.

Fig. 344. Niewyraźne widmo, otrzymane przy użyciu okrągłego otworu.

Przypatrzmy się teraz widmu słonecznemu, otrzymanemu podług ostatniej metody, a dostrzeżemy na niem liczne ciemne linie, prostopadłe do jego długości (patrz tablicę chromolitografowaną, widmo № 1). Linie te pojawiają się zarówno w widmie światła słonecznego bezpośredniego, jak i odbitego od księżyca i innych planet. Z linii tych przedstawione są tam tylko najważniejsze, lecz w istocie znane są w ilości kilku tysięcy. Zostały one po raz pierwszy na początku bieżącego stulecia zauważone przez Wollastona, który nie zwrócił jednak na nie wielkiej uwagi. Na nowo zaś odkrył je Fraunhofer i od niego też noszą

one nazwę *linii Fraunhofer'a*. Najważniejsze z nich oznaczone są literami od *A* do *H*: linia *A* wypada w ciemnej, *B* i *C*—w jasnej czerwieni; *D*—na granicy pomiędzy barwami pomarańczową i żółtą, *E*—w zieleni, *F*—na granicy pomiędzy zieloną i jasno-niebieską, *G*—w ciemno-niebieskiej i wreszcie *H*—w końcu fioletu. Jedną z najbardziej godnych uwagi jest linia *D*, składająca się właściwie z dwóch, leżących tak blizko jedna drugiej, że niepodobna ich prawie widzieć jako linie oddzielne bez użycia lunety. Otóż Fraunhofer zaobserwował także w ciągłem widmie płomienia zwyczajnej świecy jasną, żółtą linię, daleko silniej świecącą, niż pozostała jego część i zajmującą przytem—o ile pomiary ówczesne pozwalały sądzić—w widmie świecy dokładnie to samo miejsce, co ciemna podwójna linia *D* w widmie słonecznem (porównaj na tablicy widma № 1 i № 3). Następnie Swan dowiódł w sposób niewątpliwy, że owa jasno-żółta linia w widmie świecy pochodzi od chlorku sodu (zwyczajna sól), znajdującego się w powietrzu i wystarczającego w minimalnej nawet ilości do wytworzenia żółtego światła. Wniosek z tego spostrzeżenia jakby sam się nasuwał i należało przyjąć, że w przychodzącem do nas świetle słonecznem brak tych żółtych promieni, które pochodzą od sodu. Późniejsze badania wykazały oprócz tego, że inne trzy ciemne linie w widmie słonecznem odpowiadają dokładnie, pod względem położenia swego, trzem jasnym liniom w widmie wodoru. Dalej gdy Kirchhof, chcąc określić położenie jasnych linii w widmach rozżarzonych par pewnych metali, porównywał je z widmem słonecznem, dostrzegł, że np. dla wszystkich jasnych linii żelaza można znaleść odpowiednie ciemne linie w widmie słońca. Zgodność jest w tym ostatnim wypadku zadziwiająca: im więcej intensywną jest dana jasna linia, tem ciemniejszą jest odpowiadająca jej linia Fraunhofer'a; gdy pierwsza jest niewyraźna, druga również jest taką. Należy dodać jeszcze, że liczba podobnych linii żelaza doszła, dzięki następnym poszukiwaniom Angströma i Thalena, do 460.

Zachodzi obecnie niezmiernie ciekawe pytanie, dlaczego te same linie, które w widmie rozżarzonych par wydają się jasne na ciemnem tle, w widmie słonecznem naodwrót przedstawiają

się jako ciemne na jasnem tle? Następujące doświadczenia mogą nam dać pewne wskazówki co do przyczyn tej, że tak powiemy, odwracalności widm: Rzućmy najprzód na ekran widmo lampy elektrycznej, które, jak wiemy, jest *ciągłe*, następnie wprowadźmy w zagłębienie dolnego jej węgla kawałek sodu, przyczem ten się ulatnia, rozżarza i otacza żółtą płomienistą powłoką biało świecący węgiel górny. Wtedy to na ekranie, w ciągłem przed chwilą widmie, *pojawia się obecnie linia ciemna*, zajmująca tutaj dokładnie to samo położenie, co ciemna linia *D* w widmie słonecznem. Linia ta zniknie zaś natychmiast, gdy przesuniemy górny węgiel tak, ażeby tylko czyste jego światło, nie przechodzące przez rozżarzone pary sodu, padało na pryzmat. Doświadczenie to pokazuje, że rozżarzone pary sodu przepuszczają wszystkie promienie światła elektrycznego, z wyjątkiem tych, jakie same wysyłają; te ostatnie zostają pochłonięte czyli *zabsorbowane*. W taki sam jak powyższy sposób można także otrzymać ciemne t. zw. *linie absorbcyjne* innych ciał. Umieściwszy np. na dolnym węglu lampy elektrycznej jakąś sól litynową razem z kawałkiem sodu, otrzymamy w widmie światła lampy dwie ciemne linie: jedną—od sodu, zajmującą to samo miejsce co w poprzedniem doświadczeniu, drugą zaś—od litynu, pojawiającą się w czerwieni, tam, gdzie zwykle wypada jasna linia litynowa. A więc i pary litynu pochłaniają te promienie, jakie same są zdolne wysyłać. To, cośmy tutaj powiedzieli o parach sodu i litynu, stosuje się także do innych ciał i odnośne fakty możemy ująć w ogólne prawo, które brzmi: *gazy lub pary pochłaniają te rodzaje promieni, jakie same, będąc w stanie rozżarzenia, wysyłają, przepuszczają zaś wszystkie inne.* Do ugruntowania i rozwoju ważnego tego prawa przyczynili się różni znakomici uczeni, jak Stokes, Foucault, Angström, Balfour Stewart, Kirchhoff. Stanowi ono, że tak powiemy, główny filar, na którym opiera się optyczna metoda badania ciał za pomocą ich widm, czyli metoda *analizy spektralnej.*

Balfour Stewart, a zwłaszcza Kirchhoff, nadali prawu temu formę nadzwyczaj ścisłą i rozległą. Pierwszy z nich pokazał najprzód, odnośnie do ciepła, że *zdolność pochłaniająca (absorb-*

cyjna) danego ciała, przy określonej temperaturze, jest równa jego zdolności wysyłającej (emissyjnej) dla każdego rodzaju promieni cieplnych. Dalej poddawał on doświadczeniu kawałek specyalnego fajansu, który rozpatrywany przy dziennem świetle, przedstawiał części bardziej ciemne od innych: pierwsze pochłaniały więcej z padającego na fajans światła, niż ostatnie. Otóż gdy fajans ten jest doprowadzony, przez dostatecznie silne ogrzanie, do stanu świecenia, wtedy—w razie jeżeli dopiero co przytoczone twierdzenie Stewarta o promieniach cieplnych, stosuje się także do świetlnych—owe *ciemniejsze* poprzednio części powinny okazać się *jaśniejsze* od pozostałych. Albowiem w pierwszym wypadku fajans był oświecony i różne jego części słabiej lub silniej pochłaniały światło, w drugim zaś razie jest on świecącym; te same więc części powinny odpowiednio wysyłać mniej lub więcej światła. Doświadczenie w zupełności potwierdziło ten wniosek. Stewart badał także barwne szkło zimne oraz ogrzane do wysokiej temperatury. W stanie zimnym pochłania ono część przechodzącego przez nie światła, część zaś przepuszcza, lecz samo żadnych promieni nie wysyła. Przeciwnie szkło to, ogrzane do temperatury rozżarzonego węgla, wysyła pewne promienie i to te właśnie, które może pochłaniać; inaczej mówiąc, dopełnia przez emissyę to, co zabsorbowało. Badania te dowodzą, że powyższe twierdzenie w zupełności stosuje się także do promieni świetlnych.

Kirchhoff również wykonał bardzo wiele doświadczeń, dotyczących stosunku pomiędzy pochłanianiem i wysyłaniem światła. Z doświadczeń tych zatrzymamy się tylko na jednem, dla nas obecnie najważniejszem. Zauważył on mianowicie, iż w widmie słonecznem niema ciemnej linii, odpowiadającej jasnej czerwonej linii w widmie litynu, spróbował tedy wytworzyć w pierwszem ową ciemną linię: W tym celu przepuszczał światło słoneczne przez słaby płomień gazowy, zabarwiony na czerwono za pomocą par litynu. Te ostatnie odejmowały światłu słonecznemu odnośne czerwone promienie, przez co w widmie słonecznem pojawiła się nowa ciemna linia. Gdy stopniowo zmniejszał natężenie światła słonecznego, ciemna ta linia również zanikała stopniowo, aż

nie można już jej było odróżnić od reszty widma; wreszcie przy bardzo znacznem osłabieniu rzeczonego światła, na miejscu jej wystąpiła jasna linia litynowa na ciemniejszem tle. Zmieniając więc natężenie światła słonecznego, można w danym punkcie jego widma otrzymać linię ciemną na jasnem tle, albo widmo o wszędzie jednakowem natężeniu światła, albo nareszcie linię jasną na ciemnem tle. Kirchhoff używając do podobnych doświadczeń ziemskiego źródła światła, pokazał także, że ciemne linie absorbcyjne pojawiają się tylko w razie, gdy *płomień pochłaniający posiada niższą temperaturę, niż owo źródło*, wtedy bowiem jedynie światło, wysyłane przez płomień, nie może skompensować straty, jaka powstaje wskutek pochłaniania. Gdy zaś płomień jest o tyle gorący, że wysyła więcej światła, aniżeli pochłania, wtedy w odnośnem widmie widzimy jasne linie na ciemnem tle. Wreszcie gdy płomień wysyła tyleż światła, ile go pochłania, widmo źródła jest ciągłe i niczem nie zdradza obecności pochłaniającego płomienia. Rezultaty te doświadczeń, jak zaraz zobaczymy, są niezmiernie ważne dla analizy spektralnej, szczególniej w zastosowaniu jej do ciał niebieskich (1), pozwalają one bowiem dokładnie objśniać ciemne linie Fraunhofer'a, a także poznać skład słońca i innych gwiazd.

Słońce przedstawia olbrzymią massę o niezmiernie wysokiej temperaturze; powierzchnia jego, zwana *fotosferą*, rozżarzona do białości, wysyła białe światło, które samo przez się dałoby widmo ciągłe. Wokoło słońca jednak, po nad fotosferą, znajduje się powłoka z rozżarzonych gazów i par, zwana *chromosferą*. Ta ostatnia *posiada temperaturę niższą*, niż fotosfera, wystarczającą jednak do utrzymania ciężkich nawet metali w stanie lotnym. Światło fotosfery słonecznej, zanim dochodzi do nas, musi tedy przejść przez chromosferę, gdzie ulega pochłaniającemu działaniu rozmaitych par, wskutek czego w odpowiednich miejscach widma słonecznego powstają ciemne linie—są to właśnie linie Fraunhofer'a.

---

(1) Tait, Progrès récents de la physique.

Z faktów podanych wyżej (patrz str. 512) wynika już, że atmosfera słoneczna zawiera wodór, sód i żelazo. Dalsze badania wykazały, że dwie ciemne linie *H* pochodzą od par wapnia, grupa zaś linii *b* (patrz tablicę № 1)—od par magnezu; linię *G*, częściowo także grupę *E*, przypisać należy żelazu. Analiza spektralna wykazała następnie, że na słońcu, oprócz powyższych, istnieją jeszcze z pewnością następujące pierwiastki: bar, chrom, nikiel, miedź, cynk, stront, kadm, kobalt, mangan, glin, tytan. Wreszcie w widmie słonecznem znajduje się pewna ilość ciemnych linii, nie odpowiadających żadnemu ze znanych dotychczas ziemskich pierwiastków, od jakich zaś ciał zależą one, przyszłość to może wykaże.

Musimy jeszcze nadmienić, że w widmie słonecznem, oprócz takich linii Fraunhofer'a, które bezsprzecznie pochodzą od pochłaniającego działania chromosfery, istnieją jeszcze liczne inne, powstałe wskutek pochłaniania niektórych promieni przez atmosferę ziemską i zwane liniami *telluryczne*mi. Ich pochodzenie ziemsko-atmosferyczne łatwo poznajemy po tem, że stają się one wyraźniejsze, albo nawet w ogóle występują dopiero wtedy, gdy promienie jego przechodzą przez najgrubszą warstwę atmosfery ziemskiej. Jako linie Fraunhofer'a telluryczne można np. wymienić linie *A* i *B*, ciemność których zależy ściśle od położenia słońca na niebie. Gwiazdy stałe dają widma podobne wprawdzie do słonecznego, lecz niezupełnie z niem zgodne. Ważnym jest fakt, że nie wszystkie ciemne linie w widmach tych gwiazd odpowiadają takimże liniom w widmie słonecznem (porównaj w tablicy № 1 i 2), co dowodzi, że pewna dosyć znaczna ilość tych ostatnich nie pochodzi ani od atmosfery ziemskiej, ani od jakiego innego środka, znajdującego się ewentualnie w przestworach pomiędzy nami, a ciałami niebieskiemi, lecz że istotnie linie te powstają wskutek pochłaniającego wpływu atmosfery słonecznej (chromosfery). Przytoczymy wreszcie jeden jeszcze rezultat odnośnych poszukiwań, stanowiący nader piękne potwierdzenie opisanej przez nas wyżej teoryi powstawania ciemnych linii w widmach. Oto badano, za pomocą analizy spektralnej, tak zwane *wyskoki słoneczne* (protuberancye), widoczne podczas cał-

kowitych zaćmień słońca, w różnych miejscach jego obwodu, pod postacią czerwonawych występów. Są to prawdopodobnie wybuchy gazów, *wyrzuconych na olbrzymią wysokość po nad atmosferę słoneczną;* przy niezaćmionem słońcu nie są one widoczne dlatego, że słabe ich światło znika w obec wielkiej jasności zwykłego światła dziennego. Otóż podczas zaćmienia słonecznego w r. 1868 udało się po raz pierwszy otrzymać widmo protuberancyj: składa się ono z *samych jasnych linii*, z których najważniejszemi są: trzy linie wodoru, oraz jedna, nie odpowiadająca żadnemu z dotychczas znanych ziemskich pierwiastków. Janssen, wysłany przez francuzką Akademię do Indyj Wschodnich w celu obserwowania owego zaćmienia, odkrył zaraz metodę, pozwalającą dostrzedz jasne linie wyskoków nawet przy niezaćmionem świetle słonecznem. Zasadę tej metody wygłosił jeszcze przed nim Lockyer, który nie wiedząc nic o odkryciach francuzkiego fizyka, wprowadził ją nawet w wykonanie. Polega ona głównie na tem, że zmniejsza się natężenie jasności atmosfery ziemskiej, oświeconej przez słońce, nie osłabiając przytem prawie wcale światła wyskoków. Sam przyrząd, używany do tego celu, pozwala nietylko widzieć widmo wyskoków, lecz także kształt ich i kontury. Mają one postać zakrzywionych rogów, chmur lub łańcuchów górzystych; jedne składają się przeważnie z wodoru, drugie zawierają pary żelaza, magnezu, wapnia i innych pierwiastków, w ogóle zaś przedstawiają ten sam skład chemiczny, co i chromosfera. Ponieważ sięgają po nad tę ostatnią, przeto światło ich, przybywające do nas, nie ulega pochłaniającemu jej działaniu i dlatego też daje jasne linie tam, gdzie w widmie słonecznem znajdują się ciemne.

Za pomocą powyższej metody, zastosowanej do badania widmowego wyskoków, rozpatrywano także i samą chromosferę, w widmie której Young odkrył 273 jasnych linii, z tych 64 należących do żelaza.

W obec tych rezultatów bez przesady można powiedzieć, że analiża spektralna stanowi jeden z najwspanialszych tryumfów nauki, umożliwiła bowiem poznanie fizycznej i chemicznej budowy ciał, nieskończenie od nas dalekich. Zastosowana do ba-

dania gwiazd stałych, planet, komet, mgławic, dała cenny materyał do tego poznania i rozwiązała zagadnienia, które na innej drodze zaledwie dałyby się rozstrzygnąć.

§ 2. Analiza spektralna ciał ziemskich. Spektroskop.

W poprzednim § wyłożyliśmy najważniejsze zasady analizy spektralnej i przedstawiliśmy rezultaty zastosowania jej do ciał niebieskich, obecnie zaś rozpatrzymy znaczenie tej metody dla chemicznego badania ciał, znajdujących się na ziemi. Od dawna wiedziano o tem, że pewne substancye, wprowadzone do płomienia, zabarwiają go na kolor sobie właściwy, uciekano się nawet do tego sposobu, ażeby w danym razie wykazać ich obecność; sposób ten wszakże sam w sobie był bardzo niepewnym, a stał się środkiem do ścisłej analizy dopiero wtedy, gdy poznano, jakie usługi może tutaj oddać pryzmat. Gołe oko nie może np. dostrzedz różnicy między czerwonem zabarwieniem płomienia przez lityn i przez stront; gdy natomiast światło takiego płomienia przepuścimy przez pryzmat, otrzymamy od dwóch tych ciał odmienne widma. Wprowadziwszy do płomienia jakąś sól sodową, zawierającą ślady litynu, otrzymamy zabarwienie, które wyda nam się czysto żółtem, pryzmat zaś wskaże, że jest ono także czerwonem, w widmie bowiem tego płomienia pojawi się, obok linii żółtej, także czerwona. Miejsce, jakie dana jasna linia w widmie zajmuje, nie zależy od temperatury źródła światła, inaczej mówiąc, czy badane ciało wprowadzimy do płomienia t. zw. lampki gazowej Bunsena, czy też do źródła o wiele gorętszego, jasne linie ciała tego pojawią się zawsze w jednem i tem samem ściśle określonem miejscu widma. Od temperatury zależną jest tylko, jak wiemy, *jasność* linii, wzrastająca w miarę podnoszenia się pierwszej. Niekiedy też przy wyższej temperaturze występują wyraźnie nowe jasne linie, które przedtem były niewidoczne z powodu zbyt słabego natężenia; tak np. w płomieniu lampy elektrycznej lityn daje, oprócz znanej nam czerwonej, linię błękitną, niewidoczną przy użyciu lampki Bunsena.

Analiza spektralna umożliwiła rozległe badania nad składem różnych połączeń; przytem metoda ta odznacza się nadzwyczajną czułością; dość powiedzieć, że jedna trzymilionowa część miligrama sodu może jeszcze wywołać żółte zabarwienie światła i dać odnośną jasną widmową linię; tak minimalnej zaś ilości niepodobna wykryć za pomocą żadnej innej metody. Dowiedziono np., że powietrze, a szczególniej zawieszone w niem pyłki, zmięszane są z chlorkiem sodu, którego drobniutkie cząstki unoszą się z wody morskiej, spienionej i wzburzonej przez wichry. Dość jest uderzyć o stół, a oderwane odeń pyłki natychmiast zabarwiają znajdujący się w blizkości płomień na żółto. Niezmierna czułość omawianej tu metody pozwoliła Bunsen'owi i Kirchhof'owi odkryć dwa nieznane przedtem pierwiastki z grupy metali alkalicznych (potasowców), a mianowicie *cez* i *rubid*, połączenia których w ilości nader małej znajdują się w pewnych minerałach i źródłach mineralnych. Widma ich przedstawione są na tablicy pod № 5 i 6. Następnie Crookes odkrył, za pomocą analizy spektralnej, metal *tal*, podobny do ołowiu, Reich i Richter znaleźli, drogą tej samej metody, metal *ind*, zawarty w niektórych rudach cynkowych, zaś Lecoq-de-Boibaudran—pierwiastek *gal*.

Do widmowego badania t. zw. lekkich metali wystarcza płomień lampki Bunsena; źródło takie jest jednak za słabe, gdy chodzi o otrzymanie w stanie rozżarzonej pary metali ciężkich, jak np. cynk, miedź, srebro i t. p. W tych razach należy uciec się do potężniejszego źródła ciepła. Jeżeli widmo ciężkiego metalu ma być rzucone na ekran, wtedy zwykle używa się do tego lampy elektrycznej, dla subjektywnego zaś jego badania za pomocą przyrządu, który wkrótce opiszemy, dostateczne są zwyczajne iskry elektryczne, albo też iskry silnej maszyny indukcyjnej (poznamy ją w księdze o elektryczności), przebiegającej pomiędzy dwoma biegunami, utworzonemi z badanego metalu, przyczem cząstki tego ostatniego zostają ulotnione i rozżarzone. Widma metali ciężkich przedstawiają bardzo znaczną ilość jasnych delikatnych linii o skomplikowanem w ogóle ugrupowaniu. Ażeby rozżarzyć ciało gazowe, przepuszcza się iskry z aparatu

indukcyjnego przez szklaną rurę, zawierającą dany gaz w stanie rozrzedzonym; wtedy poczyna on świecić barwą, zależną od jego natury i to właśnie światło poddaje się badaniu widmowemu. Plücker, Hittorf i Wüllner dowiedli, że przy podobnej metodzie, jeden i ten sam gaz może dawać różne widma, jeżeli zmienia się odpowiednio jego ciśnienie oraz rodzaj elektrycznego wyładowania. Wodór np. pod powiększonem ciśnieniem i przy silnem elektrycznem wyładowaniu daje widmo ciągłe, a więc wysyła

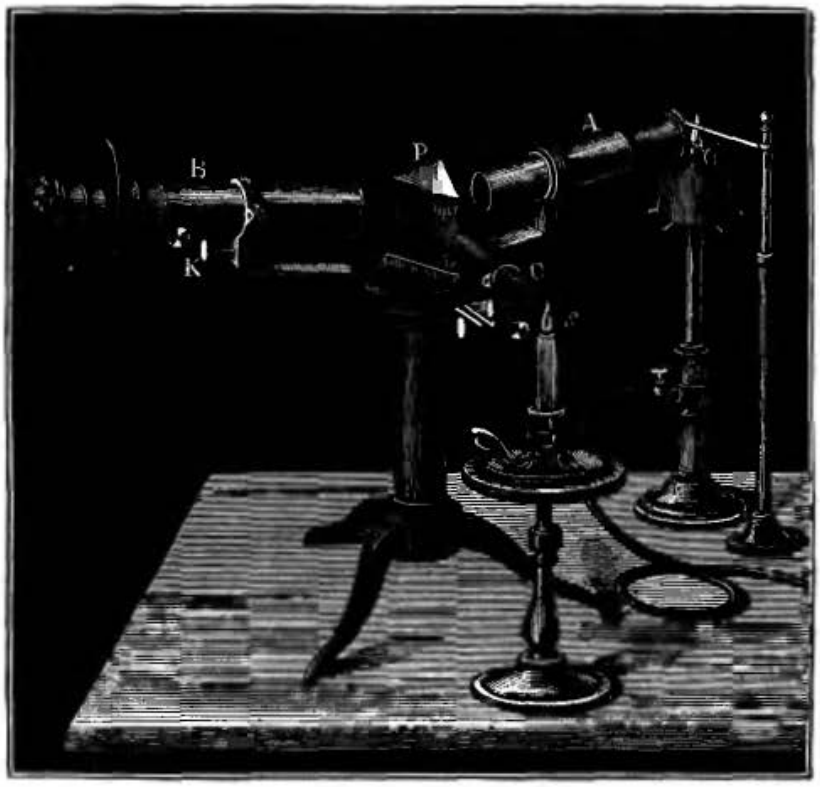


Fig. 345. Spektroskop.

promienie wszelkiej łamliwości; ma to jednak miejsce, jak widzimy, tylko przy szczególnych warunkach.

Pozostaje nam jeszcze opisać przyrząd, ułatwiający badanie oraz porównywanie widm rozmaitych źródeł światła, znany pod nazwą *spektroskopu*. Przedstawiony on jest w całości na fig. 345. Składa się z pionowo ustawionego pryzmatu *P*, wokoło którego umieszczone są w różnych kierunkach trzy lunety *A*, *B* i *C*. Z tych pierwsza posiada na tylnym końcu, zwróconym do źródła światła mającego być badanem, wązką pionową szczelinę, która

wypada w ognisku głównem soczewki zbierającej, umieszczonej na drugim końcu tejże lunety. W ten sposób promienie świetlne, które przeszły przez szczelinę, padają jako równoległe na pryzmat, ten zaś rozszczepia je i zwraca w kierunku drugiej lunety *B*. Przez tę ostatnią obserwuje się widmo; ponieważ obraca się ona w płaszczyznie poziomej, wokoło pionowej osi, przechodzącej przez pryzmat, można ją przeto dowolnie skierowywać na różne części obrazu widmowego; guzik *K* służy do dokładniejszego jej ustawienia. Przy badaniach spektroskopicznych nadzwyczaj ważnem jest—jak zresztą czytelnik sam mógł się przekonać—oryentowanie się co do położenia w widmie pewnych jasnych i ciemnych linii. Umożliwia to właśnie trzecia luneta *C*: na tym jej końcu, który jest odwrócony od pryzmatu, znajduje się w *s* mała fotografowana skala o bardzo drobnych przezroczystych podziałkach, na drugim zaś umieszczona jest w odległości ogniskowej od skali soczewka zbierająca. Skalę tę oświeca się lampą lub świecą, której promienie, po wyjściu z lunety *C*, biegną równolegle do jej osi, poczem padają na przednią powierzchnię odpowiednio ustawionego pryzmatu tak, że odbijając się odeń, wpadają do lunety *B*. Dzięki takiemu urządzeniu, przez lunetę *B* widzi się jednocześnie powiększony obraz skali i badane widmo; w ten sposób można odnosić jasne lub ciemne linie tego ostatniego do właściwych miejsc na skali. Opisany spektroskop nie pozwala rozpatrywać badanego źródła światła w kierunku prostej linii, wskutek bowiem odchylania promieni przez pryzmat, luneta *A* musi także stanowić pewien kąt z lunetą *B*. Od niedogodności tej są wolne t. zw. *spektroskopy prostolinijne* (à vision directe), w których zamiast pojedyńczego pryzmatu znajduje się układ pryzmatyczny bez odchylenia (patrz str. 507). Do bardzo ścisłych badań nad widmem różnych metali oraz słońca, opisanych w poprzednim §, spektroskop o jednym pryzmacie

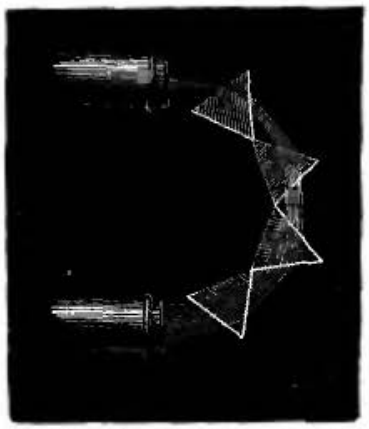


Fig. 346. Spektroskop o czterech pryzmatach, użyty przez Kirchhoffa.

nie wystarcza, a to z powodu zbyt słabej jego zdolności rozszczepiającej. Kirchhoff, chcąc wykonać dokładny rysunek tych widm, użył do tego silnie rozszczepiającego spektroskopu o czterech pryzmatach, odpowiednio umieszczonych jeden za drugim (fig. 346, str. 521) i zaopatrzonego w bardzo znacznie powiększającą lunetę. Tak zmodyfikowany przyrząd uwidocznił nowe *linie, grupy zaś ich, przedstawiające się w słabszych spektroskopach* jako prążki o niewyraźnych brzegach, rozpadły się na oddzielne delikatne linie, jak to np. ma miejsce ze znaną nam już podwójną linią Fraunhofera *D*. Spektroskop ten umożliwił także wykonanie doskonałych rysunków widma słonecznego (Kirchhoff, Hofman, Angström, Thalen), które mają również doniosłe znaczenie dla analizy spektralnej słońca i innych ciał niebieskich, co astronomiczne karty dla badań gwiaździstego nieba.

ROZDZIAŁ VIII.

Pochłanianie światła.

§ 1. *Barwy ciał.*

Czytelnik przypomina sobie, że w widmie słonecznem, oprócz ciemnych linii, pochodzących od pochłaniającego działania rozżarzonych par chromosfery, istnieją jeszcze takie, które tworzą się *wskutek absorbcyi pewnych promieni przez atmosferę* ziemską, a głównie przez zawarte w tej ostatniej pary wodne. Fakt ten dowodzi, że ciała lotne mogą powodować ciemne linie absorbcyjne nietylko wtedy, gdy są w stanie rozżarzonym, lecz także przy innych znacznie niższych temperaturach. Że tak jest w istocie, pokazują również liczne doświadczenia, z których przytoczymy tutaj kilka. Przez odpowiednią szklaną rurkę, zawierającą pary *jodu* o pięknej fioletowej barwie, przepuszcza się światło elektryczne, które następnie, rozszczepione w pryzmacie, tworzy na ekranie widmo. To ostatnie nie jest wtedy ciągłe, lecz przedstawia znaczną ilość ciemnych linii, w niektórych miej-

scach bardzo gęsto skupionych (patrz tablicę widmo № 11); pochodzą one oczywiście od pochłaniającego wpływu jodu i odpowiadają dokładnie jasnym liniom w widmie rozżarzonej pary tego pierwiastku. Dlatego właśnie, że jod w stanie pary pochłania promienie pomarańczowe, żółte i zielone, przepuszcza zaś czerwone i fioletowe, wydaje się on barwy mieszanej, przedstawiającej się dla oka jako fioletowa. W podobny sposób barwy innych przezroczystych ciał, tak stałych jak i ciekłych, znajdują objaśnienie swe w najrozmaitszej ich zdolności pochłaniania pewnych promieni światła. Jeżeli na drodze promieni słonecznych, lub w ogóle białych, umieścimy odpowiednio rozcieńczony wodny roztwór krwi, wtedy w odnośnem widmie znika fiolet, w częściach zaś żółtej i zielonej, pomiędzy liniami *D* i *E*, pojawiają się dwie szerokie ciemne smugi. Barwa krwi nie jest jednorodna, lecz składa się z wszystkich tych promieni białego światła, które przechodzą przez krew, nie uległszy pochłonięciu. Nieznaczna nawet chemiczna zmiana krwi powoduje odpowiednią zmianę w jej widmie, z czego korzysta fizyologia oraz medycyna sądowa. W wypadkach np. otrucia tlenkiem węgla lub kwasem pruskim, zmienione widmo krwi daje niezawodne wskazówki; chcąc je zbadać, należy tylko wodny roztwór krwi, przypuszczalnie zatrutej, wprowadzić do szklanego naczynia o ścianach równoległych i naczynie to umieścić przed szczeliną spektroskopu.

Wiadomo, że zielona barwa roślin zależy od t. zw. *chlorofilu*, zawartego w ich komórkach. Otóż spektroskopiczne badanie roztworu alkoholowego tego barwnika pokazuje, że pochłania on bardzo silnie część promieni czerwonych oraz słabiej niektóre promienie pomarańczowe, żółte i zielone, dla niebieskich zaś i fioletowych jest prawie zupełnie nieprzezroczysty. Zielona barwa chlorofilu jest tedy mieszaniną tych wszystkich promieni z białego światła, które on swobodnie przepuszcza. Pochłanianie światła zależy także od grubości warstwy lub stopnia koncentracyi substancyi, przez którą ono w danym razie przechodzi: gdy jedna albo druga wzrastają, linie absorbcyjne tejże substancyi stają się szersze oraz ciemniejsze, albowiem coraz to nowe

promienie ulegają pochłonięciu. To nam objaśnia, dlaczego jedno i to samo ciało, zależnie od swej grubości, może przedstawiać różne barwy. Tak np. woda, która w małych ilościach jest bezbarwna, przy znacznej grubości może wydać się niebieską; szkło z przymieszką tlenku kobaltu posiada barwę ciemnoniebieską lub niebiesko-białą, zależnie od tego, czy mamy przed sobą bardzo grubą, albo też cienką jego warstwę. Podobnie i ciałka krwi, badane oddzielnie pod mikroskopem, mają barwę nader słabo czerwoną, w większej zaś masie nadają krwi mocno czerwony kolor. Odpowiednio gruba warstwa roztworu chlorofilu przepuszcza tylko ciemno-czerwone promienie i taką też barwę przedstawia on w tych warunkach.

Jeżeli widmo słoneczne lub elektryczne rzucimy na biały papierowy ekran, przekonamy się, że wszystkie barwy rysują się na nim z jednakową wyrazistością; przeciwnie gdy to samo widmo otrzymamy np. na papierze czerwonym, wtedy barwy: żółta, zielona, niebieska i fioletowa znikną prawie zupełnie, czerwona zaś i pomarańczowa będą posiadały tę samą wyrazistość, co na ekranie białym. Dowodzi to, iż papier czerwony pochłania z padającego nań światła wszystkie promienie, oprócz czerwonych i pomarańczowych, które zostają przezeń nieprawidłowo odbite czyli rozproszone (patrz str. 447). Podobne doświadczenia, wykonywane z papierem żółtym, zielonym, niebieskim i t. d. pokazują, że każdy z nich pochłania inne części widma, a barwa jego, rozpatrywana przy dziennem świetle, stanowi zawsze mięszaninę wszystkich tych promieni, które w danym wypadku ulegają odbiciu. Papier biały odrzuca wszystkie promienie, wchodzące w skład białego światła, w jednakowym stopniu; to znaczy, że nie posiada on żadnej przeważnej zdolności pochłaniania tych lub owych promieni. Powierzchnia *szara* w jednakowym, nader słabym stopniu odbija promienie wszelkiej barwy, *czarna* zaś posiada tę właściwość, że pochłania wszystkie padające na nią promienie. Widzimy tedy, że barwy ciał, rozpatrywanych w świetle przechodzącem lub też odbitem, znajdują zawsze swe objaśnienie w zdolności pochłaniającej tychże ciał i że stanowią że tak powiemy, tę resztę światła, która nie została zabsorbowaną.

Jeżeli na białe ciało padają np. tylko promienie żółte, wtedy wydaje się ono zabarwionem na żółto; podobnie uważamy je za ciało czerwone, zielone lub niebieskie w razie, gdy oświecają je promienie jednej z tych barw. Ciało zaś czarne pozostaje takiem, niezależnie od barwy padającego nań światła. Wreszcie gdy ciało posiada jednę z barw widma słonecznego, np. czerwoną, wtedy będąc oświecone przez promienie czerwone albo białe, jaśnieje w pełnym blasku, przy oświeceniu zaś przez jakiekolwiek inne promienie, np. żółte, wydaje się czarnem. Doświadczenia te należy wykonywać w przyciemnionym pokoju, dla usunięcia wpływu dziennego światła. Rzecz oczywista, że każde ciało, badane w świetle przechodzącem lub odbitem, może przedstawiać tylko tę barwę, jaka jest zawarta w źródle oświecającem. Musimy wszakże zauważyć, że w większości wypadków, barwa ciał nie jest do tego stopnia wyłączną, ażeby wszystkie promienie, oprócz tych, które zgadzają się z nią, zostały absolutnie pochłonięte; zwykle ciało odrzuca jeszcze promienie innych barw, jakkolwiek nader słabo. Otóż jeżeli padają nań promienie jego własnej barwy, wtedy jest ono najbardziej widoczne, nie znika jednak w oświeceniu innej barwy, lecz przedstawia się tylko daleko mniej jasno. Dlatego też ciała w wypadkach, gdy są wystawione na działanie promieni, których barwa nie zgadza się z ich własną, nie są zupełnie czarne. Jednorodne oświecenie nie pozwala więc w ogóle rozróżniać świetności barw, a uświadamia nam tylko stopniowania w jasności. Gdyby, jak powiada Lomel, słońce stanowiło kulę z rozżarzonego sodu, cała ziemia nasza, wraz ze wszystkiemi znajdującemi się na niej tworami, miałaby jednostajny ponury wygląd. Białe światło słoneczne, zawierające nieskończoność barwnych odcieni, jest tym naturalnym czarodziejem, który przyobleka otaczające nas przedmioty w różnobarwne ich szaty. Światło świecy lub gazu oświetlającego zawiera te same promienie, co i słoneczne, lecz w innym nieco ilościowym stosunku: w pierwszem znajduje się bardzo wiele promieni żółtych, a także zielonych, daleko zaś mniej niebieskich i fioletowych, aniżeli w drugiem. To nam tłómaczy, dlaczego przy świecy trudno jest odróżnić materyę zieloną od

niebieskiej. Ciała bowiem zielone odbijają przeważnie promienie zielone i niektóre niebieskie; przeciwnie ciała niebieskie odbijają szczególniej promienie tejże barwy, a także nieco zielonych. Ponieważ tedy światło świecy zawiera mało niebieskich i dużo zielonych promieni, to materye o dwóch tych barwach, oświecone przez nią, muszą wydawać się zielonemi.

W końcu dodamy jeszcze, że barwy ciał bardzo rzadko zgadzają się z odpowiedniemi barwami widma słonecznego, albowiem pierwsze są, jak wiemy z powyższego, złożone z kilku różnych odcieni i ulegają dalszemu rozszczepieniu. Należy tylko patrzyć przez pryzmat na jakikolwiek barwny przedmiot, np. na kwiatek lub kawałek materyi, ażeby przekonać się, że brzegi obrazu, równoległe do krawędzi pryzmatu, przedstawiają grę barw widmowych.

§ 2. Fluorescencya. Fosforescencya.

Rozpatrzmy obecnie wpływ, jaki absorbowane promienie wywierają na samo ciało pochłaniające. W tym celu rzućmy wiązkę białego światła najprzód na soczewkę zbierającą, a następnie na szklane naczynie (fig. 347), zawierające np. bezbarwny wodny roztwór eskuliny — substancyi, znajdującej się w korze kasztana. Niechaj odległość naczynia od soczewki będzie nieco mniejsza, niż jej odległość ogniskowa. Promienie, po wyjściu z soczewki, tworzą stożek, część którego wypada wewnątrz roztworu; otóż ta właśnie jego część poczyna łagodnie, lecz wyraźnie świecić piękną niebieską barwą, co wskazuje, że cząstki eskuliny, znajdujące się na drodze przechodzących promieni, stają się samodzielnem źródłem światła. To ostatnie jest najsilniejsze tuż przy ścianie naczynia, głębiej zaś traci szybko na intensywności.

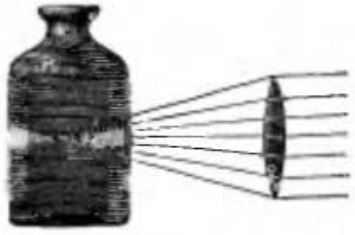


Fig. 347. Zjawisko fluorescencyi.

Znaczna ilość ciał przezroczystych—stałych i ciekłych, posiada podobną zdolność świecenia pod wpływem zewnętrznych

promieni. Zjawisko to nosi nazwę *fluorescencyi*, zostało bowiem po raz pierwszy zauważone u pewnej odmiany fluspatu (fluorek wapnia), która, będąc sama przez się zieloną, w pewnych warunkach poczyna świecić niebiesko-fioletową barwą. Zdolność fluoryzowania w wysokim bardzo stopniu posiadają także, między innemi, następujące ciała: szkło zabarwione na żółto przez uran i w ogóle związki uranowe, roztwór siarczanu chininy, alkoholowy roztwór chlorofilu, nafta i t. d.; siatkówka oka w świeżym stanie przedstawia także słabą fluorescencyę (Helmholtz, Sieczenow). Metale zaś, również jak i węgiel, kwarc i t. p. są pod omawianym tutaj względem zupełnie nieczynne. Zauważymy jeszcze, że światło, wysyłane wskutek fluorescencyi, jest zawsze zabarwione, barwa zaś jego zależy od substancyi, przez którą w danym razie przechodzą promienie; jest ona niebieską dla siarczanu chininy, jasno-zieloną dla szkła uranowego, czerwoną dla chlorofilu, niebieską dla nafty i t. d. Zmodyfikujmy obecnie powyższe doświadczenie w taki sposób, ażeby owa wiązka białego światła, zanim jeszcze dosięgnie soczewki, przeszła przez naczynie o ścianach równoległych i zawierające taki sam zupełnie roztwór eskuliny, jak to, które znajdujo się po za soczewką. Światło, wychodzące z tej ostatniej pod postacią stożka zdaje się być niezmienione, z zachowania się jego po wejściu do drugiego roztworu eskuliny przekonywamy się jednak, iż nie posiada ono już więcej zdolności wywołania w nim fluorescencyi. Inaczej mówiąc, światło, które raz już przeszło przez roztwór eskuliny (to samo stosuje się do innych ciał fluoryzujących), traci wskutek absorbcyi te promienie, które mogą wywołać fluorescencyę takiegoż roztworu. Podobne doświadczenia, wykonane z innemi fluoryzującemi ciałami, dały rezultaty zupełnie analogiczne, które w ogóle można wyrazić w następującej formie: *ciała, zdolne do fluorescencyi, zostają doprowadzone do stanu tego przez te promienie, które zostają przez nie pochłonięte.*

Fluorescencya danego ciała zależy więc od składu padającego nań światła tak, że nie wszystkie promienie mogą spowodować to zjawisko. Przekonano się, że ażeby to uczynić, muszą one w każdym razie posiadać łamliwość większą, albo przynaj-

mniej równą łamliwości tych promieni, które mają pojawić się dzięki fluorescencyi. Naprzykład siarczan chininy lub szkło uranowe, oświecone przez promienie czerwone, pomarańczowe albo żółte, nie fluoryzują wcale, albowiem światło fluorescencyjne, jakie ciała te są w stanie wydawać, składa się z promieni o łamliwości większej, niż wyżej wymienione. Przeciwnie chlorofil fluoryzuje w czerwonej barwie, niezależnie od rodzaju padających nań promieni. Odnośna metoda badania polega na tem, że rzuca się widmo słoneczne lub elektryczne na ścianę przezroczystego naczynia, zawierającego dane ciało i obserwuje, w którem mianowicie miejscu powstaje fluorescencya. Jeżeli np. mamy do czynienia z roztworem eskuliny, to przekonywamy się, że część widma, począwszy od czerwieni aż do ciemnego błękitu, nie wywiera nań żadnego wpływu; dopiero w blizkości ciemnej linii *G* pojawia się w roztworze owo niebieskie światło, ciągnące się nietylko wzdłuż całego fioletu widma, lecz widoczne jeszcze po za nim na odległości prawie równej długości widma, otrzymanego w zwykłych warunkach. Dowodzi to, że po za fioletowemi promieniami znajdują się jeszcze inne, bardziej od nich łamliwe, których okiem dostrzedz nie możemy; nazywamy je *ultra-fioletowemi*. Jeżeli na drodze tych ostatnich promieni umieszczamy substancyę fluoryzującą, jak np. w powyższym wypadku eskulinę, albo też siarczan chininy, ciała te poczynają fluoryzować we właściwej barwie, zdradzając przez to dla oka obecność promieni ultra-fioletowych. Gdy do doświadczeń tych używa się światła słonecznego, wtedy i w części ultra-fioletowej jego widma, rzuconego na substancyę fluoryzującą, można dostrzedz mnóztwo ciemnych linii, bezsprzecznie zależnych od słońca, albowiem nie pojawiają się one nigdzie w widmie np. elektrycznem, w słonecznem zaś występują zawsze, niezależnie od użytej substancyi fluoryzującej.

Promienie ultra-fioletowe można zresztą zobaczyć i bez udziału ciał fluoryzujących, należy tylko starannie zasłonić część widma, od linii *B* aż do *H*. Barwa ich przy słabszem świetlnem natężeniu jest ciemno-niebieska (błękitna), przy silniejszem zaś— niebiesko-szara; w zwyczajnych warunkach nie widzimy ich dla-

tego, że wywierają na oko wrażenie o wiele słabsze, niż mniej łamliwe promienie widma, zawarte między liniami *B* i *H*. W ogóle promienie o znacznej łamliwości, posiadające w wysokim stopniu zdolność wywoływania fluorescencyi, nie we wszystkich źródłach światła zawarte są w jednakowym stosunku. Szczególniej obfituje w nie światło, otrzymywane przy przepuszczaniu prądu elektrycznego przez szklaną t. zw. rurkę Geisslera, napełnioną np. rozrzedzonym azotem. W razie gdy wewnątrz znajduje się także pewna liczba kulek ze szkła uranowego, cała rurka, pod wpływem przebiegającego prądu, przedstawia wspaniałe zjawisko: azot świeci barwą czerwonawo-fioletową, kule zaś uranowe fluoryzują w pięknej jasno-zielonej barwie (patrz tablicę chromolitografowaną: „światło elektryczne w rozrzedzonych gazach“, № 4). Zwykłe elektryczne światło również zawiera dużo promieni o wielkiej łamliwości, a nawet ultra-fioletowa część jego widma jest dłuższa, niż słonecznego; dlatego też światło to nadaje się tak dobrze do doświadczeń nad fluorescencyą. Przeciwnie płomień świecy lub gazowy okazuje się w tym wypadku prawie zupełnie nieczynnym dlatego, że jest ubogi w promienie rzeczonego rodzaju. Nie należy wszakże sądzić, że tylko najbardziej łamliwe promienie mogą wywołać zjawisko fluorescencyi. Tak np. widzieliśmy wyżej, że roztwór chlorofilu fluoryzuje już pod wpływem promieni czerwonych, począwszy od linii *B*; okazuje się nawet, że ze wszystkich części widma, środkowo-czerwone promienie, między liniami *B* i *C*, powodują w danym razie najżywszą fluorescencyę. Jako drugi przykład można podać alkoholowy roztwór pewnego barwnika anilinowego (Rose de Magdala). który przy dziennem nawet świetle silnie fluoryzuje w barwie pomarańczowo-żółtej; rzucając na naczynie, roztwór taki zawierające, widmo, przekonywamy się, że fluorescencya jego poczyna się już w czerwieni i że jest najsilniejsza w części zielono-żółtej. Najbardziej łamliwe promienie fioletowe i ultra-fioletowe z tego głównie względu zasługują tutaj na uwagę, że mogą wywołać fluorescencyę wszystkich tych znanych ciał, które w ogóle są zdolne do tego zjawiska.

Fluorescencya ciał trwa tak długo, dopóki działa zewnętrzne padające na nie światło; z chwilą usunięcia tego ostatniego, znika także samo zjawisko. Wyjątki od tego prawidła są tak nieliczne i małoznaczące, że możemy je pominąć. Lecz istnieje pewna grupa ciał, które, znajdując się przez pewien czas pod wpływem zewnętrznego źródła światła, świecą jeszcze po usunięciu tego ostatniego w ciemności. Do takich należą np. połączenia siarki z wapniem, strontem i barem, przedstawiające się pod postacią białych proszków. Zawarte w szklanych rurkach i umieszczone w ciemnym pokoju, ciała te nie okazują najmniejszego śladu świecenia, lecz gdy na kilka chociażby chwil oświecimy je białem światłem palącego się magnezu, które następnie oddalimy, owe białe proszki poczną świecić w ciemności, każdy inną barwą. Ciała te możemy także umieścić w rurkach Geissler'a, a następnie przepuszczać przez te ostatnie prąd elektryczny; po przerwaniu prądu zobaczymy, że owe ciała świecą w ciemnym pokoju (patrz przytoczoną wyżej tablicę № 2 i № 5). Zjawisko to nazywamy *fosforescencyą*. Do substancyj silnie fosforyzujących należą, oprócz wymienionych, dyament, spat wapienny, chlorofan (pewna odmiana fluspatu), jedwab, cukier oraz związki uranu. Z promieni widma, bardziej łamliwe posiadają w wysokim stopniu zdolność wywoływania fosforescencyi, przyczem przekonano się, że i w tym wypadku, podobnie jak przy fluorescencyi, czynią to właśnie te promienie, które przez daną substancyę zostają pochłonięte. Światło fosforencyjne, tak samo jak fluorescencyjne, składa się z promieni o mniejszej łamliwości, niż powodujące odnośne zjawisko światło zewnętrzne. Co zaś do promieni mniej łamliwych, zawartych pomiędzy liniami *A* i *F*, to na zasadzie pewnych faktów, odkrytych przez Becquerel'a, należy przypuścić, iż one nietylko nie są w stanie wywołać fosforescencyi, lecz zdają się nawet niweczyć wpływ bardziej łamliwych promieni. Jak widzimy, istnieje wielkie podobieństwo pomiędzy dwoma szeregami zjawisk, opisanemi w niniejszym §; właściwie mówiąc, *fosforescencya jest tylko fluorescencyą, trwającą dłużej, niż działanie zewnętrznego pobudzającego źródła.*

Becquerel przeprowadził bardzo rozległe doświadczenia nad fosforescencyą; posiłkując się wynalezionym przez siebie przyrządem, t. zw. fosforoskopem, odkrył on, że prawie wszystkie ciała są zdolne do fosforescencyi, wyjątek stanowią tylko metale. Podczas jednak gdy pewne substancye, jak np. wspomniane wyżej siarki wapnia, strontu i baru świecą fosforycznym blaskiem w ciągu wielu godzin, u innych natomiast ciał zjawisko to trwa bardzo krótko, jak np. u platyno-cyanku potasu, który świeci nie dłużej, jak $^1/_{500}$ sekundy.

Musimy jeszcze nadmienić o pewnej grupie objawów, mylnie zaliczanych do zjawisk fosforescencyi, a powstających wskutek zupełnie innej przyczyny. Mamy tu na myśli świecenie starego próchniejącego drzewa, niektórych istot żyjących, jako to: rorobaczka świętojańskiego, zieminka świecącego i wielu morskich zwierząt; do tych ostatnich należą meduzy, mięczaki, polipy, wymoczki, robaki obrączkowe i t. d., od nich też zależy świecenie morza. Większość świecących istot wydziela pewnego rodzaju śluz i ta to właśnie substancya wysyła promienie świetlne; u niektórych zaś istnieje specyalny organ, zawierający substancyę tłuszczową, która świeci. Zjawiskom tym towarzyszą prawdopodobnie jakieś procesy chemiczne; nowsze poszukiwania każą przypuszczać, że w wielkiej liczbie wypadków, świecenie zwierząt zależy od powolnego utleniania się tłuszczów, zawartych w ich tkankach.

§ 3. Chemiczne działanie promieni. Fotografia.

Wpływ promieni świetlnych nie ogranicza się na wywoływaniu w ciałach przejściowych tylko powyżej opisanych zmian. Istnieje mianowicie szereg ciał, na które światło działa tak energicznie, że powoduje łączenie się ich z innemi ciałami, albo też ich rozkład, to jest światło wywołuje także stałe zmiany chemicznych własności materyi. Jeżeli mięszaninę dwóch równych objętości gazów chloru i wodoru pozostawimy w ciemnym pokoju, gazy te nie połączą się wcale; gdy natomiast wystawimy ją na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, połączenie nastąpi natychmiastowo i z wybuchem, przyczem utworzy się nowe ciało

lotne—chlorowodór, którego wodny roztwór znany jest jako kwas solny. Pod wpływem światła, chlor rozpuszczony w wodzie, rozkłada tę ciecz na jej składniki t. j. na wodór i tlen i łączy się z pierwszym; barwnikowe substancye roślinne, wystawione na działanie promieni słonecznych, ulegają odbarwieniu i na tem też polega bielenie materyj. Jednym z najważniejszych także przykładów chemicznego działania światła jest wpływ jego na sole srebra, jak na chlorek lub jodek srebra, które będąc oświecone, przybierają z początku barwę fioletową, następnie czarną, ulegając przytem rozkładowi i wydzielając srebro pod postacią nadzwyczaj subtelnego czarnego proszku; na tej własności soli srebra opartą jest sztuka fotograficzna, o której zaraz pomówimy. Musimy jeszcze nadmienić, że w wielu razach najsilniejsze chemiczne działania wywierają promienie najbardziej łamliwe, a mianowicie niebieskie, fioletowe i ultrafioletowe. Gdy np. w powyższem doświadczeniu z mieszaniną chloru i wodoru, umieścimy na drodze światła żółte szkło, przepuszczające tylko mniej łamliwe promienie, wybuch nie nastąpi, otrzymamy go zaś natychmiast, jeżeli szkło żółte zastąpimy niebieskiem. Doświadczenia pokazały również, że tylko bardziej łamliwe promienie wywierają chemiczny wpływ na owe sole srebra tak, że promienie te można nazwać *fotograficznemi*. Często także zowią je chemicznemi, przez to jednak mogłaby się nasunąć myśl, że tylko one posiadają własność chemicznego działania, odróżniającą je od innych promieni widma, co nie jest słusznem. Wspomniany wpływ ich naprzykład na sole srebra, którego nie posiadają mniej łamliwe promienie, polega na tem, że sole te pochłaniają właśnie promienie niebieskie, fioletowe i ultrafioletowe, przepuszczają zaś pozostałe. Przez dodanie do bromku srebra pewnych anilinowych barwników, udało się uczynić sól tę chemicznie, względnie fotograficznie, wrażliwą także na promienie czerwone, żółte i zielone. Wreszcie doświadczenia z różnobarwnem światłem wykazały, że mniej łamliwe promienie najskuteczniej wpływają na nader ważny proces chemiczny, odbywający się w zielonych częściach roślin i polegający na tem, że pochłonięty z powietrza kwas węglany (połączenie węgla

z tlenem) pod wpływem światła ulega tam rozkładowi, przyczem węgiel zostaje zasymilizowany, tlen zaś wraca do atmosfery.

Zwróćmy się obecnie do wspomnianego wyżej zastosowania chemicznego wpływu światła, do fotografii.

Czytelnik przypomina sobie, że na tylnej ściance (patrz fig. na str. 479) ciemni optycznej można otrzymać obrazy przedmiotów, umieszczonych przed tym przyrządem. Obrazy takie trwają jednak tylko dopóty, dopóki światło, wchodzące przez otwór do przyrządu, pada na tafelkę. Od czasu odkrycia ciemni optycznej, wielu badaczów usilnie się też starało wynaleźć sposób utrwalenia tych obrazów; nareszcie Niépce i Daguerre zdołali zadanie to rozwiązać. Pierwszy z nich oddawał się cierpliwie poszukiwaniom, począwszy od roku 1814 do 1829; udało mu się otrzymać na miedzianej płycie, pokrytej srebrem, trwałe obrazy, nie zmieniające się już pod wpływem światła i dokładnie odpowiadające pod względem światłocieni samym przedmiotom. Substancyę, wrażliwą na działanie promieni świetlnych, stanowił pewien rodzaj smoły, rozpuszczonej w oleju lawendowym i jako cienka warstwa jednostajnie rozprowadzonej na owej płycie metalowej. Gdy płytę tak przygotowaną umieszczano w ciemni optycznej, po pewnym czasie pojawiały się na niej słabe kontury obrazu; chcąc je uczynić wyraźniejszemi, Niépce zanurzał płyty w mieszaninę oleju lawendowego i nafty, przyczem zauważył, że te części smoły, które poprzednio wystawione były na działanie światła, pozostawały w mięszaninie prawie niezmienione, podczas gdy inne szybko się rozpuszczały, obnażając w odpowiednich miejscach powierzchnię metalową. Opisany tylko co sposób otrzymywania trwałych obrazów wymagał działania promieni w ciągu 10—12 godzin, nie mógł więc wcale być stosowany na szerszą nieco skalę. W r. 1829 Niépce przedstawił rezultaty swych badań Daguerre'owi, który ze swej strony od dawna zajmował się tą samą kwestyą i wynalazł sposób zdejmowania obrazów, znany dopiero jednak od r. 1839 pod nazwą *daguerrotypii;* jakkolwiek obecnie sposób ten wyszedł zupełnie z użycia, zasługuje jednak na wzmiankę ze względów historycznych. Oto w krótkości zasady daguerrotypii. Płytę miedzianą, pokrytą srebrem, poddaje

się przez pewien czas działaniu par jodu, dopóki nie przyjmie ona odcienia złotawo-żółtego, to jest dopóki nie utworzy się na niej warstwa jodku srebra; przez to płyta staje się wrażliwą na światło, którą to wrażliwość jeszcze można spotęgować, wystawiając ją na działanie par bromu. Płytę tak przygotowaną umieszcza się w odpowiedniej ciemni optycznej, zaopatrzonej w objektyw o dwóch achromatycznych soczewkach, które mają mniejszą odległość ogniskową i pozwalają światłu szybcej działać, aniżeli objektyw pojedyńczy w zwykłej ciemni optycznej. Światło wywiera wtedy właściwy swój wpływ i na płycie tworzy się niedostrzegalny obraz oświeconego przedmiotu, umieszczonego przed soczewką. Przeciąg czasu, przez jaki światło w takich warunkach powinno działać, zależy od jego natężenia, od objektywu oraz od sposobu przygotowania płyty; waha się on pomiędzy 3 i 30 minutami. Po wyjęciu płyty—którą należy wtedy starannie ochraniać od dalszego wpływu światła—nie dostrzega się na niej najmniejszego śladu obrazu. Ten ostatni występuje wyraźnie dopiero wtedy, gdy poddaje się płytę działaniu par rtęciowych, osadzających się na tych jej częściach, które przedtem uległy wpływowi światła; tutaj tworzy się amalgamat srebra i rtęci, stanowiący jasne części obrazu, pozostałe zaś części, na których osadza się srebro w stanie nadzwyczaj rozdrobnionym, są ciemne. Klisza, w podobny sposób otrzymana, mogłaby bardzo szybko uledz starciu i dlatego należy ją utrwalić. W tym celu, po starannem obmyciu podsiarkonem sodu, poddaje się ją działaniu mięszaniny tegoż ciała i chlorku złota i ogrzewa z dołu za pomocą silnej lampy. Na całej powierzchni tworzy się wtedy cienka warstwa złota, która znacznie wzmacnia rysunek i w ogóle ochrania go od wszelkich przypadkowych zmian.

Daguerrotypia przedstawiała bardzo wiele złych stron. Po pierwsze klisze jej były dość ciężkie, co dawało się szczególnie uczuwać w podróży, a przytem były drogie; dokładne rozpatrzenie obrazu, z powodu odbijania się w nich światła, stanowiło pewną trudność tak, że należało im zawsze nadawać pewne określone położenie względem padających na nie promieni. Wreszcie otrzymywało się zwykle tylko jeden obraz, a gdy z tego samego

przedmiotu chciano ich mieć większą ilość, musiano za każdym razem powtarzać całą powyższą operacyę. Dlatego też gdy odkryto sposób otrzymywania fotografii na papierze, powitano go jako nader znaczny postęp w nowej sztuce. Podobnie jak nazwiska Niépce'a i Daguerre'a związane są z pierwotnem odkryciem sposobu otrzymywania trwałych obrazów na kliszach metalowych, tak też nazwiska Talbot'a oraz Blancquard-Evrard'a ściśle łączą się z wynalazkiem klisz papierowych. Fotografia na papierze obejmuje dwie główne czynności: rezultatem pierwszej jest tak zwany *negatyw*, t. j. obraz, którego jasne części odpowiadają ciemnym częściom fotografowanego przedmiotu; podczas drugiej czynności negatyw służy do utworzenia *pozytywnego* obrazu, w którym światłocienie są znowu względem negatywu odwrócone, a więc idą w tym samym porządku, co i na fotografowanym przedmiocie. Sposób Talbot'a, ulepszony znacznie przez Blancquard-Evrard'a, polega na następującem: ćwiartkę cienkiego jednorodnego i ścisłego papieru należy jedną jej powierzchnią zetknąć z roztworem azotanu srebra, tak jednak, ażeby zetknięcie było dokładne i ażeby powierzchnia przeciwna nie została zmoczona. Po kilku minutach odejmuje się papier, rozciąga go na szkle i suszy w ciemności; zupełnie zaś wysuszony zanurza w roztwór jodku potasu i bromku potasu; zachodzi wtedy podwójna chemiczna reakcya, wskutek której tworzą się dwa wrażliwe na światło ciała, a mianowicie jodek srebra i bromek srebra, któremi papier nawskroś nasiąka. Jeżeli tak przygotowany papier fotograficzny zostaje użyty w stanie mokrym, obraz tworzy się na nim w dość krótkim czasie, co przedstawia wielką dogodność, gdy chodzi o zdjęcie fotografii istot żyjących. Papier suchy musi natomiast dłużej być wystawiony na działanie światła, za to jednak można go brać ze sobą w podróż i nadaje się on bardzo dobrze do zdejmowania obrazów widoków natury, pomników i t. p. przedmiotów. Po wyjęciu takiej kliszy z ciemni optycznej nie można nic dostrzedz na jej powierzchni, podobnie jak i na płytach Daguerre'a; obraz występuje dopiero pod działaniem pewnych czynników, jak np. kwasu gallusowego, albo lepiej pyrogallusowego, w roztwór którego na-

leży zanurzyć papier. Organiczny ten kwas (jeden lub drugi) działa na sole srebra we wszystkich tych miejscach, na które działało światło i tutaj też tworzy się połączenie kwasu ze srebrem, o bardzo ciemnej barwie, występującej tem wyraźniej, im silniej operowały promienie świetlne; pojawiający się *obraz jest negatywny.* W celu ochrony od dalszego wpływu światła, obmywa się papier roztworem podsiarkonu sodu lub bromku potasu, przez co zostają oddalone te części soli srebra, które nie uległy zmianie. Negatyw pozwala otrzymywać pozytywne obrazy za pomocą następującej manipulacyi: nasyca się go woskiem tak silnie, że jego miejsca niepoczernione stają się przezroczyste, następnie umieszcza na drugim fotograficznym papierze i kładzie obadwa razem pomiędzy dwie szklane tafle. Jeżeli te ostatnie wystawimy na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, albo nawet rozproszonego światła dziennego, wówczas drugi papier pozostanie jasnym w tych wszystkich miejscach, gdzie negatyw jest ciemny, a zczernieje tam, gdzie ten ostatni jest przezroczysty. Otrzymamy tedy obraz, którego światłocienie we właściwym idą porządku, a więc *obraz pozytywny;* uwidocznia się go zaś i utrwala w podobny sposób, jak i negatyw.

Fotografia na papierze znalazła wkrótce bardzo szerokie zastosowanie; wprawdzie nie dorównywa ona, pod względem delikatności rysunku, dagerrotypii, niektóre zaś szczegóły nie mogą być dokładnie uwidocznione z powodu ziarnistej budowy papieru, z drugiej jednak strony ogólny jej wygląd jest bardziej jednolity i dlatego też bywa ona głównie ceniona przez artystów. Zresztą metoda ta uległa znacznym ulepszeniom, które następowały po sobie z zadziwiającą szybkością. Pierwszy postęp polegał na zastąpieniu papieru zwyczajnego przez żelatynowany o powierzchni bardzo gładkiej; znakomitszy zaś krok naprzód został dokonany przez Niépce'a młodszego, któremu udało się przygotować klisze szklane. Warstwę wrażliwą na światło stanowi tutaj białko, odpowiednio przygotowane, zmieszane z jodkiem potasu i poddane—po uprzedniem rozprowadzeniu na szklanej płycie i wysuszeniu—działaniu azotanu srebra i kwasu octowego. Klisza taka w ciemni optycznej powinna pozostawać pod

działaniem światła w ciągu 15 do 30 sekund; obraz uwidocznia się i utrwala za pomocą kwasu gallusowego i podsiarkonu sodu. Otrzymuje się najprzód negatyw, który służy następnie do zdejmowania obrazów pozytywnych na szkle albuminowanem (to jest pokrytem białkiem), lub na papierze.

Lecz i białko zostało później zastąpione przez bardziej odpowiednią substancyę, mianowicie przez kollodium, t. j. bawełnę strzelniczą, rozpuszczoną w mieszaninie eteru i alkoholu. Sposób ten, odkryty w r. 1851 przez angielskiego fotografa Archer'a, przedstawia tę korzyść, że warstwa kollodiumowa, odpowiednio przygotowana i zmięszana z wiadomemi nam już z powyższych metod substancyami, ulega nadzwyczaj szybko działaniu światła tak, że zdjęcie jest prawie momentalne. Umożliwia to otrzymywanie fotografij osób z ich chwilowym wyrazem twarzy, a nawet przedmiotów znajdujących się w ruchu, jak np. chmur pędzonych wiatrem, fal morskich, zwierząt w biegu i t. p.

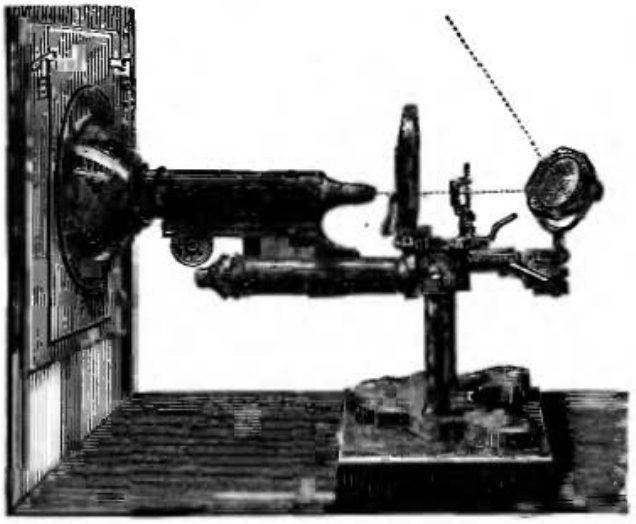


Fig. 348. Mikroskop użyty do fotografii.

Nową, bardzo ważną gałęź fotografii, zwaną *mikrofotografią*, stanowią sposoby otrzymywania powiększonych obrazów przedmiotów mikroskopijnie małych oraz bardzo drobnych obrazów przedmiotów zwykłej wielkości. Pierwsze osiąga się, gdy objektyw ciemni optycznej zastąpiony zostaje przez mikroskop; fig. 348, przedstawiająca, oprócz tego ostatniego, tylko przednią ściankę ciemni, pokazuje, jak należy się przytem urządzić. Mały dany przedmiot silnie się oświeca za pomocą odbitych od zwierciadła promieni; powiększony jego obraz pada na kliszę ciemni optycznej, gdzie w sposób zwykły zostaje utrwalony. Metoda ta daje się zastosować do wszelkich poszukiwań mikrograficznych i pozwala dokładnie zbadać rezultaty tychże; jest ona ważną

szczególnie w zastosowaniu do przedmiotów, mających znaczenie naukowe, należących np. do świata niższych roślin i zwierząt. Druga odmiana mikrofotografii — otrzymywanie maleńkich obrazów—została odkryta przez Bersch'a, następnie zaś udoskonalona przez Dagron'a, Moitessier'a i innych. Sposób ten właśnie pozwala zdejmować zaledwie dostrzegalne fotografie; przy jego pomocy można było, podczas oblężenia Paryża, wysyłać pocztą gołębią długie i obszerne depesze, fotografowane na papierze mikroskopijnych wymiarów i nieznacznego ciężaru, które następnie po odbiorze odczytywano przy pomocy słonecznego mikroskopu (patrz str. 481).

Ilość fotografij, jakie z danego przedmiotu można otrzymać, jest nieograniczona, negatyw bowiem pozwala zdejmować dowolną liczbę obrazów pozytywnych; niestety jednak te ostatnie zmieniają się z czasem, tracąc pod wpływem światła swą wyrazistość oraz dokładność, wreszcie zaś bledną zupełnie. Lecz gdyby nawet udało się nadać im trwałość, to jeszcze przedstawiałyby tę niekorzyść, iż przygotowanie ich wymaga dużo czasu i że są za drogie. Dlatego też oddawna starano się wyżej opisane metody zmodyfikować i ulepszyć w ten sposób, ażeby, zamiast zwykłej, otrzymać fotograficzną kliszę o obrazie wypukłym, z której możnaby robić odbitki, podobnie jak z miedziorytu lub kamienia litograficznego. Myśl ta zajmowała Niépce'a jeszcze wtedy, gdy odkrycie jego poczęło zaledwie kiełkować, a o urzeczywistnienie jej kusili się liczni mężowie nauki i sztuki. Fizeau pierwszy (1841) wynalazł sposób przygotowywania płyt Daguerr'a, które mogły być użyte tak, jak płyty miedziorytnicze, lecz odnośne próby, jakkolwiek godne uwagi, zostały wkrótce zarzucone, mianowicie gdy sama daguerrotypia ustąpiła miejsca fotografii na papierze i szkle. Od owego czasu wynaleziono wiele jeszcze metod, za pomocą których można przygotowywać klisze, nadające się do odbitek; z metod tych rozważymy tutaj jednę tylko, wprowadzoną przez Poitevin'a: Na jakiejkolwiek płycie pokrytej jednostajną warstwą żelatyny, najlepiej zmieszanej z dwuchromianem potasu, umieszcza się, po wysuszeniu, kliszę fotograficzną danego przedmiotu — negatywną albo

pozytywną—i wystawia na działanie bezpośredniego lub rozproszonego światła słonecznego. Można także ową płytę wystawić w ciemni optycznej na wpływ promieni od samego przedmiotu. Po pewnym czasie zanurza się ją w wodzie, gdzie wszystkie te części żelatyny, które nie uległy działaniu światła, pęcznieją, a to z powodu przenikania do nich wody, w tych więc miejscach tworzą się wyniesienia; przeciwnie woda przenika bardzo słabo do tych miejsc, na które wpływało światło tak, że tutaj płyta wydaje się wgłębioną. Wyniesienia odpowiadają tedy cieniom obrazu, wgłębienia zaś—jasnym jego częściom. W taki sposób otrzymuje się na żelatynie wypukły rysunek, który następnie, drogą zwykłej galwanoplastyki (poznamy ją w księdze o elektryczności) przenosi się na płytę miedzianą. Metoda Poitevin'a została ulepszoną po części przez niego samego, po części zaś przez innych i znalazła liczne zastosowania.

Wszystkie sposoby fotografowania, o jakich mówiliśmy dotychczas, dają obrazy wprawdzie bardzo dokładne co do zarysów oraz stopniowania światłocieni, lecz którym brak jednej bardzo ważnej cechy, mianowicie różnorodności barw. Braku tego nie udało się jeszcze w zupełności usunąć, istnieją tylko niezbyt pomyślne odnośne próby. Wollaston, Davy, Seebeck zauważyli już, że chlorek srebra nabiera i zachowuje barwę tych jednorodnych promieni, które nań padają. Doświadczenia ich podjął na nowo Becquerel: odpowiednio przygotowaną płytę, pokrytą warstwą chlorku srebra, poddawał on dwugodzinnemu działaniu widma słonecznego i otrzymał jego wizerunek. Ten ostatni przedstawiał barwę ciemno-purpurową, poprzedzającą czerwień i zależną od promieni, niewidzialnych dla oka, o których niżej pomówimy. Na przeciwnym końcu, po za linią *H*, promienie ultra-fioletowe pozostawiły długi ślad, szarawej barwy, wreszcie pośrednie części pomiędzy liniami *A* i *H*, odmalowały się we właściwych swych kolorach, przyczem maximum jasności wypadało tam, gdzie widmo słoneczne przedstawia największe natężenie świetlne. Barwa żółta była nieco blada, lecz czerwień, zieleń i fiolet wypadły bardzo pomyślnie. Barwy te w ciemności trwały przez krótki czas, przy dziennem zaś świetle znikały

bardzo szybko i Becquerel nie znalazł żadnego środka, ażeby je utrwalić. Gdy na płycie umieścił barwny obraz, otrzymał także, po dostatecznie długiem wystawieniu na światło słoneczne, barwną kopię tegoż obrazu (za pomocą roztworu siarczanu chininy zatrzymywał przytem promienie ultra-fioletowe, które mogłyby kopii tej nadać bardziej szary wygląd).

Niépce młodszy zmienił nieco ostatni sposób i zdołał również otrzymać barwne kopie obrazów. Podczas doświadczeń swych przekonał się on, że wystąpienie tej lub owej barwy zależy w bardzo znacznym stopniu od stężenia roztworu chloru, służącego do przygotowania kliszy. Przy użyciu słabego roztworu, żółtą barwę otrzymuje się najłatwiej, w miarę zaś powiększania zawartości chloru, występują także: zielona, niebieska i fioletowa, najmniej zaś łamliwe, t. j. czerwona i pomarańczowa wymagają najbardziej stężonych roztworów. Niestety rezultaty te, wysoce interesujące ze stanowiska czystej nauki, nie dały się zastosować w praktycznej fotografii, a to dlatego, że barwy owe, jak już powiedzieliśmy, istnieją na kliszy tylko tak długo, dopóki ta znajduje się w zupełnej ciemności. To samo dotyczy barw, otrzymanych na kliszy odmienną nieco metodą Poitevin'a. Dlatego też próbowano na innej drodze znaleźć rozwiązanie zajmującej nas tutaj kwestyi. Starano się przygotować każdą barwę oddzielnie i dopiero przez połączenie ich odtworzyć naturalną barwę przedmiotu, analogicznie do tego, jak postępuje się przy chromolitografii. To właśnie zadanie zostało rozstrzygnięte przez dwóch fotografów i przez jednego z nich (Ducos du Hauron'a) zastosowane w praktyce. O wiele zaś ważniejsze zadanie, a mianowicie możność otrzymywania barwnych i trwałych fotografij w sposób ściśle analogiczny do tego, jaki daje nam obecnie fotografie zwykłe, należy jeszcze do przyszłości.

Na zakończenie niniejszego rozdziału wspomnimy jeszcze w kilku słowach o innego rodzaju promieniach niewidzialnych, wysyłanych przez ciała świecące. Badając różne części widma słonecznego pod względem ich natężenia świetlnego, przekonywamy się, że to ostatnie, słabe w czerwieni, wzrasta stopniowo aż do żółtej barwy, gdzie dosięga swego maximum, poczem znów

słabnie do skrajnego fioletu. Inaczej się rzeczy mają z ciepłotą rzeczonych części: przesuwając wzdłuż widma przyrząd, bardzo czuły na zmiany ciepłoty, *znajdziemy, że wzrasta ona wciąż* w kierunku od fioletu do czerwieni, oraz że—co ciekawsze—wpływ cieplny nie kończy się na granicy tej ostatniej, lecz rozciąga *się po za nią na znacznej przestrzeni.* Wnosimy z tego, że istnieją promienie jeszcze mniej łamliwe, niż czerwone; nazywamy je *ultra-czerwonemi.* Nie działają one na nasz zmysł wzroku, to znaczy, że są ciemne, obecność ich jednak łatwo wykazać za pomocą czułego termometru. Słońce wysyła trojakiego rodzaju promienie: cieplne, świetlne i chemiczne, które przy przejściu przez pryzmat, rozszczepiają się i układają w widmie podług stopnia swej łamliwości. Każde w ogóle źródło światła, obok promieni świetlnych, wysyła także ciemne, ciała zaś ogrzane, lecz nie doprowadzone jeszcze do stanu rozżarzenia, dają tylko ciemne promienie, których nie widzimy. Podobnie bowiem, jak ucho odróżnia tylko pewne tony, zawarte pomiędzy dwiema granicami, odpowiadającemi określonej, niezbyt małej, ani zbyt wielkiej liczbie drgań, tak też i oko może odczuć jako światło tylko te promienie, których łamliwość nie przekracza pewnej maximalnej i minimalnej granicy. O promieniach cieplnych obszerniej *pomówimy w następnej księdze.*

ROZDZIAŁ IX.

Teorya światła.

§ 1. *Doświadczenie Fresnel'a. Falowy ruch eteru.*

Rozpatrzyliśmy dotychczas cały szereg zjawisk świetlnych oraz odnośnych praw, wykrytych na drodze empirycznej, nie dotykając przytem wcale pytania, czem właściwie jest światło. Obecnie przystępujemy do opisu takich faktów z dziedziny optyki, które wymagają koniecznie bliższego zastanowienia się nad powyższem pytaniem, a jednocześnie dają nam klucz do jego rozwiązania.

W roku 1665 ojciec Grimaldi wydał zadziwiającą książkę pod tytułem *Physico-mathesis de lumine*, w której po raz pierwszy wspomina o pewnem zjawisku, zauważonem przezeń podczas następujących doświadczeń. Na drodze wiązki światła, wpadającego do ciemnego pokoju przez ciasną szczelinę, umieszczał on bardzo wązkie, nieprzezroczyste przedmioty, w kierunku równoległym do szczeliny i cień ich rzucał na biały ekran. Okazało się najprzód, że cień był szerszy, niż należało tego oczekiwać na zasadzie praw prostolinijnego rozchodzenia się światła, następnie że był otoczony barwnemi prążkami, równoległemi do szczeliny. Zjawisko to znikało natychmiast, gdy tę ostatnią nieco rozszerzano. Jeżeli na miejscu nieprzezroczystego ciała umieszczano ściankę metalową o bardzo delikatnym okrągłym otworze, a po za nią biały ekran, wtedy pojawiały się na nim współśrodkowe barwne pierścienie, zajmujące po części tę przestrzeń, która właściwie powinna była być zupełnie ciemna. Wreszcie gdy w ściance metalowej znajdowały się dwa bardzo małe, okrągłe otwory, nader blizko siebie leżące, wtedy można było nietylko zauważyć dwa układy współśrodkowych pierścieni, po części krzyżujących się wzajemnie, lecz także trzy systemy *ciemnych równoległych linii*, które znikały natychmiast, gdy zatykano jeden z otworów (fig. 349). Ostatnie doświadczenie wywołało ogromne zdumienie pomiędzy fizykami, obalało bowiem ówczesne pojęcia o istocie światła i prowadziło do wcale nieoczekiwanego rezultatu, że światło, dodane do innego światła, może spowodować ciemność. Newton powtórzył i rozszerzył doświadczenia włoskiego fizyka, przyczem starał się objaśnić przyczynę owego zadziwiającego zjawiska, lecz nadaremnie. Odnośne badania na nowo podjęli następnie Fraunhofer, Young, a szczególniej Fresnel i wtedy dopiero udało się wyświetlić powyższą zagadkę. Podamy tutaj opis słynnego doświadczenia Fresnel'a.

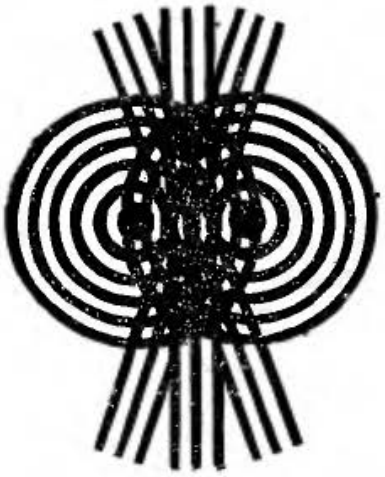


Fig. 349. Układ pierścieni i ciemnych linii w doświadczeniu Grimaldi'ego.

Dwa szklane zwierciadła *A B* i *B C* (fig. 350) o poczernionej tylnej powierzchni stykają się wzdłuż pionowej krawędzi *B;* jedno z nich (*B C*) jest stale przymocowane szrubą *T*, drugie zaś (*A B*) może być obracane za pomocą szruby *S*, wokoło tejże krawędzi. Figura 351 przedstawia szematycznie wypadek, gdy są one nachylone do siebie pod bardzo rozwartym kątem, równym prawie 180°. W blizkości zwierciadeł znajduje się soczewka *L* o małej odległości ogniskowej, która zbiera padające na nią promienie świetlne w ognisku *P;* z tego też punktu świecącego promienie padają następnie na obadwa zwierciadła. Jedno z nich *A B* odbija promienie tak, że zdają się wychodzić z punktu *M*, który stanowi w ten sposób urojony obraz ogniska *P;* podobnie w zwierciedle *B C* powstaje drugi obraz *N* tegoż ogniska. Nawiasowo dodamy tutaj, że zwierciadła muszą być przygotowane z czarnego szkła albo z metalu, dlatego, ażeby każde z nich posiadało tylko jedną powierzchnię odbijającą i dawało tylko jeden obraz. Otrzymujemy tedy dwa świetlne stożki *M m m'* i *N n n'*, których wierzchołki *M* i *N* możemy uważać jakby za dwa rzeczywiste źródła światła; widzimy, że stożki te, zachodząc jeden na drugi, zajmują wspólną część *B m n* przestrzeni, na rysunku zacienioną. Jeżeli na drodze ich ustawimy

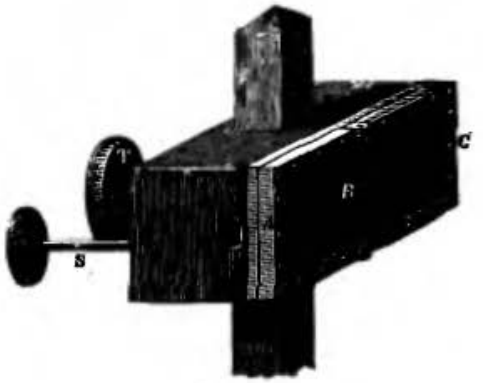


Fig. 350. Zwierciadła Fresnel'a.

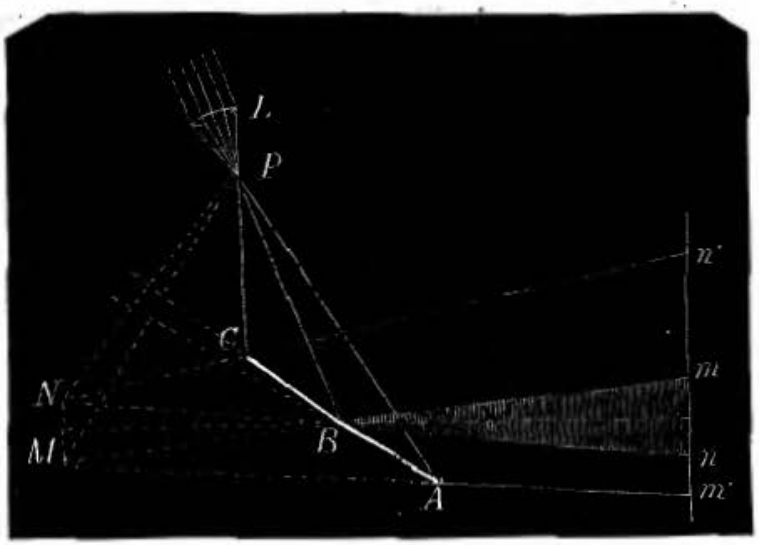


Fig. 351. Doświadczenie Fresnel'a.

ekran m' n', wtedy to miejsce na nim, które przetnie ową wspólną część, czyli pole m n, będzie jednocześnie oświecone przez obadwa stożki. Na tem właśnie polu oprócz jasnych, widać szereg *ciemnych linii, które znikają wszakże natychmiast, gdy jedno ze zwierciadeł zostaje zasłonięte.* Gdy przez obracanie szruby S zmniejszymy kąt pomiędzy zwierciadłami, owe ciemne linie staną się węższe i zbliżą ku sobie; w ten sposób możemy je uczynić tak delikatnemi, że zaledwie dają się odróżnić. Są one zaś wyraźne tylko wtedy, gdy zwierciadła stanowią kąt bardzo rozwarty, t. j. gdy obrazy M i N leżą nader blizko jeden od drugiego. Widzimy, że doświadczenie Fresnel'a przedstawia wielkie podobieństwo do tego, jakie wykonał Grimaldi, przepuszczając światło przez dwa bardzo małe otwory; tutaj, również jak i tam, *światło dodane do światła w pewnych warunkach, powoduje ciemność;* w jednym i w drugim razie na ekranie powstają ciemne linie wówczas, gdy padają nań promienie jednocześnie z dwóch świetlnych punktów, znikają zaś, gdy jeden z tych ostatnich jest zasłonięty. Zobaczmy tedy, w jaki sposób nauka o istocie światła objaśnia to na pozór niepojęte zjawisko, którego, jak powiedzieliśmy, nie umiał sobie wytłómaczyć taki nawet genialny uczony, jak Newton, a to z przyczyn, które wkrótce staną się dla nas zupełnie jasne.

Wiemy, że światło nie rozprzestrzenia się momentalnie, lecz wymaga pewnego czasu na przebycie drogi od jednego punktu do innego. To każe nam wnosić, że każde świecące ciało stanowi źródło jakiegoś działania, które w pewien sposób przenosi się na nerw wzrokowy i wywołuje w nas wrażenie światła. Zachodzi tylko pytanie, czy przenoszenie się owego działania polega na tem, że samo świecące ciało wysyła pewną substancyę we wszystkich kierunkach, czy też powoduje ono tylko wstrząśnienia, udzielające się w przestrzeni od cząstki danego środka do cząstki. Podług dawniejszej teoryi, zwanej *emissyjną*, głównym zwolennikiem której był Newton, światło składa się właśnie z cząstek materyi nadzwyczajnie subtelnych, ustawicznie wyrzucanych przez źródło świetlne i przebiegających przestrzeń z jednakową dla wszystkich nich prędkością; uderzenia tych cząstek

o siatkówkę mają powodować wstrząśnienie nerwu wzrokowego, odczuwane następnie jako wrażenie światła. Cząstki te, uczy dalej teorya emissyjna, ulegają siłom przyciągającym i odpychającym ze strony materyi, o którą uderzają: pierwsze siły wywołują załamanie światła, drugie zaś—jego odbicie; istnieje tyle rodzajów takich cząstek, ile jest oddzielnych barw, przyczem każdy z nich w rozmaitym stopniu załamuje się przy przejściu z jednego środka do drugiego. Szereg następujących po sobie jednakowych cząstek stanowi promień świetlny, przyczem odstępy pomiędzy niemi mogą być bardzo znaczne; ponieważ wrażenie światła w oku naszem trwa przez $^1/_{10}$ sekundy, to dla ciągłości jego wystarczy, jeżeli uderzenia cząstek będą następowały po sobie w takim właśnie odstępie czasu. Gdyby więc w ciągu sekundy w tym samym kierunku przebiegło tylko dziesięć cząstek, wynikałoby z tego, że odległość pomiędzy dwiema sąsiedniemi cząstkami wynosi 30000 kilom. (droga, przebyta przez światło w ciągu sekundy, podzielona przez ilość cząstek, które ją w tym czasie przebyły); gdyby ich nawet przeszło sto, to i tak odległość pomiędzy niemi wynosiłaby 3000 kilom. W ten sposób możnaby objaśnić, dlaczego promienie, wychodzące z różnych punktów, mogą przecinać się wzajemnie, nie przeszkadzając sobie wcale. Masa takiej cząstki, obliczona na zasadzie pewnych praw mechaniki, jest tak minimalnej wielkości, że nie możemy jej sobie wcale naocznie przedstawić. „Gdyby, powiada John Herschel, cząstka światła przy swej prędkości posiadała wagę jednego grana (0,065 grama), wywarłaby przez swe uderzenie taki sam skutek, jak kula armatnia, ważąca 56000 gramów i biegnąca z szybkością 305 metrów na sekundę; jakże więc niezmiernie małe muszą być te cząstki światła, skoro myriady ich, padające na soczewki lub zwierciadła, nie nadają najlżejszego nawet ruchu najczulszym przyrządom, specyalnie do tego celu przygotowanym“. Jak już wspomnieliśmy, Newton objaśniał zjawisko załamania przez to, że cząstki świetlne ulegają przyciąganiu ze strony substancyj załamujących. Otóż przyjąwszy, że przyciąganie to działa tylko na bardzo małej odległości i obliczywszy przytem siłę przyciągającą w wypadku, gdy cząstka

zbacza z pierwotnej swej drogi o 30°, okazuje się, że do tego potrzebaby siły niemniej jak dwa tysiące septilionów razy większej od tej, z jaką ziemia przyciąga takąż cząstkę. Rezultat ten, w obec przypuszczalnej niezmiernie małej masy cząstek światła, nie bardzo się przyczynia do nadania teoryi emissyjnej wielkiego prawdopodobieństwa. W wypadku tym bowiem nie wielkość cyfr przemawia na niekorzyść tej teoryi—albowiem i druga z nich prowadzi do wartości, z trudnością dających się uświadomić — lecz małe prawdopodobieństwo, jakie istnieje w przypuszczeniu, iż tak olbrzymia siła może rozwinąć się przy tak nieskończenie małych masach. Zresztą, gdyby nawet nie istniały podobne zarzuty, to i tak bezpośrednie, faktyczne dowody zmusiłyby uczonych do porzucenia emissyjnej teoryi światła. Jedną z najważniejszych trudności, stanowiących dla niej nieprzebytą zaporę, były opisane wyżej wyniki doświadczeń, w których światło dodane do światła powodowało ciemność (interferencya światła. Fakt ten nie daje się w żaden sposób pogodzić z teoryą, głoszącą, że światło jest materyą, wysyłaną przez źródło tegoż. Później odkryto inny fakt, niemniej sprzeczny z rzeczoną teoryą: Jeden z jej wniosków, wyprowadzony jeszcze przez Newtona, głosi, że prędkość światła w środkach gęściejszych winna być większa, niż w mniej gęstych. Otóż doświadczenia Fizeau i Foucaulta dały rezultat wręcz przeciwny: w szkle światło rozchodzi się *wolniej*, niż w powietrzu. Dwa te fakty: interferencya światła oraz zmniejszanie się jego prędkości przy przejściu ze środka mniej gęstego do więcej gęstego—ostatecznie obaliły teoryę emissyjną, która ustąpiła miejsca prawie powszechnie przyjętej obecnie teoryi *falowania światła* czyli teoryi *undulacyjnej*. Ta ostatnia dozwala rozpatrywać z jednego punktu widzenia nietylko znane zjawiska świetlne, ale nadto łączy z niemi przejawy ciepła promienistego (o których pomówimy w następnej księdze) i pewne zjawiska elektryczne; oprócz tego, przedstawiając zjawiska świetlne w analogii z dźwiękowemi, ułatwia znakomicie zrozumienie pierwszych. W ten sposób przyczynia się ona do ustalenia nauki o jedności sił przyrody. Do rozwoju i ugruntowania teoryi undulacyjnej przyczynili się głównie

Huyghens, Hooke, Euler, w naszem zaś stuleciu Young, Fresnel i wielu innych. Z poprzedniej księgi dowiedzieliśmy się, że każde ciało dźwięczące znajduje się w stanie ruchu drgającego, który udziela się otaczającemu powietrzu, wskutek czego w tem ostatniem tworzą się fale, dochodzące do ucha naszego i powodujące w niem wrażenie dźwięku. Podobnie i ruch, wychodzący z każdego ciała świecącego, przenosi się, według teoryi undulacyjnej, za pomocą pewnego sprężystego środka, wypełniającego przestrzeń pomiędzy niem a ciałem oświeconem; każda cząstka tego środka przejmuje ruch swej poprzedniczki i przenosi go dalej, przyczem żadna z nich nie oddala się po za pewną nader nieznaczną odległość od pierwotnego swego położenia. Lecz co stanowi ów sprężysty środek, przenoszący drgania świetlne? Powietrze środkiem tym być nie może, względnie bowiem cienka tylko jego warstwa otacza ziemię, a może i inne jeszcze ciała niebieskie; w niezmierzonych za to przestrzeniach, przez które dochodzi do nas światło słońca i gwiazd, nie ma wcale powietrza. Należy przyjąć, że wszechświat wypełniony jest materyą sprężystą, nadzwyczaj subtelną i nieważką, nie przedstawiającą żadnego znaczniejszego oporu poruszającym się w niej ciałom; hipotetyczny ten środek zowiemy *eterem* i on to właśnie służy jako pośrednik przy przenoszeniu ruchu drgającego ciał świecących. Zobaczmy tedy, jak należy sobie wyobrazić stan jego podczas rozchodzenia się w nim światła.

Czytelnik przypomina sobie, że podczas rozprzestrzeniania się dźwięku w powietrzu, cząstki tego ostatniego drgają tam i napowrót w samym kierunku rozchodzenia się fal dźwiękowych (str. 261); przy falowaniu zaś wody, cząstki jej oscylują w górę i na dół, t. j. w kierunku, prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fal wodnych. Otóż światło polega właśnie na ostatniego rodzaju drganiach cząstek eteru—drganiach zwanych *poprzecznemi*. Rozważmy je nieco bliżej: Niechaj A, B, C, D, E (fig. 352) przedstawia szereg przyciągających się wzajemnie cząstek w stanie równowagi; przypuśćmy, że wskutek jakiegoś wstrząśnienia, zaszłego w kierunku prostopadłym do linii AE, cząstka A zajmuje położenie A'. Ta zmiana miejsca narusza pierwotny stan

równowagi: cząstka A' stara się pociągnąć za sobą sąsiednią cząstkę B', która ulega jednocześnie z drugiej strony przyciąganiu cząstki C'; otóż pewne prawa, w które nie możemy się tutaj wdawać, pokazują, że przy takim układzie sił cząstka B' poruszy się, również jak i pierwsza, w kierunku prostopadłym do szeregu cząstek. W czasie, gdy B' opuszcza się ku dołowi i przybywa do B'', cząstka A' wraca do pierwotnego położenia i w danej chwili mamy układ A'' B'' C'' D'' E''. Następnie cząstka A'' wskutek nabytej prędkości, podnosi się w górę do A''' na wysokość, ściśle równą tej, na jaką poprzednio się opuściła, B'' wraca do położenia B czyli B''', cząstka zaś C''' rozpoczyna swój ruch, przyczem powstaje układ A''' B''' C''' D''' E''', zmieniający się potem w A'''' B'''' C'''' D'''' E'''' i t. d. Widzimy tedy, że sposób udzielania się drgań poprzecznych, jest podobny do tego, w jaki przenoszą się drgania podłużne, z tą wszakże różnicą, że te ostatnie powodują szereg zgęszczeń i rozrzedzeń, podczas pierwszych zaś cząstki drgające ulegają tylko kolejnym i prawidłowym bocznym przesunięciom w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się światła. Fig. 353 przedstawia cząstki o wiele bliżej siebie leżące, niż w poprzednim wypadku; układ ich w danej chwili ruchu drgającego odpowiada

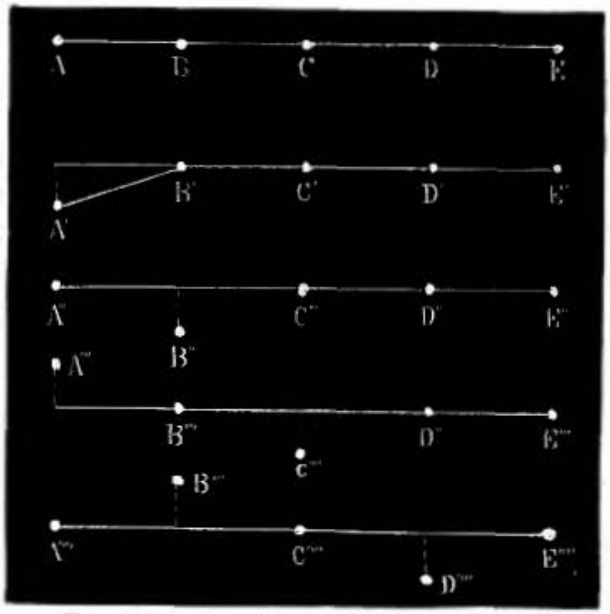


Fig. 352. Sposób rozchodzenia się fal poprzecznych.

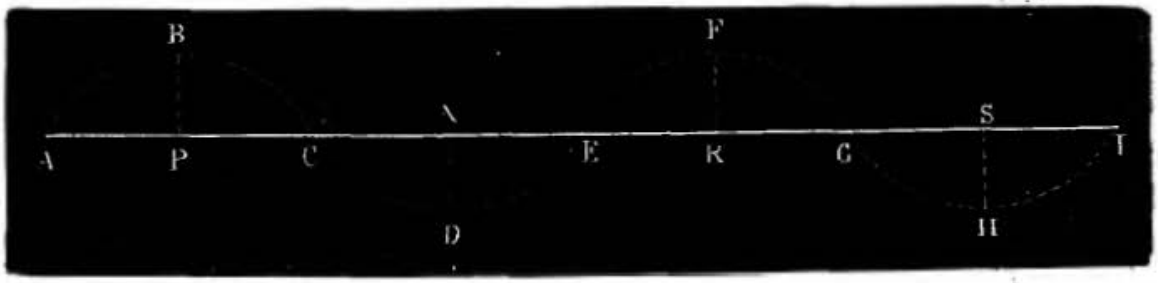


Fig. 353. Fala poprzeczna.

fazie A'''' B'''' C'''' D'''' E'''' (fig. 352). Połączywszy je, otrzymujemy linię falową $A\ B\ C\ D\ E$... zupełnie podobną do linii, wyobrażającej fale dźwiękowe (str. 258), lecz gdy w tej ostatniej zagięcia ku górze i dołowi przedstawiają tylko obrazowo zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza, w wypadku drgań poprzecznych każdy punkt linii wyobraża istotne położenie drgającej cząstki w pewnym momencie: tutaj wyniesienia obejmują te cząstki, które wzniosły się po nad pierwotną linię równowagi, zagłębienia zaś odpowiadają tym, które się pod nią opuściły. Podczas gdy cząstka wykonywa jedną całkowitą oscylacyę, t. j. gdy opuszcza się do A', powraca do A'', wznosi się do A''' i znów wraca do A'''', tworzy się wokoło niej całkowita fala, składająca się z jednego wyniesienia i jednego zagłębienia. Gdy fala ta biegnie dalej, następne oscylacye owej cząstki powodują nowe fale, które bezpośrednio idą za pierwszą i w ten sposób wokoło punktu, z którego ruch pierwotnie się rozpoczął, powstaje cały system fal. Linia prosta, poprowadzona ze środka takiego systemu w kierunku rozchodzenia się ruchu, stanowi *promień;* ta część jego, która obejmuje jedno wyniesienie i jedno zagłębienie, zowie się *długością fali;* na fig. 353 przedstawione są dwie takie długości. Te cząstki, których odległość na tym samym promieniu wynosi jedną lub więcej całkowitych fali, znajdują się jednocześnie w tej samej fazie oscylacyi, cząstki np. B i F, oddalone o jedną długość fali, zajmują obydwie najwyższe położenie, z którego poczynają się obniżać, cząstki A i E przechodzą przez położenie równowagi, dążąc ku górze i t. d. Cząstki zaś B i D, oddalone o pół fali, znajdują się w fazach oscylacyi wprost przeciwnych, podczas bowiem gdy pierwsza z najwyższego swego położenia poczyna się opuszczać, druga z najniższego zaczyna ruch swój ku górze; to samo stosuje się do cząstek B i H, oddalonych o trzy pół fale. W ogóle widzimy, że fazy cząstek są te same, gdy odległość pomiędzy niemi równa się parzystej liczbie pół-fal, są zaś wprost przeciwne, gdy odległość ta wynosi nieparzystą liczbę pół-fal.

Oto w krótkich zarysach teorya falowania eteru, za pomocą którego światło od źródła swego przenosi się w przestrzeń daleką.

Zobaczmy teraz, jak teorya ta objaśnia znane nam już zjawiska świetlne; w jakich, według niej, warunkach powstaje interferencya światła, jak tłómaczy barwy, od czego zależy natężenie światła, jak należy sobie przedstawić rozszczepienie jego i pochłanianie? Na wszystkie te pytania postaramy się odpowiedzieć w następnych paragrafach niniejszej księgi.

§ 2. Interferencya światła. Długość fali i częstość drgań dla różnych barw. Amplituda drgań.

Czytelnik zechce przypomnić sobie rezultat krzyżowania się dwóch jednakowych systemów fal na powierzchni wody, przy jednakowej amplitudzie drgania cząstek, należących do obu systemów (str. 344): tam, gdzie wyniesienie jednej fali zlewa się z wyniesieniem drugiej, cząstka wody podnosi się na podwójną wysokość, tam zaś, gdzie zagłębienie schodzi się z zagłębieniem, cząstka opuszcza się dwa razy niżej, niż przy pojedyńczej fali, tam wreszcie, gdzie wyniesienie jednej fali spotyka zagłębienie drugiej, cząstka pozostaje w spoczynku. Wiemy także, że rezultat ten stanowi tylko szczegółowy wypadek ogólnego prawa nakładania się różnych systemów fal, podług którego wypadkowy ruch drgający każdej oddzielnej cząstki równa się sumie jednokierunkowych, albo różnicy różnokierunkowych ruchów składowych (patrz str. 345). Stosuje się to zarówno do rozchodzenia się fal wodnych, jak i dźwiękowych oraz świetlnych; podobnie bowiem jak ciecze i powietrze, tak też i eter świetlny może przejmować naraz wiele ruchów oscylacyjnych. Impulsy, jednocześnie otrzymywane przez daną cząstkę, mogą się wzajemnie wzmacniać, albo też całkowicie lub częściowo znosić; co przy falach cieczy powoduje *spokój*, to przy falach dźwiękowych wywołuje *ciszę*, przy świetlnych zaś — *ciemność*. Doświadczenia Grimaldi'ego oraz Fresnel'a, opisane na początku 1 § niniejszego rozdziału, są tylko zwykłemi zjawiskami *interferencyi światła*, polegającej na tem, że fale świetlne wzajemnie się zobojętniają *przy zupełnie podobnych warunkach, przy jakich zachodzi także interferencya dźwięku* (patrz stronicę 348). Po-

nieważ warunki te omówiliśmy wówczas bardzo obszernie, zbytecznem więc byłoby tutaj jeszcze raz je rozważyć. W doświadczeniu Grimaldi'ego ciemne linie na ekranie pojawiały się w tych miejscach, gdzie jednocześnie padały promienie przez obadwa otwory ścianki, przyczem jeden promień wyprzedzał drugi o nieparzystą liczbę pół-fal; każda z cząstek eteru, leżących na drodze tych promieni, znajdując się pod wpływem dwóch równych (przy jednakowej amplitudzie drgań), lecz skierowanych w przeciwne strony impulsów, pozostawała w spoczynku. Ażeby jednak dwa podobne systemy fal mogły spowodować zupełnie wyraźne ciemne linie, powinny one wychodzić nietylko jednocześnie, lecz w dokładnie analogiczny sposób z dwóch źródeł światła, to znaczy, że wszelkie zmiany, jak np. wzmocnienie ruchu lub jego osłabienie, przerwa, albo też inne przeszkody, zachodzące w jednem ze źródeł, powinny jednocześnie także odbywać się w drugiem. Nie możemy atoli tak uregulować procesu świecenia w dwóch ciałach, ani nawet w dwóch punktach tego samego ciała, ażeby drgający ruch, wychodzący z jednego z nich, nie różnił się pod żadnym względem, *oprócz różnicy w fazie oscylacyi*, od takiegoż ruchu, wychodzącego z drugiego punktu. Z tego właśnie względu należy uważać doświadczenie Grimaldi'ego za niezupełnie dokładne, interferujące bowiem ze sobą systemy fal wychodziły z dwóch oddzielnych punktów świetlnego źródła. Metoda zaś, jaką posługiwał się Fresnel przy wywoływaniu zjawiska interferencyi, pozwoliła otrzymać, przez odbicie od dwóch zwierciadeł, oba systemy fal z jednego i tego samego świecącego punktu. Wszelkie zmiany w tym ostatnim występowały przez to zupełnie jednakowo w obu systemach fal (fig. 351), nie wpływając wcale na ich koincydencyę lub interferencyę tak, że promienie, wychodzące jakby z punktów M i N, różniły się tylko pod względem drogi przebytej. Fig. 354 (str. 552) unaocznia właśnie krzyżowanie się współśrodkowych fal świetlnych, wychodzących z M i N. Otóż do tych punktów, które, jak np. a, leżą na linii $B A'$ prostopadłej do linii $M N$, promienie obu systemów dochodzą w jednakowych fazach, albowiem odległości $M a$ i $N a$, a właściwiej drogi $P J a$ i $P J' a$, przebyte przez promienie, wy-

chodzące jednocześnie z ogniska P i odbite od zwierciadeł, są sobie równe. W punkcie a, również jak i we wszystkich pozostałych, leżących w tym samym co i on pionowym kierunku, fale wzajemnie się wzmacniają i dają środkową jasną linię. Do punktów natomiast jak n n', leżących z boku B A', dochodzą promienie z M i N, różniące się o pół fali, a więc o fazach przeciwnych, tutaj więc następuje interferencya i punkty te tworzą pierwszą ciemną linię. Idąc dalej po tej samej stronie, napotykamy punkty b b', w których różnica faz wynosi całą długość fali,

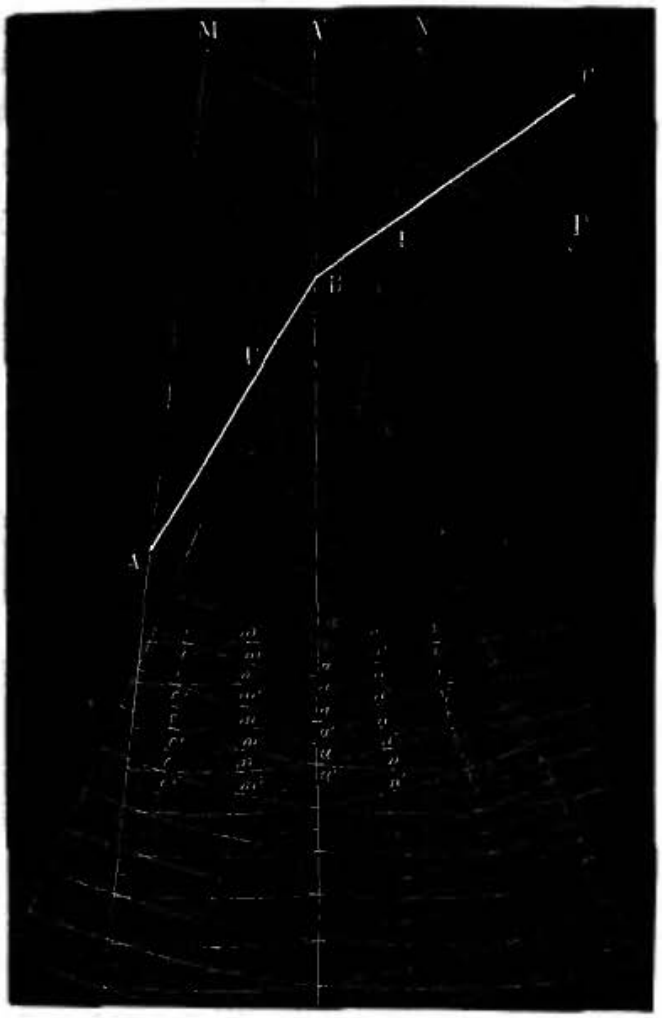


Fig. 354. Interferencya światła (w doświadczeniu Fresnel'a).

co znaczy to samo, jak gdyby wcale nie było żadnej w fazach różnicy; b i b' dają tedy znów jasną linię. W podobny sposób po drugiej stronie linii B A' punkty m m' są ciemne, c c' zaś jasne i t. d. Figura 355 przedstawia ekran umieszczony pionowo, w kierunku prostopadłym do linii B A', w pewnej odległości przed zwierciadłami; widzimy na nim szereg kolejno po sobie następujących jasnych i ciemnych linii, oznaczonych lite-

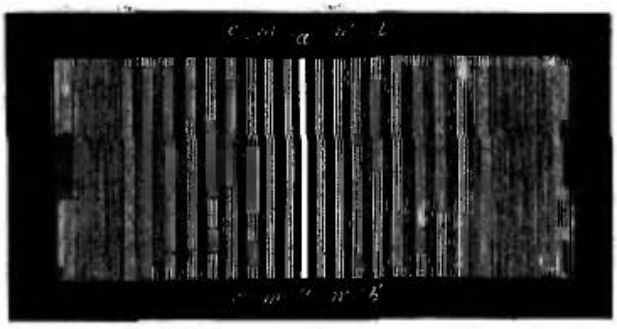


Fig. 355. Ciemne linie interferencyjne.

rami, odpowiadającemi literom dla jasnych i ciemnych punktów poprzedzającej figury.

To, cośmy tutaj powiedzieli o kolejnem następstwie jasnych i ciemnych linii, stosuje się tylko w wypadku, gdy do doświadczenia zostaje użyte światło jednorodne, przy użyciu zaś światła białego, zjawisko, jak zaraz zobaczymy, przedstawia się nieco inaczej. Jeżeli na soczewkę *L* (patrz fig. 351) rzuca się najprzód promienie czerwone, następnie po usunięciu tych ostatnich, powtarza to samo z promieniami niebieskiemi, można zauważyć, że w pierwszym razie linie na ekranie są bardziej rozsunięte, niż w drugim, to znaczy, że ciemne linie dla promieni czerwonych więcej są oddalone od środkowej jasnej, niż odpowiednie ciemne linie dla promieni niebieskich. Z tego wynika, że wzajemne zobojętnienie dwóch promieni niebieskich wymaga mniejszej różnicy w przebytej drodze, niż promieni czerwonych; od wniosku tego krok już tylko jeden do innego, a mianowicie, że *długość fali dla światła niebieskiego jest mniejsza, niż dla czerwonego.* Powtarzając podobne doświadczenia z pozostałemi jednorodnemi barwami, przekonywamy się, że w ogóle im dane światło jest bardziej łamliwe, tem linie, jakie ono daje na ekranie, są bardziej ścieśnione, a więc tem mniejszą jest odpowiadająca mu długość fali. Przy doświadczeniach takich można się posługiwać widmem—rozumie się o dostatecznie silnem natężeniu—którego oddzielne barwy kolejno rzuca się na soczewkę, a więc i na zwierciadła. Przy użyciu białego światła linie na ekranie nie są tylko naprzemian jasne lub ciemne, ale także zabarwione. Środkowa jasna linia, gdzie mieszają się ze sobą wszystkie barwy o największem natężeniu, jest biała; z boków jej znika najprzód fiolet, następnie mniej łamliwe promienie, wskutek czego linia ta na wewnątrz otoczona jest rąbkiem żółtawym, na zewnątrz zaś czerwonawym. Tam, gdzie zanika barwa żółta, powstaje pierwsza ciemna linia, która przedstawia jednak słaby fioletowy odcień, albowiem ta ostatnia barwa w miejscu tem stała się mocniejszą. Następnie idzie kilka barwnych jasnych linii, druga ciemna, znów barwne, aż wreszcie, dzięki mięszaniu się rozmaitych barw, pozostaje jednostajna biel. Białe światło daje tedy

nieliczne i coraz mniej wyraźne linie, przy jednorodnem zaś ciemne linie są zupełnie czarne i ukazują się w wielkiej ilości.

Powiedzieliśmy wyżej, że pierwsza ciemna linia na ekranie, po za środkową jasną, powstaje przez dwa promienie, których różnica równa się połowie długości fali. Otóż, jeżeli zmierzymy dokładnie długość tych promieni dla jakiegokolwiek światła jednorodnego (a istnieją na to sposoby), czyli odległości każdego z dwóch źródeł światła od pierwszej ciemnej linii, to różnica ich da nam zarazem wielkość pół-fali dla tegoż światła; zupełnie tak samo można znaleść długość fali dźwiękowej, odpowiadającej badanemu tonowi, z interferencyi dźwięku, którą możemy otrzymać *za pomocą stosownego przyrządu, przedstawionego na* fig. 232, str. 348. Przez powtarzanie podobnych pomiarów, przy tem samem świetle, dla 2-ej, 3-ej, 4-ej.... ciemnej linii, odpowiadających różnicy, równej 3, 5, 7...., jednem słowem nieparzystej liczbie pół-fal—możemy pierwszy otrzymany rezultat ściśle skontrolować. Fresnel zrobił to dla światła, które przeszło przez szkło czerwone i znalazł, że długość fali dla takiego światła wynosi 638 milionowych części jednego milimetra. W jednym z następnych rozdziałów poznamy dokładniejszą metodę mierzenia długości fali dla różnych promieni, tymczasem zaś możemy powziąć wyobrażenie o niezmiernej małości tych fal z faktu, że na przestrzeni jednego milimetra mieści się ich 1315 dla skrajnych czerwonych, 1698 dla żółtych promieni od sodu i 2542 dla skrajnych fioletowych. Widzimy tedy, że im *dane promienie są bardziej łamliwe, tem odpowiadające im fale są krótsze*, coraz bowiem większa ich ilość mieści się na tej samej długości. Z nauki o dźwięku wiemy już, że wszystkie tony, wysokie czy nizkie, silne lub słabe, rozchodzą się w danym środku z jednakową prędkością, która w powietrzu wynosi 340 metrów na sekundę. Wiadomo nam również, że podczas jednej całkowitej oscylacyi dźwięk przenosi się na długość jednej fali (str. 284) tak, że ilość drgań w ciągu sekundy, czyli t. zw. częstość drgań, odpowiadająca pewnemu tonowi, daje nam zarazem liczbę fal, wytworzonych w ciągu tego czasu na pewnej przestrzeni. Otrzymujemy tedy długość fali w powietrzu dla danego tonu, jeżeli powyższą prędkość rozcho-

dzenia się dźwięku dzielimy przez odpowiednią częstość drgań. W podobny sposób można dla każdego falowego ruchu znaleźć długość jego fali, jeżeli tylko wiadomą jest szybkość rozprzestrzeniania się tego ruchu oraz odnośna częstość drgań i naodwrót: mając długość fali, można także obliczyć częstość drgań. Otóż prędkość światła wynosi, jak wiemy, w okrągłej liczbie 300000 kilometrów na sekundę; pewne obserwacye, robione przez Arago, również jak i teoretyczne wywody, oparte na teoryi ruchu falowego, każą nam przyjąć, że prędkość ta w swobodnym eterze wszechświata jest jednakowa dla promieni wszelkich barw i natężenia. Dzieląc tedy liczbę, wyrażającą tę prędkość przez podaną wyżej długość fali dla promieni np. skrajnie czerwonych, otrzymujemy około 395 bilionów drgań, wykonywanych w ciągu sekundy przez cząstkę eteru wtedy, gdy przeprowadza ona światło rzeczonej barwy. Dla żółtego promienia od sodu częstość drgań wynosi jeszcze więcej, albowiem 509 bilionów, skrajnie zaś fioletowym promieniom odpowiada 763 bilionów drgań na sekundę. Czytelnik zauważył tutaj zapewne związek, zachodzący pomiędzy długością fali dla pewnej barwy, a odnośną częstością drgań: promieniom mniej łamliwym (czerwonym) odpowiada mniejsza częstość drgań i większa długość fali, bardziej zaś łamliwym (fioletowym)—znaczniejsza daleko częstość drgań przy mniejszej za to długości fali. Rzecz oczywista bowiem, że im więcej drgań cząstka eteru wykonywa w ciągu sekundy, tem drgania te muszą być szybsze, czyli że każde z nich trwa przez krótszą część sekundy; ponieważ podczas jednej całkowitej oscylacyi ruch przenosi się na długość jednej fali, ta ostatnia musi być mniejszą, gdy oscylacye prędzej się odbywają. Podobnie jak przy dźwięku *wysokość tonu* zależy od częstości drgań, tak przy świetle od tego samego zależy *barwa* promienia. Gdy np. widełki strojowe wykonywują 440 drgań w ciągu sekundy, ucho, do którego drgania te dochodzą, odczuwa je jako ton *A;* gdy zaś w ciągu takiego samego czasu fala, wychodząca ze źródła świetlnego, uderzy o oko np. 509 bilionów razy, to ostatnie odbierze wrażenie barwy żółtej. Widmo świetlne można porównać do gamy; w istocie przedstawia ono gamę barw, z któ-

rych najniższą jest skrajnie czerwona, najwyższą zaś—skrajnie fioletowa. Promienie ultra-czerwone odznaczają się zbyt małą częstością drgań, ażeby mogły wywrzeć na oko wrażenie światła; również i ultra-fioletowe o zbyt wielkiej częstości drgań, nie mogą być przez nie odczute.

Rozważmy obecnie ze stanowiska teoryi falowania inną jeszcze cechę promienia świetlnego, a mianowicie jego *natężenie*. Kula metalowa, przymocowana do dolnego końca pionowego spiralnie skręconego drutu, będąc wyprowadzona w kierunku pionowym z pierwotnego położenia, a następnie puszczona, powraca wskutek sprężystości drutu do tegoż położenia z siłą, równą tej, która poprzednio naruszyła równowagę, tutaj jednak nie zatrzymuje się, lecz wykonywa drgania ku górze i ku dołowi, dające się z łatwością liczyć. Otóż jeżeli w podobnem doświadczeniu kula zostanie ściągniętą najprzód na 2 centymetry, następnie na 4, później na 6 i t. d. i w każdym z tych wypadków zostanie puszczona, będzie ona w ciągu jednej oscylacyi przebywała drogi odpowiednio coraz większe. Droga kuli od jednego skrajnego jej położenia do drugiego zowie się *amplitudą*, powiemy więc, że amplituda drgań w drugim wypadku jest 2 razy większa, w trzecim zaś 3 razy większa, niż w pierwszym. Pomimo to, częstość drgań kuli w każdym z tych wypadków jest jednakowa, a więc zarówno dłuższą, jak i krótszą drogę przebywa ona w tym samym czasie; dzieje się zaś tak dlatego, że przy dwa lub trzy razy większem obniżeniu kuli, ujawnia się dwa albo trzy razy większa siła sprężystości drutu. W ogóle częstość drgań nie zależy od zewnętrznego impulsu, lecz od budowy samego drgającego ciała; impuls ten wpływa tylko na amplitudę drgań, a w miarę jej wzrastania ton staje się silniejszy. Cząstka materyi wyprowadzona z położenia równowagi, powraca doń z siłą, natężenie której zmienia się w prostym stosunku do odległości, na jaką ta cząstka oddaliła się od tegoż położenia. Wskutek tego prędkość jej ruchu drgającego wzrasta także proporcyonalnie do tej samej odległości, czyli że drgania odbywają się tem szybcej, im większą jest ich amplituda; dlatego właśnie *czas trwania jednej oscylacyi jest stały, niezależny od zmian amplitudy.*

Nadmieniliśmy już w księdze o dźwięku, że mechaniczne działanie kuli, uderzającej o tarczę, jest wprost proporcyonalne do masy kuli i do kwadratu z jej prędkości (str. 270). To samo stosuje się do cząstek powietrza, uderzających o błonę bębenkową ucha, jak i cząstek eteru, uderzających o oko. Prędkość ruchu drgającego tych ostatnich dosięga maximum w chwili największego odchylenia z położenia równowagi. Otóż natężenie fali świetlnej jest wprost proporcyonalne do kwadratu z tej maximalnej prędkości. Ponieważ zaś, według powyższego, prędkość ta wzrasta w miarę powiększania się amplitudy, wynika z tego, że *natężenie światła jest wprost proporcyonalne do kwadratu z amplitudy drgań.*

Widzimy tedy, że, podobnie jak przy drganiach dźwiękowych powietrza i ciał, wydających dźwięk (str. 272), tak i przy drganiach świetlnych, amplituda oscylacyi określa *natężenie* dźwięku, względnie światła, zaś peryod (t. j. czas trwania) oscylacyi, albo też częstość drgań warunkuje *wysokość* tonu, względnie *barwę* promienia. Wspomniany przez nas fakt, że peryod oscylacyi jest niezależny od jej amplitudy, tłómaczy nam, dlaczego jeden i ten sam ton lub barwa mogą posiadać rozmaite natężenie.

Wreszcie zważywszy, że światło rozchodzi się od ciała świecącego na wszystkie strony, podobnie jak dźwięk od ciała dźwięczącego, pod postacią współśrodkowych kulistych fal, zrozumiemy, że dla tych samych powodów, jakie wyłuszczyliśmy już w nauce o dźwięku (patrz str. 272), natężenie światła jest odwrotnie proporcyonalne do kwadratu z odległości od ciała świecącego. Prawo to, zyskane na drodze empirycznej, okazuje się więc z drugiej strony wynikiem teoryi falowania światła.

§ 3. Zasada Huyghens'a.

W poprzednich dwóch §§ staraliśmy się wyłożyć teoryę falowania światła w sposób możliwie najprostszy i najbardziej przystępny dla nieobznajmionego z nią jeszcze czytelnika. Obecnie wszakże musimy wykład ten nieco zmodyfikować, albowiem

w takiej formie, w jakiej go tam podaliśmy, nie mógłby nam służyć do zupełnie dokładnego wyjaśnienia znanych nam już zjawisk i praw z zakresu optyki, również jak i zjawisk, które następnie jeszcze poznamy.

Już w r. 1664 Hooke wygłosił pogląd, że światło polega na drgającym ruchu jakiegoś sprężystego środka, rozprzestrzeniającym się w kierunku prostych linii, które wychodzą ze wspólnego punktu na kształt promieni kuli. Uczonemu temu, przed innymi, należy się zasługa jasnego sformułowania tej zasady teoryi falowania. Nie mógł on jednak na tej podstawie wytłómaczyć zjawiska załamania światła, do tego bowiem brak mu było jeszcze pewnych uzupełnień, które odkrył dopiero współcześnie z nim żyjący Huyghens. Od niego też noszą one ogólną nazwę *zasady Huyghens'a*. Zobaczmy tedy, na czem polega ta ostatnia.

Wiemy już, że każda drgająca cząstka eteru powtarza ruch cząstki, pierwotnie wprawionej w drgania przez ciało świecące; oprócz tego, każda z nich znajduje się względem otaczających ją cząstek w takim samym stosunku, w jakim ta najpierw pobudzona cząstka pozostaje względem swych najbliższych sąsiadek. Jeżeli przeto wokoło tej pierwszej cząstki powstaje system fal, to tworzy się on także wokoło drugiej, trzeciej, czwartej i t. d., czyli innemi słowy *każda drgająca cząstka stanowi punkt wyjścia dla oddzielnego systemu fal.* Wszystkie te jednocześnie istniejące oddzielne systemy, któreby można nazwać składowemi, w każdej chwili krzyżują się z sobą według znanego nam już prawa nakładania się fal i wytwarzają jeden system wypadkowy albo główny, przebiegający w tej samej chwili dany sprężysty środek. Wyobraźmy sobie, że wokoło punktu A (fig. 356, str. 559), będącego źródłem ruchu, wytworzyła się kulista fala, której część tylko $B\ C$ przedstawiona jest na rysunku. Wszystkie cząstki, leżące na jej powierzchni, stanowią punkty wyjścia dla nowych, jednakowo wielkich fal składowych, które wyobrażone są pod postacią małych łuków; gdy fale te po pewnym czasie dochodzą, w jednakowych fazach oscylacyi, do miejsca $B'\ C'$, panuje tutaj taki sam stan ruchu drgającego, jak przedtem na powierzchni $B\ C$, tylko że ruch ten nie przeniósł się jako jedyna fala z $B\ C$

na B' C', lecz w postaci fal składowych (wychodzących z oddzielnych punktów leżących na linii B C). Rezultat wszakże, pod względem *kształtu powierzchni* B' C', *oraz prędkości* udzielenia się ruchu, jest ten sam, jak gdyby ruch drgający rozprzestrzenił się jako jedna fala od punktu A aż do B' C'. Gdy falowy ruch przenosi się bez przeszkody, wszystkie owe składowe fale zlewają się w jedną główną tak, że one same oddzielnie niczem nie ujawniają swej obecności. Lecz gdy np. fala wychodząca z A, przechodzi przez jakiś otwór B C, znajdujący się dajmy na to w ekranie, wtedy tylko część jej, zawarta pomiędzy promieniami A B i A C, rozprzestrzenia się swobodnie i fale składowe, wychodzące z punktów, położonych pomiędzy B i C, zlewają się w główną falę B' C'. Z krańcowych zaś punktów B i C wychodzą fale składowe B' b i C' c, które częściowo pozostają odosobnione i przenoszą ruch, wprawdzie stosunkowo bardzo słaby, do przestrzeni B' B S i C' C S, ominiętych przez falę główną. Wkrótce poznamy zjawiska, powstające wskutek takiego wyosabniania się fal składowych.

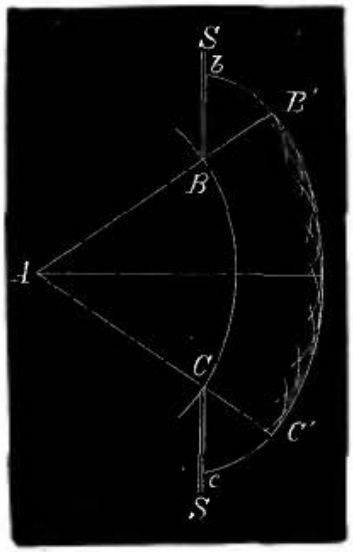


Fig. 356. Zasada Huyghens'a.

Widzimy tedy, że fale składowe rozprzestrzeniają się pod postacią kul współśrodkowych wokoło punktu świecącego zupełnie tak, jak gdyby rozchodziła się zeń tylko jedna główna fala. Cóż tedy oznacza wyrażenie: prostolinijny kierunek światła? Nie rozchodzi się ono wzdłuż jednej prostej linii, cząstki bowiem na niej leżące wpływają w sposób wyżej opisany na te, które znajdują się na innych liniach; właściwie więc i *pojedyńczy promień świetlny nie istnieje*, gdyż nawet na nader nieznaczną część falowej powierzchni składa się bardzo wiele fal, tworzących razem wiązkę. Pod promieniem świetlnym będziemy odtąd rozumieli kierunek, w jakim rozchodzi się ruch od tego małego elementu powierzchni falowej, do którego wiązka owa należy. W każdym środku, w którym światło rozprzestrzenia

się na wszystkie strony z jednakową prędkością, promień jest prostopadły do odpowiadającego mu elementu powierzchni falowej. Im bliżej punktu świecącego, tem wyraźniejszą przytem jest wypukłość tej ostatniej, przeciwnie im dalej, tembardziej staje się ona płaską tak, że na znacznej odeń odległości niewielką część powierzchni falowej możemy w przybliżeniu uważać za płaską (podobnie jak małą część nader wielkiej kuli), odpowiadające jej zaś promienie za równoległe pomiędzy sobą.

Poznawszy zasadę Huyghens'a, zastosujmy ją obecnie do wypadku, gdy fala świetlna, rozprzestrzeniająca się w powietrzu, napotyka inny, optycznie gęstszy środek, gdy pada np. na spokojny poziom wody. Niechaj $a\ b$ (fig. 357) przedstawia płaską część powierzchni falowej, zaś $A\ a\ b'\ B$ odpowiadającą jej wiązkę równoległych promieni. Gdy fala ta biegnie ku powierzchni $M\,N$ wody, cząstki eteru, znajdujące się pomiędzy a i b', zostają jedna po drugiej wprawione w ruch i wysyłają fale składowe, które rozchodzą się po części w powietrzu, po części zaś w wodzie. Rozpatrzmy najprzód te pierwsze. W chwili gdy cząstka b' ma rozpocząć swe drgania, t. j. gdy główna fala przeniosła się na odległość $b\ b'$, wokoło cząstki a utworzyła się w powietrzu fala składowa, której promień $a\ c$ jest oczywiście równy $b\ b'$; fala ta przedstawiona jest pod postacią półkola, zakreślonego z punktu a. Pozostałe punkty, leżące pomiędzy a i b', dają w tymże czasie początek podobnym falom składowym, lecz o promieniach tem mniejszych, im dany punkt leży bliżej punktu b', ruch którego jeszcze się nie rozpoczął. Jeżeli z b' poprowadzimy prostą linię $b'\ c$, styczną do półkoła $b'\ c\ M$, wyobrażającego pierwszą falę składową, to linia ta będzie także styczną do wszystkich półkół,

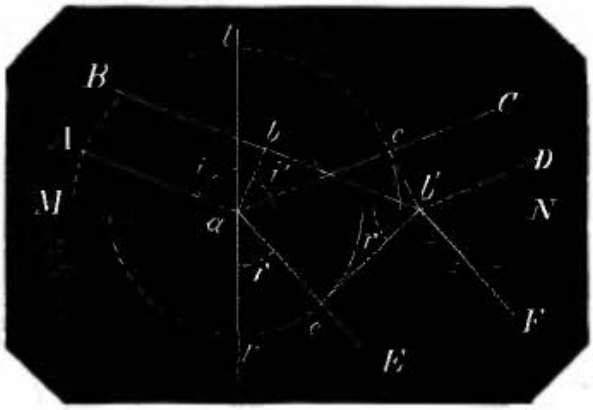


Fig. 357. Objaśnienie praw odbicia i załamania światła.

przedstawiających składowe fale, wyszłe z punktów, leżących między a i b' tak, że linia ta wyobraża płaską część fali głównej, która z nich wszystkich się utworzyła. Fala b' c, *odbita* od powierzchni wody i rozprzestrzeniająca się w kierunku odpowiadającej jej wiązki a C b' D równoległych promieni, tworzy z tą powierzchnią kąt c b' a, równy (jak to bardzo łatwo dowieść można geometrycznie) kątowi b a b', jaki z poziomem wody daje fala *padająca* a b. Jeżeli z punktu a wystawimy do poziomu M N normalną a l, wtedy kąt A a l (i), jaki tworzy z nią promień padający, jest równy kątowi nachylenia b a $b'(i')$ odpowiadającej fali a b względem tegoż poziomu, odjąwszy bowiem od kąta prostego kąt *padania* (i), lub kąt nachylenia fali (i'), otrzymujemy w jednym i w drugim razie wielkość jednakową, co dowodzi, że $i = i'$. To samo zupełnie dotyczy promienia odbitego a C i fali odbitej b' c. Ponieważ fala padająca i odbita są zawsze jednakowo nachylone do powierzchni wody, wynika z tego, że i promień padający oraz *odbity* są *zawsze równo nachylone* względem normalnej do tejże powierzchni w punkcie padania. Widzimy tedy, że prawo, orzekające równość kątów padania i odbicia światła, stanowi konieczny wynik teoryi undulacyjnej. Rozpatrzmy obecnie te części fal składowych, które przenikają do wody. Podczas gdy główna fala przenosi się w powietrzu od b do b', wokoło cząstki a tworzy się w wodzie fala składowa, której promień a e tak się ma do promienia a c (lub b b'), jak prędkość światła w wodzie do prędkości tegoż w powietrzu. Ponieważ, jak wykazały doświadczenia Fizeau i Foucault'a, pierwsza jest mniejsza od drugiej, to i a e jest mniejszy od a c. Linia prosta b' e, styczna do półkola, przedstawiającego pierwszą falę składową w wodzie, jest zarazem styczną do półkół, wyobrażających wszystkie inne fale składowe w wodzie, wyszłe z punktów, leżących między a i b'. Linia ta przedstawia tedy płaską falę główną, która rozchodzi się w wodzie w kierunku wiązki a E b' F prostopadłych do niej i równoległych pomiędzy sobą promieni. Widzimy, że te ostatnie tworzą z normalną a l' kąt r, różny od kąta padania i, a przytem mniejszy od niego, czyli że promień A a uległ w wodzie załamaniu i *zbliżył się do normalnej*.

Tak samo i fala główna $b' e$ w wodzie nachylona jest do powierzchni tejże pod kątem $e b' a$, równym kątowi r. Jeżeli dowolnie wybraną przez nas długość $a b'$ przyjmiemy za jedność, wtedy $b b'$ stanowi wstawę kąta padania i, zaś $a e$ wstawę kąta załamania r, są to bowiem prostopadłe, spuszczone z końca jednego boku odpowiedniego kąta na przedłużenie drugiego jego boku; z trygonometryi zaś wiadomo, że przy promieniu równym jedności ($a b' = 1$) prostopadła taka jest zarazem wstawą danego kąta. Stosunek długości $b b'$ do $a e$ jest takiż sam, co i prędkości światła w powietrzu do prędkości jego w wodzie, ten ostatni zaś stosunek jest niezmienny, bez względu na kąt padania promieni świetlnych. *Prawo tedy o stałości stosunku wstawy kąta padania do wstawy kąta załamania* okazuje się również koniecznym wynikiem teoryi undulacyjnej; dopiero w jej świetle staje się zupełnie jasnem. Mianowicie według tej teoryi, spółczynnik załamania dla dwóch danych środków jestto nic innego, jak stosunek prędkości, z jakiemi rozprzestrzenia się w nich światło. Spółczynnik np. załamania dla powietrza i wody, równy $4/3$, powiada nam tedy, że podczas gdy światło w pierwszym z tych środków przebywa w okrągłej liczbie 300000 kilometrów na sekundę, w drugim—o $1/4$ mniej, t. j. tylko 225000 kilom. Wniosek z teoryi falowania, że światło w środku silniej załamującym rozchodzi się wolniej, niż w słabiej załamującym, potwierdziły, jak już wiemy, doświadczenia Fizeau i Foucault'a. Co się tyczy samej owej różnicy w prędkościach światła w środkach rozmaicie załamujących, to teorya falowania tłómaczy ją przypuszczeniem, iż gęstość eteru, zawartego w ciałach stałych i płynnych, jest większa od gęstości jego w powietrzu, albo też w przestworach wszechświatowych. W razie gdy fala świetlna przechodzi z jednego optycznego środka do innego, drgający ruch eteru udziela się eterowi, mniej albo więcej gęstemu i dlatego też zajść musi pewna zmiana w dotychczasowym sposobie rozprzestrzeniania się fali. Ażeby dobrze zrozumieć rodzaj tej zmiany, zaczerpnijmy z mechaniki pewne dane co do praw uderzania o siebie ciał sprężystych. Przypuśćmy, że dwie kule słoniowe *niejednakowej wielkości* zawieszone są na nitkach jedna obok drugiej tak,

że dotykają się wzajemnie. Jeżeli mniejszą z nich uniesiemy nieco do góry i puścimy, wtedy spadając uderzy ona o większą, przyczem zobaczymy, że ta ostatnia poruszy się w kierunku uderzenia, mniejsza zaś kula odskoczy napowrót, t. j. w stronę przeciwną kierunkowi spadku. Gdy zaś uczynimy to samo z większą kulą, wtedy ta, uderzywszy o mniejszą, porusza ją naprzód, lecz i sama także podąża za nią, jakkolwiek porusza się ona w tę stronę z mniejszą nieco prędkością, niż jak gdyby tej drugiej kuli nie napotkała. W obu tedy razach kula uderzająca udziela część swego ruchu kuli uderzanej, lecz sama nie pozostaje przytem w spoczynku. Rzecz się zmienia, gdy kule posiadają *wielkość jednakową*, wtedy bowiem uderzająca zatrzymuje się, cały swój ruch udzielając uderzanej, która biegnie w pierwotnym kierunku tamtej. Prawa te można także zastosować do przenoszenia się drgającego ruchu eteru świetlnego z danej warstwy na drugą, znajdującą się w spoczynku. Jeżeli obydwie posiadają jednakową gęstość, a więc także, gdy masy jednakowych ich objętości są równe, wtedy druga warstwa przejmuje całkowicie ruch pierwszej, ta ostatnia zaś pozostaje w spoczynku, dopóki nie otrzyma nowego impulsu od strony źródła światła. Z tego wynika, że w jednym i tym samym, wszędzie jednakowo optycznie gęstym środku, nie mogą powstać cofające się napowrót fale składowe; zgodnie z tem widzimy, że w środku takim światło rozprzestrzenia się zawsze tylko naprzód, a nie wstecz. Przeciwnie, gdy dwie owe warstwy różnią się pod względem swej gęstości, a więc gdy jednakowe ich objętości zawierają nierówne masy, wtedy warstwa rzadsza uderzająca udziela wprawdzie ruch swój uderzanej, lecz i sama zachowuje także część ruchu, tylko że kierunek tegoż staje się wręcz przeciwnym (podobnie jak z małą kulą, która spadając, uderza o większą, popycha ją naprzód, poczem sama cofa się w tył), wskutek czego powstają powrotne fale składowe, dające razem odbitą falę główną. Widzimy tedy, że zjawisko odbicia się światła może mieć miejsce tylko wtedy, gdy fala świetlna uderza o powierzchnię, odgraniczającą dwa środki o niejednakowej gęstości.

§ 4. Rozszczepienie i pochłanianie światła w obec teoryi falowania.

Prędkość światła dla różnych jego rodzajów jest jednakowa tylko w swobodnym eterze, w eterze zaś, zawartym w ciałach, t. j. w przestrzeniach pomiędzy ich cząstkami, promienie świetlne o rozmaitej barwie rozprzestrzeniają się z szybkością niejednakową. Wpływ, wywierany przez cząstki danego ciała na przebiegające przezeń fale świetlne, zależy oczywiście od natury tegoż ciała. Wiemy np., że w wielu substancyach bezbarwnych i przezroczystych, jak woda lub szkło, promienie o większej częstości drgań zostają silniej odchylone od pierwotnego kierunku, aniżeli promienie o mniejszej częstości drgań i to właśnie stanowi przyczynę rozszczepiania się światła złożonego przy przejściu jego przez pryzmat z takiej substancyi. Ponieważ, jak widzieliśmy w poprzednim paragrafie, spółczynnik załamania dla dwóch danych środków, wyraża tylko stosunek prędkości światła w tych ostatnich, to *niejednakowe załamanie różnych promieni świadczy o mniejszej albo większej szybkości ich rozprzestrzeniania się w załamującym środku.* Te promienie, które się najsilniej załamują, ulegają oczywiście największej zwłoce przy swem rozchodzeniu się, dla najsłabiej zaś załamanych opóźnienie w prędkości jest najmniejsze. Takie ciała stałe lub ciekłe, jak np. wspomniane już szkło albo woda, załamują najsilniej promienie fioletowe, najsłabiej zaś czerwone i dlatego pryzmaty szklane lub wodne dają nam zwykłe widma, poczynające się od czerwieni i kończące się fioletem. Ciała zaś lotne w ogóle, a więc także powietrze atmosferyczne, powodują tak nieznaczne rozszczepienie przechodzącego przez nie światła, że można przyjąć, iż prędkość światła jest w nich dla wszystkich barw jednakowa, podobnie jak w swobodnym eterze. Spółczynnik np. załamania dla tego ostatniego i powietrza przy 0^0 i ciśnieniu 760 milim. równa się stosunkowi 1,000294 do 1.

Bardzo ciekawym jest wpływ cząstek niektórych barwnych substancyj na prędkość przechodzącego przez nie światła. Jeżeli szklany wydrążony pryzmat napełnimy alkoholowym roztworem

fuksyny (barwnik anilinowy) i będziemy przezeń patrzyli na silnie oświeconą szczelinę, zobaczymy widmo, w którem *promienie niebieskie i fiotetowe są mniej załamane, niż czerwone i żółte*, innemi słowy to, co zwykle widzimy na końcu widma, w danym wypadku ujrzymy na jego początku, ten ostatni zaś będzie przesunięty ku środkowi. W fuksynie zatem promienie niebieskie i fioletowe rozprzestrzeniają się szybcej, niż czerwone i żółte. Zjawisko to, odkryte przez Christiansen'a i potwierdzone przez Kundt'a, który zbadał je na wielu innych pochłaniających światło barwnych substancyach, nosi nazwę *anormalnego rozszczepienia*. Pokazuje ono, że jedyną charakterystyczną cechą danego jednorodnego światła jest częstość drgań, inne bowiem jego właściwości, jak łamliwość lub długość fali ulegają zmianie. W istocie wiemy, że gdy promień np. czerwony, zielony lub jakikolwiek jednorodny, przechodzi z powietrza do wody albo szkła, barwa jego od tego się nie zmienia, częstość drgań pozostaje ta sama. Długość natomiast fali w wodzie oczywiście jest inna, niż w powietrzu, skoro bowiem prędkość światła w tem ostatniem jest większa niż w pierwszej, a długość fali w ogóle równa się ilorazowi z prędkości przenoszenia się ruchu drgającego przez częstość drgań, to gdy ta ostatnia jest niezmienną, fala świetlna, odpowiadająca danej barwie, musi być w wodzie krótsza niż w powietrzu (w stosunku $^3/_4$ do 1).

Nasze wrażenia barw są czysto subjektywne, zależą one tylko od ilości fal świetlnych, uderzających w ciągu jednostki czasu o siatkówkę oka tak, że gdy liczba tych uderzeń zmienia się, wtedy odbieramy wrażenie innej barwy. Otóż czy istnieją warunki, przy których jedno i to samo ciało świecące wysyłałoby do nas światło o zmieniającej się barwie? Przypomnijmy sobie zasadę Doepplera (str. 285), głoszącą, że przy jednakowej liczbie drgań ciała dźwięczącego słyszymy ton wyższy albo niższy, zależnie od tego, czy ciało to zbliża się do nas lub oddala, albo też czy my zbliżamy się doń lub oddalamy. Ta sama zasada stosuje się także do światła. Jeżeli wyobrazimy sobie, że z dalekich przestworów wszechświata zbliża się ku nam z dostateczną prędkością jakieś ciało, wysyłające np. żółte światło, wtedy

barwa jego wyda nam się zielonawą, albowiem oko nasze otrzymuje w ciągu sekundy większą liczbę uderzeń, niż w razie, gdyby ciało owo znajdowało się w spoczynku. Przeciwnie przy jego oddalaniu się, liczba fal, dochodzących do oka w przeciągu sekundy zmniejszałaby się i żółta barwa wydawałaby się czerwonawą. Gdyby promienie od tego poruszającego się ciała padały na szklany pryzmat, ulegałyby w nim większemu albo mniejszemu załamaniu. W spektroskopie skierowanym na to ciało, odpowiadająca mu jasna widmowa linia przesuwałaby się w stronę zieleni lub czerwieni, zależnie od tego, czy zbliżałoby się ono ku nam albo oddalało. Podobnie rzecz się ma także z ciemnemi liniami w widmach gwiazd, oddalających się albo zbliżających ku nam. Z przesunięcia się tych linii w jedną lub w drugą stronę widma oraz z wielkości tego zboczenia można wnosić o kierunku ruchu gwiazdy i o jej prędkości. W ten sposób podczas jednej obserwacyi Syryusza zauważono, iż gwiazda ta oddalała się od naszego systemu słonecznego z prędkością 48 kilometrów na sekundę. Wprawdzie i lunety pozwoliły astronomom odkryć własny ruch wielu gwiazd stałych, lecz za pomocą tych przyrządów można dostrzedz tylko zmianę miejsca w kierunku prostopadłym do linii widzenia. Spektroskop zaś oddaje pod tym względem tę nieocenioną przysługę, że ujawnia także ruch gwiazdy w kierunku samej linii widzenia. Lockyer obserwował przesunięcia ciemnej linii *F* w widmie słonecznem i jasnej linii *F* w widmie atmosfery słonecznej (chromosfery), a obserwacye te pozwoliły mu dokładnie obliczyć prędkość, z jaką rozżarzony wodór, składający chromosferę, wznosi się i opuszcza albo też wiruje w szalonym pędzie. Zmiana w liczbie dochodzących nas fal świetlnych, odpowiadająca owym przesunięciom, wskazuje prędkość 50 do 60 kilometrów na sekundę; rachunek zaś, zrobiony na podstawie najsilniejszego zboczenia linii, dał w rezultacie prędkość 190 kilometrów. Najgwałtowniejsze orkany w atmosferze ziemskiej, szybkość których dochodzi najwyżej do 45 metrów na sekundę, są chyba niewinnym wiaterkiem w obec tych straszliwych orkanów w atmosferze słońca (1).

(1) Lomel, l. c.

Dotychczas, mówiąc o teoryi falowania światła, poświęcaliśmy uwagę naszą nie tyle źródłu tegoż, ile sposobom jego rozprzestrzeniania się, obecnie zaś chcemy zająć się nieco zbadaniem procesu, zachodzącego, według tejże teoryi, w samem ciele świecącem. Otóż przyjmują obecnie, że dane ciało staje się źródłem światła—zobaczymy w następnej księdze, że stosuje się to także do ciepła—wskutek nadzwyczaj szybkiego ruchu drgającego jego cząstek, który to ruch za pośrednictwem eteru odczuwamy jako wrażenie ciepła lub światła, zależnie od częstości drgań. Podobnie jednak, jak ton, wydawany przez drgającą strunę, zależy od jej długości, natężenia, grubości i materyału z którego jest zrobiona, tak też i drgania oddzielnych cząstek ciała świecącego uwarunkowane są ich budową i naturą chemiczną. Można powiedzieć, że cząstki te nastrojone są na pewną barwę—tę właśnie, którą świeci dane ciało; dlatego też charakterystyczną cechą wielu ciał są jasne linie w ich widmie. Musimy wszakże nadmienić, że w *ciałach stałych*, w *których spójność* bywa nader znaczna, drgający ruch jest bardzo przez nią ograniczony tak, że żadna z cząstek nie może się oddalić po za pewną odległość od położenia równowagi, około którego wykonywa swe oscylacye. Te ostatnie w danym wypadku nie zależą od chemicznej natury ciała; częstość zaś ich nie jest stałą i jednakową dla wszystkich cząstek, lecz w danej chwili może być najrozmaitszą. W taki sposób tłómaczy się, dlaczego ciała stałe, niezależnie od chemicznego swego składu, dają przy ogrzewaniu widmo *ciągłe*, które przy względnie nizkiej temperaturze zawiera tylko niewidzialne ultra-czerwone promienie, w miarę zaś jej podwyższania, pojawiają się także stopniowo promienie czerwone, żółte, zielone i t. d. aż do fioletowych, występujących przy temperaturze rozżarzenia do białości. Również i *ciała ciekłe*, w których spójność jest jeszcze dość znaczna, będąc doprowadzone do stanu rozżarzenia, dają widmo ciągłe. Oprócz jednak oscylacyj, wykonywanych przez cząstki ciał stałych oraz ciekłych i podlegających ograniczającemu wpływowi wspomnianej spójności pomiędzy ich cząstkami, wewnątrz każdej z tych ostatnich odbywają się nadto drgania *drobniejszych jej składników*, zależne

już tylko od względnego ich układu w cząstce i od ich natury chemicznej. Lecz jasne linie, odpowiadające tym drganiom, są niewidzialne dlatego, że znikają na jasnem również tle ciągłego widma, powstającego wskutek drgań całych cząstek. Dopiero gdy te ostatnie zostają uwolnione od wpływu spójności, t. j. gdy ciało przechodzi w stan lotny, występują charakterystyczne dlań jasne linie widmowe, zdradzające chemiczną jego budowę.

W księdze o dźwięku zatrzymaliśmy się nieco dłużej nad wpływem zgodności drgań dwóch lub więcej ciał oscylujących (str. 352) i zauważyliśmy tamże, że wpływ ten stosuje się również do drgań świetlnych. Gdy dana fala wprawia w ruch ciało, zdolne do wysyłania takich samych fal, wtedy udziela mu ona część swego ruchu i dlatego przechodzi osłabiona, każda zaś inna fala biegnie dalej niezmieniona. Wyobraźmy sobie przestrzeń wypełnioną stroikami lub strunami, naciągniętemi we wszystkich kierunkach i nie interferującemi ze sobą; wszystkie one nastrojone są na jeden i ten sam ton tak, że będąc wprawione w drgania, wzmacniają się wzajemnie i wydają ten właśnie ton. Gdy zaś przestrzeń nie stanowi źródła dźwięku, lecz tylko służy jako środek do przeprowadzania go z innego źródła, wtedy okazuje się ona dziwnie, że tak powiemy, nieprzezroczystą dla tego jedynie tonu, który przedtem zdolna była wydawać. Wszelkie tony, wyjąwszy ten, na który nastrojone są stroiki lub struny, wydawane przez silny instrument z jednej strony przestrzeni, słyszane są z drugiej z taką prawie intensywnością, jak gdyby tych stroików lub strun wcale nie było. Lecz gdy instrument wydaje ton, właściwy tym ostatnim, wtedy pochłaniają one stopniowo odnośny ruch drgający i same poczynają drgać; jeżeli przytem liczba ich jest dostatecznie wielka, pochłonięcie to jest zupełne i dany ton wcale nie przechodzi na drugą stronę, wyjąwszy tę jego część, którą one wysyłają. Przypuśćmy obecnie, że mamy ciało, znajdujące się w tak szybkim drgającym ruchu, iż nie wydaje już dźwięku, lecz wysyła światło pewnej barwy. Otóż drugie ciało tego samego gatunku co pierwsze, będzie najbardziej zdolne do pochłonięcia tego światła, albowiem dwie części jednej i tej samej materyi, znajdujące się w jednakowych wa-

runkach, drgają według jednakowych praw. Płomień zawierający np. rozżarzone cząstki sodu, można porównać do owej przestrzeni, wypełnionej stroikami, nastrojonemi na pewien specyalny ton; w istocie cząstki te są zdolne tylko do oscylacyj, odpowiadających barwie żółtej i łatwo zrozumieć, dlaczego pochłaniają one te właśnie żółte promienie, osłabiając je, albo nawet wcale nie przepuszczając takowych.

Taką jest, w kilku słowach wyrażona, zasada pochłaniania ruchu drgającego, do której Stokes doszedł przeszło dwadzieścia lat temu (1). Sprowadza ona, jak widzimy, do jednego ogólnego punktu widzenia zjawiska pochłaniania dźwięku, światła, a także, jak o tem następnie się przekonamy, ciepła promienistego. W końcu należy dodać jeszcze, że pochłonięty ruch nie znika, lecz przenosi się w całości na ciało pochłaniające. Jedna część pochłoniętego ruchu eteru zużywa się na przezwyciężenie spójności pomiędzy cząstkami, które odsuwają się od siebie, albo nawet *zupełnie oddzielają: ciało przechodzi* ze stanu stałego w ciekły, z ciekłego w lotny i wreszcie, gdy same cząstki rozpadają się na jeszcze drobniejsze swe składniki, ulega chemicznemu rozkładowi. Na tem ostatniem działaniu pochłoniętych fal świetlnych opiera się, jak wiemy, rozkład niektórych substancyj, używanych w fotografii. Druga zaś część pochłoniętego ruchu wprawia cząstki w drgania, albo też już istniejące wzmacnia, przez co cząstki te stają się same źródłem nowych fal eteru, objawiających się dla nas jako ciepło lub światło, jak np. podczas zjawisk żarzenia się, fluorescencyi lub fosforescencyi.

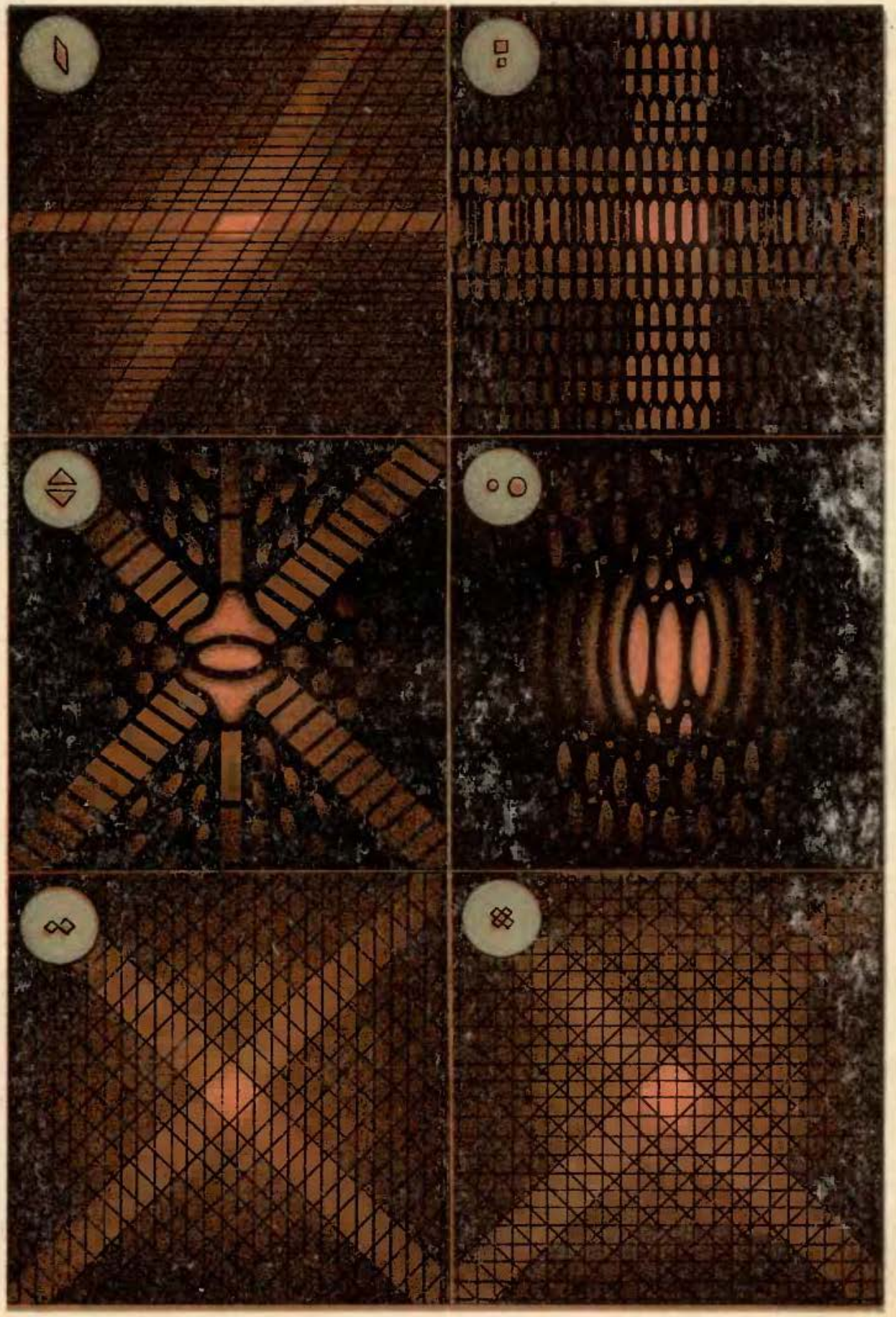
§ 5. Uginanie się światła (dyfrakcya).

Gdy Newton powtórzył i pod niektóremi względami odmienił doświadczenia Grimaldi'ego nad powiększaniem się cienia wązkich przedmiotów, jak włosów, nici, igieł (str. 542), przekonał się wkrótce, że zboczenie promieni świetlnych nie pochodziło, jak sądzono z początku, od załamania się ich jakoby w cienkiej warstwie zgęszczonego powietrza, zbierającego się na po-

(1) *Tait, Progrès récents de la physique.*

wierzchni tychże przedmiotów. Widział on, że powstawanie linij było zupełnie niezależne od natury substancyj, poddawanych doświadczeniu: czy to był metal, kamień, szkło, drzewo, lód, zawsze pojawiały się grupy linij, mające określone barwy i idące w pewnym porządku. Zauważył również, że rozmaite jednorodne barwy widma dawały linie niejednakowej szerokości. Ze wszystkich tych faktów Newton wyprowadził ten tylko wniosek, że promienie świetlne, przechodząc mimo krawędzi ciał, ulegają zboczeniu, istotnego jednak objaśnienia, jak wiemy, nie mógł znaleść.

Liczne doświadczenia, urządzane obecnie w celu zbadania tego zjawiska, można podzielić na dwa szeregi. Pierwszy obejmuje te, w których światło przechodzi mimo krawędzi prostolinijnych, a więc np. przez jednę albo więcej bardzo wązkich szczelin o brzegach równoległych; w doświadczeniach zaś drugiego rodzaju przepuszcza się światło przez jeden lub kilka maleńkich otworów trójkątnych, czworokątnych lub okrągłych. Jeżeli przez ciasną pionową szczelinę przepuścimy wiązkę promieni słonecznych i rzucimy je na ekran, dość daleko od szczeliny umieszczony, zobaczymy na nim oprócz białej jasnej linii, utworzonej pośrodku przez promienie, które doszły doń w kierunku prostolinijnym, dwa boczne szeregi kolejno ciemnych i jasnych linij, podobnych do linij interferencyjnych w doświadczeniu Fresnel'a (patrz fig. 355, str. 552). Zjawisko to dowodzi, że, jak chce zasada Huyghens'a, światło rozprzestrzenia się nietylko prosto—lecz także w pewnych specyalnych warunkach krzywolinijnie. Środkowa jasna linia oznacza to miejsce na ekranie, na które pada fala główna; tutaj właśnie wszystkie fale składowe, wychodzące z różnych punktów szczeliny, wspomagają się wzajemnie, przebywają bowiem drogi ściśle jednakowe. Wiemy jednak, że fala główna, przechodząc przez otwór, wysyła także fale składowe do przestrzeni, które właściwie powinny być zupełnie ciemne; te właśnie fale dają początek owym jasnym i ciemnym liniom w tych miejscach na ekranie, które znajdują się nie naprzeciwko szczeliny, lecz z boków jéj. Gdy padają one na taki bocznie położony punkt ekranu, mogą wspomagać lub też



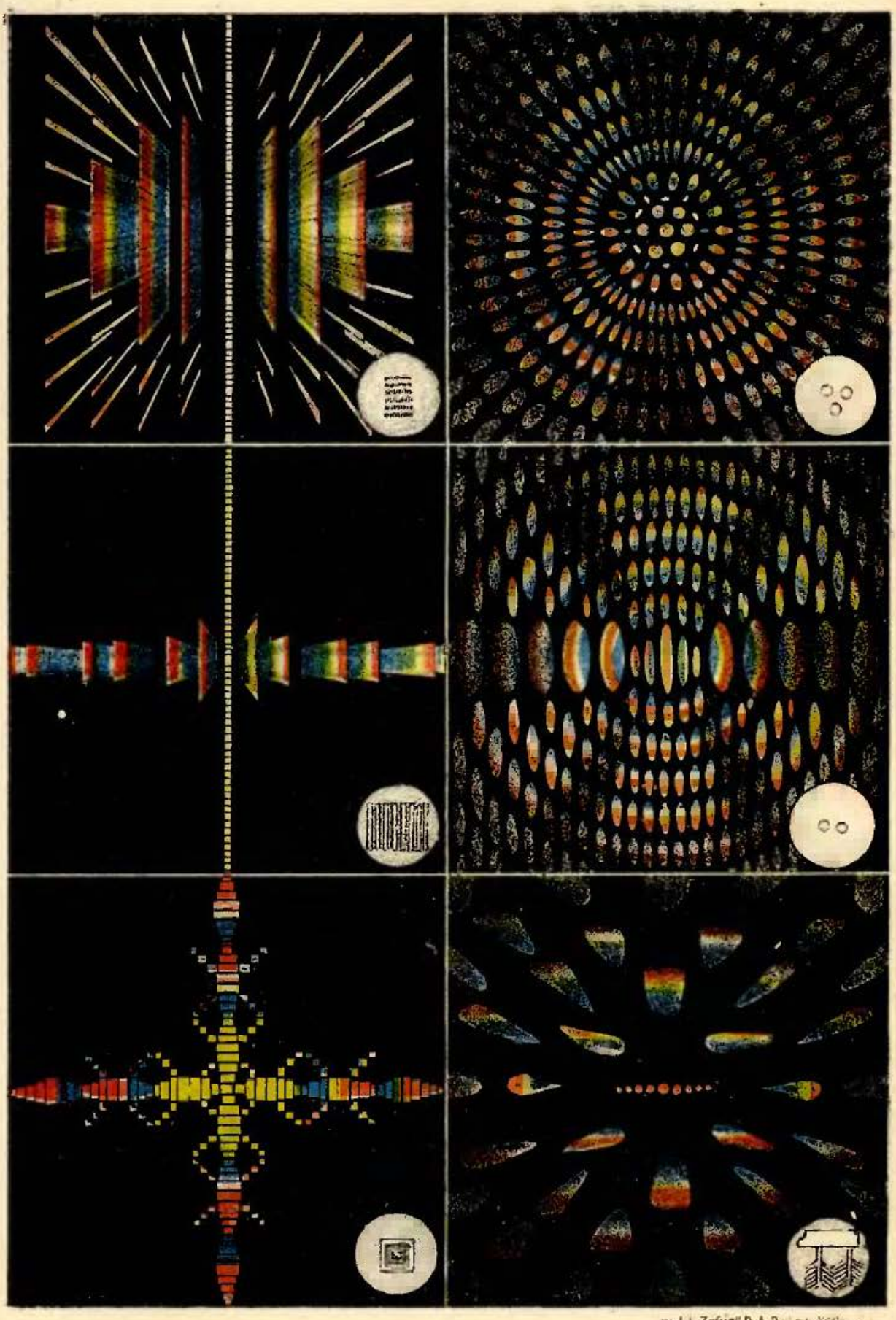
VI. Zjawiska interferencyi.

Uginanie się światła przez małe otwory.
Prążki jednobarwne.

zobojętniać się wzajemnie, zależnie od różnicy w drogach przebytych; w pierwszym razie tworzy się jasna, w drugim zaś ciemna linia. Fale składowe, odosobnione od fali głównej, tworzą promienie *ugięte*, samo zaś zjawisko zbaczania światła od kierunku prostolinijnego zowiemy *uginaniem* się czyli *dyfrakcyą*. Co do rezultatów użycia światła białego lub jednorodnego, t. j. co do barw linij, są one takie same, jak w doświadczeniach nad interferencyą (patrz str. 553). Podobnie, jak w tych ostatnich w miarę zmniejszania kąta pomiędzy zwierciadłami ścieśniamy coraz bardziej owe linie na ekranie, aż wreszcie nie można ich odróżnić, tak też w doświadczeniach nad uginaniem światła powtarza się to samo przy rozszerzaniu szczeliny, przez którą ono przechodzi. Gdy chcemy, ażeby odosabniające się fale składowe ujawniły dla nas swą obecność, musimy przepuszczać światło przez bardzo małe otwory, albowiem przy większych zjawisko uginania jest tak niewyraźne, iż nie możemy go dostrzedz. Gdy obserwuje się je przez lunetę, wtedy obraz dyfrakcyjny tworzy się w płaszczyznie ogniskowej objektywu i widziany jest przez okular w powiększeniu, dlatego też przy użyciu lunety otwory owe mogą być większe. Przyrząd, służący do tego celu, zaopatrzony jest od strony objektywu w obręcz drewnianą, na którą naciągnięta jest cynfolia z wyciętym w niej małym otworkiem. Obrazy widziane wtedy są najróżnorodniejsze, zależnie od kształtu tego ostatniego. Najprostszy widok przedstawia się wtedy, gdy otwór jest okrągły; mamy wtedy jasny jego okrągły obraz, otoczony naprzemian jasnemi i ciemnemi pierścieniami, które przy użyciu białego światła są lekko zabarwione. Jeżeli otwór przedstawia równoległobok (patrz tablicę p. t. „uginanie się światła przez małe otwory, prążki jednobarwne“), wtedy całe pole widzenia jest podzielone dwoma szeregami ciemnych linij na mnóstwo równoległoboków: pośrodku widać najjaśniejszy z nich, wokoło niego zaś mniej jasne, przyczem wszystkie razem tworzą pochylony krzyż. Na wymienionej tablicy, uwidoczniającéj uginanie się światła czerwonego, przedstawione są jeszcze inne wzory, otrzymane przy przepuszczaniu tegoż światła przez otwory najrozmaitsze, kształty których podane są obok każdego odpowiadającego im obrazu.

Nauka o dyfrakcyi czyli uginaniu się światła została znakomicie posunięta naprzód dzięki pracom Fraunhofer'a, któremu, jak wiemy, wiedza zawdzięcza zbadanie ciemnych linij w widmie słonecznem. Gdy znakomity ten fizyk obserwował obrazy, powstające przy przepuszczaniu światła przez liczne małe otwory, wpadł na pomysł zbadania także zjawisk, występujących wtedy, gdy przechodzi ono przez bardzo gęstą siatkę, utworzoną z nadzwyczaj delikatnych drucików lub nitek. Z początku Fraunhofer przygotowywał takie siatki, naciągając bardzo cienkie druty mosiężne na kwadratową ramę, przyczem równość odstępów pomiędzy pojedyńczemi drutami regulował za pomocą delikatnych szrub. Następnie chcąc otrzymać bardziej prawidłowe i subtelne odległości pomiędzy szczelinami, przepuszczającemi światło, pokrywał szklane tafelki cienkiemi blaszkami złota i na tych ostatnich nacinał owe szczeliny; wreszcie na samem szkle rył dyamentem kreski tak cienkie, że na długości jednego milimetra mieściło się ich więcej niż tysiąc, przyczem każda z nich stanowiła ciemny ekran dla światła swobodnie przechodzącego pomiędzy niemi. Oprócz siatek o liniach tylko wzajemnie równoległych, Fraunhofer używał jeszcze i takich, w których dwa układy linii przecinały się pod kątem prostym tak, że oczka miały formę kwadratową, dalej siatek o oczkach okrągłych i wielu innych, przez co otrzymał znaczną liczbę obrazów, gdzie ciemne i jasne prążki tworzyły zadziwiająco prawidłowy system. Obrazy te poddawał on starannej obserwacyi i pokazał, że są najzupełniej zgodne z teoretycznemi wnioskami.

Tablica zatytułowana: „uginanie się światła przez siatkę, prążki wielobarwne“, pokazuje obrazy otrzymane przy użyciu światła białego. Gdy np. światło to przechodzi przez siatkę o oczkach równoległych, obraz składa się z jasnego środkowego prążka (strona lewa, figura środkowa), za którym idą najprzód dwa szerokie prążki ciemne, a następnie dwa kompletne widma, o fiolecie zwróconym ku wnętrzu i o barwach absolutnie czystych. Za temi widmami idą dalsze, coraz to szersze i o barwach stopniowo bledniejących. Zauważmy mimochodem, że widmo dyfrakcyjne jest *normalne*, gdyż rozmaite barwy jego zaj-



w t-ii. „Zofija" B. A. Pol...

VII. Zjawiska interferencyi.

Uginanie się światła przez siatkę.
Prążki wielobarwne.

do 572 kn

Wyższa Szkoła Biblioteka Nauczycielska
w Płocku

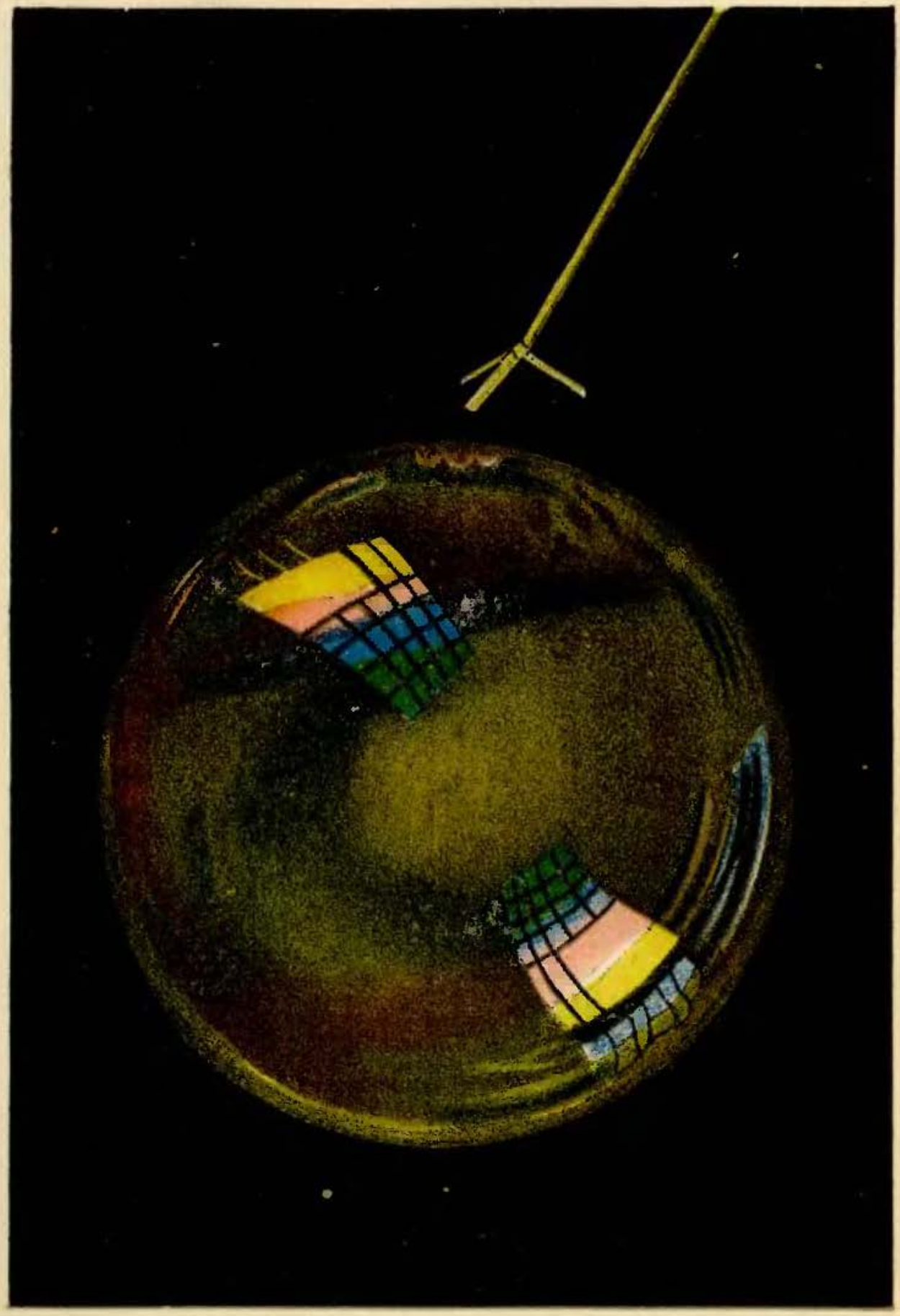
mują miejsca, względne rozmiary których są proporcyonalne do odpowiedniej długości fali, podczas gdy w widmie refrakcyjnem barwy te rozszerzają się zależnie od substancyi pryzmatu. Poniżej opisanego obrazu tablica pokazuje widmo otrzymane przez siatkę o oczkach kwadratowych; obok zaś (strona prawa, figura dolna) widzimy obraz przez siatkę o wyglądzie pierzastym. Zjawiska dyfrakcyi, tutaj wymienione, możemy obserwować także, patrząc na słońce poprzez pióro lub też czarną wstążkę, trzymaną tuż przed okiem (Newton); spostrzegamy wtedy liczne łuki tęczowe, które powstają wskutek tego, że cienie rzucane na siatkówkę oka przez oddzielne włókna, otoczone są równoległemi barwnemi prążkami. Podobne zjawiska ukazują się nam również, gdy zamkniętemi prawie oczyma patrzymy na płomień świecy, wtedy bowiem rzęsy tworzą nieprawidłową nieco siatkę.

Wszystkie te doświadczenia wzbudzają w prostym już laiku wielki interes, nieskończenie wszakże ważniejszemi są one dla badaczy przyrody, albowiem każde z nich stanowi nowy dowód na korzyść teoryi falowania światła i potwierdza słuszność wywodów matematycznej analizy, otrzymanych jeszcze przed obserwacyą. Nie możemy się tutaj wdawać w szczegółowe ich wyłuszczanie, powiemy tylko, że w ogóle obrazy te polegają na koincydencyi albo też interferencyi światła przechodzącego przez siatkę. Wszystkie te oddzielne wiązki światła, które przez oczka jej przechodzą równolegle do siebie i pod jednakowym kątem ugięcia odnośnie do promieni na nią padających, zbierają się po przejściu przez objektyw lunety w jednem miejscu płaszczyzny obrazu. Dajmy na to, że światło jest jednorodne i że każda z tych wiązek opóźnia się względem następnej o długość odpowiadającej mu fali; wtedy wszystkie one doskonale wzmacniają się wzajemnie i wytwarzają silnie oświeconą część obrazu. Lecz w pewnej odległości od tego kierunku, gdzie różnica w fazach dwóch sąsiednich wiązek wynosi jedną długość fali, spotykają się wiązki, dla których różnica ta równa się niecałkowitej liczbie fal; tutaj następuje częściowa lub zupełna interferencya. Ta ostatnia jest kompletna dla dwóch wiązek, z których jedna opóźnia się względem drugiej np. o kilkaset i pół długości fal

tak, że w odpowiedniem miejscu powstaje ciemna część obrazu. Zaledwie potrzebujemy dodać, że następne jasne jego części wypadają tam, gdzie różnica w drogach przebytych przez nakładające się wiązki wynosi całkowitą liczbę fal. Stopniowe zmniejszanie się natężenia świetlnego dalszych jasnych linij jest także skutkiem interferencyi, zachodzącej wewnątrz każdej oddzielnej wiązki. Jasne linie leżą tem bliżej obrazu samego otworu, im mniejszą jest długość fali dla jednorodnego światła, użytego do doświadczenia. W razie zaś, gdy światło to jest białem, jasne linie, odpowiadające różnicy jednej fali, układają się kolejno podług długości tej ostatniej i tworzą pierwsze widma dyfrakcyjne po obu stronach jasnego obrazu szczeliny; drugie, trzecie i t. d. widma powstają przy większej różnicy w fazach. Gdy w padającem świetle brak pewnych promieni, w widmach tych pojawiają się ciemne linie; tak np. przy użyciu światła słonecznego można dostrzedz w nich ciemne linie Fraunhofer'a. Dzięki występowaniu tych ostatnich w widmie dyfrakcyjnem, można było dokładnie oznaczyć odpowiadające im długości fal, czego właśnie dokonał sam Fraunhofer. Przy pomocy pewnego przyrządu, pozwalającego mierzyć kąt ugięcia promieni, które przeszły przez siatkę, Angström obliczył wielkość różnicy w drogach przez nie przebytych, równą jednej, dwom, trzem i t. d. falom, zależnie od tego, czy mierzenia czynione były w pierwszem, drugiem lub trzeciem widmie dyfrakcyjnem. W rezultacie znalazł on długość fali dla promieni widma, począwszy od czerwieni do skrajnego fioletu.

§ 6. Barwy cienkich warstw.

Któż z nas nie zabawiał się w dzieciństwie puszczaniem owych lekkich kulek o przedziwnie doskonałej formie i wspaniałych barwach, jednem słowem baniek mydlanych? Wiemy, że gdy z początku posiadają one nieznaczną średnicę, powłoka ich jest jednobarwną i przezroczystą. W miarę wdymania powietrza, ciśnienie na wewnętrzną powierzchnię bańki powiększa się, przez co bańka się rozszerza i powłoka jej staje się coraz



w Lit, Zofija B A Bukaty Krolewska

III. Zjawiska interferencyi światła.

Barwy cienkich warstw przezroczystego ciała.
Bańka mydlana.

b. sh. 575.

Wyższa Szkoła Rolnicza
Biblioteka
w Lublinie

cieńsza. W chwili, gdy grubość jej dochodzi do pewnej granicy, na powierzchni bańki ukazuje się szereg barw, z początku bladych, które jednak stopniowo zyskują na intensywności, wzajemnie się zastępują i mieszając się, tworzą mnóstwo najsubtelniejszych barwnych odcieni. Wreszcie gdy ścianka staje się tak cienka, że nie może przeciwdziałać ciśnieniu gazu na jej wewnętrzną powierzchnię, na bańce pojawiają się ciemne plamy i wkrótce potem pęka ona; ten właśnie stan napięcia przedstawiony jest na tablicy (patrz chromolitografię „bańka mydlana"). Proste to doświadczenie posłużyło Newtonowi za punkt wyjścia do całego szeregu zadziwiających badań i obecnie jeszcze barwy baniek mydlanych stanowią jedno z najciekawszych zjawisk w dziedzinie optyki. W istocie przedstawia ono tylko pojedyńczy wypadek z całego łańcucha zjawisk, jakie zawsze można obserwować, gdy światło ulega naprzemian załamaniu i odbiciu o powierzchnie, ograniczające cienkie warstwy ciał przezroczystych. Podobne zjawiska powstają zarówno w ciałach stałych, jak ciekłych i gazowych. Kryształy rozpadające się, dzięki swej budowie, na bardzo cienkie blaszki, np. mika, gips i talk, dalej cienko wydęte szkło, powierzchnia stali, pokryta cienką warstwą tlenku żelaza, przedstawiają barwy, podobne do barw bańki mydlanej. Należą tutaj także barwy delikatnych błonek na skrzydłach niektórych owadów, szkieł, które przez długi czas wystawione były na działanie wilgoci, zanieczyszczonej wody, pokrytej cienką tłuszczową warstwą i t. p. Wszystkie te zjawiska znane są w fizyce pod ogólnem mianem *barw cienkich warstw*, sam zaś proces zowiemy *iryzacyą*.

Zanim podamy przyczynę tego rozszczepienia światła na barwy prostsze, przytoczymy warunki, w jakich ono może mieć miejsce oraz prawa, określające porządek tych barw. W celu dokładniejszego zbadania odnośnych zjawisk, Newton umieścił wypukłą soczewkę na płaskiej szklanej tafelce i przyciskał ją lekko do tej ostatniej, przez co obydwie powierzchnie stykały się w jednem miejscu, począwszy od którego wzajemna ich odległość była coraz większa, lecz do pewnej granicy dość nieznaczna (fig. 358, str. 576). Gdy od takiego układu dwóch szkieł

odbiło się światło, padające prawie prostopadle do granicznej powierzchni, wokoło punktu zetknięcia pojawiły się różnobarwne współśrodkowe pierścienie, tem węższe, im większą była ich odległość od wspólnego środka. Każda barwa przedstawiała się z początku jako kolista płaszczyzna jednostajnego koloru, która rozszerzając się coraz dalej w miarę silniejszego naciskania soczewki, odłączała się wreszcie jako pierścień i ustępowała miejsca innej barwie wokoło wspólnego środka. Przy dostatecznem ciśnieniu w tym ostatnim pojawia się zawsze czarny krążek, a cały obraz składa się z systemu naprzemian jasnych i ciemnych pierścieni, stopniowo coraz mniej wyraźnych (fig. 359, str. 577). Barwy idące od środkowego punktu do najbliższego ciemnego pierścienia, Newton zaliczył do pierwszego rzędu (od

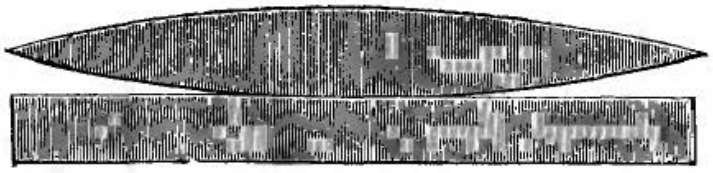


Fig. 358. System szkieł Newtona.

O do *A*); są one następujące: czarna, blado-niebieska, biała, żółta, pomarańczowa, czerwona. Od tego miejsca do następnego ciemnego pierścienia idą barwy drugiego rzędu: fioletowa, niebieska, żółtawo-zielona, żółto-czerwona (od *A* do *B*); dalej idą jeszcze barwy trzeciego, czwartego i piątego rzędu.

Jeżeli powyższy układ dwóch szkieł rozpatruje się nie w świetle odbitem, lecz przechodzącem, widać również szereg barwnych pierścieni, o wiele jednak bledszych, niż w poprzednim wypadku, oprócz tego porządek barw jest inny i w środku, zamiast czarnego, pojawia się biały krążek. Gdy porównano obrazy, otrzymane w świetle odbitem i przechodzącem, przekonano się, że barwy, pojawiające się w obu razach na tych samych miejscach, są dopełniające tak, że promień odbity w pewnym punkcie oraz promień, który przezeń przechodzi, utworzyłyby razem

światło białe. Przy pomocy zwierciadeł udało się Young'owi i Arago dokładnie nałożyć obraz pierścieni, pojawiających się w świetle odbitem, na ich obraz w świetle przechodzącem: okazało się, że gdy obadwa posiadały jednakowe natężenie, pierścienie znikały zupełnie, a raczej dopełniały się wzajemnie do światła białego.

Jeżeli do powyższych doświadczeń używa się światła jednorodnego, wtedy pierścienie są tylko naprzemian ciemne i ja-

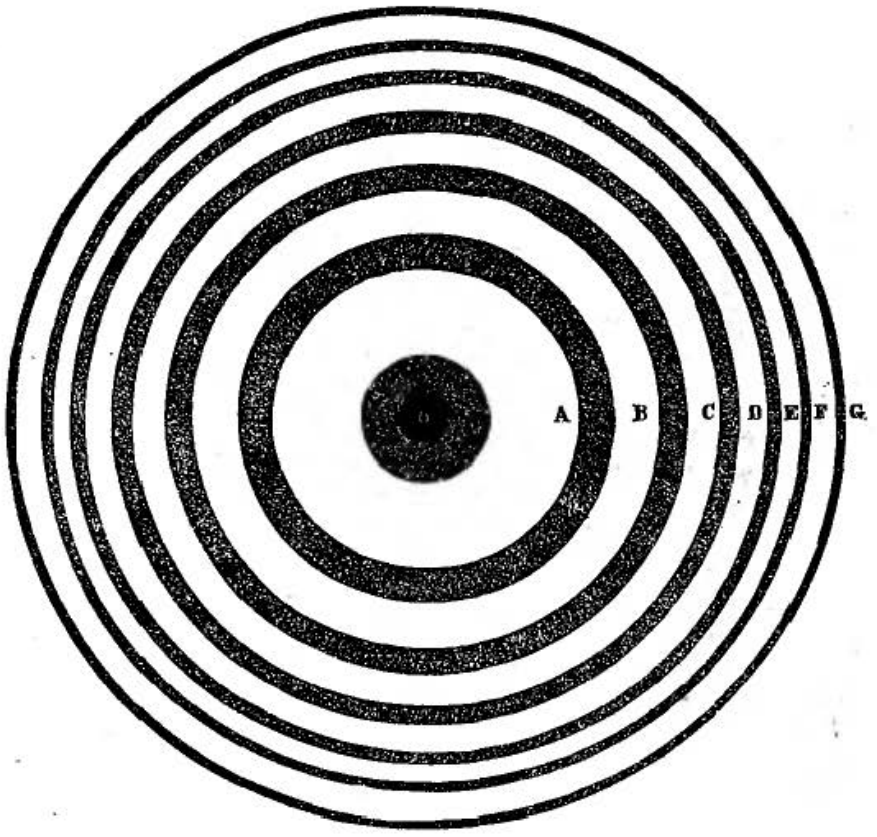


Fig. 359. Barwne pierścienie Newtona.

sne, przyczem średnica ich dla różnych barw widma jest rozmaita: dla czerwieni największa, dla fioletu najmniejsza. To nam tłómaczy, dlaczego światło białe daje pierścienie o wszystkich barwach widma, nie mogą one bowiem wypaść razem. W jednem tylko miejscu pomiędzy O i A (fig. 359) wszystkie barwy pojawiają się jednocześnie w odpowiednim stosunku i wytwarzają biel. Podobnie jak promienie białe odbite dają pierścienie

o barwach dopełniających dla barw pierścieni przy promieniach przechodzących, tak też przy świetle jednorodnem odbitem pojawiają się jasne pierścienie dokładnie w tych miejscach, gdzie widać ciemne w świetle przechodzącem.

Newton próbował objaśnić wszystkie te zjawiska na podstawie teoryi emissyjnej i przypuszczał, że światło, rozprzestrzeniając się, może peryodycznie znajdować się w dwóch różnych stanach: jednym, w którym łatwo ulega odbiciu, lecz nie załamaniu i drugim, w którym naodwrót łatwo się załamuje, a nie odbija. O wiele prostsze jest objaśnienie, jakie daje teorya falowania, podług niej bowiem barwy cienkich warstw nie są niczem innem, jak zjawiskami interferencyi światła, podobnemi do zjawisk w doświadczeniu Fresnel'a. Gdy wiązka światła pada na przednią powierzchnię *M N* bardzo cienkiej tafelki, wtedy np. promień *a b* (fig. 360) odbija się tutaj w kierunku *b o*, inny zaś promień *f c* przenika do wnętrza, pada na tylną powierzchnię *P R*, gdzie odbija się, wraca napowrót i biegnie obok promienia *b o*. Z dwóch tych promieni, biegnących razem, drugi opóźnia się nieco względem pierwszego, gdyż musi przebyć drogę *c n b*, oczywiście tem większą, im grubszą jest tafelka. Do tej różnicy w drodze przebytej dołącza się się jeszcze inna, zależna od tego, że pierwszy promień odbił się przy przejściu ze środka mniej do bardziej gęstego, drugi zaś przeciwnie przy przejściu ze środka bardziej do mniej gęstego. Na mocy pewnych danych dowiedziono, że pierwszy rodzaj odbicia powoduje w dotychczasowym biegu promienia różnicę równą połowie fali, przy drugim zaś różnicy takiej niema. Otóż jeżeli dwie te różnice razem wzięte wynoszą całą długość fali dla danej jednorodnej barwy i jeżeli patrzymy z *o* na tafelkę, wydaje nam się ona jasną. Tafelki o innej grubości, powodujące opóźnienie równe w sumie nieparzystej liczbie pół-fal i oświecone temże samem światłem, wydają się ciemne, albowiem obadwa promienie, biegnące w kierunku *b o*, znoszą się wtedy wzajemnie. Gdy zaś światło owo jest białe, dana tafelka gasi

Fig. 360. Objaśnienie barw cienkich warstw.

jeden tylko rodzaj wchodzących w skład jego promieni, odpowiadający grubości tafelki, wszystkie inne zaś promienie wpadają do oka i nadają jej barwę dopełniającą do barwy wygaszonej. W ogóle tedy warstwy wszędzie jednakowo grube przedstawiają się na całej swej przestrzeni jako jednostajnie zabarwione, przyczem rodzaj barwy zależy od ich grubości.

W powyższym wszakże układzie dwóch szkieł Newtona mamy do czynienia z warstwą powietrza, znajdującą się pomiędzy tafelką i soczewką (fig. 358); tam, gdzie te ostatnie stykają się, grubość warstwy jest równa zeru, wzrasta ona jednak stopniowo w miarę oddalania się od punktu zetknięcia. W punkcie tym mamy tylko różnicę, zależną od niejednakowego odbicia się dwóch promieni i równą, jak to wynika z pewnego rozumowania, połowie fali; tutaj też promienie owe znoszą się wzajemnie i powstaje ciemny środek. Począwszy od tego miejsca, różnica w drogach przebytych wynosi kolejno dwie, trzy, cztery, pięć i t. d. pół-fal, wskutek czego następuje naprzemian koincydencya lub interferencya. W taki sposób powstaje, przy użyciu jednorodnego światła, system pierścieni jasnych i ciemnych o wspólnym ciemnym środku. W świetle białem, jak już wspomnieliśmy wyżej, ciemne i jasne pierścienie, odpowiadające rozmaitym barwom, nie mogą wypaść razem, lecz w danem miejscu pojawia się pierścień o barwie, stanowiącej mieszaninę wszystkich tych, które tutaj nie uległy interferencyi.

Rozpatrzyliśmy tedy przyczynę powstawania barw w świetle odbitem, pozostaje nam więc jeszcze objaśnić je w wypadku, gdy badamy daną warstwę w promieniach przechodzących. Niechaj $d\,h$ (fig. 360) przedstawia promień, który przeszedł przez tafelkę wzdłuż $b\,d$; do niego przyłącza się inny, który przebył drogę $f\,c$, następnie przeniknął do wnętrza, tutaj dwa razy (w n i b) uległ zupełnemu wewnętrznemu odbiciu i wzdłuż $b\,d$ wyszedł na zewnątrz, ażeby biedz razem z promieniem $d\,h$. Drugi promień opóźnia się względem pierwszego o drogę $c\,n\,b$; ponieważ przytem obadwa jego odbicia zachodzą przy przejściu ze środka bardziej do mniej gęstego, nie powodują one wcale różnicy w fazach oscylacyi, albo też różnicę równą całej długości

fali i nie wpływają na stopień koincydencyi lub interferencyi, zależnych tylko od grubości tafelki. Widzimy, że w obu wypadkach biegnące razem dwa promienie odbite *b o*, albo też przechodzące *d h* różnią się o drogę *c n b*, tylko że w pierwszym razie do różnicy tej przyłącza się jeszcze różnica pół-fali, zależna od niejednakowych warunków odbicia dwóch takich promieni, w drugim zaś niejednakowości tej niema. Promienie więc przechodzące koincydują wtedy, gdy odbite interferują pomiędzy sobą i naodwrót, rozumiemy tedy, dlaczego układ szkieł Newtona przedstawia w jednorodnem świetle odbitem ciemny środek i ciemne pierścienie w tych miejscach, gdzie w takiemże świetle przechodzącem wypadają jasny środek oraz jasne pierścienie. Z tego samego powodu światło białe odbite daje pierścienie o barwach dopełniających dla barw pierścieni w świetle przechodzącem. To ostatnie daje, jak już wspomnieliśmy, pierścienie o wiele bledsze, niż światło odbite, a to dlatego, że z dwóch promieni, wychodzących z tafelki w kierunku *d h*, jeden ulega dwukrotnemu wewnętrznemu odbiciu, jest więc o wiele słabszy od drugiego tak, że pomimo przeciwnych faz oscylacyi, nie mogą one zupełnie znieść się wzajemnie. Lecz dwa promienie, biegnące w kierunku *b o* i odbite raz tylko jeden, posiadają prawie jednakowe natężenie i w razie, gdy różnica ich faz wynosi nieparzystą liczbę pół-fal, interferują prawie zupełnie, a mniej lub więcej dokładna interferencya stanowi o żywości barw odnośnych pierścieni.

Chcąc ściśle obserwować barwy baniek mydlanych, należy je strzedz od wszelkich wstrząśnień wskutek prądów zewnętrznego powietrza, albowiem wstrząśnienia te, nader nawet nieznaczne, zmieniają nieprawidłowo grubość ścianki, przez co barwy przesuwają się jedna na drugą i dokładne badanie staje się niemożliwem. Dlatego też Newton radził wytwarzać bańki wewnątrz bardzo przezroczystej flaszki, przez korek której przechodzi słomka. Przy zachowaniu podobnych ostrożności można widzieć, że barwy pojawiają się najprzód na najwyższym punkcie bańki mydlanej, a następnie rozprzestrzeniają się po niej ku dołowi, w miarę jak woda opuszcza się do najniższego jej punktu i powłoka staje się od góry coraz cieńsza. Gdy z początku ścian-

Tabl. IV. **Widmo powietrzne (Fata morgana) w pustyni afrykańskiej.**

Дозв. Ценз. Варшава, 9 Марта 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Wyższa Szkoła Aktorska
Biblioteka
Archiwum

ka bańki jest jeszcze dostatecznie gruba, nie mogą na niej powstać żadne barwy interferencyjne, gdy jednak grubość ta stopniowo maleje, zjawisko iryzacyi zbliża się coraz bardziej do tego, jakie widzimy w warstwie powietrza pod soczewką: czerń, pojawiająca się na bańce przed jej pęknięciem, odpowiada bezbarwnemu miejscu w punkcie zetknięcia się soczewki z płaską tafelką szklaną.

Porządek barw na bańce mydlanej, badanej w świetle odbitem, jest inny, niż w świetle przechodzącem. Gdy np. spostrzegamy w niej przez odbicie obraz jasnego nieba, a następnie patrzymy przez nią na to ostatnie, przekonywamy się, że w tym drugim wypadku barwa jej jest dopełniającą do barwy w pierwszym razie. Bańka mydlana, puszczona w swobodnem powietrzu, przedstawia o wiele żywszą grę barw i szybszą ich zmianę, niż bańka, zawarta we flaszce, albowiem swobodny przepływ powietrza powoduje ciągły prąd cieczy, tworzącej ściankę, przez co grubość jej zmienia się ciągle w rozmaitych punktach. Lecz co zjawisko samo przy użyciu flaszki traci na piękności, to zyskuje na znaczeniu naukowem, wtedy bowiem odbywa się prawidłowo i może ułatwić zbadanie odnośnych faktów.

W końcu nadmieńmy jeszcze, że z barwy można sądzić o grubości ścianki, jeżeli tylko znaną jest przytem długość fali dla oddzielnych barw. Tak naprzykład obliczono z łatwością, że czerń musi pojawić się wtedy, gdy grubość ścianki wynosi mniej niż jednę dziesięciotysięczną część milimetra, gdyby więc można było puścić bańkę, mającą wszędzie tę obliczoną grubość, byłaby ona zupełnie niewidoczną.

ROZDZIAŁ X.

Polaryzacya światła.

§ 1. Podwójne załamanie.

Kiedy w roku 1669 słynny lekarz duński Erazm Bartholinus badał kryształy, przysłane mu z wyspy Islandyi, zdziwił się niezmiernie, gdy zauważył, że *przedmioty, przez nie rozpatrywane, wydają się podwójne.* O ważnem tem odkryciu doniósł on w oso-

bnym traktacie, w którym przytoczył wszystkie swe obserwacye oraz towarzyszące im poboczne okoliczności, przez co zwrócił uwagę na zjawisko, mające dla całego rozwoju nauki o świetle nadzwyczaj ważne znaczenie. W dwadzieścia lat potem Huyghens powtórzył doświadczenia Bartholinus'a i zbadał prawa odnośnych zjawisk, starając się je objaśnić na podstawie teoryi undulacyjnej. Od owego czasu liczni pracownicy zajmowali się tym przedmiotem, należącym do najważniejszych z zakresu optyki.

W pewnych pokładach wapiennych można znaleść minerał,

Fig. 361. Podwójny obraz przedmiotów, rozpatrywanych przez spat wapienny.

krystalizujący w formie romboedru—bryły ograniczonej sześcioma płaskiemi rombami, z których każde dwa naprzeciw siebie leżące są równoległe między sobą. Minerał ten, zwany spatem wapiennym albo islandzkim, jest w najczystszej swej formie zupełnie przezroczysty i bezbarwny. Gdy na jednę z jego płaszczyzn rzucimy prostopadłą do niej wiązkę promieni równoległych, z przeciwległej płaszczyzny wyjdą *dwie* wiązki świetlne, tworzące na ekranie dwa jasne punkty. Zjawisko to zowie się *podwójnem załamaniem*. Ponieważ pojedyńczy promień, przechodząc przez spat wapienny, rozszczepia się na dwa promienie, to patrząc przez ten minerał na rozmaite przedmioty, widzimy je podwójnie; tak np. umieściwszy go na jakiem piśmie, będziemy widzieli przezeń każdą literę podwójnie (fig. 361).

Fig. 362. Podwójnie załamana wiązka świetlna.

Powróćmy teraz do owych dwóch wiązek światła, wychodzących z kryształu. Jedna z nich stanowi przedłużenie padającej (fig. 362), tak jak gdyby przeszła przez zwykłe szkło o ró-

wnoległych ścianach, druga zaś jest przesunięta na bok w kierunku, zależnym od położenia kryształu. Gdy obracamy ten ostatni w taki sposób, że nie zmieniamy nachylenia jego do promieni padających, wtedy jasny punkt na ekranie, odpowiadający pierwszej wiązce, zajmuje stale jedno i to samo miejsce; przeciwnie jasny punkt, utworzony przez drugą wiązkę, opisuje przy obracaniu kryształu koło. Jeżeli natomiast pochylamy kryształ i nadajemy mu względem promieni padających coraz to inne położenie, wtedy pierwsza wiązka zachowuje się tak, jak tego wymagają wiadome nam prawa załamania: stanowi ona tak zwane promienie *zwyczajnie załamane*. Druga atoli wiązka przy pochylaniu kryształu prawom tym nie podlega, to znaczy, że nie zawsze pozostaje w jednej płaszczyznie z promieniami padającemi, ani też nie istnieje dla niej stały stosunek pomiędzy wstawą kąta padania i wstawą kąta załamania; drugą tę wiązkę zowiemy *nadzwyczajnie załamaną*. Spółczynnik załamania dla tej ostatniej jest bardzo trudno oznaczyć, albowiem kierunek wychodzących z kryształu promieni zależy od jego kształtów; ażeby czytelnik lepiej to zrozumiał, musimy powiedzieć jeszcze słów kilka o tych kształtach. Figura 363 przedstawia szematycznie wspomnianą już wyżej najpospolitszą formę romboedryczną spatu wapiennego, w której na sześć wierzchołków składają się po dwa kąty ostre i jeden rozwarty, na pozostałe zaś dwa wierzchołki (*a* i *b*)—same kąty rozwarte. Linia prosta *a b*, łącząca dwa ostatnie wierzchołki romboedru, stanowi jego oś, wokoło której płaszczyzny, krawędzie i kąty wierzchołkowe są ułożone symetrycznie. Na fig. 364 (str. 584) widzimy oprócz formy opisanej (*a*) inną, w której wszystkie ostre kąty wierzchołkowe są zastąpione przez sześć płaszczyzn równoległych do osi kryształu (*b*); wreszcie gdy i dwa rozwarte kąty wierzchołkowe znikają, a na ich miejsce pojawiają się płaszczyzny, prostopadłe do osi, mamy formę przedstawioną w *c*. Jeżeli wyobrazimy sobie, że prawa i lewa jej krawędź zastąpione zostały

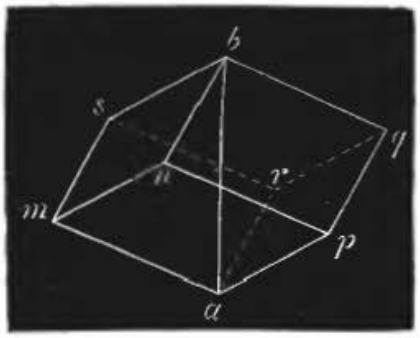


Fig. 363. Romboedr.

przez płaszczyzny, otrzymamy prostokątny równoległościan, którego ściany dolna i górna są prostopadłe do osi kryształu, dwie zaś boczne oraz przednia i tylna są do niej równoległe. Rzućmy na przednią ścianę takiego kryształu, którego oś niechaj zajmuje położenie *pionowe*, *poziomą* wiązkę promieni świetlnych, padających pod kątem prostym, a zobaczymy, że przez tylną ścianę wychodzi również pojedyńcza wiązka, stanowiąca przedłużenie padającej. Przy obracaniu kryształu wokoło osi, promienie pa-

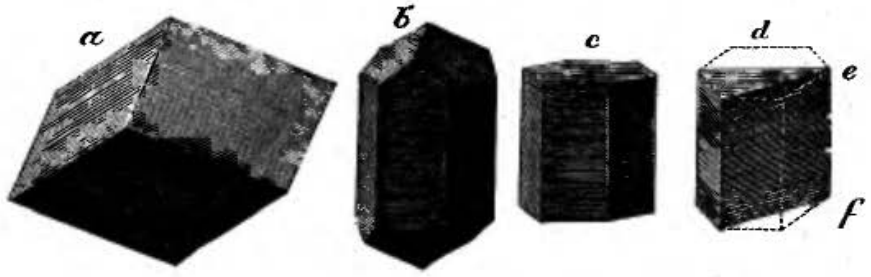


Fig. 364. Krystaliczne formy spatu wapiennego, pochodne od romboedru.

dają coraz bardziej pochyło, a wtedy poczyna występować zjawisko podwójnego załamania i na ekranie ukazują się dwa jasne punkty, które wszakże pozostają zawsze w płaszczyznie padania, *w danym wypadku prostopadłej do osi kryształu.* Oprócz tego obie wiązki podlegają prawu Snell'a, to znaczy, że spółczynnik załamania dla każdego z nich jest stały, jak tego dowodzą pomiary, wykonane z pryzmatem, wyciętym ze spatu wapiennego i mającym krawędź załamującą *e f* równoległą do osi kryształu (fig. 364 *d*). Otrzymane wielkości liczebne pokazują, że w tych warunkach promień zwyczajny rozprzestrzenia się wewnątrz kryształu z prędkością 0,603, promień zaś nadzwyczajny—z prędkością 0,673 (jeżeli prędkość światła w powietrzu przyjmiemy za 1). Fig. 365 przedstawia graficznie zachowanie się dwóch tych rodzajów promieni wewnątrz kryształu. Koło zakreślone z punktu *a* promieniem *a o*, równym 0,603, wyobraża falę zwy-

Fig. 365. Podwójne załamanie. Wypadek pierwszy.

czajną, koło zaś o promieniu *a e*, równym 0,673, falę nadzwyczajną, jakie się utworzyły w krysztale w tym samym czasie, w którym w powietrzu powstała fala o promieniu równym 1. Nadmieńmy tutaj jeszcze, że nawet w razie, gdy owa pozioma wiązka światła pada prostopadle na przednią ściankę pionowo stojącego kryształu i wychodzi przez tylną jako pojedyńcza, to w istocie składa się ona wtedy z dwóch wiązek, które przeszły przez kryształ w tym samym kierunku, lecz z niejednakową prędkością, jak o tem można sądzić na mocy pewnych zjawisk.

Rozpatrzmy teraz wypadek, gdy oś kryształu zajmuje położenie *poziome*. Jeżeli ta sama co poprzednio wiązka światła pada na przednią jego ściankę prostopadle do osi, wówczas wychodzi zeń jako pojedyńcza i stanowi przedłużenie padającej. Przy obracaniu zaś kryształu wokoło pionowej krawędzi, promienie padają bardziej pochyło, załamują się podwójnie i obadwa, to jest zwyczajny i nadzwyczajny pozostają stale w poziomej płaszczyznie padania. Pierwszy z nich podlega oprócz tego prawu Snell'a, dla drugiego zaś spółczynnik załamania nie jest stały, to znaczy, że prędkość jego wewnątrz kryształu nie jest jednakowa w dwóch różnych kierunkach. Fala zwyczajna wyobrażona jest przez *koło* o promieniu *a o*, równym 0,603 (fig. 366), fala zaś nadzwyczajna przez *elipsę* (1), której połowa dużej osi *a p* równa 0,673 jest prostopadła do osi kryształu, połowa zaś małej osi, równa 0,603, biegnie w kierunku samej osi kryształu. Innemi słowy, promień nadzwyczajny posiada w kierunku osi kryształu prędkość mniejszą, niż w kierunku do niej prostopadłym. Jeżeli wreszcie wiązka światła pada prostopadle na górną ścianę kryształu w kierunku samej jego osi, wtedy wychodzi zeń jako pojedyńcza, lecz nie pozornie, ale istotnie jako taka, albowiem w kierunku

Fig. 366. Podwójne załamanie. Wypadek drugi.

(1) Koło przedstawia figurę mającą tylko jedną średnicę albo oś, elipsa zaś jest jakby wydłużonem kołem i posiada dwie osie: jednę dużą i jednę małą.

osi prędkość dla promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego jest jednakowa, równa 0,603. Widzimy więc, że promień, przechodzący przez kryształ wzdłuż jego osi, albo też równolegle do niej, nie ulega podwójnemu załamaniu, w każdem zaś innem położeniu rozszczepia się na dwa, biegnące oddzielnie lub razem, lecz zawsze z różną prędkością. Z tego powodu oś spatu islandzkiego zowie się także jego *osią optyczną*, wszelka zaś płaszczyzna, przechodząca przez tę oś lub równoległa do niej, stanowi *przecięcie główne*.

Jak już wspomnieliśmy wyżej, oś spatu wapiennego jest zarazem osią symetryi, wokoło której płaszczyzny jego, krawędzie i kąty są ze wszystkich stron ułożone symetrycznie. Okazało się, że jest ona także osią symetryi odnośnie do rozprzestrzeniania się światła i dlatego słusznie bardzo upatrywano przyczynę podwójnego jego załamania w samej budowie tego kryształu. Spat wapienny łupie się z największą łatwością w kierunku równoległym do ograniczających go płaszczyzn romboedrycznych, wskutek czego można go podzielić na coraz mniejsze fragmenty, mające ściśle prawidłową formę. Fakt ten dowodzi, że kształt kryształu nie jest tylko, że tak powiemy, powierzchowną jego cechą, lecz ma źródło głębsze, a mianowicie—w pewnym ściśle określonym układzie samych cząstek. Krystalografia dzieli na podstawie tego układu wszystkie w ogóle formy krystaliczne na sześć systemów. Przedstawicielem typowym pierwszego systemu, zwanego prawidłowym, jest sześcian; kryształy tutaj należące posiadają trzy wzajemnie prostopadłe i równej długości osie, z których każda może być uważana za główną. Takie np. ciała jak fluspat lub sól kamienna, krystalizujące w prawidłowym systemie, zachowują się w obec przechodzącego przez nie światła podobnie jak substancye niekrystaliczne, np. szkło albo ciecze, to znaczy, że załamują je w zwykły sposób, nie rozszczepiając go na dwie oddzielne wiązki.

Następne dwa systemy krystalograficzne, kwadratowy i sześcioboczny posiadają także trzy osie, z których dwie tylko mają równą długość tak, że jedna z nich wyróżnia się jako oś symetryi. Kryształy tych systemów załamują światło podwójnie i dają

promień zwyczajny i nadzwyczajny; w jednym tylko kierunku samej osi promień biegnie jako pojedyńczy. Jeżeli promień nadzwyczajny rozprzestrzenia się z większą prędkością, niż zwyczajny, wtedy odpowiadająca mu wewnątrz kryształu powierzchnia falowa, przedstawia *sferoid wydłużony* w kierunku prostopadłym do osi (czyli spłaszczony w kierunku samej osi); obejmuje on wokoło *kulistą* falę, należącą do promienia zwyczajnego. W podobny sposób światło zachowuje się, jak widzieliśmy, w spacie wapiennym, a także w turmalinie, rubinie, szmaragdzie i innych; kryształy takie zowią się *odjemnemi*. Gdy przeciwnie promień nadzwyczajny rozchodzi się z mniejszą, niż zwyczajny prędkością, wtedy odpowiadająca mu powierzchnia falowa przedstawia się jako sferoid wydłużony w kierunku samej osi kryształu, otoczony kulistą powierzchnią falową, pochodzącą od promienia zwyczajnego i stykający się z nią w końcowych punktach osi. Takie kryształy zowią się *dodatniemi*, a jako przykład może służyć kryształ górny czyli kwarc.

Do trzech pozostałych systemów (jednotrzyosiowy, dwuskośnoosiowy i trójskośnoosiowy) należą kryształy załamujące światło również podwójnie, lecz tak, że żaden z dwóch promieni nie podlega prawu załamania. Oprócz tego, w kryształach tych istnieją dwa kierunki, wzdłuż których światło przechodzi jako wiązka pojedyńcza, innemi słowy posiadają one *dwie osie optyczne*. Powierzchnie falowe od dwóch promieni otaczają jedna drugą, lecz stykają się w czterech miejscach, t. j. w końcowych punktach obu osi, w kierunku których niema, jak powiedzieliśmy, podwójnego załamania, a więc i prędkość dla obydwóch promieni jest jednakowa.

§ 2. Własności promieni spolaryzowanych.

Widzieliśmy w poprzednim paragrafie, że wiązka światła, po przejściu przez kryształ spatu wapiennego, rozszczepia się na dwie: zwyczajną i nadzwyczajną. Obecnie zajmiemy się bliższem zbadaniem pytania, czy posiadają one te same lub też inne

własności, co naturalne światło padające. Gdy wiązka światła naturalnego przechodzi przez taki kryształ i ulega w nim podwójnemu załamaniu, oba rodzaje promieni wychodzących posiadają zawsze *jednakowe świetlne natężenie*, niezależnie od położenia jego względem promieni padających, jak tego dowodzi doświadczenie szematycznie przedstawione na obocznej figurze. Promienie słoneczne wpadające przez otwór *L*, przechodzą przez romboedr spatu wapiennego, którego przecięcie główne *S S* znajduje się w płaszczyznie rysunku, rozszczepiają się tutaj na wiązki *A A'* i *A S* i, po przejściu przez soczewkę, tworzą na usta-

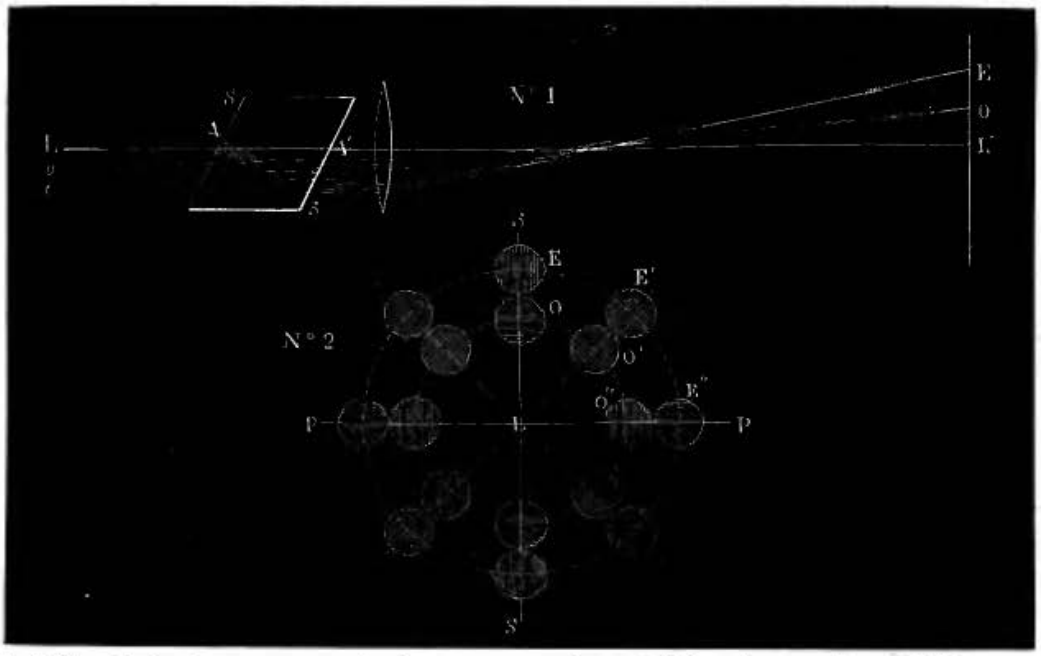


Fig. 367. Jednakowe natężenie obrazu zwyczajnego (*O*) i nadzwyczajnego (*E*), niezależnie od położenia kryształu.

wionym w jej ognisku ekranie obraz zwyczajny *O* oraz nadzwyczajny *E* (fig. 367, № 1). Obrazy te znajdują się w płaszczyznie głównego przecięcia kryształu, przy pochylaniu zaś tego ostatniego zmieniają swe miejsca na ekranie, obracają się wokoło punktu *L'*, leżącego na jednej prostej linii z otworem *L* i przyjmują, gdy przecięcie to stanowi z płaszczyzną rysunku kąty równe 0,45, 90, 135, 180, 225, 270, 360 stopni, położenia pokazane na fig. 367, № 2, posiadając przytem stale jednakowe natężenie. Zmodyfikujmy obecnie powyższe doświadczenie w ten sposób, że na drodze promieni wychodzących z romboedru *S*

ustawiamy ekran *M M*, który zatrzymuje promień nadzwyczajny, przepuszcza zaś tylko zwyczajny *B D* (fig. 368). Ten ostatni rzucamy następnie na drugi romboedr *S'* i przepuszczamy przez soczewkę, zupełnie tak samo, jak w poprzedniem doświadczeniu. Widzimy, że ten zwyczajnie załamany promień, po przejściu przez drugi romboedr, ulega znów podwójnemu załamaniu i tworzy na ekranie obraz zwyczajny *O'* i nadzwyczajny *E'* (fig. 368, № 1). Obrazy te również znajdują się w płaszczyznie głównego przecięcia drugiego kryształu *S'*, przy obracaniu zaś jego zaj-

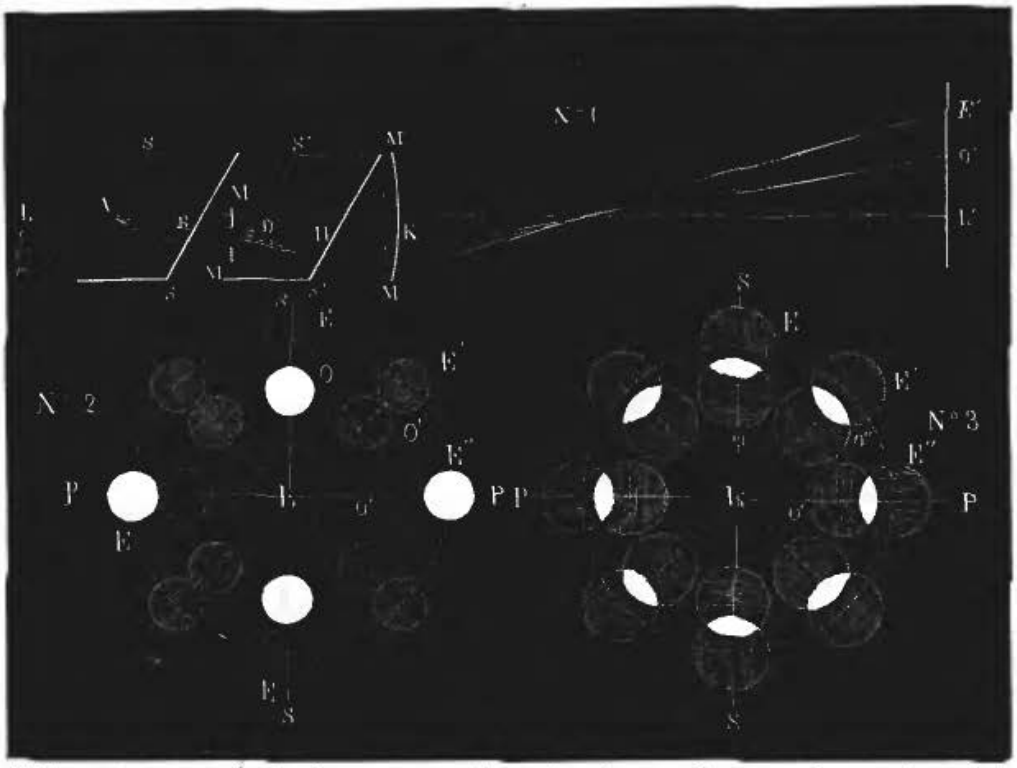


Fig. 368. Różne natężenia obrazu zwyczajnego i nadzwyczajnego, zależne od względnego *położenia dwóch kryształów.*

mują takie same położenia, jak w pierwszem doświadczeniu, z tą jednak różnicą, że ich natężenie świetlne zmienia się przytem i zależy od *kąta, jaki tworzy rzeczona płaszczyzna z płaszczyzną głównego przecięcia pierwszego kryształu S* (fig. 368, № 2). Gdy kąt ten jest równy zeru, to jest gdy przecięcie główne *S'* jest równoległe do takiegoż przecięcia *S*, obrazu nadzwyczajnego wcale niema, czyli że promień *B D* przechodzi wtedy przez drugi kryształ, nie rozdwajając się. Obraz nadzwyczajny występuje wszakże *natychmiast po wyprowadzeniu drugiego kryształu*

z rzeczonego położenia, przyczem natężenie jego wzrasta w miarę kąta nachylenia, przeciwnie zaś obraz zwyczajny słabnie. Przy kącie, równym 45° natężenie świetlne obu obrazów *O'* i *E'* jest jednakowe, przy 90° obraz zwyczajny znika, nadzwyczajny zaś posiada największe natężenie, czyli że przy wzajemnie prostopadłem położeniu dwóch głównych przecięć *S'* i *S* promień *B D* przechodzi przez drugi kryształ tylko jako nadzwyczajny. Przy powiększaniu kąta od 90° do 180°, natężenie obu obrazów przedstawia się tak samo, jak od 90° do 0°; wreszcie od 180° do 360° przybierają one ten sam blask, co od 180° do 0°.

Widzimy tedy, że zwyczajnie załamany promień *B D*, wychodzący z pierwszego kryształu, daje początek tylko promieniowi zwyczajnemu albo też nadzwyczajnemu, zależnie od tego, czy główne przecięcie drugiego kryształu jest do pierwszego równoległe, czy też prostopadłe; podwójne zaś załamanie, jakiemu promień *B D* w innych położeniach ulega, występuje symetrycznie po obu stronach poziomej lub pionowej płaszczyzny, a przy pewnych kątach nachylenia promień ten daje początek dwom obrazom o niejednakowem natężeniu. Doświadczenie to pokazuje, że promień *B D* posiada własności inne, niż światło naturalne, albowiem to ostatnie daje obrazy zawsze jednakowo silnie oświecone, tamten zaś—obrazy, zależne od nachylenia dwóch głównych przecięć odnośnych kryształów. Zachowanie się promienia *B D* pokazuje, że w różnych płaszczyznach posiada on rozmaite własności, że jest inny powyżej, inny—poniżej kierunku, w jakim się rozprzestrzenia, nareszcie inny po stronie lewej i prawej od tegoż kierunku. Taki promień nazywa się *spolaryzowanym*.

Zjawiska interferencyi przekonały nas, że światło polega na drganiach cząstek eteru, pozwoliły one także obliczyć częstość tych drgań dla różnych barw i odpowiadające im długości fali, lecz nie dały żadnych wskazówek co do kierunku samych drgań. Można było tedy przypuszczać, że te ostatnie są albo tylko podłużne, jak drgania dźwiękowe, albo też tylko poprzeczne, jak te, które rozprzestrzeniają się na powierzchni wody, albo nareszcie—w części podłużne, w części poprzeczne. Otóż tylko

zjawiska polaryzacyi światła mogą objaśnić nas co do tej kwestyi. Gdyby mianowicie drgania promienia zwyczajnego, wychodzącego z pierwszego kryształu, odbywały się podłużnie w kierunku jego rozprzestrzeniania się, wtedy posiadałby on te same własności w płaszczyznie pionowej i poziomej. Doświadczenia dowiodły, że tak nie jest; przeciwnie widzieliśmy, iż promień ten, padając na drugi kryształ, wychodzi zeń jako zwyczajny albo nadzwyczajny, zależnie od tego, czy główne przecięcie tego kryształu jest równoległe lub prostopadłe do tamtego i dlatego musimy odrzucić przypuszczenie o drganiach wyłącznie podłużnych. Natomiast drgania poprzeczne tłómaczą zachowanie się omawianego promienia, jeżeli bowiem przypuścimy, że odbywają się one tylko w kierunku prostopadłym do drogi (*B D*) jego rozchodzenia się (fig. 368, № 1), to jest powyżej i poniżej płaszczyzny rysunku, a nie z boków jej, musimy także przyjąć, że górna i dolna strona promienia różnią się w czemkolwiek od bocznych, t. j. prawej i lewej. Wreszcie gdyby na promień *B D* składały się oprócz poprzecznych, jeszcze drgania podłużne, te ostatnie przeszłyby przez drugi kryształ tak samo jak przez pierwszy, niezależnie od jego położenia. Lecz przy wzajemnie prostopadłym kierunku dwóch głównych przecięć, promień zwyczajny wcale z drugiego kryształu nie wychodzi, a ponieważ w tem miejscu na ekranie, gdzie on powinienby się znajdować, nietylko nie występują objawy świetlne, lecz także i cieplne, wnioskujemy, że do miejsca tego nie dochodzą żadne drgania eteru, którym zwykle objawy te przypisujemy, czyli że przynajmniej w spolaryzowanym promieniu niema wcale drgań podłużnych, a tylko poprzeczne.

Fig. 353 (str. 548) przedstawia promień spolaryzowany; płaszczyzna zaś, w której odbywają się jego drgania, zowie się *płaszczyzną drgań*. Widzieliśmy w powyższem doświadczeniu (fig. 368), że zwyczajny promień *B D*, po wyjściu z pierwszego kryształu, ustawionego tak, że główne jego przecięcie jest poziome, zachowuje się zupełnie symetrycznie względem płaszczyzny poziomej lub pionowéj przezeń poprowadzonej; *niewiadomo jednak dotychczas napewno, w której mianowicie z tych dwóch pła-*

szczyzn zachodzą drgania, przyjmujemy tylko, że są one w danym wypadku pionowe, czyli że *płaszczyzna drgań dla promienia zwyczajnego jest prostopadłą do głównego przecięcia kryształu.* Jeżeli w temże doświadczeniu zatrzymamy za pomocą ekranu promień zwyczajny *B D*, a rzucimy na drugi kryształ nadzwyczajny, przekonamy się, że przy równoległem położeniu dwóch głównych przecięć znika na ekranie obraz zwyczajny, przy prostopadłem zaś — nadzwyczajny. Zjawisko jest tedy wprost przeciwne temu, jakie obserwuje się przy przepuszczaniu promienia zwyczajnego. Promień tedy nadzwyczajny okazuje się także spolaryzowanym, lecz drgania jego odbywają się w kierunku prostopadłym do kierunku drgań dla promienia *B D*, czyli że *płaszczyzną drgań dla promienia nadzwyczajnego jest samo przecięcie główne.*

Nasuwa się jeszcze pytanie, czy drgań podłużnych brak tylko w spolaryzowanych promieniach, czy też w ogóle niema ich w żadnem świetle, możnaby bowiem przypuścić, że drgania takie istnieją w promieniach padających na kryształ, lecz przy przejściu przezeń ulegają pochłonięciu. Dla rozstrzygnięcia tego pytania, rzućmy światło słoneczne, wpadające przez niewielki otwór, na romboedr spatu wapiennego: otrzymamy na ekranie obrazy zwyczajny i nadzwyczajny, o jednakowem, jak wiemy, natężeniu. Otwór tak jest dobrany, że obrazy te częściowo zachodzą jeden na drugi (fig. 368, № 3) i ta właśnie wspólna część, gdzie mieszają się drgania promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego, posiada takie same prawie natężenie, jak obraz słońca, otrzymany przez ten sam otwór, lecz od bezpośrednio padających promieni słonecznych. Nieznaczna istniejąca tutaj różnica w natężeniu tłómaczy się podwójnem odbiciem o przednią i tylną ścianę kryształu, jakiemu ulega przechodzące przezeń światło. Jeżeli więc, jak powiedzieliśmy, drgań podłużnych niema w świetle spolaryzowanem, to na mocy przytoczonego doświadczenia i innych wolno mniemać, że niema ich także w świetle naturalnem i że ono polega tylko na drganiach poprzecznych. Badając bliżej tę wspólną część światła, wychodzącego z kryształu, w której mieszają się z sobą promienie zwyczajny i nad-

zwyczajny, przekonywamy się dalej, że zachowuje się ona zupełnie tak samo, jak światło naturalne, to jest nie spolaryzowane. Promień tedy zwyczajny i nadzwyczajny, spolaryzowane w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych i mające jednakowe natężenie, zmięszane z sobą, dają promień naturalny. Naodwrót także wiązkę światła naturalnego możemy zamienić na dwie spolaryzowane i o jednakowem natężeniu, których drgania odbywają się w płaszczyznach wzajemnie do siebie prostopadłych. Dwie takie wiązki nie mogą powodować zjawisk interferencyi, niezależnie też od różnicy w fazach, dają zawsze promień, którego natężenie jest równe sumie natężeń składowych promieni. Fakt ten, którego istnienie można było naprzód wywnioskować teoretycznie, został stwierdzony na drodze doświadczalnej przez Fresnel'a i Arago.

Z księgi o dźwięku (str. 263) wiemy już, że prędkość, z jaką rozchodzi się dany drgający ruch, zależy od sprężystości przenoszącego go środka. Stosuje się to zarówno do drgań dźwiękowych, jak i świetlnych. Otóż przypuszczamy, że w przestrzeniach wszechświatowych, w powietrzu oraz we wszystkich ciałach, pojedyńczo załamujących światło, jak np. woda lub szkło, sprężystość eteru jest jednakowa we wszystkich kierunkach. W ciałach takich obydwie składowe części, na jakie można rozłożyć promień światła naturalnego, dla których drgania eteru odbywają się w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych, rozprzestrzeniają się z zupełnie jednakową prędkością, przez co nic się nie zmienia we względnym, pierwotnym ich do siebie stosunku; na całej swej drodze kombinują się one i wytwarzają jeden wypadkowy promień naturalny. Lecz co się tyczy kryształów podwójnie załamujących światło, to prawdopodobnie sprężystość eteru nie jest w nich jednakowa we wszystkich kierunkach, a przypuszczenie to tembardziej wyda nam się słusznem, gdy weźmiemy jeszcze pod uwagę fakt (o którym pomówimy w następnej księdze), że kryształy takie przy ogrzewaniu rozszerzają się w różnych kierunkach niejednakowo, dalej że to samo stosuje się do prędkości rozprzestrzeniania się w nich ciepła i wreszcie, że różne ich płaszczyzny rozmaicie zachowują się względem czynni-

ków mechanicznej albo chemicznej natury. Różnicę tę we własnościach tłómaczymy sobie przez pewien określony układ cząstek, składających kryształ podwójnie załamujący światło. Przyjmujemy, że np. w kryształach o jednej osi optycznej, sprężystość eteru jest inna w kierunku tejże osi, inna znów w kierunku do niej prostopadłym i że zmienia się przy przejściu od jednego z nich do drugiego. Gdy promień naturalny przechodzi przez taki kryształ *wzdłuż osi optycznej*, obydwie składowe części promienia drgają w płaszczyznach prostopadłych do osi i prostopadłych wzajemnie do siebie; ponieważ sprężystość eteru, a więc i prędkość światła jest w tych płaszczyznach wszędzie jednakową, promień wychodzi z kryształu nierozszczepionym, to jest takim, jakim przyszedł. Lecz gdy promień naturalny przechodzi przez płaszczyznę kryształu *prostopadłą do osi optycznej*, wtedy jedna jego część drga w tejże płaszczyznie, druga zaś—w płaszczyznie samej osi i dlatego rozszczepia się on na dwa promienie spolaryzowane, rozchodzące się z rozmaitą prędkością. Takiemu samemu rozszczepieniu ulega każdy promień naturalny, jeżeli tylko nie pada w płaszczyznie, równoległej do osi optycznej.

§ 3. Przyrządy polaryzacyjne. Polaryzacya przez odbicie i zwykłe załamanie.

Oko nasze samo nie jest w stanie odróżnić światła spolaryzowanego od naturalnego; wyręczają nas pod tym względem ciała podwójnie załamujące, przedstawiające znakomity środek do odkrycia tej różnicy; z pomiędzy nich najodpowiedniejszemi są tafelki albo pryzmaty, wycięte z kryształu jednoosiowego. Przyrządy, pozwalające rozstrzygnąć, czy światło jest spolaryzowane, czy nie, oraz dające nam możność oznaczenia kierunku płaszczyzny drgań, zowią się *analizatorami* albo *polaryskopami*. Ażeby ułatwić czytelnikowi zrozumienie zasady najprostszego z takich przyrządów, posłużymy się następującem, dowcipnem porównaniem Wundta. Wyobraźmy sobie, że rzucamy igły na sito, którego poziome dno przedstawia szeregi szczelin prostolinijnych i równoległych pomiędzy sobą; jeżeli tedy osie igieł są poziome,

tylko te z nich przejdą przez sito, które są równoległe do jego szczelin. Przypuśćmy, że przy pewnem położeniu sita, wszystkie poziomo leżące igły przechodzą przezeń, to rzecz oczywista, że gdy obrócimy sito w płaszczyznie poziomej na 90°, ani jedna z tych igieł z niego nie wyjdzie.

Otóż istnieją ciała, zachowujące się względem światła podobnie jak owo sito względem igieł, padających na jego dno. I tak w zabarwionych podwójnie załamujących kryształach pochłanianie światła nie zależy jedynie od częstości drgań przechodzących promieni, lecz także od nachylenia płaszczyzny tych drgań względem osi optycznej. Występuje to szczególniej wyraźnie w turmalinie, który w pewnych warunkach pochłania całkowicie pro-

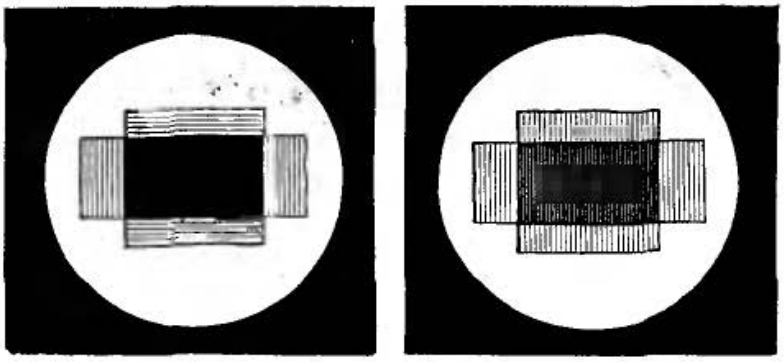


Fig. 369.

Tafelki turmalinowe wzajemnie prostopadłe. Tafelki turmalinowe wzajemnie równoległe.

mienie zwyczajne. Tafelka, wycięta z kryształu turmalinu równolegle do jego osi, *przepuszcza tylko promienie nadzwyczajne, których drgania odbywają się właśnie równolegle do tejże osi;* dlatego też tafelka taka może służyć zarówno do spolaryzowania światła (polaryzator), jak i do jego analizy (polaryskop). Weźmy dwie takie tafelki turmalinu, umieśćmy je jednę za drugą i rzućmy na nie wiązkę promieni słonecznych, a zobaczymy, że zależnie od wzajemnego względem siebie położenia tafelek, światło przechodzi przez nie, lub też zostaje zatrzymane. Gdy osie optyczne tafelek są do siebie równoległe (fig. 369, strona prawa), światło przechodzi przez obydwie tak, jak przez jedną taflę, o grubości, równej sumie ich grubości. Przy obracaniu jednej z tafelek, natężenie przechodzących promieni stopniowo słabnie

i wreszcie, gdy osie optyczne są do siebie prostopadłe (fig. 369, strona lewa), promienie te zostają zupełnie wygaszone. Doświadczenia podobne, również jak wiele innych, dotyczących światła spolaryzowanego, można z łatwością wykonywać za pomocą tak zwanych *cęgów turmalinowych* (fig. 370). Przyrząd ten składa się z dwóch tafelek turmalinu, wyciętych równolegle do osi kryształu, osadzonych w krążkach metalowych i przedstawiających *polaryzator* (*P*) i *analizator* (*A*). Krążki same objęte są przez pierścienie, stanowiące zakończenia sprężyny, skręconej w kształcie cęgów i ułatwiającej wzajemne zbliżanie tafelek; oprócz tego, krążki mogą być obracane wzdłuż obejmujących je pierścieni, co pozwala nadawać osiom turmalinu żądane położenia. Pomiędzy tafelkami umieszcza się dany przedmiot, który ma być rozpatrywany w świetle spolaryzowanem; przytrzymują go dosyć silnie ramiona cęgów. Użycie tego przyrządu, tak prostego i wygodnego zarazem, jest wszakże bardzo ograniczone przez to, że turmalin nadaje przechodzącemu przezeń światłu barwę żółto-brunatną lub brunatno-zieloną. Zamiast powyższego minerału, można użyć tafelki spatu islandzkiego, lub innego jakiego kryształu jednoosiowego; lecz spat ten przepuszcza, jak wiemy, promień zwyczajny i nadzwyczajny, co często przeszkadza oddzielnemu badaniu każdego z nich. Było więc bardzo pożądanem zbudowanie takiego analizatora, któryby dawał tylko jeden obraz i był zarazem przezroczysty dla drgań świetlnych różnej częstości. Zadanie to rozwiązał Nicol w sposób wielce dowcipny. Wyciął on mianowicie z kryształu spatu wapiennego czworoboczny pryzmat o podstawie romboedrycznej, którego przecięcie główne *a g d e* przedstawione jest na fig. 371 (str. 597). Następnie podzielił on ten pryzmat w kierunku *b c*, prostopadłym do głównego przecięcia, na

Fig. 370. Cęgi turmalinowe.

tylko te z nich przejdą przez sito, które są równoległe do jego szczelin. Przypuśćmy, że przy pewnem położeniu sita, wszystkie poziomo leżące igły przechodzą przezeń, to rzecz oczywista, że gdy obrócimy sito w płaszczyznie poziomej na 90°, ani jedna z tych igieł z niego nie wyjdzie.

Otóż istnieją ciała, zachowujące się względem światła podobnie jak owo sito względem igieł, padających na jego dno. I tak w zabarwionych podwójnie załamujących kryształach pochłanianie światła nie zależy jedynie od częstości drgań przechodzących promieni, lecz także od nachylenia płaszczyzny tych drgań względem osi optycznej. Występuje to szczególniej wyraźnie w turmalinie, który w pewnych warunkach pochłania całkowicie pro-

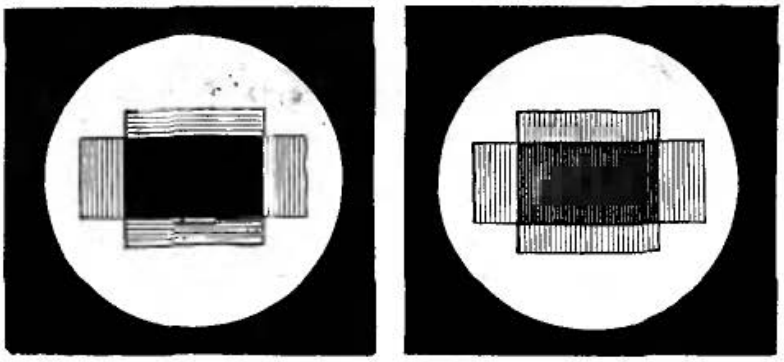


Fig. 369.

Tafelki turmalinowe wzajemnie prostopadłe. Tafelki turmalinowe wzajemnie równoległe.

mienie zwyczajne. Tafelka, wycięta z kryształu turmalinu równolegle do jego osi, *przepuszcza tylko promienie nadzwyczajne, których drgania odbywają się właśnie równolegle do tejże osi;* dlatego też tafelka taka może służyć zarówno do spolaryzowania światła (polaryzator), jak i do jego analizy (polaryskop). Weźmy dwie takie tafelki turmalinu, umieśćmy je jednę za drugą i rzućmy na nie wiązkę promieni słonecznych, a zobaczymy, że zależnie od wzajemnego względem siebie położenia tafelek, światło przechodzi przez nie, lub też zostaje zatrzymane. Gdy osie optyczne tafelek są do siebie równoległe (fig. 369, strona prawa), światło przechodzi przez obydwie tak, jak przez jedną taflę, o grubości, równej sumie ich grubości. Przy obracaniu jednej z tafelek, natężenie przechodzących promieni stopniowo słabnie

względne swe natężenie świetlne; gdy następnie badał bliżej te zjawiska, przyszedł do przekonania, że i przez odbicie pod pewnemi kątami światło może nabyć tych samych własności, jak po przejściu np. przez spat wapienny—t. j. może zostać spolaryzowane. W trzy lata potem Malus, Biot i Brewster znaleźli jednocześnie i niezależnie jeden od drugiego, że wskutek zwykłego załamania światło może także uledz spolaryzowaniu, jakkolwiek w małym tylko stopniu; wreszcie w tym samym czasie Arago odkrył barwną polaryzacyę. Zajmijmy się tedy bliższym nieco opisem tych faktów, zaczynając od pierwszego, a mianowicie od polaryzacyi przez odbicie.

Niechaj $R\ S$ (fig. 372) przedstawia szklane zwierciadło nieamalgamowane, na które pada naturalny promień $a\ b$, odbijający się w kierunku $b\ c$. Jeżeli na drodze odbitego promienia $b\ c$ umieścimy nicol, przekonamy się, że przy obracaniu tego ostatniego światło przezeń przechodzące posiada słabsze lub silniejsze natężenie, lecz w żadnem położeniu nie znika zupełnie. Według tego, cośmy wyżej powiedzieli, światło odbite $b\ c$ nie jest tedy ani całkowicie naturalne, ani całkowicie spolaryzowane; uważamy je też za *częściowo spolaryzowane*, czyli za mięszaninę jednego i drugiego. Z części niespolaryzowanej przechodzi przez nicol zawsze połowa, niezależnie od jego położenia, część zaś spolaryzowana przechodzi lub nie, zależnie od tego, czy drgania odnośnego światła odbywają się w płaszczyznie równoległej, czy też prostopadłej do głównego przecięcia pryzmatu. W pewnem położeniu nicola światło przechodzące przedstawia minimum natężenia, składa się ono bowiem w takim wypadku tylko z części niespolaryzowanej, a ponieważ ma to miejsce wtedy, gdy główne przecięcie pryzmatu leży w płaszczyznie padania $a\ b\ c$, wnosimy z tego, że drgania światła spolaryzowanego, zawartego w promieniu odbitym $b\ c$, odbywają się w płaszczyznie $d\ f\ l\ m$, prostopadłej do tamtej. Stosunek części niespolaryzowanej do spolaryzowanej w świetle odbitem zależy od kąta

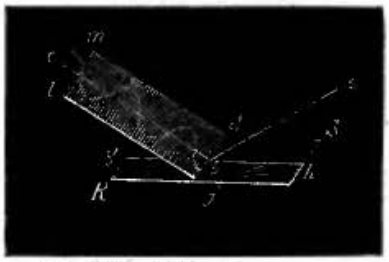


Fig. 372. Polaryzacya przez odbicie.

padania. I tak gdy promienie padają na zwierciadło prostopadle, w świetle odbitem niema wcale części spolaryzowanej, gdy natomiast kąt padania wynosi 57°, t. j. gdy promienie tworzą z powierzchnią *R S* kąt równy 33°, światło odbite jest całkowicie spolaryzowane. W tym razie kąt padania nazywa się *kątem polaryzacyi*. Malus wykazał, że prawie wszystkie zwierciadlane powierzchnie, z wyjątkiem metalowych, mogą spolaryzować światło, lecz że kąt polaryzacyi jest dla różnych ciał rozmaity. Dla wody wynosi on 53°, dla siarku węgla 59°, dla flintglasu 60°, z czego widzimy, że kąt polaryzacyi dla pewnej substancyi jest w ogóle tem większy, im większą jest jej zdolność załamująca, odnośnego wszakże prawa, związującego dwie te wartości, Malus nie zdołał wyśledzić. Dopiero Brewster odkrył, że istnieje bardzo prosty związek pomiędzy kątem polaryzacyi z jednej i spółczynnikiem załamania odbijającej substancyi z drugiej strony: śledząc mianowicie drogę promienia *I R* (fig. 373) w taki sposób odbitego, że ulega zupełnej polaryzacyi, oraz drogę promienia załamanego *I r*, który przeniknął do wnętrza ciała odbijającego, znajdujemy, że dwa te promienie stanowią pomiędzy sobą kąt prosty. Prawo Brewster'a może służyć jako nowy sposób oznaczania spółczynnika załamania; można się nim z wielką korzyścią posługiwać szczególniej wtedy, gdy chodzi o ciała mało przezroczyste, do których nie daje się zastosować metoda pryzmatyczna (str. 466). Podobnie bowiem jak znając kąt załamania *N' I r*, łatwo znaleść kąt polaryzacyi, tak naodwrót także z wielkości tego ostatniego można obliczyć kąt załamania. W taki np. sposób znaleziono spółczynnik załamania dla węgla kamiennego, dla rogu i innych ciał nieprzezroczystych. Dodajmy

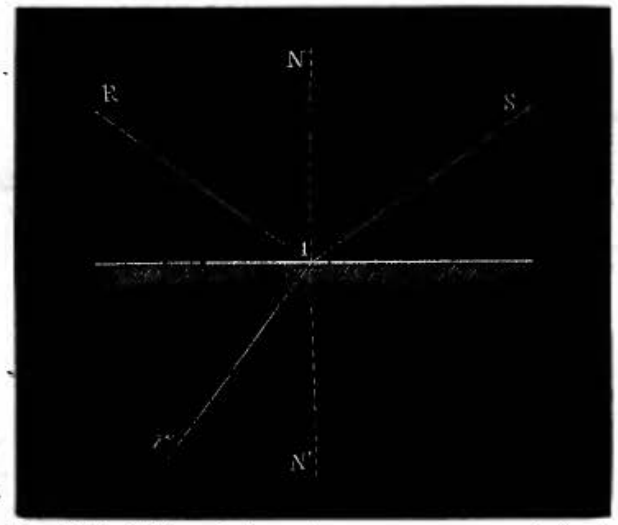


Fig. 373. Całkowicie spolaryzowany promień odbity tworzy z promieniem załamanym kąt prosty.

jeszcze, że z przyczyny niejednakowych spółczynników załamania dla promieni różnej barwy, ich kąty polaryzacyi są rozmaite, jakkolwiek w nieznacznym tylko stopniu. Dlatego też białe światło nie może nigdy wskutek odbicia uledz *całkowitej* polaryzacyi, ulega jej tylko jedna ze składowych jednorodnych barw, inne zaś są tylko mniej lub więcej zbliżone do stanu zupełnego spolaryzowania.

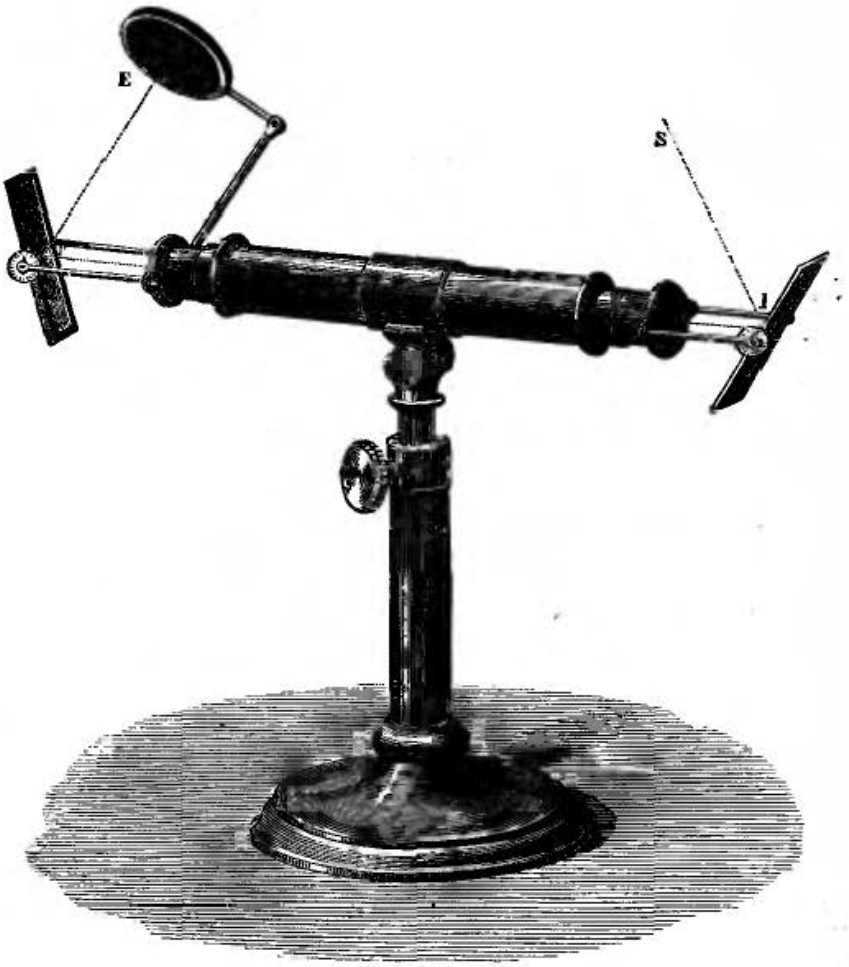


Fig. 374. Przyrząd polaryzacyjny, ulepszony przez Biot'a.

Zobaczmy teraz, jak urządzonym jest przyrząd polaryzacyjny, oparty na odbijaniu się światła. Ponieważ, jak widzieliśmy, zwierciadło szklane, do powierzchni którego promienie są nachylone pod kątem 33°, odbija tylko oscylacye o kierunku prostopadłym do płaszczyzny padania, to może ono stanowić doskonały polaryzator; drugie zaś takie samo zwierciadło, może od-

grywać rolę analizatora. Gdy mianowicie obadwa zwierciadła są do siebie równoległe, wtedy promień odbity od jednego z nich i zupełnie spolaryzowany, odbija się jako taki i od drugiego zwierciadła, albowiem drgania jego odbywają się prostopadle do wspólnej w tym razie dla obu zwierciadeł płaszczyzny padania. Przy obracaniu zaś drugiego zwierciadła w taki sposób, ażeby powierzchnia jego z padającym na nią promieniem zawsze tworzyła ten sam co poprzednio kąt, światło od niego odbite traci coraz bardziej na natężeniu i wreszcie zupełnie znika, gdy płaszczyzny padania obu zwierciadeł są do siebie prostopadłe. W tym ostatnim wypadku promień, padając na drugie zwierciadło, drga w samej jego płaszczyznie padania i dlatego nie może być przez nie odbite.

Bardzo wygodny przyrząd polaryzacyjny przedstawiony jest na fig. 374 (str. 600). Promień świetlny $S\,I$ pada najprzód na zwierciadło I z czarnego szkła, od którego się odbija w kierunku $I\,I'$ wzdłuż osi wewnątrz poczernionej rury, następnie pada na drugie zwierciadło I', od którego powtórnie się odbija ku naszemu oku albo ku ekranowi E. Rurę przyrządu, również jak i zwierciadło, można dowolnie nachylać, a także obracać wraz z podtrzymującemi je pierścieniami naokoło osi rury, co pozwala podług życzenia zmieniać kierunek padających promieni. Za pomocą tego przyrządu z łatwością przekonywamy się, że największa ciemność następuje wtedy, gdy na obu zwierciadłach kąt odbicia wynosi 57^0 i gdy jednocześnie ich płaszczyzny padania są do siebie prostopadłe, największa zaś jasność—gdy płaszczyzny te są równoległe. Należy jeszcze nadmienić, że w danym razie zwierciadła amalgamowane są niekorzystne dlatego, że przy żadnym kącie padania nie odbijają światła zupełnie spolaryzowanego.

Bardziej znanym od poprzedniego jest przyrząd polaryzacyjny Nörremberga (fig. 375, str. 602). Szklana przezroczysta tafla $C\,D$, nachylona do pionowej osi przyrządu pod kątem 33^0, stanowi polaryzator; promienie padające w kierunku $m\,n$ odbijają się i jako zupełnie spolaryzowane $n\,c$ biegną ku dołowi, gdzie znów się odbijają od amalgamowanego zwierciadła c, prze-

chodzą przez taflę $C\ D$ i padają na analizator $C'\ D'$ z czarnego szkła. Ten ostatni jest podtrzymywany przez dwa słupki a' i b', które z kolei opierają się na ruchomym pierścieniu i, dającym się obracać wzdłuż stałego, podzielonego na stopnie pierścienia K. Gdy zero tego ostatniego schodzi się ze wskaźnikiem i ruchomego pierścienia, wtedy płaszczyzny padania dla zwierciadła $C'\ D'$ i tafli $C\ D$ są równoległe pomiędzy sobą. Na figurze wskaźnik ten stoi naprzeciw podziałki 90^0, co znaczy, że owe płaszczyzny są wzajemnie prostopadłe i dlatego też promień przychodzący od dołu w górze wcale się nie odbija.

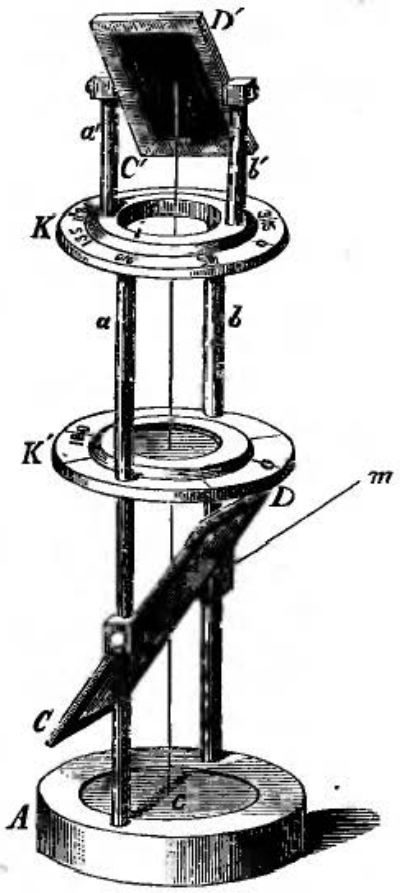


Fig. 375. Przyrząd polaryzacyjny Nörremberga.

Promienie, które będąc pochylone do tafli szklanej, przechodzą przez nią, okazują się także częściowo spolaryzowanemi, jak o tem można się przekonać za pomocą pryzmatu Nicol'a. Drgania w ten sposób spolaryzowanych promieni odbywają się w samej płaszczyznie padania, a więc w kierunku, prostopadłym do kierunku drgań światła spolaryzowanego przez odbicie. To ostatnie, jak wiemy, może przy pewnym kącie padania uledz całkowitej polaryzacyi, światło zaś załamane ulega jej tylko częściowo, niezależnie od kąta padania.

W końcu wspomnimy jeszcze o kilku zastosowaniach, jakie polaryzacya światła znalazła w naukach przyrodniczych, zastosowaniach wykazujących, że zjawiska, które z początku zdają się przedstawiać interes wyłącznie teoretyczny, mogą się w następstwie okazać bardzo pożytecznemi także dla wymagań praktyki. Na zasadzie prawa Malus'a o zmienności natężenia dwóch obrazów, otrzymywanych

przez kryształ podwójnie załamujący, Arago zbudował przyrząd, za pomocą którego łatwo można porównać natężenie dwóch źródeł światła. Ten sam uczony podaje dalej prosty sposób uwidoczniania mielizn i ostrych skał, ukrytych pod powierzchnią morza i trudnych do zobaczenia z powodu blasku jego; sposób polega na tem, że spogląda się na powierzchnię morza przez pryzmat Nicol'a, którego przecięcie główne jest prostopadłe do jej poziomu, wtedy bowiem promienie światła, odbite od wody, ulegają pochłonięciu, promienie zaś od przedmiotów podwodnych, załamane przy przejściu z wody do powietrza, dochodzą do naszego oka, pozwalając je widzieć dokładnie. Polaryzacya ułatwia nam poznanie, czy światło przychodzące do nas od odległego ciała niebieskiego, jest przezeń samo wysyłane, czy też tylko odbite od jego powierzchni. I tak dowiedziono z pewnością, że księżyc i inne planety wysyłają do nas jedynie światło, zapożyczone od słońca; również światło jądra komet częściowo przynajmniej jest tylko odbitem światłem słonecznem, jak tego zdają się dowodzić rezultaty badań wielu obserwatorów nad płaszczyzną jego polaryzacyi. Wreszcie znaleziono także, że światło tęczy jest spolaryzowane.

§ 4. Interferencya przez podwójne załamanie.

Kombinacya z dwóch nicolów, dających się obracać wokoło wspólnej osi, wybornie się nadaje do bliższego badania zjawisk polaryzacyi; w kombinacyi tej jeden z pryzmatów służy jako polaryzator, drugi zaś jako analizator.

Jeżeli ich przecięcia główne są do siebie równoległe, wtedy promień świetlny, wychodzący z pierwszego z nich, przenika także przez drugi i na przeciwległym ekranie pojawia się jasna plama. Gdy zaś drugi pryzmat odchylimy na 90°, to jest gdy skrzyżujemy nicol'e, promień przejdzie przez polaryzator, lecz zostanie zatrzymany przez drugi pryzmat-analizator, albowiem obadwa przepuszczają tylko, jak wiemy, drgania równoległe do ich głównego przecięcia; na ekranie panuje wtedy zupełna ciemność. Umieśćmy teraz pomiędzy dwoma skrzyżowanemi nicolami

tafelkę z jakiejś substancyi, pojedyńczo załamującej światło, np. ze szkła lub soli kamiennej, a zobaczymy, że owa ciemność na ekranie panuje stale, niezależnie od położenia tafelki. Inaczej rzeczy się mają przy użyciu substancyi, podwójnie załamującej światło, np. spatu wapiennego: tafelka z tego materyału, wstawiona pomiędzy dwa skrzyżowane nicol'e i obracana wokoło kierunku padających promieni, znosi panującą na ekranie ciemność lub pozostawia takową, zależnie od swego położenia. Zobaczmy tedy, jak nauka o polaryzacyi objaśnia to zjawisko. Niechaj linia *M N* (fig. 376) wyobraża kierunek głównego przecięcia pierwszego pryzmatu, linia zaś *P Q*—kierunek takiegoż przecięcia drugiego. Jeżeli przecięcie główne tafelki spatu wapiennego, umieszczonej pomiędzy obydwoma, jest równoległe do *P Q*, wtedy wychodzące z polaryzatora promienie, których drgania zachodzą w kierunku *M N*, ulegają w tafelce, jako prostopadłe do jej gł. przecięcia, zwyczajnemu tylko załamaniu i niezmienione pod względem płaszczyzny drgań padają na analizator, który ich oczywiście nie przepuszcza. Gdy zaś przecięcie główne tafelki jest równoległe do *M N*, wtedy promienie, po wyjściu z polaryzatora, załamują się w tafelce tylko nadzwyczajnie, jako biegnące równolegle do jej gł. przecięcia, znów niezmienione pod względem płaszczyzny drgań padają na analizator i tak samo jak poprzednio zostają przezeń zatrzymane. Lecz gdy przecięcie główne tafelki zajmuje położenie nierównoległe ani do *M N*, ani do *P Q*, np. *R S*, wtedy opuszczający pierwszy nicol promień o drganiach, odbywających się w kierunku *M N*, a więc w kierunku, pochyłym do tegoż przecięcia, nie przechodzi przez tafelkę wyłącznie jako promień zwyczajny, ani też wyłącznie jako nadzwyczajny. Drgania jego bowiem rozkładają się na drgania w kierunku *R S* (przecięcie główne), które przechodzą przez tafelkę jako promień nadzwyczajny oraz w kie-

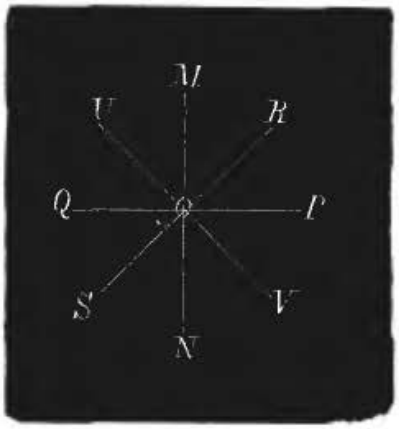


Fig. 376. Szemat rozkładania się drgań.

runku $U\ V$ (prostopadle do przecięcia głównego), przechodzące przez nią jako promień zwyczajny. Dwa te promienie, to jest zwyczajny i nadzwyczajny, padają na drugi nicol, który, jak wiemy, przepuszcza jedynie drgania, zachodzące w płaszczyznie głównego jego przecięcia. Tu drgania promienia *nadzwyczajnego*, odbywające się w kierunku $R\ S$, rozkładają się powtórnie na drgania w płaszczyznie $M\ N$ i drgania w płaszczyznie $P\ Q$. To samo dzieje się z promieniem *zwyczajnym*, którego drgania zachodzą w kierunku $U\ V$ i padają na drugi nicol; i te rozkładają się w nim na drgania w płaszczyznie $M\ N$ oraz drgania w płaszczyznie $P\ Q$. Drgania w kierunku $M\ N$, stanowiące, jak widzimy, składową część zarówno promienia nadzwyczajnego, jak i zwyczajnego, zostają zatrzymane przez drugi nicol, jako prostopadłe do jego głównego przecięcia. Drgania zaś w kierunku $P\ Q$, stanowiące drugą składową część promienia nadzwyczajnego i zwyczajnego, jako równoległe do gł. przecięcia drugiego nicol'a, przechodzą przez takowy i wytwarzają właśnie na ekranie jasną plamę. Reasumując wyniki powyższego doświadczenia powiemy, że tafelka z podwójnie załamującej światło substancyi, umieszczona pomiędzy dwoma skrzyżowanemi nicol'ami, *tylko wtedy* nie zmienia w niczem ciemności, panującej na przeciwległym im ekranie, gdy stoi równolegle do głównego przecięcia jednego z nich; w każdem innem zaś położeniu powoduje mniejszą lub większą jasność (1). Podobne zachowanie się danej tafelki zdradza napewno jej własność podwójnego załamywania światła.

Jeden z dwóch promieni, wychodzących z analizatora i drgających w kierunku głównego przecięcia tegoż $P\ Q$, stanowi tedy, jak widzieliśmy, składową część promienia zwyczajnego, drugi zaś—nadzwyczajnego. Każda z nich przebywa więc tafelkę z inną prędkością, a różnica w drodze przebytej jest tem większa, im grubszą jest ta tafelka. Promienie te, drgające w tej samej płaszczyznie, mogą powodować zjawiska interferencyi,

(1) Pod warunkiem, że nie jest wycięta prostopadle do osi optycznej kryształu.

która, jak wiemy, przy pewnych warunkach objawia się wspaniałemi barwami. Do tego rodzaju doświadczeń nad interferencyą światła spolaryzowanego, lepiej aniżeli spat wapienny nadaje się dwuosiowy gips krystaliczny, który z łatwością daje się łupać na bardzo cienkie tafelki. Podobna tafelka, umieszczona pomiędzy dwoma *skrzyżowanemi* nicol'ami, *równolegle* do jednego z głównych przecięć, nie zmienia w niczem ciemności, panującej w danej chwili na ekranie. Przy każdem innem zaś położeniu, to jest gdy przecięcie główne tafelki jest nachylone do takiegoż przecięcia polaryzatora lub analizatora, na ekranie pojawia się światło, którego natężenie zależy od wielkości kąta nachylenia tafelki. Gdy światło, użyte do doświadczenia, jest białe, na ekranie pojawia się barwa jednorodna. Przy wyprowadzaniu drugiego nicol'a ze skrzyżowanego położenia, barwa ta słabnie i wreszcie, gdy przecięcia główne obu nicol'ów stanowią pomiędzy sobą kąt równy 45^0, przechodzi w barwę białą. Przy dalszem odchylaniu biel ta zamienia się znów stopniowo w inną barwę jednorodną, która przy wzajemnie równoległem położeniu obu nicol'ów staje się dopełniającą do tej barwy jednorodnej, jaka występowała, gdy nicol'e były skrzyżowane. I tak np., jeżeli wspomniana tafelka gipsowa, znajdując się pomiędzy skrzyżowanemi nicol'ami, przedstawia barwę czerwoną, to przy równoległem ich położeniu wydaje się zieloną. Zjawisko to nie trudno jest objaśnić. Wyobraźmy sobie mianowicie, że promień, wychodzący z pierwszego nicol'a, pada w punkcie O na tafelkę (fig. 376) i w danej chwili nadaje znajdującej się tutaj cząstce eteru ruch ku górze, t. j. w kierunku $O\,M$. Drgający ruch ten wewnątrz tafelki, której przecięcie główne zajmuje położenie $R\,S$, rozkłada się na drganie w płaszczyznie tegoż przecięcia, t. j. w kierunku $O\,R$ oraz na drgania w płaszczyznie, prostopadłej do tegoż przecięcia, czyli w kierunku $O\,U$. Gdy ruchy te dochodzą do drugiego nicol'a, każdy z nich rozkłada się tutaj powtórnie, a mianowicie $O\,R$—na ruch $O\,M$, t. j. w płaszczyznie prostopadłej do głównego przecięcia analizatora i na ruch $O\,P$ w płaszczyznie tegoż przecięcia. Drugi ruch, to jest ten, który zachodzi wzdłuż $O\,U$, rozkłada się podobnie na ruch $O\,M$,

t. j. w płaszczyznie, prostopadłej do głównego przecięcia analizatora oraz na ruch $O\ Q$ w płaszczyznie tegoż przecięcia. Zauważmy tedy, że podczas gdy drgania w płaszczyznie $M\ N$, będące rezultatem rozkładu dwóch promieni, przychodzących z tafelki, odbywają się jednocześnie w tę samą stronę, t. j. ku górze ($O\ M$), drgania natomiast w płaszczyznie $P\ Q$, również stanowiące rezultat rozkładu dwóch promieni, wychodzących z tafelki, odbywają się jednocześnie w strony wprost przeciwne, a mianowicie od jednego na prawo ($O\ P$), od drugiego zaś na lewo ($O\ Q$). Wiemy zaś, że takie dwa impulsy jednocześnie nadane cząstce eteru i skierowane w strony wprost przeciwne, powodują różnicę faz, wynoszącą pół-fali. Innemi słowy, jeżeli przez przyrząd polaryzacyjny przechodzą drgania w płaszczyznie $M\ N$, t. j. gdy analizator ustawiony jest równolegle do polaryzatora, pierwszy nie powoduje żadnej różnicy faz wychodzących z niego promieni, gdy zaś jest z polaryzatorem skrzyżowany, t. j. gdy wychodzą zeń drgania w płaszczyznie $P\ Q$, powoduje on różnicę, wynoszącą pół-fali.

Jeżeli tafelka gipsowa oświecona światłem białem, umieszczona pomiędzy polaryzatorem i analizatorem, ma taką grubość, że wychodzące z niej dwa składowe promienie opóźniają się jeden względem drugiego o nieparzystą liczbę pół-fali dla pewnej określonej barwy np. czerwonej i jeżeli przytem analizator jest równoległy do polaryzatora, barwa ta zostaje wygaszoną; na ekranie pojawia się wtedy tylko zieleń, to jest to, co pozostaje w świetle białem po wygaszeniu czerwieni. Po skrzyżowaniu obu nicol'ów, do powyższej różnicy faz, spowodowanej li tylko przez tafelkę, przybywa jeszcze różnica pół-fali wskutek opisanego wyżej działania analizatora tak, że wynosi ona obecnie dla barwy czerwonej parzystą liczbę pół-fal, dla zielonej zaś nieparzystą, wskutek czego zielone promienie zostają teraz wygaszone, czerwone natomiast wzmacniają się wzajemnie i nadają tafelce tę właśnie barwę.

Jeżeli do powyższych doświadczeń używa się wiązki promieni równoległych i gdy tafelka posiada wszędzie jednakową grubość, wtedy wszystkie promienie mają do przebycia w niej

drogi jednakowe, a każda para składowych promieni, drgających w tej samej płaszczyznie (*M N* albo *P Q*), odznacza się tą samą różnicą faz. Tafelka tedy jednostajnie gruba, rozpatrywana w równoległem świetle spolaryzowanem, przedstawia w danej chwili tylko jednę barwę. W spolaryzowanem zaś świetle, zebranem przez soczewkę, zjawisko jest zupełnie inne. Ażeby otrzymać takie światło, zbiera się za pomocą soczewki wypukłej *L* (fig. 377) promienie słoneczne, a wychodzący z niej zbieżny stożek świetlny przepuszcza przez kryształ *K* spatu wapiennego, odgrywający rolę polaryzatora, gdzie ulega podwójnemu załamaniu. Stożek nadzwyczajnych promieni zostaje zatrzymany przez przegrodę *S*, stożek zaś zwyczajnych przechodzi, pada na umieszczoną w blizkości jego wierzchołka tafelkę krystaliczną *P*, podlęgającą doświadczeniu i po przejściu przez nią, oraz przez drugą soczewkę wypukłą *L'*, rzucającą dany obraz interferencyjny na ekran, dosięga analizatora *N*. Tafelka, wycięta z jednoosiowego kryształu *prostopadle do jego osi optycznej* i umieszczona pionowo w zebranem świetle spolaryzowanem, powoduje nader ciekawe zjawiska. Promień, który stanowi oś stożka świetlnego, pada na tafelkę prostopadle, przebywa ją tedy wzdłuż jej osi optycznej, nie ulegając podwójnemu załamaniu. Inne zaś promienie ulegają takiemu załamaniu i to tem silniej, im dalej biegną od osi, to jest im ukośniej padają na tafelkę; oprócz tego, w miarę coraz bardziej ukośnego padania, przebywają także w tafelce coraz to większe drogi. Oddalając się tedy od osi stożka, napotykamy stopniowo ciągle większe różnice w drodze, przebytej wewnątrz tafelki przez dwa składowe promienie, z których jeden jest zwyczajny, drugi zaś nadzwyczajny, a więc które przebiegają ją z różną prędkością. Ma to miejsce symetrycznie wokoło osi optycznej tak, że w danej chwili wszystkie elementy koła, zakreślonego na ekranie z punktu, leżącego

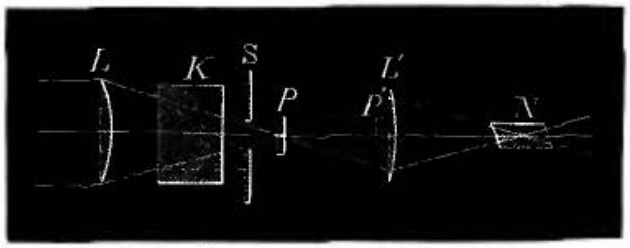
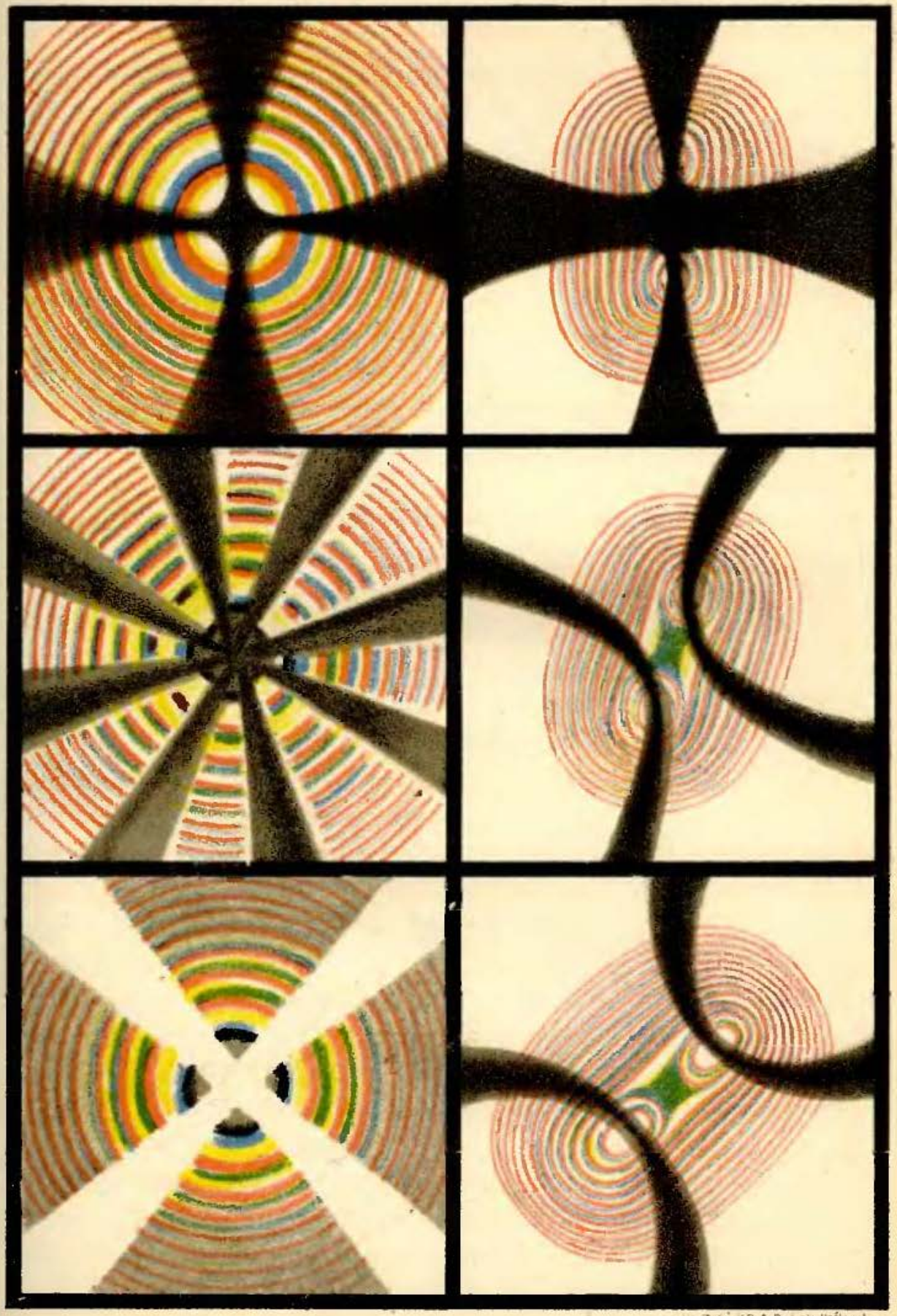


Fig. 377. Szemat przyrządu do otrzymania zebranego światła spolaryzowanego.



V. Pierścienie barwne

w jedno-i dwuosiowych, podwójnie załamujących światło kryształach.

Wyższa Szkoła
Biblioteka
Bolońska

na przedłużeniu osi, drgają jednakowo, lecz w każdem kole inaczej. Dlatego też na ekranie, przy użyciu światła białego, pojawia się system współśrodkowych barwnych pierścieni, który przy skrzyżowaniu polaryzatora i analizatora przecięty jest ciemnym krzyżem (patrz tablicę p. t. „Pierścienie barwne“, pierwszy rysunek z lewej strony). Powstawanie jego tłómaczy się w sposób następujący. Ponieważ, jak już wspominaliśmy, optyczna oś tafelki jest prostopadła do jej powierzchni, to—na mocy pewnych danych geometrycznych—każda z linij *M N*, *P Q*, *R S* i *U V* (fig. 376), poprowadzonych na ekranie przez środek pierścieni, odpowiada jednemu z jej głównych przecięć. Promienie, które wychodzą z polaryzatora i drgają równolegle do *M N*, a więc prostopadle do *P Q*, przechodzą nierozszczepione przez główne przecięcie *M N* tafelki jako nadzwyczajne, oraz przez takież jej przecięcie *P Q* jako zwyczajne. Gdy drgania te dochodzą do analizatora, skrzyżowanego z polaryzatorem, zostają przezeń zatrzymane, albowiem analizator przepuszcza tylko drgania, zachodzące w samej płaszczyznie jego głównego przecięcia *P Q*. Dlatego też na ekranie pojawia się ciemny krzyż, którego ramiona są odpowiednio równoległe do płaszczyzny drgań polaryzatora i analizatora. W każdem zaś głównem przecięciu tafelki, nachylonem do takiegoż przecięcia polaryzatora, np. w *R S*, promienie ulegają najprzód rozszczepieniu w tafelce, następnie w analizatorze; wychodzące z tego ostatniego drgania w płaszczyznie *P Q* interferują ze sobą i dają początek pierścieniom (patrz wyżej). Jeżeli analizator jest równoległy do polaryzatora, wtedy zamiast czarnego, pojawia się biały krzyż, przyczem barwy pierścieni stają się dopełniającemi do barw w poprzednim wypadku (patrz wymienioną tablicę, trzeci rysunek z lewej strony). Rysunek środkowy pomiędzy dwoma opisanemi odpowiada nachyleniu analizatora do polaryzatora, wynoszącemu 45°. Gdy Brewster badał owe barwne pierścienie, zauważył pewną znaczną różnicę pod względem zachowania się rozmaitych minerałów. I tak np. rubin, szmaragd, spat wapienny, dawały tylko pojedyńczy system pierścieni, inne zaś, jak topaz i saletra (azotan potasu), wycięte w określonym kierunku, tworzyły po-

dwójny system pierścieni, naprzemian to jasnych, to ciemnych, albo też różnobarwnych, zależnie od tego, czy używano światła jednorodnego, czy białego. Zjawiska te właśnie doprowadziły Brewster'a do wniosku, zupełnie sprawdzonego obserwacyą i doświadczeniem, że muszą istnieć kryształy o jednej i o dwóch osiach optycznych. Wyciąwszy np. tafelkę z dwuosiowego kryształu saletry w taki sposób, ażeby płaszczyzny jej były prostopadłe do linii, przepoławiającej ostry kąt pomiędzy dwiema optycznemi osiami i umieściwszy tafelkę tę w przyrządzie polaryzacyjnym, otrzymujemy piękne figury, przedstawione po prawej stronie wymienionej tablicy, odpowiadające rozmaitemu położeniu jej głównego przecięcia odnośnie do polaryzatora i analizatora.

Interesującym jest fakt, że ciała, pojedyńczo załamujące światło, mogą w pewnych warunkach stać się podwójnie załamującemi. Tafelka szklana, umieszczona w miejscu P' przyrządu polaryzacyjnego, przedstawionego na fig. 377 (str. 608), którego polaryzator i analizator są z sobą skrzyżowane, nie zmienia, jak wiemy, nic w ciemności panującej wtedy na ekranie. Lecz gdy tafelkę tę za pomocą aparatu szrubowego ściskamy w kierunku od góry ku dołowi, wtedy układ jej cząstek nie jest już jak przedtem, ze wszech stron jednakowy. Na ekranie pojawia się jasny obraz tafelki, przecięty ciemnym krzyżem, co dowodzi, że, dzięki wywieranemu na nią ciśnieniu, nabrała ona własności podwójnego załamywania światła. Własności takiej szkło stale nabywa także przez silne ogrzanie i natychmiastowe szybkie oziębienie. Podobne zjawiska dowodzą, jak słusznem jest przypuszczenie o ścisłej zależności, istniejącej pomiędzy układem cząstek danej substancyi a jej działaniem na przechodzące światło.

§ 5. Polaryzacya obrotowa.

Widzieliśmy w poprzednim §, że tafelka, wycięta z jednoosiowego kryształu prostopadle do jego osi optycznej i umieszczona pionowo pomiędzy dwoma nicol'ami, przepuszcza promienie,

wychodzące z pierwszego, nie zmieniając ich wcale, albowiem biegną one wtedy wzdłuż jej osi optycznej. Przy obracaniu drugiego nicol'a, na ekranie występuje wtedy ciemność lub jasność, zupełnie tak samo, jak gdyby tafelki owej wcale nie było. Stosuje się to do wszystkich jednoosiowych kryształów, za wyjątkiem kwarcu. Tafelka wycięta w powyższy sposób z kryształu tego minerału i wstawiona pomiędzy dwa nicol'e, zachowuje się zupełnie odmiennie. Przy obracaniu mianowicie drugiego nicol'a, obraz na ekranie zmienia tylko swą barwę (jeżeli do doświadczenia użyto światła białego), lecz w żadnem jego położeniu nie znika zupełnie; kolejno pojawiające się barwy: czerwona, pomarańczowa, żółta, zielona, niebieska i fioletowa stopniowo przechodzą jedna w drugą i powtarzają się w wymienionym porządku, jeżeli obracamy analizator ciągle w tym samym kierunku. Badając za pomocą pryzmatu jednobarwne światło, wychodzące w danej chwili z analizatora, przekonywamy się, że nie jest ono jednorodnem, lecz składa się z wielu barw. I tak np. wychodzące światło zielone, po przepuszczeniu przez pryzmat daje widmo, w którem zupełnie brak czerwieni, wszystkie inne natomiast barwy tęczowe są obecne. Przy dalszem obracaniu analizatora w tym samym kierunku, w widmie owem znika kolejno każda z wymienionych barw, przyczem po wygaśnięciu fioletu przychodzi powtórnie kolej na czerwień i t. d. To nam pokazuje, że jednobarwne światło, pojawiające się na ekranie bez udziału pryzmatu, składa się w danej chwili z wszystkich barw światła białego, za wyjątkiem tej, która uległa wygaszeniu przy przejściu przez przyrząd polaryzacyjny.

Wiemy, że gdy nicol'e w przyrządzie tym są skrzyżowane, wtedy wszystkie promienie, wychodzące z pierwszego i drgające równolegle do jego głównego przecięcia, zostają zatrzymane przez drugi nicol, jako prostopadłe do głównego przecięcia tego ostatniego, na ekranie zaś panuje wtedy zupełna ciemność. Wstawmy teraz pomiędzy skrzyżowane nicol'e znaną nam już tafelkę kwarcu, której grubość niechaj się równa 3,75 milimetra i rzućmy na polaryzator światło białe. Jeżeli chcemy, ażeby w świetle tem, po przejściu jego przez tafelkę i analizator, zo-

stały wygaszone np. promienie czerwone, musimy ten ostatni odchylić na 60° ze skrzyżowanego położenia, to znaczy, że po takiem dopiero odchyleniu drgania promieni czerwonych odbywają się prostopadle do głównego przecięcia analizatora. Ponieważ drgania w promieniach czerwonych, *po wyjściu ich z polaryzatora*, podobnie jak wszystkie inne, zachodzą prostopadle do głównego przecięcia analizatora, a po przejściu ich przez tafelkę należało dla ich wygaszenia odchylać ten ostatni ze skrzyżowanego położenia na 60°, wynika z tego, że *tafelka kwarcu skręca płaszczyznę drgań dla promieni czerwonych na 60°*. W podobny sposób znajdujemy, że płaszczyzna drgań dla promieni żółtych ulega w tejże tafelce skręceniu na 90°, dla fioletowych zaś—na 195°. Liczebne te dane odnoszszą się do tafelki, mającej, jakeśmy to zaznaczyli, grubość 3,75 milim. Przy użyciu innych tafelek, kąty, na jakie zostaje skręcona płaszczyzna drgań dla rozmaitych jednorodnych promieni, różnią się od powyżej przytoczonych i wzrastają w tym samym stosunku, w jakim powiększa się grubość tafelki.

Pewne okazy kwarcu zachowują się w taki sposób, że wycięta z nich tafelka skręca płaszczyznę drgań dla oddzielnych barw na prawo, to znaczy, że chcąc je kolejno—począwszy od czerwieni i skończywszy na fiolecie—gasić, należy obracać analizator w kierunku strzałki zegarowej, czyli z lewa na prawo; kwarc taki należy do ciał *prawoskręcających*. Inne zaś gatunki tego minerału skręcają płaszczyznę drgań na lewo, czyli że należy wtedy analizator obracać w kierunku przeciwnym, niż w poprzednim wypadku; jestto kwarc *lewoskręcający*.

Postarajmy się teraz bliżej objaśnić opisane tutaj zjawiska skręcania płaszczyzny drgań; dla uczynienia tego, musimy jednak poprzednio zaczerpnąć z mechaniki pewne dane co do rezultatów kombinacyi dwóch ruchów drgających, skierowanych w strony wzajemnie prostopadłe. Niechaj $A\ Q$ (fig. 378, str. 613) przedstawia wahadło, zakończone u dołu ostrzem, które w stanie spoczynku wskazuje punkt O. Przez ten ostatni przechodzą dwie wzajemnie prostopadłe linie $A\ B$ i $C\ D$. Gdy spoczywające wahadło uderzamy w kierunku $O\ A$, wtedy wykonywa

ono oscylacye wzdłuż linii *A B*; uderzone zaś w kierunku *O C*, drga wzdłuż linii *C D*, przyczem czas użyty na jednę oscylacyę, zależny, jak wiemy, tylko od długości wahadła, pozostaje niezmieniony, niezależnie od jej kierunku.

Jakiż tedy ruch wykonywałoby wahadło pod jednoczesnym wpływem dwóch tych uderzeń, skierowanych w strony wzajemnie prostopadłe? Ażeby to rozstrzygnąć, nadajmy mu ruch w kierunku *A B* i w chwili, gdy zajmie położenie *A*, uderzmy je w kierunku prostopadłym do tamtego, t. j. *A a* z taką siłą, że gdyby poruszało się tylko w tym ostatnim kierunku, to oddaliłoby się pod wpływem tej siły od punktu *A* na odległość równą *O A*. Wahadło opisuje wtedy koło *A C B D A* w kierunku, wskazanym przez strzałki, przyczem czas, użyty na przebycie tego koła, jest równy czasowi jednego zwykłego wahnięcia. Ponieważ wahadło otrzymało uderzenie w kierunku *A a* w chwili, gdy znajdowało się w punkcie *A*, to jest gdy wykonało już jednę czwartą oscylacyi wzdłuż *A B*, możemy powiedzieć, że dwa drgające prostolinijne ruchy o jednakowej amplitudzie drgań, odbywające się w kierunkach wzajemnie prostopadłych, będąc połączone, wytwarzają ruch kołowy, jeżeli jeden z tych ruchów wyprzedza drugi o ćwierć oscylacyi. W danym wypadku ruch kołowy wahadła odbywa się w kierunku strzałki zegarowej, czyli z lewa *na prawo;* gdyby uderzenie skierowane było w stronę przeciwną *A a*, wahadło poruszałoby się z prawa *na lewo*. Wreszcie będąc uderzone w kierunku *O C* w chwili, gdy przechodzi przez położenie równowagi *O*, poczyna ono znów wykonywać oscylacye wzdłuż prostej linii, lecz nie w kierunku *O A*, ani też *O C*, ale pośrednim pomiędzy niemi. W tym wypadku różnica faz obu ruchów albo równa się zeru, albo też wynosi parzystą liczbę pół-oscylacyi.

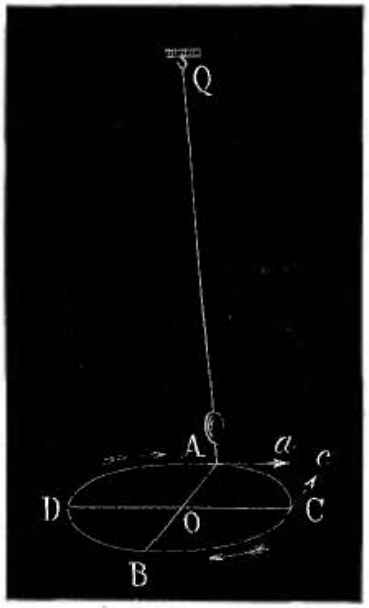


Fig. 378. Wahadło, drgające kołowo.

Zobaczmy obecnie, w jaki sposób można wiadomości te zastosować do drgającego ruchu eteru. Warunki, analogiczne do wyżej opisanych, możemy otrzymać, umieszczając pomiędzy dwoma nicol'ami bardzo cienką tafelkę miki, której przecięcie główne $R\,S$ (fig. 376, str. 604) stanowi z płaszczyzną drgań $M\,N$ polaryzatora kąt równy 45^0. Promień, wychodzący z tego ostatniego, rozkłada się w tafelce, jak wiemy, na promień, drgający w płaszczyznie jej głównego przecięcia $R\,S$, oraz na promień drgający w płaszczyznie prostopadłej do tamtej $U\,V$. Pod wpływem dwóch tych impulsów, cząstka np. O eteru, znajdująca się na powierzchni tafelki, poczyna wykonywać (na podobieństwo owego wahadła) drgania kołowe lub prostolinijne, zależnie od różnicy faz w oscylacyach dwóch wychodzących z tafelki promieni. Przypuśćmy, że różnica ta wynosi ćwierć fali dla pewnej jednorodnej barwy, to według powyższego, będziemy musieli przyjąć, że cząstka eteru O opisuje koła w płaszczyznie, prostopadłej do kierunku rozchodzenia się promienia, przyczem czas, użyty na odbycie jednej takiej kołowej oscylacyi, jest równy peryodowi drgania dla odnośnej jednorodnej barwy. Oscylacye te udzielają się następnym cząstkom, a ponieważ każda z nich rozpoczyna swój ruch nieco później, niż jej poprzedniczka, tworzy się przeto spiralna falowa linia, której jeden całkowity skręt odpowiada jednej oscylacyi. Taki promień świetlny zowie się *kołowo spolaryzowanym*, w odróżnieniu od promienia *prostolinijnie spolaryzowanego*, którym zajmowaliśmy się w poprzednich paragrafach i w którym każda cząstka eteru drga tylko w kierunku jednej prostej linii, prostopadłej do samego promienia. Należy tutaj jeszcze dodać, że drgania kołowo spolaryzowanego promienia odbywają się z lewa na prawo, lub też przeciwnie z prawa na lewo, zależnie od tego, który z dwóch promieni, wychodzących z tafelki, wyprzedza swego towarzysza. Promień kołowo spolaryzowany, badany za pomocą nicol'a, zachowuje się pozornie, jak promień naturalny, którego drgania mogą odbywać się we wszelkich możliwych kierunkach, byle tylko prostopadłych do jego drogi. W istocie, jeżeli drgania są kołowe, to wszystkie strony promienia są jednakowe, jak w promieniu natural-

nym; dlatego też gdy wspomnianą tafelkę z miki, powodującą kołową polaryzacyę, umieścimy w przyrządzie polaryzacyjnym, zobaczymy, że na ekranie stale panuje jasność, niezależnie od położenia analizatora względem polaryzatora. Lecz gdy po nałożeniu na pierwszą tafelkę drugiej, tej samej grubości tak, ażeby ich przecięcia główne były skrzyżowane, będziemy obracali analizator, to przekonamy się, że gdy ten skrzyżuje się z polaryzatorem, światło na ekranie zgaśnie całkowicie. Promień tedy, wychodzący z tafelek, zachowuje się jak prostolinijnie spolaryzowany. W samej rzeczy jest on takim. Jeżeli bowiem przyjmiemy, że po wyjściu z pierwszej tafelki promień *U V*, prostopadły do jej głównego przecięcia, wyprzedza o ćwierć fali promień *R S*, biegnący w kierunku tegoż przecięcia, to po wyjściu z drugiej tafelki, skrzyżowanej z tamtą, promienie oczywiście zamieniają swe role: ten, który biegł poprzednio wzdłuż przecięcia głównego, biegnie teraz w kierunku doń prostopadłym i naodwrót, wskutek czego różnica faz ich oscylacyi znosi się i redukuje do zera. Z drugiej więc tafelki wychodzą dwa ruchy drgające wzajemnie prostopadle i bez różnicy faz, tworzą też razem, według tego cośmy wyżej powiedzieli, jeden ruch prostolinijny, dając początek promieniowi prostolinijnie spolaryzowanemu. Opisane doświadczenie pokazuje, w jaki sposób można poznać światło kołowo spolaryzowane i zarazem, jak je odróżnić od naturalnego. Zauważymy jeszcze, że światło kołowo spolaryzowane na prawo lub na lewo, badane w powyższy sposób, zachowuje się jednakowo. Można wszelako dwa te rodzaje światła rozróżnić, wstawiając pomiędzy tafelkę miki i analizator tafelkę gipsową, wtedy bowiem pojawiające się na ekranie barwy są rozmaite, zależnie od tego, czy światło spolaryzowane jest na prawo, czy na lewo. Barwy w pierwszym wypadku są dopełniającemi do barw w drugim.

Powróćmy jeszcze raz do naszego wahadła i zobaczmy, jakie są jego drgania w razie, gdy znajduje się pod jednoczesnym wpływem dwóch impulsów, nadających mu wprost przeciwne kołowe ruchy. Przypuśćmy, że w chwili, gdy wahadło zajmuje położenie *A* (fig. 379, str. 616), zostaje jednocześnie uderzone

w kierunkach $A\,a$ i $A\,a'$ z jednakową siłą. Ponieważ przedtem posiadało ono już ruch wzdłuż $A\,B$, to pod wpływem pierwszego z tych uderzeń opisywałoby koło z lewa na prawo, pod wpływem zaś drugiego—koło z prawa na lewo. Lecz gdy dwa te uderzenia działają jednocześnie, wtedy znoszą się wzajemnie, a wahadło drga dalej wzdłuż prostej $A\,B$. Jeżeliby drugie uderzenie nastąpiło wtedy, gdy wahadło pod wpływem pierwszego opisało już część $A\,r$ koła na prawo, drgania jego również przeszłyby w prostolinijne, lecz w kierunku $r\,r'$. Uogólniając wszystkie te wyniki, powiemy, że gdy na drgające ciało działają dwa impulsy, usiłujące mu nadać kołowe ruchy w dwie przeciwne strony, wtedy drga ono prostolinijnie, przyczem płaszczyzna tych drgań zbacza lub nie od pierwotnej płaszczyzny, zależnie od tego, czy dwa te uderzenia następują jednocześnie, czy też jedno opóźnia się względem drugiego.

Fig. 379. Współdziałanie dwóch przeciwnych kołowych oscylacyj.

Stosując to do drgań świetlnych, należy przyjąć, że dwa biegnące razem promienie, spolaryzowane kołowo, lecz w przeciwne strony i mające jednakowe natężenie oraz częstość drgań, wytwarzają razem promień spolaryzowany prostolinijnie. Naodwrót każdy promień prostolinijnie spolaryzowany można rozpatrywać jako złożony z dwóch o jednakowem natężeniu i spolaryzowanych kołowo w przeciwne strony.

Jeżeli w jakimkolwiek środku dwa takie promienie złączone w jeden biegną z jednakową prędkością, natenczas nie powstaje żadna różnica faz ich oscylacyi i mamy prostolinijnie drgający ruch o pierwotnym kierunku. Odpowiada to wypadkowi, w którym wahadło otrzymuje owe dwa przeciwne uderzenia w chwili, gdy znajduje się w punkcie A lub B swej oscylacyi wzdłuż prostej $A\,B$ (fig. 379). Gdyby zaś istniały substancye, w których promień spolaryzowany np. na prawo rozchodziłby się prędzej, niż spolaryzowany na lewo, musiałaby powstać różnica faz ich oscylacyi; jeżeliby takowa wynosiła niecałkowitą albo nieparzy-

stą liczbę pół-fali, wtedy z dwóch kołowych drgań powstałoby znów drganie prostolinijne, lecz już nie w pierwotnym kierunku, ale na prawo lub lewo od niego. Odpowiadałoby to wypadkowi, w którym wahadło, otrzymawszy drugie uderzenie w chwili, gdy pod wpływem pierwszego przebyło już np. część koła $A\ r$ (fig. 379, str. 616), drga wzdłuż prostej $r\ r'$, pochylonej względem pierwotnego kierunku drgań $A\ B$. Zboczenie płaszczyzny drgań promienia prostolinijnie spolaryzowanego, który przeszedł przez taką substancyę, powinno być tem większe, im grubszą warstwę ona przedstawia, albowiem wtedy jeden ze składowych, kołowo spolaryzowanych promieni bardziej opóźnia się względem drugiego. Otóż Fresnel dowiódł, że w istocie kwarc stanowi taką substancyę. Skombinował on mianowicie kilka pryzmatów z różnych odmian tego minerału, które naprzemian skręcają płaszczy-

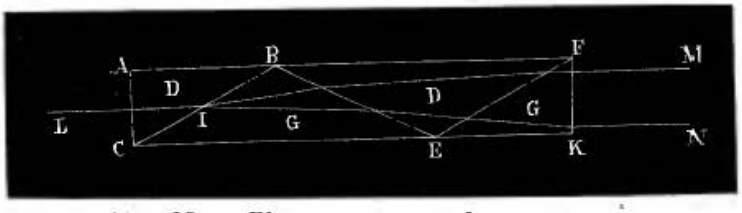


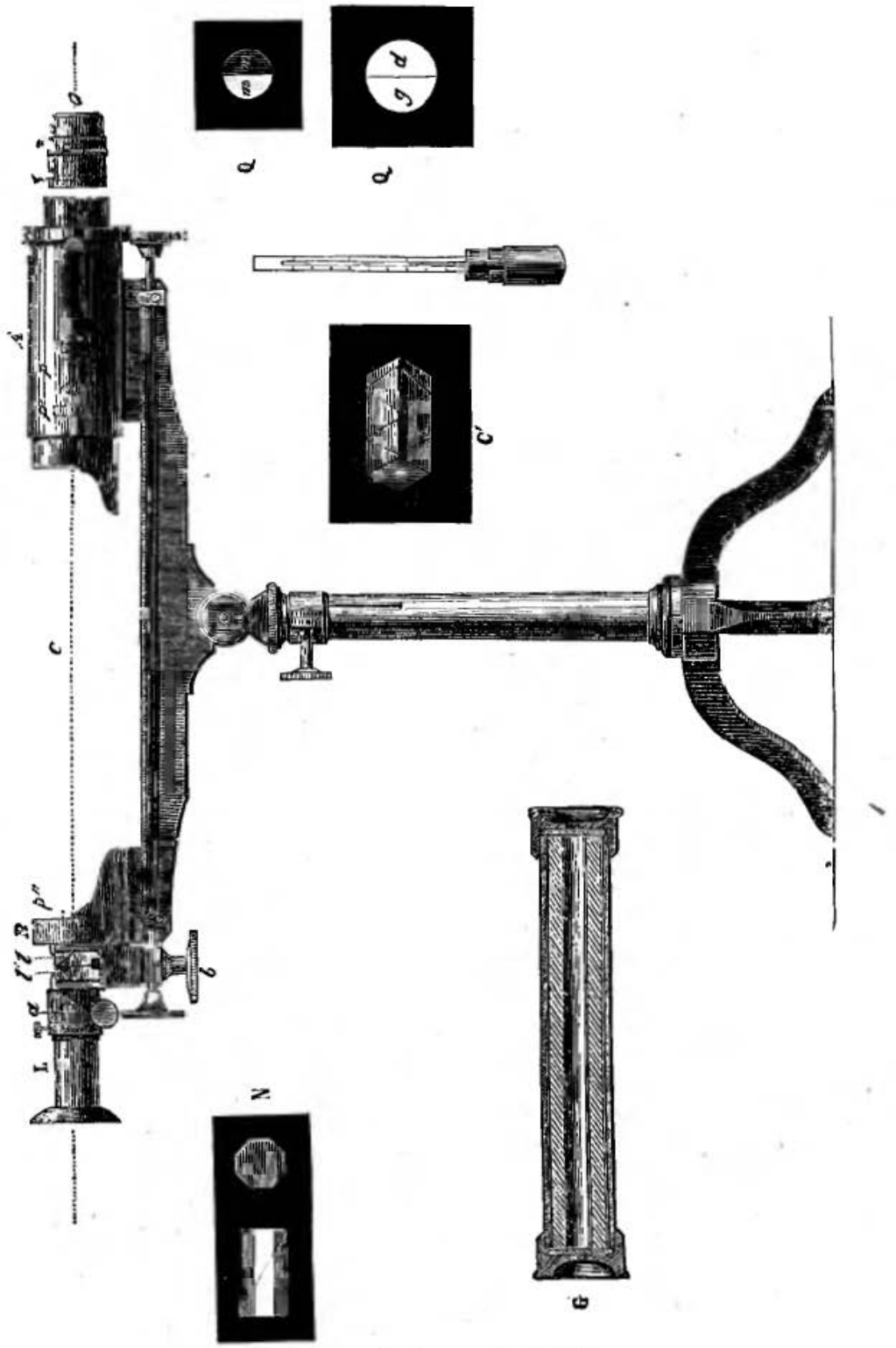
Fig. 380. Złożony pryzmat kwarcowy.

znę polaryzacyi na prawo albo na lewo i otrzymał jeden prostokątny pryzmat $A\ C\ F\ K$ (fig. 380), o płaszczyznach $A\ C$ i $F\ K$, prostopadłych do osi optycznej. Promień $L\ I$, spolaryzowany prostolinijnie, pada na pierwszą z nich i biegnie wzdłuż osi. Wychodząc z założenia, że w tym kierunku dwa kołowo, lecz w przeciwne strony spolaryzowane promienie rozchodzą się z niejednakową prędkością, należy przypuścić, że i promień $L\ I$ rozszczepia się w pierwszym pryzmacie $A\ B\ C$ na dwa takie promienie: jeden spolaryzowany na prawo, drugi na lewo. Ponieważ pryzmat $A\ B\ C$ jest prawoskręcający, pierwszy promień rozchodzi się w nim prędzej niż drugi, przyszedłszy jednak do drugiego pryzmatu $C\ B\ E$—lewoskręcającego—biegnie wolniej i od tej chwili zbliża się do normalnej, podczas gdy promień, spolaryzowany na lewo, od niej się oddala na zasadzie praw załamania. Promienie te odłączają się jeden od drugiego, a że w każdym na-

stępnym pryzmacie powtarza się to samo, to wreszcie przez płaszczyznę *F K* wychodzą dwie oddzielne wiązki światła. Badane za pomocą nicol'a, okazują się one obydwie jako kołowo spolaryzowane; przepuszczone zaś jeszcze oprócz tego przez tafelkę gipsową, nachyloną pod kątem 45°, tworzą na stojącym przed przyrządem polaryzacyjnym ekranie dwie jasne plamy, których barwy są wzajemnie dopełniające. Pojawienie się tych dopełniających barw dowodzi w danym wypadku, że jedna z wiązek, wychodzących z pryzmatu kwarcowego, jest kołowo spolaryzowana na prawo, druga zaś na lewo. Doświadczenie potwierdza tedy w zupełności znakomite przypuszczenie Fresnel'a, że prostolinijnie spolaryzowany promień rozszczepia się w kwarcu na dwa kołowo i przeciwnie spolaryzowane promienie, biegnące z niejednakową prędkością.

Znaczna ilość substancyj ciekłych, albo rozpuszczonych w jakiejś cieczy obojętnej, wywiera na światło spolaryzowane wpływ podobny do działania kwarcu. Ponieważ własność skręcania płaszczyzny polaryzacyi objawia się w danych wypadkach niezależnie od wszelkich przejawów krystalizacyi, możemy więc przypuścić, że własność ta nie zależy od pewnego określonego układu cząstek, lecz od budowy samych cząstek. Napotykamy ją zwykle u ciał, przedstawiających pewien stopień komplikacyi cząsteczkowej, że wymienimy tylko rozmaite gatunki cukru, dekstrynę, gumę arabską, olejek cytrynowy i terpentynowy, kwas winny, chininę, strychninę i t. d. Niektóre z wymienionych ciał skręcają płaszczyznę polaryzacyi na prawo, jak np. cukier trzcinowy, gronowy, mleczny, dekstryna, olejek cytrynowy; zaś inne—jak białko, żelatyna, guma arabska, olejek terpentynowy, skręcają ją na lewo. Istnieją także pewne związki, które pomimo jednakowego składu chemicznego, są w pewnych razach prawoskręcające, w innych—lewoskręcające, jak np. kwas winny. Ponieważ, jak powiedzieliśmy, własność obrotowa cieczy zależy od jej cząstek, to oczywiście, wielkość skręcenia płaszczyzny polaryzacyi, spowodowanego przez słup tejże cieczy, jest *proporcyonalna do liczby cząstek, przez jakie przeszło światło, czyli do wysokości oraz gęstości tegoż słupa.* Dzieląc tę wielkość

przez wysokość i gęstość, otrzymujemy skręcenie, jakie spowodo-



Fid, 381· Sacharometr Soleil'a.

wałaby pojedyńcza cząstka, które nazywamy własnością obro-

tową cząstkową. Jest ona różna dla rozmaitych ciał, lecz dla jednego i tego samego ciała nie zmienia się, jeżeli tylko temperatura jest stałą, dlatego też stanowi ona jednę ze specyficznych cech odnośnej substancyi. Istnieją formuły matematyczne, pozwalające dokładnie obliczyć ilość ciała, zawartego w roztworze, na podstawie jego cząstkowej własności obrotowej; należy tylko przytem ściśle oznaczyć skręcenie, spowodowane przez słup roztworu o znanej wysokości i objętości, a do tego służą przyrządy, z których opiszemy tylko jeden, przeznaczony specyalnie do oznaczania ilości cukru w roztworze i dlatego zwany sacharometrem. *Sacharometr Soleil'a* (fig. 381, str. 619) składa się z trzech głównych części: tylnej *A*, zawierającej polaryzator, przedniej *B* z analizatorem oraz ze specyalnem urządzeniem do mierzenia skręcającego wpływu roztworu cukru; w części zaś środkowej *C* umieszcza się samą rurę z badaną cieczą. Polaryzator jestto podwójnie załamujący i achromatyczny pryzmat *p*, przedstawiony osobno w *C'*. Światło przenika w *o* przez mały okrągły otwór i pada na ten pryzmat, gdzie ulega polaryzacyi, tworząc obraz zwyczajny i nadzwyczajny otworu. Promienie zwyczajne zostają zatrzymane przez przeponę, nadzwyczajne zaś przechodzą. Analizator czyli pryzmat Nicol'a, przedstawiony osobno w *N* z przodu i z boku, zajmuje w części *B* miejsce, oznaczone literą *a;* poprzedza go luneta, umożliwiająca dokładne widzenie. Gdyby przyrząd zawierał tylko opisane dwie części, to przy skrzyżowanem położeniu polaryzatora i analizatora, ten ostatni gasiłby całkowicie światło, wychodzące z pierwszego. Lecz pomiędzy polaryzatorem a rurą, napełnioną badanym roztworem, w *p'* znajduje się tafelka kwarcu, składająca się z dwóch półkrążków jednakowej grubości i wyciętych prostopadle do osi kryształu: jeden z nich jest prawoskręcający, drugi zaś lewoskręcający. Są one złożone w ten sposób, że tworzą jeden krążek, przedstawiony oddzielnie w *Q*. Jeżeli polaryzator i analizator są skrzyżowane, wtedy obydwie połowy tafelki mają barwę zupełnie jednakową, co zależy od tego, że jeden krążek skręca płaszczyznę polaryzacyi na prawo dokładnie o tyle, o ile ją drugi krążek skręca na lewo. Przy obracaniu zaś analizatora w jednę

lub drugą stronę, jedna połowa tafelki (grubość jej równa 3,7 milim.) przyjmuje barwę niebieską, druga zaś (Q') czerwoną, co znów pochodzi ztąd, że płaszczyzny drgań promieni świetlnych, które przeszły przez obadwa pół-krążki, nie są już symetrycznie położone względem głównego przecięcia analizatora, wskutek bowiem obrotu tego ostatniego, przecięcie to zbliżyło się do płaszczyzny drgań jednego promienia, oddaliło się zaś od płaszczyzny drgań drugiego. Umieściwszy między tafelką i analizatorem jakąś ciecz, skręcającą płaszczyznę polaryzacyi, wywołujemy ten sam rezultat, co przez obracanie analizatora, albowiem ciecz ta powiększa działanie jednego z pół-krążków tafelki (prawego lub lewego) w tym samym stosunku, w jakim ono zmniejsza się w drugim pół-krążku. Rura G, napełniona badanym roztworem i umieszczona w C, znosi jednakowość barw obu połów tafelki kwarcowej. Skręcenie, spowodowane przez słup cieczy, określa się za pomocą odpowiedniej grubości kryształu kwarcu o działaniu równem, lecz przeciwnem jej działaniu. W tym celu do przyrządu dodany jest t. zw. kompensator, który pozwala jednocześnie zmieniać grubość tego kwarcu oraz kierunek powodowanego przezeń skręcenia. Kompensator stanowi jednem słowem środek do zneutralizowania skręcenia, wywołanego przez badaną ciecz, a więc do przywrócenia jednakowości barw obu połów tafelki dwukwarcowej Q. Znając grubość tego kwarcu neutralizującego (którą łatwo zmierzyć za pomocą podzielonej linijki), można obliczyć kąt, na jaki została skręcona płaszczyzna polaryzacyi wskutek wstawienia rury z badanym roztworem; gdy oprócz tego jeszcze znamy zkądinąd cząstkową zdolność obrotową substancyi rozpuszczonej, mamy już wszystkie dane do obliczenia—na zasadzie wspomnianych wyżej formuł matematycznych—ilość tej substancyi, zawartej w roztworze (1).

(1) Wundt, Physique.

ROZDZIAŁ XI.

Oko ludzkie.

§ 1. Budowa oka. Tworzenie się obrazu. Oko dalekowidzące i krótkowidzące.

Przy wszystkich licznych i różnorodnych procesach, jakie dotychczas opisaliśmy, zwracaliśmy uwagę na sposób rozprzestrzeniania się światła w rozmaitych środkach, na modyfikacye, jakim ono pod wpływem zmiany warunków ulegało i które dotyczyły już to jego barwy, natężenia, częstości drgań, już to płaszczyzny tych ostatnich. Nie zajmowaliśmy się wszakże pytaniem, jak światło działa na nasze zmysły i jaką drogę przebyć musi, ażeby, że tak powiemy, przejść ze świata zewnętrznego do naszej świadomości.

Otóż badając tę drogę, przekonywamy się, że promień świetlny, doszedłszy do naszego oka, ulega tutaj załamaniu w kilku przezroczystych ciałach, a następnie dochodzi do pewnych rozgałęzień nerwowych, które z kolei doprowadzają odnośne wrażenie do mózgu. Drogę tę przez różne załamujące środki oka promień przebywa ściśle na zasadzie znanych nam praw zwykłego załamania, samo zaś oko nie przedstawia nic innego, jak małą ciemnię optyczną, o przedniej ściance, zaopatrzonej w przezroczyste okienko, po za którem znajduje się soczewka, rzucająca obrazy otaczających nas przedmiotów na ekran. *Przyjrzyjmy się tedy nieco bliżej urządzeniu tej ciemni optycznej.*

Oko leży w jamie kostnej, zwanej *oczodołem* (fig. 382, str. 623); pod względem kształtu mało różni się od kuli, a zewnętrzną jego powłokę stanowi nader mocna błona, w której rozróżniamy dwie części: przednią mniejszą *A*, przezroczystą czyli *rogówkę* i większą tylną *H* białą, nieprzezroczystą—*twardówkę*. Krzywizna przezroczystej rogówki jest większa, aniżeli krzywizna twardówki tak, że pierwsza z nich przedstawia się jakby osadzone w gałce ocznej szkiełko zegarkowe. Pod zewnętrzną

błoną leży druga, tak zwana *naczyniówka I*, która w przedniej części oka, tuż pod rogówką przechodzi w *tęczówkę*, kolistą błonę *D*, określającą barwę oka; ta ostatnia u różnych osobników bywa szarą, albo jasno lub ciemno-niebieską, zielonawą, żółtawą lub brunatną. Tęczówka stanowi rodzaj przepony dla światła, przechodzącego tylko przez okrągły otwór, znajdujący się w jej środku i zwany *źrenicą* (*C*). Jest ona właśnie okienkiem, przez które światło przenika do wnętrza oka. Za tęczówką leży *so-*

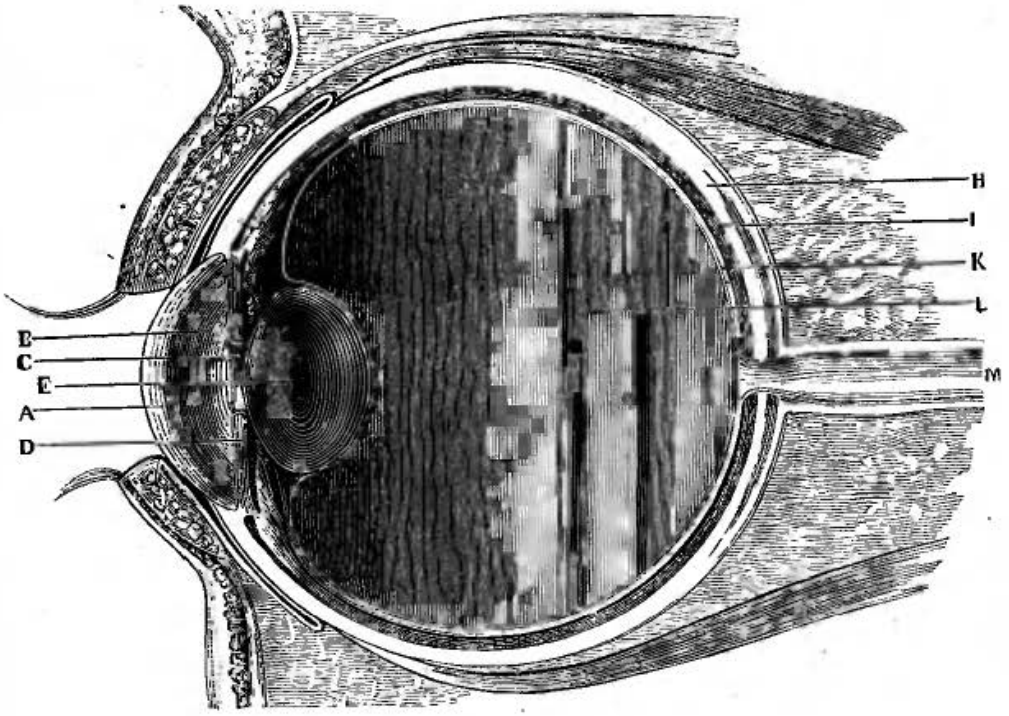


Fig. 382. Przecięcie oka ludzkiego.

czewka E, utworzona z licznych włókien i mająca, jak widzimy, kształt dwuwypukłej soczewki, której przednia powierzchnia posiada nieco mniejszą krzywiznę, to znaczy, że jest mniej wypukłą, niż powierzchnia tylna. Soczewka dzieli jamistość oka na dwie części: przednią—mniejszą i tylną—większą. Pierwsza (*B*), ograniczona przez rogówkę i soczewkę, wypełniona jest cieczą, przedstawiającą pod względem fizycznych własności prawie czystą wodę i dlatego zwaną *płynem wodnym;* część po za soczewką

wypełniona jest galaretowatą masą, tworzącą *ciało szkliste L.* Dodajmy jeszcze, że na wewnętrznej powierzchni naczyniówki znajduje się czarny barwnik, odgrywający prawdopodobnie ważną rolę w procesie widzenia, według jednych bowiem pochłania on promienie najbardziej drażniące; według innych zaś przeszkadza odbijaniu się na wszystkie strony promieni świetlnych, ułatwiając w ten sposób jasność widzenia.

Jeżeli tedy promień świetlny przenika do oka, to zanim dosięga tylnej jego ściany, musi przejść przez następujące przezroczyste środki: rogówkę, płyn wodny, soczewkę i ciało szkliste. W każdym z nich promień ulega załamaniu podobnie jak w szklanej soczewce, a wszystkie razem działają w taki sposób, że na wewnętrznej powierzchni wspomnianej ściany powstają rzeczywiste i odwrócone obrazy przedmiotów, znajdujących się przed okiem. Powierzchnia ta stanowi miejsce, gdzie światło napotyka wrażliwe na jego działanie części oka, gdzie więc poczyna się właściwy proces widzenia, do czego budowa jej jest specyalnie przystosowaną. Utworzona jest przez błonę, zwaną *siatkówką* (*K*), budowa której jest bardzo złożona. Głównie składa się ona z rozgałęzień nerwu wzrokowego (*M*), zakończonych specyalnemi ciałkami czuciowemi; na odnośnej figurze widzimy, jak nerw ten wchodzi od tyłu do gałki ocznej przez znajdujący się tamże otwór i rozgałęzia się w siatkówce, stykającej się z ciałem szklistem.

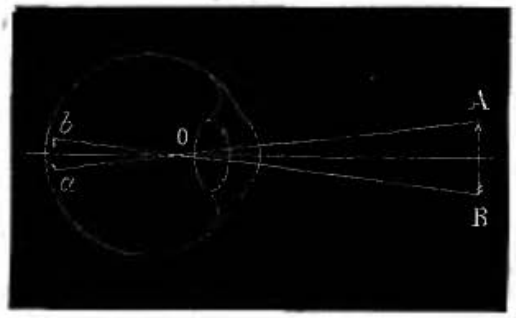


Fig. 383. Tworzenie się obrazu w oku.

Niechaj przed okiem *O* znajduje się przedmiot *AB* (fig. 383), ze wszystkich punktów którego wychodzą promienie, a część ich wpada do oka. Ponieważ zdolność załamująca dla wszystkich stałych i ciekłych środków tego ostatniego jest większa, aniżeli dla powietrza, to przypuszczamy, że promienie, wychodzące np. z punktu *A*, zbierają się w *a*, wychodzące zaś z *B* w *b*, wskutek czego na siatkówce tworzy się rzeczywisty i odwrócony obraz *ab*

przedmiotu *A B*. Doświadczenie potwierdza ten wniosek, albowiem w oczyszczonem oku świeżo zabitego zwierzęcia, zwróconem źrenicą do światła, można widzieć odwrócone i zmniejszone obrazy otaczających przedmiotów. Ze sposobu tworzenia się tych obrazów wnioskujemy dalej, że wewnątrz oka znajduję się punkt, przez który promienie świetlne przechodzą bez załamania; stanowi on *środek optyczny O* oka, prosta zaś linia, przeprowadzona przez punkt *O* i środek soczewki, zowie się *główną osią optyczną oka.*

Przedmiot, którego obraz pada na siatkówkę, wydaje się tem jaśniejszym, im więcej światła od niego przenika do wnętrza oka. Gdy spoglądamy tedy na przedmiot słabo oświecony, źrenica się rozszerza, a to w celu wpuszczenia do oka jak największej ilości promieni; przeciwnie gdy patrzymy na przedmiot silnie świecący, zwęża się ona i tym sposobem zatrzymuje nadmierną ilość światła, jakaby do siatkówki dotrzeć mogła. Dokładne rozróżnienie widzianego przedmiotu zależy od przestrzeni, jaką obraz jego zajmuje na siatkówce: im ona jest większa, czyli im większy jest kąt *a O b*, utworzony przez dwie boczne osie, idące od skrajnych punktów obrazu, tem widzenie jest wyraźniejsze. Kąt *a O b* jest równy, jak wiadomo z geometryi, kątowi *A O B*, utworzonemu przez dwie linie proste, poprowadzone od wierzchołka i podstawy przedmiotu do optycznego środka oka. Ten właśnie kąt zowie się *kątem widzenia.* Oczywiście jest on tem większy, im bliżej dany przedmiot znajduje się od oka; ponieważ obrazy pojedyńczych punktów wypadają wtedy na siatkówce dalej jeden od drugiego, to możemy je dokładniej odróżnić. W taki sposób tłómaczy się, dlaczego w blizkich przedmiotach możemy odróżnić więcej szczegółów, aniżeli w dalekich.

Ponieważ oko możemy porównać do układu soczewek, to dziwnem na pozór nam się wydaje, że widzi ono wyraźnie przedmioty, znajdujące się od niego na bardzo rozmaitej odległości. Układ ten w oku posiada chyba własność zmieniania swej krzywizny, stosownie do tej odległości, dzięki czemu, promienie zbierają się na siatkówce, rozumiemy bowiem, że gdyby one zbierały się po za nią albo przed nią, obraz każdego punktu nie byłby

punktem, lecz krążkiem i widzenie byłoby bardzo niejasne. W istocie tak jest, oko bowiem posiada własność tak zw. *akomodacyi* czyli przystosowywania się, polegającej na tem, że soczewka może powiększać swą wypukłość, a to dzięki działaniu pewnych mięśniowych elementów, otaczających ją dokoła. Jej zdolność załamująca wzrasta w miarę skurczu tego mięśnia. Przy zbliżaniu przedmiotu, a więc gdy obraz jego oddalałby się po za siatkówkę, soczewka staje się bardziej wypukłą, promienie silniej załamane zbierają się bliżej i obraz zostaje znów sprowadzony na właściwą warstwę. Zdolność akomodacyi posiada jednak swoję granicę, po za którą soczewka wypuklać się już nie może; dlatego też istnieje pewne minimum odległości, przy której widzenie jest jeszcze wyraźne i ono to właśnie określa t. zw. *odległość dokładnego widzenia.* Jest ona różna u rozmaitych osobników, często także bywa różną dla lewego i prawego oka u jednego i tego samego osobnika. Dla normalnego oka wynosi ona 25—30 centymetrów, w ogóle zaś zależy jedynie od zdolności akomodacyjnej oka i jest tem mniejsza, im podatniejszą jest soczewka, oraz im mocniejszym jest wspomniany mięsień.

Wymiary układu załamującego w oku normalnem (emmetropia) są takie, że gdy mięsień akomodacyjny jest w spoczynku, obrazy odległych przedmiotów tworzą się na siatkówce, dla bliskich zaś wypadają na niej wyraźnie tylko przy pewnym wysiłku akomodacyjnym. Teoretycznie najbardziej oddalony punkt, wyraźnie jeszcze widziany przez oko normalne, leży w nieskończoności, w rzeczywistości wszakże odległość ta, ograniczona przez konieczność wytworzenia na siatkówce obrazu niezbyt małego i niezbyt słabego, zależy także od wielkości i blasku samych przedmiotów.

Z wiekiem soczewka oka staje się mniej podatną, mięsień zaś akomodacyjny słabszym, wskutek czego jej zdolność przystosowawcza maleje, a odległość dokładnego widzenia wzrasta (presbyopia). Odbywa się to stopniowo tak, że w wieku lat 40 do 45 wada ta, dla oka przedtem normalnego, jest prawie powszechną. Osoby dotknięte nią noszą okulary o szkłach wypukłych, które czynią promienie bardziej załamanemi tak, że zbierają się

bliżej, wskutek czego nie potrzeba przedmiotów trzymanych np. w ręku odsuwać tak daleko przed siebie. Sposób ten przedstawia wszakże tę niedogodność, że obrazy odległych przedmiotów tworzą się za blizko i dlatego oko, uzbrojone w okulary wypukłe, nie mogąc przez nie dokładnie widzieć takich przedmiotów, musi na te ostatnie spoglądać bez szkieł.

Opisana wada oka stanowi, jak widzieliśmy, anomalię akomodacyjną; oprócz niej zaś istnieją jeszcze inne, zależne od anatomicznej budowy samej gałki ocznej. Gdy ta ostatnia jest wy-

Fig. 384. Oko krótkowidza.

dłużana w kierunku osi optycznej (fig. 384), wtedy ognisko dla promieni od przedmiotu nieskończenie odległego nie wypada na

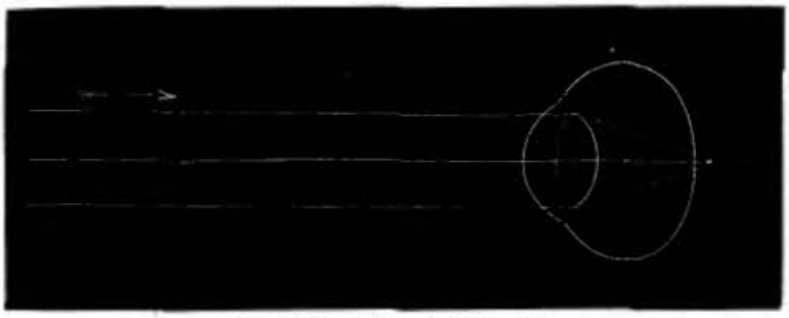


Fig. 385. Oko dalekowidza.

siatkówce, lecz bliżej, innemi słowy teoretyczna maxymalna odległość dokładnego widzenia nie jest nieskończenie wielką, minimalna zaś jest mniejsza, niż dla oka normalnego w tym samym wieku (myopia). Ponieważ w oku wydłużonem obraz tworzy się za blizko, to osoby niem obdarzone, przybliżają przedmiot, przez co jednocześnie przysuwają obraz do siatkówki; są to więc tak zwani *krótkowidze*. Noszą oni okulary wklęsłe, które zmniejszają zbieżność promieni świetlnych, wpadających do oka i sku-

piają je na samej siatkówce. Inna wada oka, wprost przeciwna tylko co opisanej, polega na tem, że gałka oczna jest za krótka (hypermetropia), wskutek czego ognisko dla promieni od przedmiotu nieskończenie odległego wypada po za siatkówką (fig. 385, str. 627). Wynika z tego niezdolność przystosowawcza do małych odległości, widzenie zaś przedmiotów oddalonych pozostaje zupełnie wyraźnem; osoby dotknięte tą wadą zowią się *dalekowidzami*. Noszą oni okulary wypukłe, które czynią promienie, wychodzące z bliższych przedmiotów, bardziej zbieżnemi, skupiając je na siatkówce. Dodajmy jeszcze, że okulary, na których zwykle podaną jest w calach wielkość promienia krzywizny ich powierzchni, stanowią odcinki kuli, czyli że są sferyczne. Od pewnego wszakże czasu zaczęto używać także i szkieł cylindrowych, a to w wypadkach wady ocznej, zwanej *astygmatyzmem*. Polega ona na tem, że powierzchnie załamujące oka nie są symetryczne wokoło jego głównej osi, wskutek czego odległość ogniskowa układu załamującego nie jest jednakowa we wszystkich płaszczyznach. Istnieją oczy, gdzie różnice krzywizny w różnych przecięciach są tak znaczne, że powodują silne zboczenia w biegu promieni świetlnych, przenikających do oka. Przypuśćmy np. że podzieliliśmy rogówkę na dwie połowy, najprzód przez poprowadzenie płaszczyzny pionowej, a następnie poziomej. Otóż w oku normalnem powierzchnie obu tych przecięć mają krzywiznę jednakową, gdy przeciwnie w oku astygmatycznem promień jednej jest mniejszy niż promień drugiej, a jeżeli różnica ta jest dostatecznie wielka, oko może być krótkowidzące w pierwszym kierunku, wcale zaś takiem nie jest, albo nawet jest dalekowidzącem w drugim. Rzecz oczywista, że chcąc naprawić ten błąd w organie wzroku, należy promienie świetlne przepuścić przez szkło, przywracające równowagę obu przecięć; promienie, uległszy działaniu takiego szkła, oraz działaniu rogówki nienormalnej, przybierają kierunek ten sam, co po przebyciu jedynie rogówki normalnej. Jak wspomnieliśmy wyżej, używa się do tego soczewek cylindrycznych, którym nadaje się takie położenie, że zbieżność promieni, spowodowana przez nie w pewnym kierunku, ma miejsce w płaszczyznie tego

samego przecięcia, w którem powierzchnia rogówki jest mniej wypukłą. Ciekawym jest fakt, dowiedziony niedawno, że szczególniej u młodych osób soczewka oka może uledz przekształceniu, stanowiącemu kompensatę astygmatyzmu rogówki.

§ 2. Widzenie dwojgiem oczu. Stereoskop. Odczuwanie barw.

Widzieliśmy w poprzednim §, że główną oś optyczną oka stanowi linia prosta, przechodząca przez jego środek optyczny oraz środek soczewki; w oku dobrze zbudowanem przechodzi ona także przez środek źrenicy. W kierunku tej osi oko najdokładniej widzi przedmioty. *Kątem optycznym* zowie się kąt *B A C*

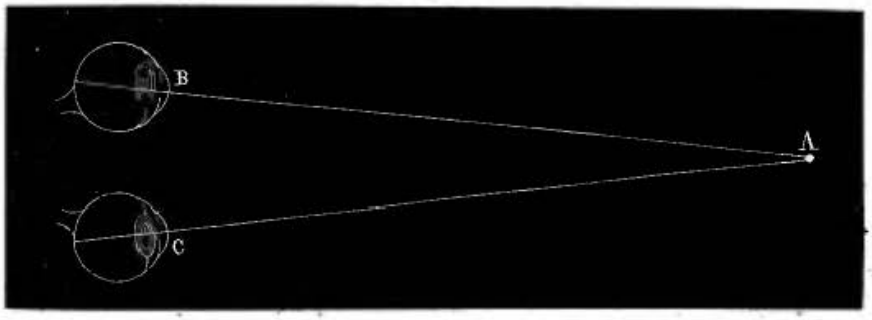


Fig. 386. Kąt optyczny.

(fig. 386), utworzony przez główne osie optyczne oka prawego i lewego, skierowanych na jeden i ten sam punkt; oczywiście jest on tem mniejszy, im bardziej odległy jest przedmiot, na który patrzymy. Ocenianie odległości zależy od wielu warunków, oprócz bowiem kąta optycznego, wpływa na to jeszcze, jak wiemy, kąt widzenia, a także porównanie z wielkością znanych nam dobrze przedmiotów, oraz zmniejszanie się lub wzmaganie jasności obrazu na siatkówce. Gdy spoglądamy np. w głąb' alei, wysadzanej drzewami, zdaje nam się, że te ostatnie są coraz mniejsze, albowiem kąt widzenia dla nich maleje w miarę odległości; przyzwyczajenie jednak nauczyło nas, iż tak nie jest i ono też modyfikuje nasz sąd w danych wypadkach. Ponieważ kąt optyczny powiększa się lub zmniejsza w miarę zbliżania albo od-

dalania się przedmiotu, przyczem oczy wykonywają odpowiednie ruchy w celu skierowania nań obu osi, to i ruchy te mogą nam dać pojęcie o odległości. Wymaga to jednak długiej wprawy, jak tego dowodzą ślepi od urodzenia, którym, dzięki operacyi, przywrócono wzrok i którzy sądzą z początku, że wszystkie przedmioty znajdują się na jednakowej odległości.

Gdy patrzymy dwojgiem oczu na jeden przedmiot, na każdej z siatkówek tworzy się obraz,—pomimo to jednak widzimy tylko przedmiot pojedyńczy. Ażeby to wytłómaczyć, Gassendi przyjmował, że w danej chwili mamy świadomość jednego albo drugiego obrazu, doświadczenia jednak obaliły to przypuszczenie. Taylor i Wollaston wypowiedzieli niegdyś pogląd, że odpowiadające sobie czyli homologiczne miejsca na siatkówkach prawego i lewego oka należą do jednego i tego samego rozgałęzienia nerwowego, które po wyjściu z mózgu rozdwaja się na odnogę prawą i lewą. Wreszcie Brewster słusznie przyjmuje, że jedność wrażenia, pomimo powstawania dwóch obrazów, zależy od tego, że przyzwyczailiśmy się odnosić jednoczesne wrażenia na dwóch siatkówkach do jednego przedmiotu (1).

Wiadomo dobrze, że patrząc dwojgiem oczu na otaczające przedmioty, nie widzimy ich w jednej płaszczyźnie, lecz wyraźnie jesteśmy świadomi tego, iż są bryłowate i rozmaicie od nas oddalone: innemi słowy, widzenie dwojgiem oczu daje nam pojęcie o trzech wymiarach przestrzeni. Dlaczego jednak malowidła nie mogą wywołać tego samego wrażenia, bez względu na mistrzowstwo artysty, który je stworzył? Długi czas nie wiedziano dokładnie, na czem polega ta różnica, dająca się tak wyraźnie zauważyć przy patrzeniu na malowidło oraz na sam przedmiot, przezeń przedstawiony. Chcąc bliżej wniknąć w naturę tej różnicy, wyobraźmy sobie sześcian lub czworokątną piramidę (fig. 387, str. 631), umieszczoną na stole, blizko przed naszemi oczami, pośrodku pomiędzy niemi. Gdy będziemy patrzyli na jeden lub drugą dwojgiem oczu, przedstawią nam się one tak, jak w *A* i *B*. Gdy zaś zamkniemy lewe oko, widok zmieni się

(1) Ganot, Traité de Physique.

w sposób, pokazany w *A'* i *B'*: płaszczyzny z prawej strony wydadzą się daleko większe niż przedtem, leżące z lewej mniejsze, albo też znikną zupełnie; wreszcie po zamknięciu oka prawego, widok będzie przeciwny ostatniemu, to jest przedstawi się jak w *A''* i *B''*. To samo możemy zaobserwować na innych przedmiotach, przyczem przekonamy się zawsze, że prawem okiem dostrzegamy części, zakryte dla lewego i naodwrót. Wynika z tego, że obrazy przedmiotu, które powstają na siatkówkach obu oczu, nie są identyczne; dzięki przyzwyczajeniu od najmłodszych lat, zlewają się one w naszej świadomości w jedną całość

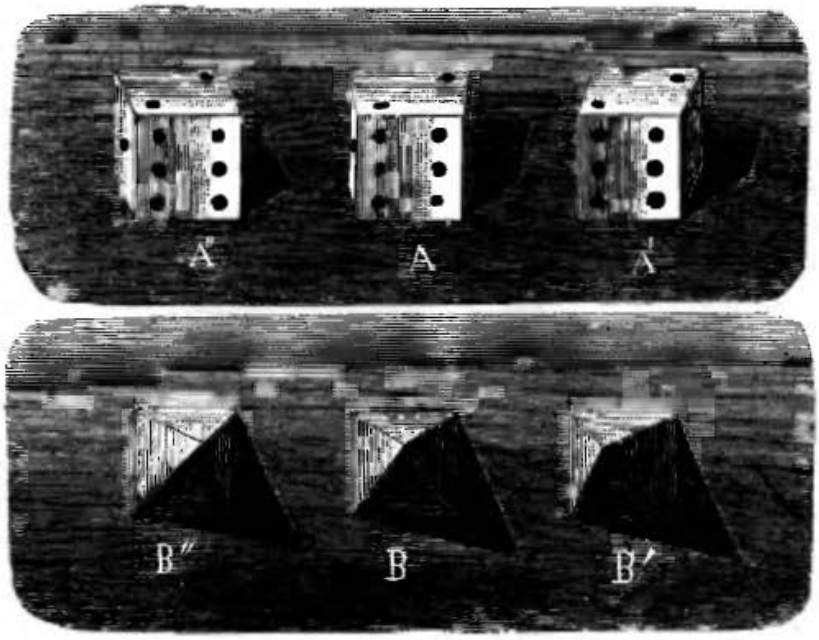


Fig. 387. Kóżnice przy patrzeniu jednem lub dwojgiem oczu.

plastycznie bryłowatą. Przeciwnie, obrazy malowidła, tworzące się w obu oczach, są zupełnie jednakowe. Widzenie dwojgiem oczu, przy którem przedmioty przedstawiają się nam w istotnych warunkach przestrzeniowych, zowie się *stereoskopowem* (1). Na zasadzie powyższych danych Wheatstone w roku 1838 zbudował przyrząd, za pomocą którego można widzieć na płaszczyznie wypukłe obrazy przedmiotów o trzech wymiarach. Przyrząd

(1) Od dwóch greckich wyrazów, które oznaczają: *widzieć bryłowato.*

ten nosi nazwę *stereoskopu*, polega zaś na tem, że przed każdem okiem umieszcza się różny rysunek tego samego przedmiotu, jeden odpowiadający prawemu, drugi zaś lewemu oku, gdy patrzą one na ten przedmiot z małej odległości. Stereoskop tak jest ustawiony, że prawe oko widzi jedynie rysunek dlań przeznaczony, lewe oko również; oba obrazy w oczach zlewają się wtedy w naszej świadomości w jeden wypukły zupełnie tak samo, jak gdybyśmy patrzyli na sam przedmiot. Złudzenie jest wtedy zupełne i istotnie zadziwiające.

W stereoskopie Wheatstone'a oba obrazy nakładają się wskutek odbicia od dwóch zwierciadeł płaskich, w stereoskopie zaś Brewstera osiąga się to za pomocą dwóch soczewek zbierających. Oto budowa ostatniego przyrządu, obecnie najbardziej rozpowszechnionego: A i A', są to dwa szkła, stanowiące części pryzmatycznej soczewki, przez które oczy O i O' rozpatrują oba rysunki (fig. 388). Szkła są tak pochylone, że obraz punktu C jednego rysunku zlewa się z obrazem odpowiedniego punktu C' rysunku drugiego w miejscu C_1. To samo stosuje się do wszystkich pozostałych punktów obu rysunków $a\ a'$ i $b\ b'$, których obrazy zlewają się w a_1, b_1, tak, że gdy rysunki te są zrobione w powyżej podany sposób, oczy otrzymają wrażenie, jak gdyby światło przychodziło od właściwego przedmiotu. Najlepiej rysunki takie dają się przygotowywać za pomocą zdjęć fotograficznych. Stereoskop Brewster'a przedstawia nietylko tę korzyść, że daje obraz wypukły, ale powiększa jeszcze ten ostatni, co pozwala dokładniej badać pojedyńcze szczegóły. W celu dalszego ulepszenia przyrządu w tym kierunku, Helmholtz użył zamiast szkieł pryzmatycznych, układów soczewek, działających jak zwy-

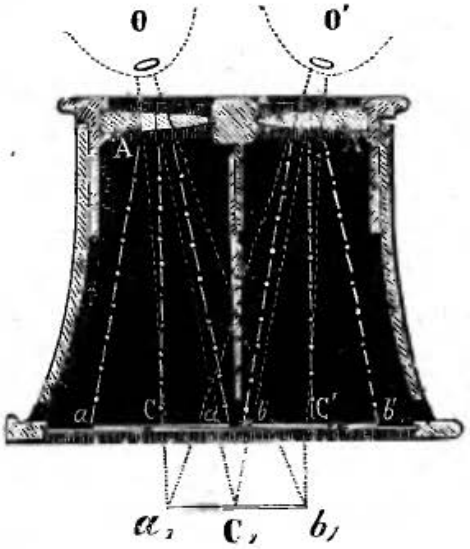


Fig. 388. Stereoskop Brewster'a. Przecięcie.

czajne mikroskopy, a to wespół z innemi jeszcze zmianami czyni przyrząd jego o wiele doskonalszym od prostszego odeń stereoskopu Brewster'a.

Za pomocą stereoskopu udało się wykazać, że gdy jedna ze siatkówek otrzymuje wrażenie pewnej barwy, druga zaś—wrażenie barwy dopełniającej do tamtej, wtedy widzimy tylko jednę barwę białą. Doświadczenie to należy urządzać w ten sposób, że umieszczone w głębi stereoskopu dwa krążki białe oświeca się dwiema wiązkami światła o barwach dopełniających i rozpatruje każdy krążek jednem okiem.

Dotychczas wspominaliśmy tylko w ogóle o wrażliwości *siatkówki na światło, obecnie zaś musimy dodać, że wrażliwość* owa nie jest wcale jednakową na całej przestrzeni tej błony. Istnieje na niej pewne miejsce, zupełnie niewrażliwe na ten bodziec, które wypada tam, gdzie nerw wzrokowy wchodzi do gałki ocznej i zowie się *ślepym punktem* oka. Dowodzi tego następujące np. doświadczenie, które każdy bardzo łatwo może wykonać. Rysuje się na papierze dwie czarne okrągłe plamy, odległe na 5 centym. i trzyma przed sobą tenże papier na odległości 15 centym.; gdy zamkniemy lewe oko, a prawem będziemy patrzyli na lewą plamę, nie dostrzeżemy plamy prawej, albowiem w wymienionych warunkach obraz jej pada na ślepy punkt. Przy innej odległości papieru, mniejszej lub większej, obydwie plamy są widoczne. Wrażliwość siatkówki jest największa na t. zw. *plamce żółtej*, znajdującej się na tylnym końcu średnicy gałki ocznej, idącej od przodu ku tyłowi, następnie maleje tak, że na poziomie równika tejże gałki jest 150 razy słabsza, niż na plamce żółtej. Wrażenie wywołane na siatkówce nie przemija w chwili oddalenia bodźca, lecz trwa jeszcze przez pewien czas. Wiadomo każdemu, że gdy obracamy np. węgiel rozżarzony, widzimy koło świetlne, albo gdy spadają duże krople deszczu, wydaje nam się, iż stanowią one nieprzerwaną żyłę wodną. Zjawiska podobne zależą od tego, że obraz węgla lub kropli, znajdujących się w danym punkcie, trwa jeszcze na siatkówce, gdy już na niej tworzy się ich obraz, odpowiadający innemu ich położeniu. Trwałość tego wrażenia zależy od stopnia wrażliwości

siatkówki oraz od natężenia światła. Dotyczy ona zarówno kształtu przedmiotów, jak i ich barwy, obracając bowiem krążki, podzielone na oddzielne wycinki o różnych barwach, otrzymujemy wrażenie barwy, stanowiącej ich mięszaninę, jak tego dowodzi np. doświadczenie z krążkiem Newtona (str. 499).

Co do wrażliwości oka na barwy, to pewne względy każą nam odrzucić przypuszczenie, podług którego odczuwamy różnemi zakończeniami nerwu wzrokowego najróżnorodniejsze barwne odcienie. Tak ścisły, że tak powiemy, podział pracy pomiędzy wszystkiemi oddzielnemi częściami siatkówki, z których każda byłaby zdolną reagować na jeden tylko rodzaj drgań świetlnych—nie istnieje. Teorya natomiast Young'a i Helmholtza przyjmuje, że w siatkówce znajdują się tylko trzy rodzaje włókien, w rozmaitym stopniu wrażliwe na wpływ trzech barw: czerwonej, zielonej i fioletowej, tworzących razem barwę białą. Jeden rodzaj jest szczególnie wrażliwy na barwę czerwoną, słabiej zaś daleko na pozostałe; drugi rodzaj najsilniej odczuwa zieloną, trzeci zaś fioletową. W taki sposób odbieramy *trzy zasadnicze wrażenia*, które zmieszane razem, lecz w danych chwilach nie jednakowo silnie, mogą powodować wszystkie wrażenia barw, do jakich oko nasze jest zdolne. Jedynie barwa biała powstaje przy jednakowej sile owych trzech zasadniczych wrażeń. Na korzyść tej teoryi przemawia np. fakt tak zwanej *ślepoty na barwy*, polegającej na tem, że niektóre osoby nie mogą odczuć pewnych barw (daltonizm). Najczęściej nie odczuwają oni barwy czerwonej. a w widmie dostrzegają tylko dwie barwy, zwane przez nich niebieską i żółtą. Wszystkie barwne wrażenia ich wyprowadzają się z zieleni i fioletu. Gdy wrażliwość na barwę czerwoną istnieje jeszcze u nich w mniejszym albo większym stopniu, napotykamy różne też stopnie ślepoty na tę barwę.

Gdy przez długi czas patrzymy na jaki barwny przedmiot, a następnie kierujemy wzrok na białą powierzchnię, otrzymujemy jeszcze wrażenie tamtej barwy, albo też wrażenie barwy do niej dopełniającej. Pierwsze pochodzi od tego, że poprzednie działanie trwa jeszcze, nawet po odwróceniu wzroku od

przedmiotu je powodującego, drugie zaś stanowi rezultat tego, że włókna nerwowe, szczególnie wrażliwe na barwę przedmiotu, męczą się i bardzo słabo reagują na wpływ jej w białem świetle, podczas gdy inne niezmęczone elementy siatkówki w normalny sposób ulegają działaniu barw pozostałych, co razem tworzy wrażenie barwy dopełniającej.

KSIĘGA CZWARTA.

CIEPŁO.

ROZDZIAŁ I.

Rozszerzanie się ciał od ciepła. ~~Zmiana~~ stanów ~~skupienia~~.

§ 1. Zjawiska rozszerzania sie i kurczenia.

Gdy dotykamy jakiegoś ciała, to oprócz znanego wrażenia, jakie sprawia na nas budowa jego powierzchni, otrzymujemy jeszcze inne szczególnego rodzaju, które trudno daje się bliżej określić i które nazywamy wrażeniem *ciepła* lub *zimna*. Zależy ono zarówno od stanu samego ciała, jako też od chwilowego usposobienia naszego narządu zmysłowego. Jedno bowiem i to samo ciało może wywołać w nas różne, a nawet wprost przeciwne wrażenia, jeżeli będziemy go się dotykali w różnych momentach czasu; tłómaczymy sobie to zjawisko mówiąc, że albo ciało to *ogrzało się* lub *oziębiło*, albo też, że w naszym narządzie zmysłowym zaszły pewne zmiany, albo wreszcie przypisujemy różnicę wrażeń jednej i drugiej przyczynie. Jeżeli naprzykład na dłoni prawej położymy kawałek lodu, lewą zaś zanurzymy w wodzie gorącej, a po pewnym czasie zanurzymy obydwie w wodzie, mającej mniej więcej tę samą ciepłotę, co zwykłe powietrze pokojowe, to w prawej ręce uczujemy wrażenie ciepła, w lewej zaś—zimna. W tym wypadku różnica wrażeń, jakich

doznajemy, jest skutkiem różnych warunków, w jakich znajdowały się zakończenia nerwowe rąk naszych przed zanurzeniem ich w wodzie letniej. Albo gdybyśmy w danej chwili zanurzyli rękę w wodzie gorącej, wystawionej na oziębiające działanie otaczającego powietrza i po wyjęciu jej uczynili to samo po raz drugi, lecz po upływie pewnego dosyć długiego czasu, to doznalibyśmy również dwóch różnych wrażeń; powiedzielibyśmy wtedy, że, ponieważ nasza ręka nie uległa żadnym zmianom między pierwszem a drugiem zanurzeniem jej w wodzie, ta ostatnia musiała zmienić swą ciepłotę, czyli, że różnica wrażeń zależy w tym razie od samego ciała, którego się dotykamy.

Całą tę grupę wrażeń, która stanowi znaczną część ogólnej sumy naszych wrażeń codziennych, wraz ze wszystkiemi dotykowemi, niedawno jeszcze obejmowano jedną nazwą wrażeń czucia, mówiąc, że wchodzą one w zakres *zmysłu czuciowego*, w ostatnich jednak czasach zaczęto się bliżej zastanawiać nad tem, że wrażenia ciepła i zimna mają zupełnie odrębny charakter i bynajmniej nie są podobne do wrażeń, których przyczyną jest np. uderzenie, dotknięcie twardego przedmiotu, łechtanie skóry i t. p. Oddzielono tedy wrażenia ciepła i zimna od innych, tak samo odbieranych za pośrednictwem całej powierzchni ciała ludzkiego, i przyjęto dla nich t. zw. *zmysł temperatury*. Słusznie też znakomity fizyk angielski William Thomson mówi w jednym ze swych odczytów o „sześciu wrotach“ (t. j. sześciu zmysłach) ducha ludzkiego. Zobaczymy w dalszym ciągu niniejszej księgi, jakie znaczenie fizycy nadają samemu słowu: *temperatura;* tymczasem zaś przystąpimy do zbadania zjawisk, towarzyszących tym zmianom wrażeń, które dochodzą do naszej świadomości za pośrednictwem zmysłu temperatury, starając się zapoznać czytelnika z różnemi sposobami konstatowania i mierzenia tych zjawisk. Zobaczymy też, że zjawiska te są bardzo liczne i różnorodne i—że odgrywają nadzwyczaj ważną rolę w gospodarce przyrody.

Przyczynę naszych wrażeń, wchodzących w zakres zmysłu temperatury, przypisujemy pewnemu czynnikowi fizycznemu, który nazywamy *ciepłem*, odróżniając go od samego wrażenia

ciepła, uważanego jako jeden z jego licznych objawów. Lecz pytaniem, czem właściwie jest ciepło zajmiemy się dopiero wtedy, gdy czytelnik pozna zjawiska cieplne oraz prawa z nich wynikające. Postaramy się z nich wyprowadzić istotę ciepła, podobnie jak na zjawiskach świetlnych oparliśmy teoryę światła.

Zachowując sobie, jak już wspomnieliśmy, ściślejsze określenie wyrazu temperatura do jednego z dalszych rozdziałów, obecnie powiemy tylko, że oznacza on stan ciepłoty danego ciała; im ono jest cieplejsze, tem wyższą jest jego temperatura, im zaś zimniejsze, tem ona jest niższą. Nasz zmysł temperatury nie daje nam, jak widzieliśmy, dokładnego pojęcia o stanie ciepłoty ciał, albowiem jedno i to samo ciało może posiadać dla nas bardzo rozmaitą temperaturę, zależnie od tego, jaką częścią ciała naszego dotykamy go się, jako też od temperatury tejże części. Dana ciecz np. może nam się wydać ciepłą, gdy zanurzymy w niej rękę, zimną zaś gdy weźmiemy ją w usta. Doświadczenie opisane na początku niniejszego paragrafu dowodzi, że za pomocą naszego zmysłu możemy odczuć jedynie różnicę w temperaturze ciała dotykanego i ręki, ciało cieplejsze od niej uważamy za ciepłe, zimniejsze zaś—za zimne. Ponieważ jednak ścisłe oznaczenie temperatury ciał jest konieczne przy badaniu zjawisk cieplnych, postarano się o środek, niezależny od naszego osobistego wrażenia. Polega on na zmianie objętości, jakiej pod wpływem zmiany temperatury doznają wszystkie ciała. Zmianę zaś temperatury możemy osiągnąć przez zetknięcie danego ciała z innem o różnej temperaturze; ciało cieplejsze udziela wtedy część swego ciepła ciału zimniejszemu. Bardzo proste doświadczenie pokaże nam, że objętość ciała się powiększa, gdy temperatura jego się podnosi, zmniejsza zaś gdy ta ostatnia się obniża. Ogrzejmy kulę metalową, która przy zwyczajnej temperaturze przechodzi dokładnie przez pierścień, nad płomieniem lampki spirytusowej, a zobaczymy, że po ogrzaniu kula nie przejdzie już przez tenże pierścień (fig. 389 str. 642). Przed ogrzaniem średnice kuli i pierścienia były równe, po ogrzaniu zaś średnica kuli stała się większą. Pozwólmy kuli powrócić do pierwotnej temperatury, a przekonamy się, że przejdzie ona znów przez pierścień, z czego wynika,

że wraz z oziębieniem objętość jej się zmniejszyła. Widzimy tedy, że zmiana objętości trwa tylko dopóty, dopóki trwa zmiana temperatury.

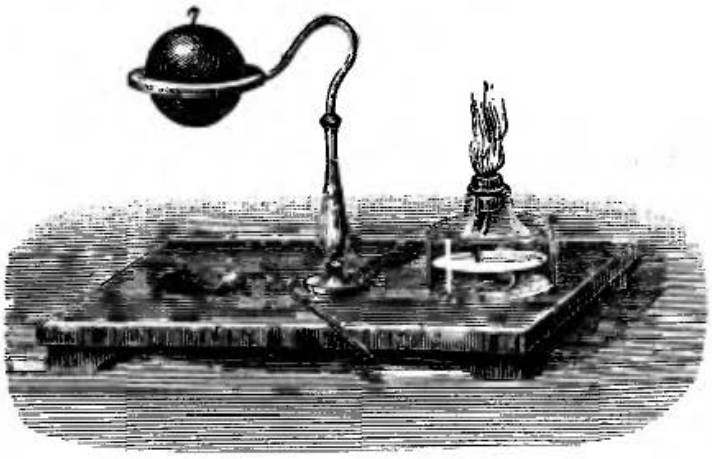


Fig. 389. Rozszerzanie się kuli pod wpływem ciepła.

Za pomocą przyrządu, przedstawionego na fig. 390, można jeszcze lepiej uwidocznić tę zależność wymiarów ciała od jego temperatury. Słupki *A* i *B*, silnie przymocowane do podstawy, są w górnej swej części przedziurawione, a przez otwory przechodzi pręt metalowy. Słupek *A* zaopatrzony jest w szrubę *C*, za pomocą której można jeden koniec pręta mocno przyszrubować; drugi zaś koniec przechodzi swobodnie przez otwór w słupku *B* i dotyka krótszego ramienia *a b* dźwigni *b a D*, której dłuższe ramie *a D* posuwa się po łuku, podzielonym na stopnie.

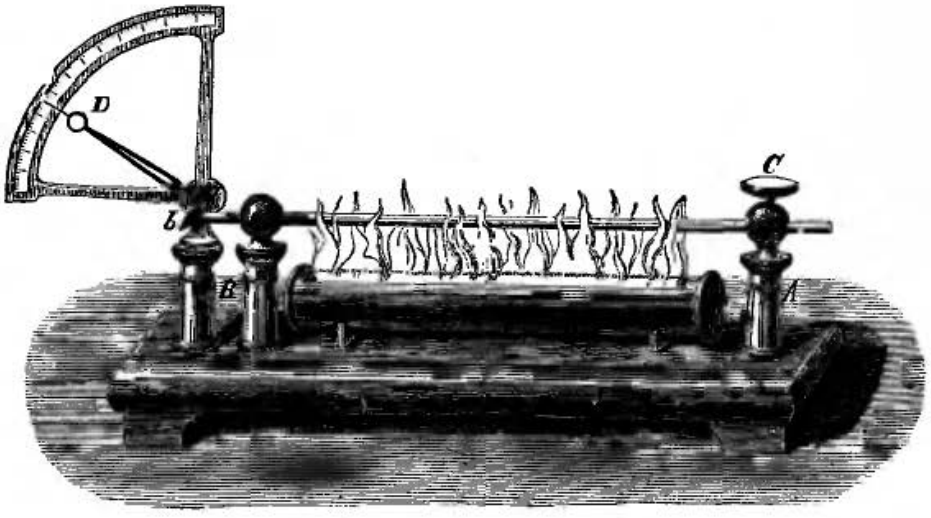


Fig. 390. Linijne rozszerzania się pręta.

Przyszrubujmy pręt przy pewnej określonej temperaturze w taki sposób, ażeby wskazówka D stała naprzeciwko zera podziałki. Jeżeli następnie będziemy ogrzewali pręt, wskazówka zacznie posuwać się ku górze i to tem wyżej, im silniejszem będzie ogrzewanie; wynika z tego, że przy podnoszeniu temperatury pręt się wydłuża. Gdy po odjęciu płomienia pozwolimy, ażeby pręt się oziębiał, zobaczymy, że wskazówka stopniowo opada, co dowodzi, iż pręt stopniowo także się kurczy. Wreszcie gdy temperatura jego stanie się równą tej, jaką miał na początku doświadczenia, wskazówka znów stanie naprzeciwko zera czyli, że długość pręta dojdzie wtedy do pierwotnej jego długości.

To cośmy dotychczas powiedzieli o ciele stałem, stosuje się także do ciał ciekłych i lotnych. Napełnijmy szklany balon, wydłużony w cienką rurkę, jakąś cieczą i zanurzmy go w naczyniu z wodą, mającą określoną temperaturę; przypuśćmy, że ciecz w rurce dochodzi wtedy do punktu a (fig. 391). Ogrzejmy wodę w naczyniu, a ciecz podniesie się w rurce tem wyżej, im cieplejszą będzie ta woda; dojdzie ona np. do punktu a'. Gdy następnie woda się oziębi i osiągnie pierwotną swą temperaturę, ciecz w rurce opadnie znów do punktu a. Objętość tedy cieczy powiększa się wraz z podwyższeniem, zmniejsza się zaś wraz z obniżeniem temperatury. Należy wszakże zauważyć, że ciecze rozszerzają się silniej, aniżeli ciała stałe, jak to wynika z opisanego doświadczenia. Gdy bowiem ogrzewamy wodę w naczyniu, balon również powiększa swą objętość i prze-

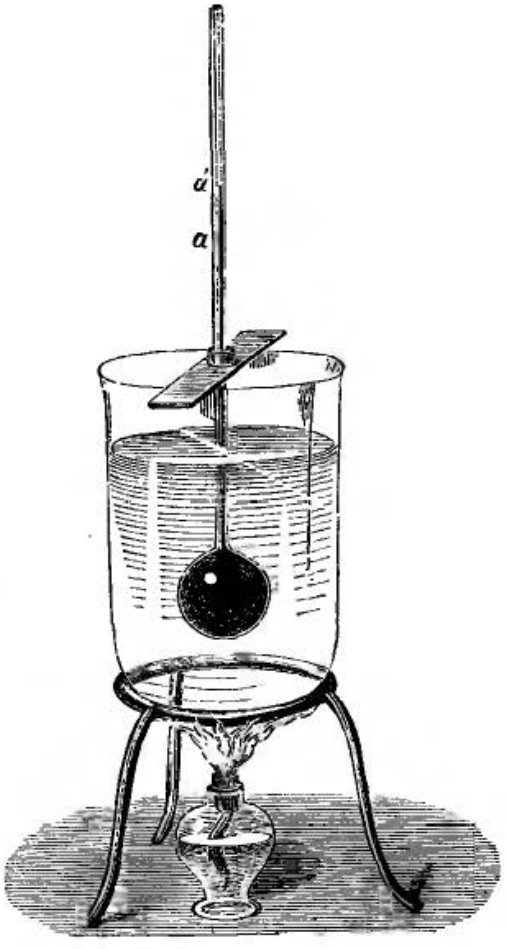


Fig. 391. Rozszerzanie się cieczy pod wpływem ciepła.

strzeń zajęta przez ciecz staje się większą. Obserwowane tedy przez nas rozszerzenie cieczy jest pozorne; stanowi ono różnicę pomiędzy jej istotnem rozszerzeniem i rozszerzeniem balonu.

Rozszerzania się gazów pod wpływem ciepła można dowieść za pomocą zupełnie podobnego doświadczenia, z tą tylko różnicą, że balon i część rurki wypełnione są, zamiast cieczy, powietrzem. Oprócz tego w rurce znajduje się kropla rtęci, której ruch ku górze lub ku dołowi wskazuje powiększanie, albo zmniejszanie się zamkniętego w przyrządzie gazu. Postępując w taki sam jak wyżej sposób przekonywamysię, że objętość danego gazu wzrasta przy podwyższaniu, maleje zaś przy obniżaniu jego temperatury i jednocześnie także spostrzegamy, że gaz rozszerza się silniej, aniżeli balon, a nawet aniżeli ciecz.

Do rozszerzalności ciał powrócimy jeszcze w niniejszym rozdziale.

§ 2. Mierzenie temperatury. — Termometry.

Ponieważ, jak widzieliśmy w poprzednim §, objętość ciał znajduje się w ścisłej zależności od ich temperatury, a z drugiej strony każde ciało osiąga stopniowo temperaturę swego otoczenia, to ze zmian jego objętości możemy wnioskować o zmianach stanu ciepłoty tegoż otoczenia. Do tego celu mógłby służyć przyrząd wyżej opisany (patrz fig. 390), należałoby tylko przy danej temperaturze tak przymocować pręt, ażeby wskazówka D stała naprzeciwko pewnej podziałki. Przy podnoszeniu się temperatury otaczającej wskazówka posuwałaby się ku górze, przy jej obniżaniu się — opadałaby ku dołowi. Przesunięcie wskazówki o pewną ilość podziałek mogłoby służyć za miarę zmiany temperatury pręta, a więc i jego otoczenia, czyli innemi słowy przyrząd mógłby stanowić *termometr*. Jako taki wszakże przedstawialby tę niedogodność, że chcąc dostatecznie uwidocznić wydłużenie pręta, należałoby, z powodu małej rozszerzalności ciał stałych, wybierać pręty długie, które nadto potrzebaby łączyć z dźwignią. Dlatego też do oznaczenia temperatury uży-

wa się przyrządów, opartych na rozszerzalności cieczy, jak np. rtęć, albo też gazów, jak powietrze.

Termometr rtęciowy (fig. 392) składa się z małego kulistego lub walcowatego zbiornika szklanego, przedłużonego w bardzo cienką rurkę. W zbiorniku znajduje się nader czysta rtęć, która przy najniższej nawet temperatnrze wypełnia także część rurki. Powietrze z tej ostatniej wypędza się za pomocą ostrożnego gotowania rtęci w przyrządzie, poczem koniec rurki się zalutowuje. Gdy po oziębieniu rtęć w rurce opada, powstaje nad nią próżnia tak, że rozszerzanie jej odbywa się zupełnie swobodnie, to jest bez modyfikującego wpływu ciśnienia powietrza. Ponieważ średnica rurki jest bardzo mała w stosunku do zawartości zbiornika, to nader nieznacznej nawet zmianie objętości towarzyszy wyraźne podniesienie lub obniżenie się słupa rtęci w rurce. Ażeby zaś ze zmian wysokości tego słupa można było sądzić o zmianach objętości rtęci, przyrząd powinien być odpowiednio urządzony. Gdy rurka posiada wszędzie jednakową średnicę, wtedy przy jednakowej zmianie objętości wydłużenie słupa rtęci będzie jednakowe. Przypuśćmy, że długość rurki *począwszy od danego punktu*, podzielona jest na pewną ilość równych części. Jeżeli wysokość słupa rtęci zmienia się np. o 10 takich części, to wnioskujemy z tego, że zmiana objętości rtęci jest 10 razy większa, aniżeli w wypadku, gdy wysokość słupa tego zmienia się tylko o jedną część. Możemy tedy przyjąć, że zmiana wysokości słupa o 1, 2, 3... podziałki odpowiada zmianie temperatury, równej 1, 2, 3... stopniom. Widzimy więc, że na termometrze powinien być raz na zawsze oznaczony pewien stały punkt, od którego liczą się podziałki oraz oznaczona długość takiej jednej podziałki, odpowiadająca jednostce zmiany objętości rtęci czyli jednemu stopniowi. Osiąga się to przez obserwacyę

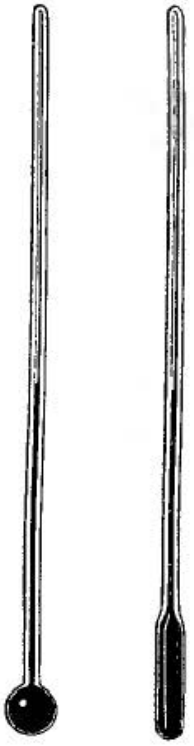


Fig. 392. Zbiornik i rurka rtęciowego termometru.

dwóch różnych i stałych temperatur. Jeżeli w naczyniu, napełnionem czystym, topniejącym lodem, umieścimy wyżej opisany termometr tak, ażeby zbiornik oraz część rurki były doskonale otoczone lodem (fig. 393), to poziom rtęci w rurce dojdzie do pewnego punktu, przy którym się zatrzyma i pozostanie tak długo, dopóki przyrząd będzie się znajdował w topniejącym lodzie. Temperatura bowiem tego ostatniego jest stałą, bez względu na temperaturę otaczającego powietrza oraz na stan barometru. Zgodzono się tedy ażeby miejsce, gdzie zatrzymuje się poziom rtęci w topniejącym lodzie, przyjąć za punkt, od którego liczą się podziałki; oznacza go się jako punkt topliwości lodu, albo *zero* stopni. Dodamy jeszcze nawiasowo, że dno naczynia, w którem znajduje się lód, powinno posiadać otwór, ażeby woda powstała ze stopienia lodu mogła swobodnie ściekać.

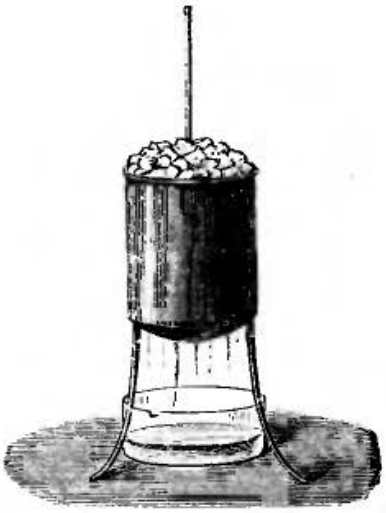


Fig. 393. Oznaczenie zera na termometrze.

Zaobserwowano dalej, że gdy zanurza się termometr w dystylowanej wodzie i ogrzewa tę ostatnią, rtęć w termometrze podnosi się tylko tak długo, dopóki woda nie zaczyna wrzeć. Począwszy od tej chwili, poziom rtęci zatrzymuje się stale na jednem i tem samem miejscu, gdzie pozostaje nawet przy silniejszem ogrzewaniu wody. Powtarzając to doświadczenie w rozmaitym czasie, przekonywamy się, że gdy ciśnienie barometryczne się zmienia, poziom rtęci w rurce termometrycznej też ulega zmianie, lecz przy jednym i tym samym stanie barometru temperatura wrzącej wody, a więc i poziom rtęci termometru w niej zanurzonego, jest stały. Zgodzono się tedy, ażeby za drugi stały punkt termometru uważać miejsce, gdzie zatrzymuje się rtęć wtedy, gdy przyrząd ten jest zanurzony w czystej wodzie, wrzącej przy ciśnieniu 760 milim.

Chcąc jednak ściśle oznaczyć na termometrze ten stały punkt, nie dosyć jest zanurzyć go w wodzie, wrzącej przy ci-

śnieniu 760 milim, albowiem na temperaturę wrzenia wody, oprócz ciśnienia barometrycznego, wpływają jeszcze inne czynniki. Dla prostoty jedynie przyjęliśmy wyżej, że przy tem samem ciśnieniu barometrycznem, temperatura wrzenia wody jest stała. W istocie zależy ona także, jak zobaczymy później, od czystości wody i materyału naczynia, w którem ciecz ta jest zawarta; oprócz tego temperatura wrzącej wody nie jest na całej głębokości jednakowa. Dlatego też, ażeby uniknąć wszelkich powodów do nieścisłości, zanurza się termometr w parze, wydobywającej się z wrzącej wody, temperatura bowiem tej pary jest stała, niezależnie od czystości wody i materyału naczynia, byle tylko ciśnienie barometryczne równało się 760 milim. Figura 394 przedstawia przyrząd, używany przy oznaczaniu punktu wrzenia na termometrze. Składa się on z naczynia A, zawierającego wodę oraz z osadzonego na nim cylindra $a\ a$ o podwójnych ścianach, pomiędzy któremi pozostaje wolna przestrzeń. W przestrzeni wewnętrznej CC umieszcza się termometr, następnie ogrzewa wodę aż do wrzenia; uchodząca z niej do góry para otacza wtedy termometr i doprowadza go do temperatury wrzenia. W górnej części cylindra para, przez znajdujące się tamże otwory, wchodzi do zewnętrznej przestrzeni BB i otacza przestrzeń wewnętrzną CC tak, że ta ostatnia nie ulega oziębieniu. Osadzony z boku manometr M wskazuje prężność pary wewnątrz przyrządu. Termometr zanurza się tak głęboko, że gdy napełniająca go rtęć osiąga temperaturę wrzenia wody, słup rtęci w rurce wystaje nieco po nad korek, przytrzymujący termometr. Miejsce, do którego dochodzi wtedy poziom rtęci oznacza się jako punkt wrzenia wody, co zaś do liczby postawionej w tym punkcie, to, jak zaraz zobaczymy, jest ona rozmaita. Na termometrze Celsyusza punkt wrzenia wody oznacza się liczbą 100, pod warunkiem wszakże, że podczas doświadczenia ciśnienie barometryczne wynosi dokładnie 760 milim oraz, że manometr M wskazuje, iż prężność pary wewnątrz naczynia $A\ aa$ jest równa ciśnieniu zewnętrznego powietrza. W razie zaś, gdy stan barometru jest inny, albo gdy manometr pokazuje, że prężność pary wewnątrz naczynia jest większa, aniżeli ciśnienie zewnętrznego

powietrza, wtedy należy wprowadzić odpowiednią poprawkę, albowiem temperatura wrzącej wody wynosi więcej niż 100 stopni przy silniejszem ciśnieniu i mniej przy słabszem. Tak np. przy ciśnieniu 787 milim. wynosi ona 101 stopni, przy ciśnieniu 733 milim. tylko 99 stopni.

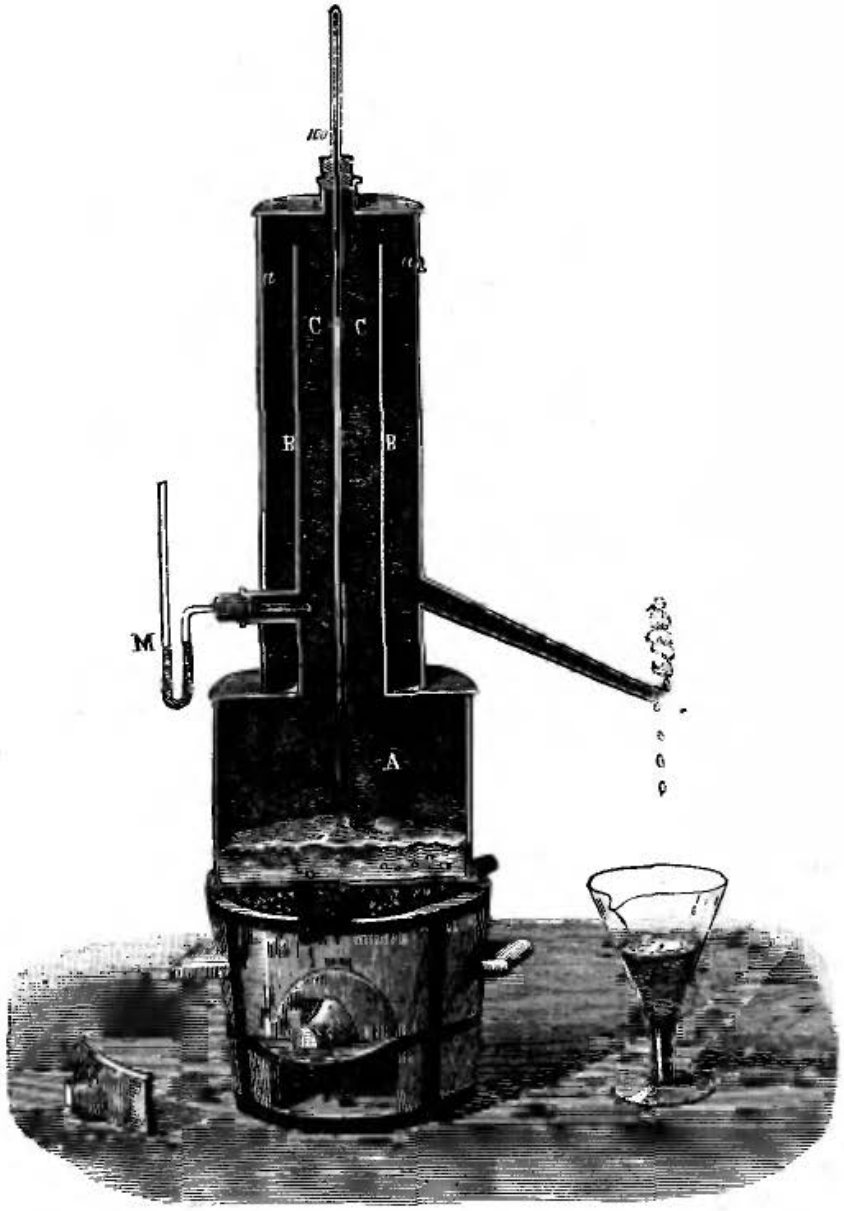


Fig. 394. Oznaczenie punktu wrzenia na termometrze.

Według Celsyusza tedy odległość pomiędzy dwoma punktami, w powyższy sposób oznaczonemi na termometrze, dzieli się na 100 równych części czyli stopni (°), pod warunkiem jednak,

że rurka termometryczna posiada wszędzie jednakową średnicę; podziałki takie oznacza się także poniżej 0^0 i powyżej 100^0, a to w celu mierzenia temperatur wyższych od temperatury wrzącej wody i niższych od temperatury topniejącego lodu. Skala wyryta jest na samej rurce termometrycznej, albo na rurce do niej przylutowanej lub też wreszcie na deseczce, do której termometr jest przymocowany (fig. 395).

W nauce termometr Celsyusza powszechnie prawie bywa używany; w codziennem zaś życiu używa się często termometru Reamur'a, który różni się od pierwszego tylko pod tym względem, że odległość pomiędzy dwoma stałemi punktami podzielona jest na 80 części, to jest że punkt wrzenia wody oznaczony jest liczbą 80. Punkty oznaczone zerem są na obu termometrach te same. Wynika z tego, że 1^0 Reamur'a wynosi $^{100}/_{80}$ albo $^5/_4$ Celsyusza, naodwrót 1^0 Celsyusza równa się $^4/_5$ Reamur'a. Zamiana tedy stopni jednych na drugie jest bardzo prosta, chcąc bowiem stopnie Reamur'a wyrazić w stopniach Celsyusza, należy pierwsze pomnożyć przez $^5/_4$; przy zamianie zaś stopni Celsyusza na stopnie Reamur'a mnoży się pierwsze przez $^4/_5$. Naprzykład 28^0 R. $= 28 \times {}^5/_4 = 35^0$ C; 35^0 C $= 35 \times {}^4/_5 = 28^0$ R.

Na skali termometrycznej Fahrenheit'a, używanej jeszcze obecnie w Anglii i północnej Ameryce, odległość pomiędzy dwoma stałemi punktami: topliwości lodu i wrzenia wody, jest podzielona na 180 stopni. Oprócz tego *zero* Fahrenheit'a znajduje się o 32 takich stopni poniżej zera Celsyusza i Reamur'a, w miejscu, gdzie zatrzymuje się poziom rtęci w topniejącej mięszaninie równych części śniegu i salmiaku. Punkt topliwości lodu na termometrze Fahrenheit'a oznaczony jest tedy 32^0, wrzenia zaś wody 212^0. Ponieważ odległość ta podzielona jest na 180^0, to 100^0 Celsyusza równa się 180^0 Fahrenheit'a czyli, że 1^0 C $= {}^{180}/_{100} = {}^9/_5$ F i naodwrót 1^0 F $= {}^5/_9{}^0$ C. Chcąc temperaturę daną w stopniach Fahrenheit'a wyrazić w stopniach Celsyusza, należy od pierwszej odjąć naprzód 32^0 a resztę pomnożyć przez $^9/_5$; naprzykład 120^0 F wynosi $(120^0 - 32) \times {}^5/_9 = 48\ {}^8/_9{}^0$ C. Przeciwnie przy zamianie stopni Celsyusza na stopnie Fahrenheit'a należy

pierwsze pomnożyć przez $^9/_5$ i do znalezionej liczby dodać 32; i tak $45^0\ C = (45 \times {}^9/_5) + 32 = 113^0\ F$.

W niektórych wreszcie krajach używa się skali Delisle'a, na której punkt wrzenia wody oznaczony jest 0^0, topliwości zaś lodu 150^0. Porównanie wymienionych czterech skal termometrycznych ułatwi czytelnikowi figura 396. Najwygodniejszą z nich jest skala Celsyusza, jej też będziemy się trzymali w dalszym ciągu nauki o cieple. Dodajmy jeszcze, że stopnie powyżej zera oznacza się znakiem +, poniżej zaś znakiem —.

Fig. 395. Termometry stu-stopniowe.

Termometry, o których dotychczas wspominaliśmy, oparte są na rozszerzalności rtęci, zawartej w szklanem naczyniu. Należy przytem pamiętać, że gdy temperatura się podnosi, wtedy powiększa się nie tylko objętość rtęci, lecz także objętość szklanego naczynia. Gdyby szkło rozszerzało się w takim samym stosunku jak rtęć, ta ostatnia nie podnosiłaby się w termometrze, nawet przy możliwie wysokiej temperaturze; w istocie jednak rozszerzalność rtęci jest siedm i pół razy większa od rozszerzalności szkła tak, że przy wzrastającej temperaturze rtęć w rurce musi się podnosić, chociaż nie tak znacznie jak w wypadku, gdyby szkło wcale się nie rozszerzało. Właściwie tedy obserwujemy nie istotne, lecz pozorne rozszerzanie się rtęci czyli, jak powiedzieliśmy wyżej, różnicę pomiędzy jej rozszerzalnością i rozszerzalnością szkła. Jeżeli przyjmiemy, że rozszerzanie się rtęci i szkła w pewnych granicach, pomiędzy któremi zwykle waha się temperatura, odbywa się zupełnie prawidłowo, to zgodzimy się i na to, że wskazówki różnych termometrów powinny zawsze być jednakowe, pod warunkiem że zostały starannie przygotowane i że dla każdego podział skali oparty jest na dwóch wyżej opisanych zasadniczych doświadczeniach. Jedynie przy nieco wyższych temperaturach rozmaite gatunki szkła rozszerzają się nie zupełnie je-

dnakowo tak, że chcąc wtedy porównywać wskazówki różnych termometrów, należy przynajmniej dbać o to, ażeby kulki termometrów były przygotowane z tego samego szkła.

Termometr wtedy tylko szybko wskazuje temperaturę, na jaką jest wystawiony, gdy ciepło w krótkim czasie przenika całą massę rtęci; w tym celu ścianki zbiornika powinny być możliwie cienkie, rtęć zaś powinna przedstawiać możliwie dużą powierzchnię. Dlatego też zbiornikowi częściej nadają kształt walca aniżeli kuli, albo też zamiast niego używa się rurki, skręconej spiralnie; zaleca się to szczególniej w wypadkach, w których chodzi o obserwacyę zmian temperatury, szybko po sobie następujących. Ażeby termometr był bardzo czuły, to znaczy, ażeby nader nieznacznej zmianie temperatury towarzyszyło widoczne podniesienie się lub obniżenie poziomu rtęci, objętość zbiornika w stosunku do średnicy rurki powinna być dosyć wielka. Walferdin zbudował termometry nadzwyczajnie czułe, które wskazywały zmianę temperatury równą jednej setnej stopnia. Przy oznaczaniu bardzo różnych temperatur, musiano w każdym pojedyńczym wypadku regulować ilość rtęci: do nizkich temperatur dole-

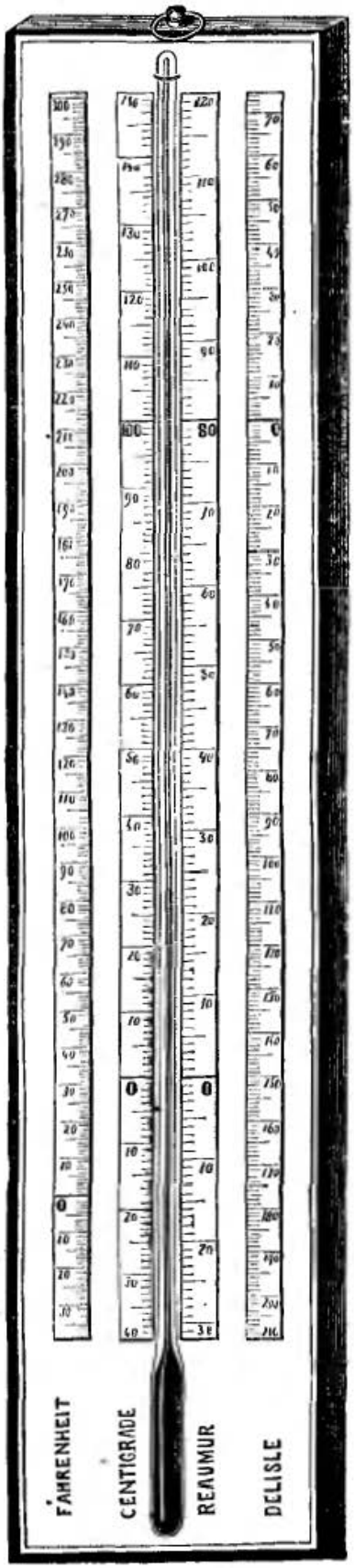


Fig. 396. Porównanie skal termometrycznych.

wano tej ostatniej, do wysokich zaś nieco odlewano. Rtęć poczyna wrzeć przy 350° i zamarza przy—39°. Są to więc dwie granice, po za któremi termometr rtęciowy staje się bezużyteczny. Oprócz tego doświadczenie pokazało, że rozszerzanie rtęci odbywa się prawidłowo—to jest proporcyonalnie do podwyższania temperatury—jedynie od—36° do 100° i że od 100° do 350° rozszerzalność jej wzrasta. Wynika z tego, ze wskazówki termometru rtęciowego są dokładne tylko od—36° do 100°, dla temperatur zaś wyższych wskazówki te są przybliżone i pomyłka może nawet dochodzić do kilku stopni. Po za temi więc dwiema granicami należało zmodyfikować odpowiednie przyrządy, służące do określania stanu ciepłoty ciał. Dla nizkich temperatur modyfikacya polega na tem, że termometr napełnia się, zamiast rtęcią, alkoholem, który zwykle bywa zabarwiony, w celu łatwiejszego obserwowania ruchów słupa cieczy w rurce termometrycznej. Alkohol nie zamarza przy żadnej ze znanych dotychczas temperatur. Punkt topliwości lodu można oznaczyć na termometrze alkoholowym w taki sam jak powyższy sposób; punktu zaś wrzenia wody oznaczyć jak wyżej nie można dlatego, że alkohol wrze przy daleko niższej temperaturze, aniżeli woda. Chcąc przyrząd taki podzielić na stopnie, należy go umieścić w wodzie obok termometrów rtęciowych, wodę stopniowo ogrzewać lub oziębiać i kreślić na nim podziałki podług wskazówek tychże termometrów. W istocie jednak takie termometry alkoholowe będą zawsze znacznie odstępowały od termometru rtęciowego, alkohol bowiem rozszerza się dosyć nieprawidłowo.

Można także zbudować termometry oparte na rozszerzalności i kurczliwości powietrza. Pierwsze w ogóle przyrządy, służące do mierzenia ciepła, polegały na tej zasadzie. I tak już Galileusz zbudował termometr (fig. 397 strona prawa), składający się ze szklanej kuli, do której przylutowana była szklana rurka; powietrze w tej ostatniej oddzielone było za pomocą kropli rtęci *A*, która służyła jako wskaźnik. Przesuwanie się jego wskazywało zmiany objętości zamkniętego powietrza, a więc i zmiany temperatury. Również i drugi przyrząd przedstawiony na fig. 397, wynaleziony przez Drebbel'a i stanowiący pierwszy

termometr, jaki wszedł w użycie, składał się ze szklanej kulki oraz z rurki, otwartym końcem zanurzonej w cieczy, napełniającej także część rurki. Nad cieczą w rurce i kuli znajdowało się powietrze, którego objętość zmieniała się przy zmianach temperatury; było to widoczne dzięki opuszczaniu się lub podnoszeniu słupa cieczy w rurce: gdy ono się rozszerzało, spychało ciecz tę ku dołowi, gdy się kurczyło, zewnętrzne powietrze pchało ją napowrót do góry.

Czytelnik sam zrozumie braki podobnych przyrządów. W ogóle mówiąc, termometr powietrzny trudno urządzić w taki sam sposób, jak rtęciowy, dlatego, że rozszerzalność powietrza jest zbyt wielka, wynosi bowiem od punktu topliwości lodu do punktu wrzenia wody $^1/_3$ pierwotnej objętości. Termometr powietrzny tak urządzony byłby za duży i niepraktyczny, zbudowano go też w odmienny sposób, którego jednak bliżej opisywać tutaj nie możemy.

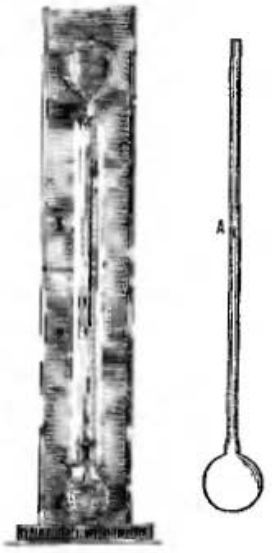


Fig. 397. Termometry powietrzne, podług Drebbel'a i Galileusza.

Leslie i Rumford zbudowali przyrządy, pozwalające określić *różnicę* dwóch temperatur. Polegają one na rozszerzalności powietrza, na które nie wpływa zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne. Obadwa składają się z dwa razy zgiętej szklanej rurki, do której na obu końcach przylutowane są szklane kulki (fig 398). W termometrze Leslie rurka zawiera kwas siarczany (zabarwiony na czerwono), którego poziom przy jednakowej temperaturze obu kulek jest w obu ramionach jednakowy i znajduje się na wysokości oznaczonej *zerem*. Gdy ogrzewa się jedną z kulek, rozszerzające się w niej powietrze spycha ciecz tak, że spada ona po tej stronie do punktu *b* np. podczas gdy po stronie przeciwnej podnosi się aż do *a*. Z odległości poziomu cieczy od zera można ocenić różnicę w temperaturze obu kulek, odległość ta bowiem jest podzielona na stopnie. Te ostatnie oznacza się na termometrze w taki sposób, że jedną z kulek ogrzewa się np. o 10^0 więcej, aniżeli drugą, stawia znak 10 tam, gdzie za-

trzymuje się poziom cieczy i odległość tego znaku od zera dzieli na dziesięć równych części, które stanowią stopnie. Stopnie takie stawia się następnie powyżej i poniżej zera na każdem ramieniu. Termometr Rumforda różni się od poprzedniego tylko

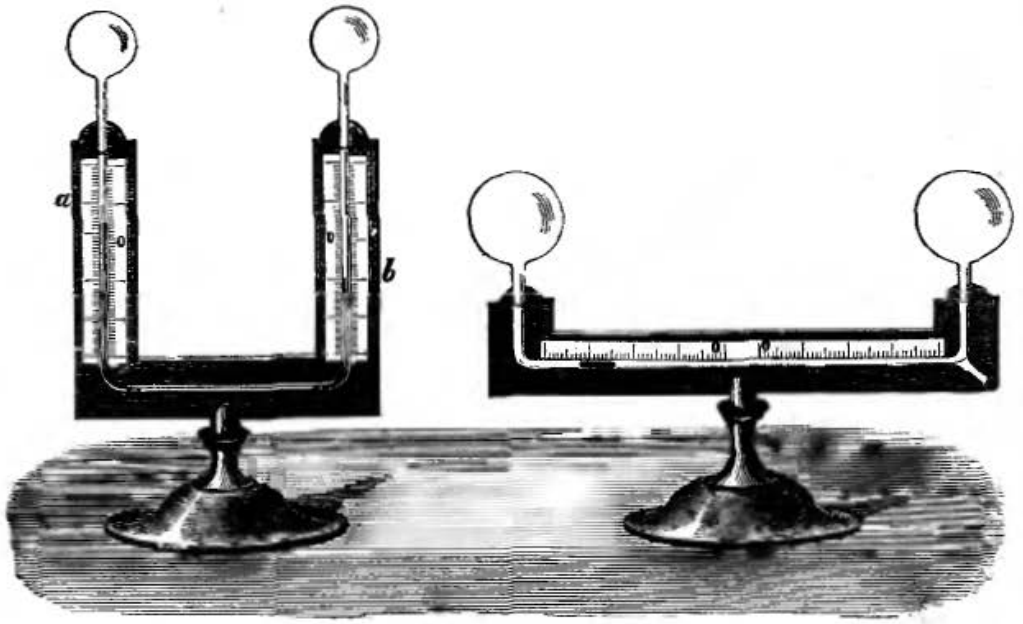


Fig. 398. Termometry różnicowe podług Leslie i Rumforda.

pod tym względem, że pozioma część rurki jest stosunkowo o wiele dłuższa i że napełniającą ją ciecz stanowi tylko krótki słupek rtęci, który znajduje się dokładnie pośrodku, gdy temperatura obu kulek jest jednakowa. Ponieważ za pomocą tych przyrządów nie można oznaczyć istotnej temperatury, lecz tylko różnicę w ogrzaniu dwóch kulek, otrzymały one nazwę *termometrów różnicowych* albo *dyfferencyalnych.*

Do określania temperatur spożytkowano także fakt niejednakowej rozszerzalności różnych ciał stałych. Przymocujmy do siebie na całej długości dwie sztabki metalowe, np. cynkową i miedzianą i ogrzewajmy otrzymaną w ten sposób sztabkę pojedyńczą, a zobaczymy, że ta ostatnia będzie się zginała (Fig. 399), albowiem cynk rozszerza się silniej, aniżeli miedź. W danym wypadku sztabka wygnie się tedy w stronę miedzi. Gdy sztabka się oziębi i powróci do pierwotnej temperatury, będzie znów prosta, przy dalszem zaś oziębianiu pocznie się wyginać w stro-

nę przeciwną, gdyż teraz cynk kurczy się bardziej od miedzi. Jeżeli obydwie sztabki metalowe są z samego początku zgięte i przytem bardziej rozszerzalny metal znajduje się na wewnątrz, to przy podnoszeniu temperatury zgięcie się zmniejsza, przy jej obniżaniu zaś powiększa się.

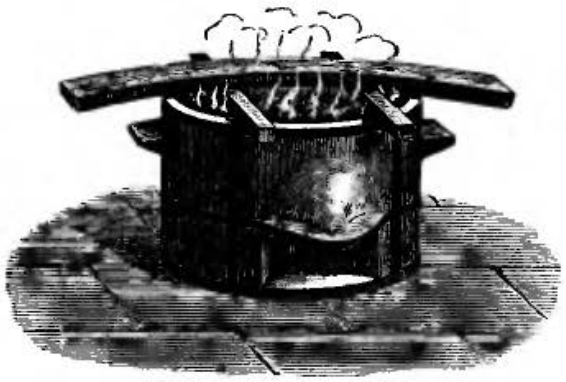


Fig. 399. Różna rozszerzalność dwóch metali.

Na tej własności polegają termometry metalowe, służące nie tyle do dokładnego oznaczenia temperatury, ile do pokazania jej przyrostu lub ubytku. Jednym z najbardziej rozpowszechnionych jest termometr, którego budowa jest w zasadzie ta sama co w barometrze aneroidzie (patrz str. 157), tylko, że rurka która tam, będąc napełniona powietrzem, zgina się lub rozgina pod wpływem zewnętrznego ciśnienia, jest tutaj zastąpiona przez zgięty w łuk pasek metalowy (fig. 400), składający się z miedzi i stali, przylutowanych do siebie na całej długości. Jeżeli miedź znajduje się na wewnętrznej stronie łuku, stal zaś na zewnętrznej, to przy podnoszeniu temperatury, łuk się rozgina, ponieważ miedź rozszerza się wtedy silniej, aniżeli żelazo, przeciwnie przy jej obniżeniu łuk się zgina, gdyż wtedy miedź kurczy się silniej od żelaza. Ruch swobodnego końca łuku przenosi się, podobnie jak w barometrze aneroidzie, na strzałkę posuwającą się po cyferblacie. Skalę oznacza się na tym termometrze przez porównanie z termometrem rtęciowym. Termometr metalowy Breguet'a (fig. 401) składa się z paska metalowego, złożonego ze srebra, złota i platyny i skręconego spiralnie w ta-

Fig. 400. Termometr metalowy.

ki sposób, że srebro, najbardziej rozszerzalne z trzech metali, znajduje się na wewnętrznej, platyna zaś na zewnętrznej stronie skrętów. Spiralna ta zawieszona jest pionowo; do dolnego jej końca przymocowana jest lekka wskazówka, poruszająca się wzdłuż podziałek, oznaczonych na cyferblacie. Gdy temperatura się podnosi, spiralna się rozkręca, albowiem srebro najbardziej się wtedy rozszerza i wskazówka porusza się w jedną stronę; przy obniżeniu temperatury spiralna się skręca i wskazówka porusza się w stronę przeciwną. Podziałki oznacza się na cyferblacie przez porównanie z termometrem rtęciowym. Ponieważ paski metalowe są nadzwyczaj cienkie, to zmiany temperatury wpływają bardzo szybko na całą ich masę tak, że przyrząd ten prawie momentalnie pokazuje te zmiany. Oprócz tego jest on w najwyższym stopniu czuły, a to z powodu nadzwyczajnej delikatności oddzielnych jego części.

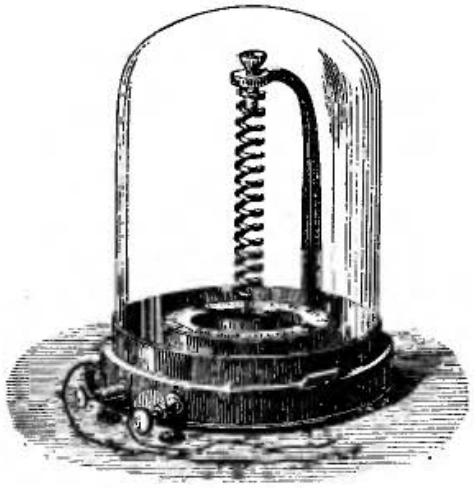


Fig. 401. Termometr metalowy Breguet'a.

Do mierzenia bardzo wysokich temperatur, naprzykład temperatury pieców lub ognisk, używa się przyrządów zwanych *pyrometrami*, w opis których nie będziemy się tutaj wdawali. Zauważymy jedynie, że polegają one po części na rozszerzalności metali, po części zaś na tej własności gliny, że objętość jej przy bardzo wysokiej temperaturze staje się coraz mniejsza. Dotychczas nie udało się pogodzić wskazówek pyrometrów ze wskazówkami termometrów rtęciowych i dlatego pierwszych nie należy uważać za bardzo dokładne. Chcąc dla wyższych temperatur osiągnąć większą dokładność, należy uciec się do rozszerzalności powietrza. W wielu razach, szczególniej przy obserwacyach meteorologicznych, potrzebną jest znajomość najwyższej lub najniższej temperatury, jaka panowała w danem miejscu lub czasie, której wszakże obserwator nie może określić przez ciągłe badanie termometru. W tym celu zbudowano przyrządy

samo zapisujące, które pokazują najwyższą lub najniższą temperaturę, na jaką były wystawione. Jednym z najdawniejszych przyrządów tego rodzaju jest *termometrograf* Rutheford'a (fig. 402), składający się z dwóch termometrów, poziomo przymocowanych wzdłuż skali. Jeden z nich *C D*, napełniony rtęcią, służy do oznaczenia maximum temperatury. W rurce termometrycznej

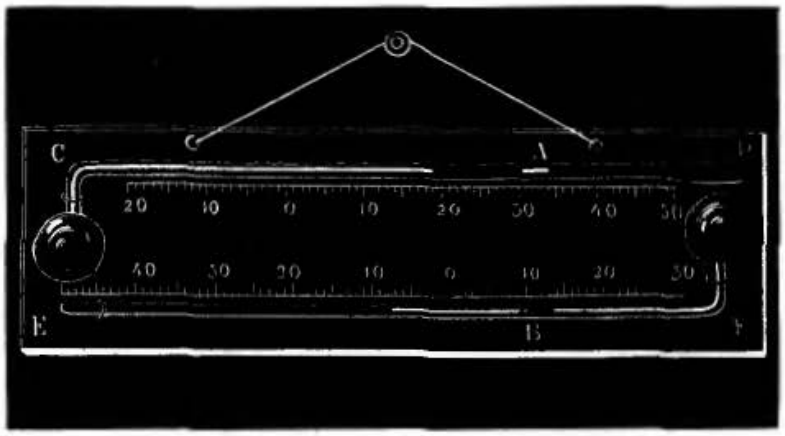


Fig. 402. Termometrograf Rutheford'a.

przed rtęcią znajduje się mały walec stalowy *A*, na końcach którego przylutowane są maleńkie kulki tak, że walec przesuwa się w rurce bez znacznego tarcia. Chcąc oznaczyć maximum temperatury, panującej w danym okresie czasu, należy przez pochylanie przyrządu tak długo przesuwać walec *A*, dopóki ten nie zetknie się dokładnie z końcem słupa rtęci w rurce. Gdy temperatura wzrasta, rozszerzająca się rtęć pcha przed sobą walec; gdy ona spada, rtęć się kurczy, lecz nie pociąga za sobą walca, który pozostaje tedy w miejscu, do jakiego doszedł podczas najwyższej temperatury rtęci. Ta podziałka na skali, przy której znajduje się koniec walca, zwrócony w stronę rtęci wtedy, gdy po niejakim czasie badamy termometr, pokazuje maximum temperatury, panującej w tymże czasie. Drugi termometr *E F*, służący do oznaczenia minimum temperatury, jest napełniony alkoholem; skala jego nakreślona podług termometru rtęciowego. W rurce znajduje się jeszcze mała szklana pałeczka *B*, zaopatrzona na końcu, zwróconym ku *E*, w mały guzik z czarnego szkła tak, że i ona przesuwa się bez tarcia o ścianki rurki termome-

trycznej. Przez odpowiednie pochylanie przyrządu można z łatwością zanurzyć całkowicie pałeczkę w alkoholu, przyczem ów guzik powinien znajdować się dokładnie na poziomie słupa cieczy w rurce. Gdy następnie temperatura spada i alkohol się kurczy, pociąga on za sobą pałeczkę, a to dzięki przyciąganiu pomiędzy nim i guzikiem; gdy temperatura znów się podnosi, alkohol rozszerzając się, przepływa mimo pałeczki i pozostawia ją w miejscu. Podziałka, przy której leży szklany guzik, pokazuje minimum temperatury, jaka panowała w przeciągu czasu od nastawienia przyrządu do chwili obserwacyi. [1])

Użycie tego przyrządu ogranicza się do obserwacyj, przy których nie potrzeba go przenosić, albowiem najsłabsze wstrząśnienie zmienia już położenie pałeczek, a więc czyni niedokładnemi jego wskazówki. Nie nadaje się on np. do mierzenia stopniowego przyrostu temperatury wnętrza ziemi w miarę głębokości. W tym celu zbudowano inny termometr maximalny. Jest to zwykły termometr, którego koniec jednak nie jest zalutowany, lecz wydłużony w delikatny wierzchołek. Napełnia się go tak, ażeby przy pewnej temperaturze T rtęć akuratnie dochodziła w nim do wierzchołka i w sposób zwykły oznacza na nim punkt zera. Odległość tego ostatniego od wierzchołka dzieli się następnie na stopnie zupełnie tak samo jak w zwykłym termometrze. Gdy przyrząd zostaje wprowadzony do jakiegoś miejsca, o temperaturze wyższej niż T, przy której rtęć dochodziła do wierzchołka, pewna ilość tej cieczy wypływa. Wynika z tego, że gdy on spadnie znów do temperatury T, pozostała rtęć nie będzie już w nim dochodziła do wierzchołka, do którego sięgała przy najwyższej temperaturze, na jaką przyrząd był wystawiony. Ażeby znaleść tę temperaturę, należy tylko przyrząd ogrzewać dopóty, dopóki pozostała rtęć nie dojdzie w nim do wierzchołka i zanotować przy jakiej temperaturze to ma miejsce. Ta ostatnia jest właśnie szukaną temperaturą. Istnieje także termometr minimalny, zbudowany na podo-

---

(1) Wüllner, Lehrbuch der Experimental physik.

bnej zasadzie, lecz nie tak prosty w użyciu. Termometry te służą głównie do oznaczania najwyższej lub najniższej temperatury głębin jezior, mórz lub studni. Wszystkie termometry, jakie dotychczas opisaliśmy, pokazują, ściśle mówiąc, jedynie temperaturę tych ciał, które ulegają w przyrządach tych rozszerzeniu, tymczasem my posiłkujemy się termometrami w celu mierzenia temperatury ciał stałych, ciepłych lub gazowych, z któremi je stykamy. Chcąc więc z przybliżoną chociażby dokładnością sądzić o tej ostatniej z temperatury, jaką pokazuje termometr, należy koniecznie przedsięwziąć pewne środki ostrożności. Gdy mierzymy temperaturę ciała lotnego lub cieczy, należy zanurzyć w nich cały termometr; jeżeli jest on dostatecznie czuły i masa jego jest nieznaczna w stosunku do masy ciała badanego, to możemy przyjąć, że temperatura, jaką wskazuje termometr wtedy, gdy poziom rtęci w nim się ustalił, jest równą temperaturze danego środka. Chcąc zbadać temperaturę ciała stałego, wyżłabia się w nim zagłębienie dostatecznie duże, tak, ażeby można było w niem pomieścić przynajmniej kulkę termometru; lepiej jeszcze zagłębienie napełnić rtęcią i gdy przyjmie ona temperaturę badanego ciała, zanurzyć w niej termometr. W każdym jednak razie niezbędnem jest, ażeby termometr był mały w stosunku do mas, których temperaturę oznaczamy; ponieważ pomiędzy dwoma stykającemi się ciałami ma miejsce ustawiczne wyrównywanie ich stanu ciepłoty, to i termometr nie pokazuje tej temperatury, jaką pierwotnie posiadała badana masa, lecz temperaturę, która się utworzyła po wyrównaniu z temperaturą termometru. Ażeby wskazówka ta nie bardzo się różniła od pierwotnej temperatury badanego środka, masa termometru powinna być niezbyt wielka. Błąd ten w zupełności usunąć się nie daje, należy tylko starać się o to, ażeby sprowadzić go do możliwego minimum.

Oprócz tego termometry, nawet te, które zostały przygotowane z jak największą starannością, mogą być przyczyną pomyłki, o której należy tutaj wspomnieć. W przyrządach tych mianowicie zero niekiedy się podnosi, czyli innemi słowy, gdy termometr jest zanurzony w topniejącym lodzie, rtęć nie obniża

się w nim, aż do punktu, oznaczonego na skali 0°. Sądzono z początku, że jest to skutek zmniejszenia się objętości naczynia termometru, które to zmniejszenie stanowić miało jakoby rezultat ciśnienia zewnętrznego na przyrząd, pozbawiony wewnątrz powietrza. Skonstatowano jednak później, że to nie jest istotną przyczyną. Obecnie objaśniamy przemieszczenie zera pewnym procesem, jaki się odbywa pomiędzy cząstkami szkła wtedy, gdy podczas przygotowywania termometru zostało ono najprzód doprowadzone do temperatury wrzenia rtęci, a następnie szybko oziębione. Dzięki procesowi temu objętość zbiornika termometru się powiększa; następnie powraca on z czasem do pierwotnej swej objętości, wskutek czego zero się podnosi. Odbywa się to bardzo powoli, podług bowiem obserwacyj Despretz'a, zero podnosi się w ciągu kilku lat. Dlatego też należy koniecznie sprawdzać od czasu do czasu położenie zera na termometrze.

§ 3. Rozszerzalność ciał stałych.

Poznaliśmy wyżej ogólny fakt, że ciała się rozszerzają pod wpływem ciepła, obecnie zaś zjawia się przed nami pytanie, w jakiej mierze rozszerzanie to się odbywa, to jest jaki istnieje stosunek pomiędzy przyrostem objętości ciała i podnoszeniem się jego temperatury. Badania nasze rozpoczniemy od rozszerzalności ciał stałych. Gdy ogrzewamy np. sztabę rozszerza się ona w kierunku wszystkich trzech swoich wymiarów, to jest staje się dłuższa, szersza i grubsza.

Jeżeli sztaba przy temperaturze topniejącego lodu to jest 0° posiada długość d, to przy innej, wyższej temperaturze posiada długość większą. Przypuśćmy, że przy temperaturze 100° długość ta równa d', to oczywiście, iż różnica pomiędzy tą późniejszą długością d' i pierwotną d stanowi wydłużenie całej sztaby przy ogrzaniu jej na 100°. Jednostka długości sztaby ulega przy tem samem ogrzaniu d razy mniejszemu wydłużeniu, które oznaczamy przez k; jest ono wyrażone pod postacią ułamka pierwotnej długości ciała. Otóż to wydłużenie, jakiemu ulega jednostka dłu-

gości przy ogrzaniu jej na pewną określoną ilość stopni (w danym razie przyjmujemy 100°) zowie się *spółczynnikiem linijnej rozszerzalności*. Ponieważ przy ogrzaniu od temperatury topniejącego lodu do temperatury wrzenia wody jednostce długości przybywa k, d zaś jednostkom przybywa d raży więcej to jest $d\,k$, to długość d' po ogrzaniu można wyrazić w sposób następujący: $d'=d+dk$, a wyrzucając d' za nawias mamy $d'=d\,(1+k)$.

Rozszerzanie w kierunku szerokości odbywa się zupełnie w tym samym stosunku, pod warukiem jednak, że sztaba jest jednorodną. Jeżeli szerokość sztaby przy temperaturze 0° jest równa s, to oznaczywszy szerokość przy 100° przez $ś$, mamy $ś = s + s\,k$, albo $ś = s\,(1 + k)$. Wreszcie to samo dotyczy rozszerzania w kierunku trzeciego wymiaru, to jest grubości, jeżeli tylko sztaba jest zupełnie jednorodna. Oznaczywszy grubość jej przy 0° przez g, grubość zaś przy 100° przez g' mamy $g' = g + g.\,k$ czyli $g' = g\,(1 + k)$.

Ponieważ objętość ciała jest równa iloczynowi z trzech jego wymiarów, to objętość sztaby przy 0° jest równa $d.\,s.\,g.$ Przy temperaturze zaś 100° objętość równa $d'.\,s'.\,g'$ albo według powyższego równa $d.\,(1 + k).\,s\,(1 + k).\,g\,(1 + k)$. Widzimy, że w tym ostatnim iloczynie czynnik $(1 + k)$ jest dwa razy pomnożony przez siebie samego czyli, że jest podniesiony do sześcianu, co oznacza się przez $(1 + k)^3$ i co po wykonaniu daje $1 + 3k + 3k_2 + k^3$. Otóż doświadczenie pokazuje, że spółczynnik rozszerzalności k jest zawsze bardzo mały; jego więc kwadrat k^2 i jego sześcian k^3 stanowią ułamki tak drobne, że wyrażenia $3k^2$ i k^3 możemy odrzucić i bez popełnienia znaczniejszego błędu zamiast całkowitego sześcianu czynnika $1 + k$ wziąć jedynie początkowe dwa wyrażenia to jest $1 + 3k$. Ostatecznie tedy objętość $d'.\,s'.\,g'$ przy 100° jest równa $d.\,s.\,g \times (1 + 3k)$ albo też po zniesieniu nawiasu równa $d.\,s.\,g + d.\,s.\,g.\,3k$. Wielkość $3k$ wyraża rozszerzenie, jakiemu ulega jednostka objętości przy ogrzaniu od temperatury topnienia lodu do temperatury wrzenia wody; stanowi on *spółczynnik rozszerzalności objętościowej* albo *sześciennej*, który, jak widzimy, jest równy *potrójnemu spółczynnikowi rozszerzalności linijnej*. Ostatnie

zaś równanie, wyrażające objętość późniejszą za pomocą objętości pierwotnej więcej całkowite rozszerzenie, pokazuje, że rozszerzenie to jest tyle razy większe od spółczynnika rozszerzalności sześciennej, ile razy cała objętość *d. s. g* jest większa od jednostki objętości.

Oprócz spółczynników linijnej i sześciennej rozszerzalności podaje się jeszcze spółczynnik rozszerzalności płaszczyzny, który wyraża rozszerzenie, jakiemu ulega jednostka płaszczyzny przy ogrzaniu jej od temperatury topniejącego lodu do temperatury wrzenia wody. Za pomocą takiego samego jak powyższe rozumowania można pokazać, że płaszczyzna równa przy 0^0 iloczynowi z długości d przez szerokość s, to jest $d. s$, równa przy 100^0 temuż iloczynowi więcej całkowite rozszerzenie czyli $d. s (1+2k)$. Widzimy, że ten spółczynnik jest równy *podwójnemu spółczynnikowi rozszerzalności linijnej.*

Z powyższego wynika tedy, że przy badaniu rozszerzalności ciał wystarcza oznaczenie spółczynnika linijnego, mnożąc go bowiem przez dwa lub trzy otrzymujemy pozostałe dwa spółczynniki. Gdy ogrzejemy sztabę od temperatury topniejącego lodu do innej jakiej temperatury t, różnej od 100^0, długość jej po ogrzaniu nie będzie równa d', lecz będzie miała wartość inną, którą oznaczymy przez d_t. W tym wypadku możemy także znaleść spółczynnik rozszerzalności, to jest wydłużenie, jakiemu ulega jednostka długości przy ogrzaniu jej od 0^0 do t^0. Spółczynnik ten, jak wyżej, oznaczamy przez k, dla pokazania wszakże, że w danym razie ciało zostało ogrzane od 0^0 do t^0, stawiamy u dołu litery k odpowiedni znaczek (k_t). Długość sztaby po ogrzaniu od 0^0 do t^0 jest równa pierwotnej długości więcej całkowite wydłużenie, czyli $d_t = d (1 + k_t)$.

Widzieliśmy w poprzednim paragrafie, że termometr rtęciowy pozwala nam mierzyć temperaturę za pomocą pozornej rozszerzalności rtęci. Powiadamy, iż temperatura podniosła się o 1^0, gdy rtęć uległa $^1/_{100}$ tego rozszerzenia, jakiemu ulega przy ogrzaniu od 0^0 do temperatury wrzenia wody i twierdzimy, że podniosła się o t^0 gdy rtęć uległa $t/_{100}$ tegoż rozszerzenia. Mówimy np. że temperatura podniosła się o 25^0 Celsyusza, gdy

rtęć w tym termometrze uległa $^{25}/_{100}$ tego rozszerzenia, jakiemu ulega przy ogrzaniu od temperatury topliwości lodu do temperatury wrzenia wody. Jeżeli tedy ciała stałe rozszerzają się pod wpływem ciepła w takim samym stosunku jak rtęć, to wydłużenie sztaby przy ogrzaniu od 0^0 do t^0 jest równe $t/_{100}$ tego wydłużenia, jakiemu sztaba ulega przy ogrzaniu od 0^0 do 100^0. Gdybyśmy spółczynnik k rozszerzalności linijnej, oznaczający przyrost długości, jakiemu ulega jednostka sztaby przy ogrzaniu jej od 0^0 do 100^0, podzielili przez 100, otrzymalibyśmy przyrost α przy ogrzaniu od 0^0 do 1^0. Ponieważ zaś przyjmujemy, że rozszerzanie się sztaby jest dokładnie proporcyonalne do wzrostu temperatury, wynika z tego, że i spółczynnik k_t, wyrażający wydłużenie jednostki długości przy ogrzaniu od 0^0 do t^0, podzielony przez t, daje tę samą wartość α, którą nazwiemy spółczynnikiem rozszerzalności linijnej przy ogrzaniu od 0^0 do 1^0. Znając ten ostatni spółczynnik możemy z łatwością znaleść całkowity przyrost długości, jakiemu ulega sztaba przy ogrzaniu jej od 0^0 do temperatury t^0. Jeżeli bowiem długość ta przy zerze stopni jest równa d, to przy temperaturze 1^0 jest równa tejże długości więcej całkowity przyrost czyli równa $d + d\,\alpha$; przy temperaturze zaś t^0 przyrost jest t razy większy tak, że wtedy długość $d_t = d + d\,\alpha\,t$, a po wyrzuceniu za nawias $d_t = d\,(1 + \alpha\,t)$.

Obecnie przystąpimy do zbadania czy istotnie rozszerzalność jest proporcyonalna do temperatury, mierzonej za pomocą rtęciowego termometru oraz do opisu metod, jakiemi uczeni posługiwali się przy oznaczeniu spółczynnika rozszerzalności rozmaitych ciał.

Przy dawniejszych doświadczeniach nad rozszerzalnością ciał pod wpływem ciepła posługiwano się przyrządami podobnemi w zasadzie do przyrządu przedstawionego na fig. 390 (str. 642). Pierwsi, którzy użyli dokładniejszej metody, byli Lavoisier i Laplace. Oto opis przyrządu, jakim uczeni ci się posługiwali. Pomiędzy czterema silnemi i nieruchomo stojącemi słupami N N (fig. 403) zbudowany był ceglany piec, na którym stała wanna C. W tej ostatniej umieszczano badaną sztabę S. Jeden jej koniec mocno przylegał do nieruchomego słupka B', posta-

wionego pionowo w wannie i przymocowanego do ramienia $b'b$, drugi zaś koniec sztaby przylegał do słupka B (co oddzielnie jest przedstawione na rysunku), tak samo schodzącego pionowo ku wannie i przymocowanego do ramienia $a'\ a$. Ramię $a'\ a$ nie by-

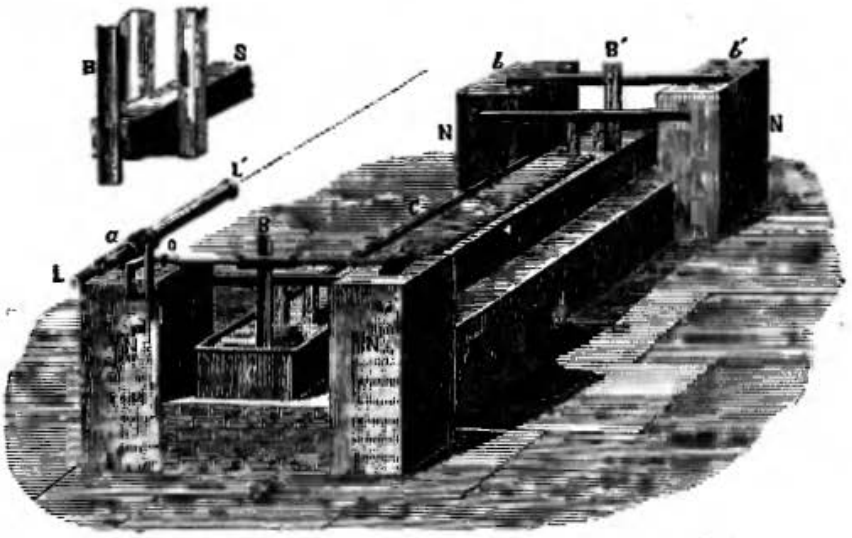


Fig. 403. Przyrząd Lavoisier'a i Laplace'a, służący do mierzenia rozszerzalności ciał stałych.

ło, tak jak ramię $b'\ b$, stale przymocowane do podtrzymujących je słupów, lecz mogło się obracać. Wraz z ramieniem $a'\ a$ osadzona na jego końcu luneta $L'\ L$ poruszała się w taki sposób, że gdy ramię to przy rozszerzeniu badanej sztaby obracało się w jednym kierunku, koniec L lunety podnosił się, gdy zaś ramię to obracało się w kierunku przeciwnym, tenże koniec ulegał opuszczeniu.

Lunetę skierowywano na pionową skalę, oddaloną w przybliżeniu na 200 metrów tak, że można było dokładnie obserwować, jaka podziałka znajdowała się na przedłużeniu optycznej osi lunety (fig. 404). Przy obracaniu się lunety widać przez nią coraz inne podziałki; doświadczenie zaś pokazało, że gdy dolny koniec słupka B, o który opierała się badana sztaba, przesuwał się o 1 milim. i zajmował np. położenie P, wtedy luneta obracała się na tyle, że jej oś optyczna przebiegała wzdłuż skali 744 milimetry.

Z początku napełniano wannę C wodą oziębioną do temperatury zamarzania i doprowadzano sztabę S do 0^0. Poczem dłu-

gość jej mierzono dokładnie i obserwowano podziałkę skali, widoczną wtedy przez lunetę. Następnie dopiero zapalano w piecu i ogrzewano wodę w wannie. Ponieważ jeden koniec sztaby silnie przylegał do nieruchomego słupka B', to rozszerzenie jej ujawniało się jedynie na drugim końcu, *przylegającym* do ruchomego słupka B i mogło być odczytywanem na skali. Należało tylko odległość, jaką wzdłuż skali przebiegała oś lunety, podzielić przez 744, ażeby otrzymać wielkość na jaką przesuwał się dolny koniec słupka B, a więc ażeby otrzymać wydłużenie sztaby. Stosunek tego wydłużenia do pierwotnej długości sztaby pozwala obliczyć spółczynnik rozszerzalności linijnej przy danej temperaturze t, mierzonej za pomocą rtęciowego termometru. Na podstawie licznych doświadczeń Lavoisier i Laplace dowiedli, że gdy ciało, ogrzane od zera do punktu wrzenia wody, powraca następnie do temperatury 0^0, przybiera napowrót swą pierwotną długość. Dalej pokazali, że pomiędzy 0^0 i 100^0 rozszerzalność jest proporcyonalna do temperatury, czyli, że istotnie spółczynnik k znaleziony przy ogrzaniu na 100^0 i podzielony przez sto, albo też spółczynnik k_t, znaleziony przy ogrzaniu na t^0 i podzielony przez t, dają tę samą wartość α, którą otrzymujemy przy ogrzaniu na 1^0 i którą nazwaliśmy spółczynnikiem rozszerzalności linijnej przy ogrzaniu od 0^0 do 1^0.

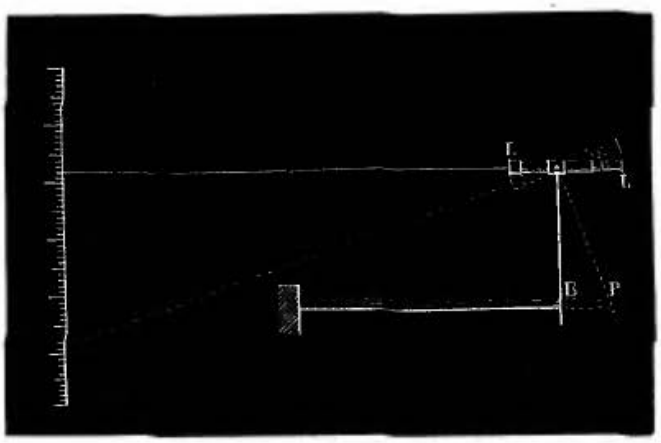


Fig. 404. Mierzenie rozszerzalności ciał stałych. Zasada metody Lavoisier'a i Laplace'a.

Chcąc przy opisanej metodzie znaleść wspomnianą wyżej cyfrę 744, to jest chcąc znaleść stosunek pomiędzy odległością, jaką wzdłuż skali przebiega oś lunety i wydłużeniem sztaby, trzeba było dokonywać mierzeń bardzo delikatnych i łatwo podlegających ważnym pomyłkom, których można uniknąć przy użyciu metody Ramsdena. Metodą tą posługiwał się Roy w roku 1784

w celu określenia rozszerzalności pewnych miar; polega ona na następującem. Trzy metalowe wanny A, B, C (fig. 405) są ustawione równolegle do siebie na żelaznych podstawach; dwie zewnętrzne A i C są napełnione lodem, środkowa zaś B zawiera wodę i może być ogrzaną za pomocą lampek spirytusowych. W każdej wannie znajduje się sztaba metalowa, mająca 2 metry długości. Sztaby zewnętrzne utrzymywane stale przy temperaturze 0^0, mają też stałą długość, podczas gdy sztaba środkowa podlegająca badaniu i ogrzewana lub oziębiana, wydłuża się albo kurczy. Na obu końcach każdej z tych sztab znajduje się pionowy słupek metalowy. Na słupkach w A' i A'' osadzone są siat-

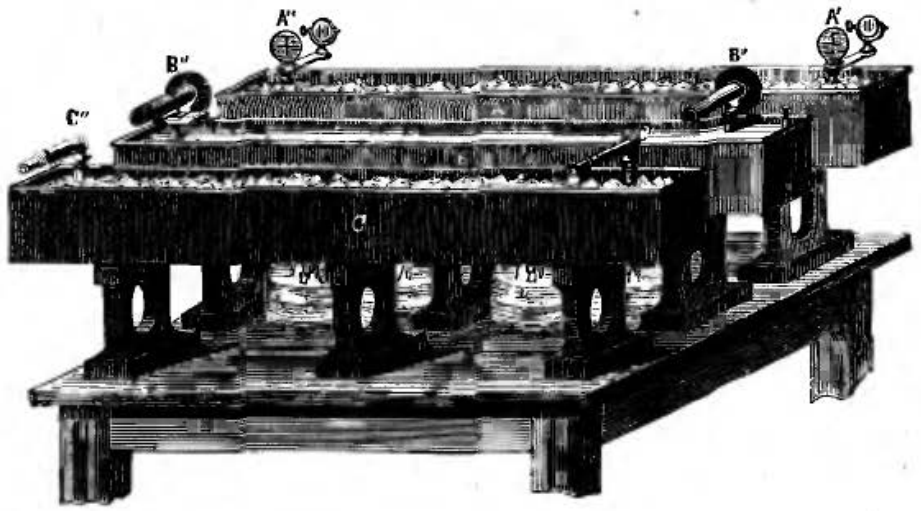


Fig. 405. Przyrząd Ramsden'a.

ki z dwóch cienkich nitek, przecinających się pod kątem prostym; siatki te są oświecone za pomocą małych zwierciadeł. Na każdym końcu sztaby podlegającej badaniu to jest w B' i B'' znajduje się część mikroskopu, zawierająca objektyw; wreszcie na końcach drugiej zewnętrznej sztaby, to jest w C' i C'' osadzone są części, zawierające okular i siatkę z nitek tak, że C' i B' oraz C'' i B'' stanowią razem jeden całkowity mikroskop. Jeżeli z każdej strony oś optyczna rury, zawierającej okular stanowi przedłużenie osi optycznej rury, zawierającej objektyw i jeżeli osie te, będąc przedłużone, spotykają środek siatki w A' i A'', to obserwator widzi w C', również jak i w C'', utworzony

przez objektywy B' i B'' rzeczywisty obraz siatki, znajdującej się po za tym objektywem, który to obraz zlewa się z siatką w okularze. Na odwrót także z podobnego widoku można sądzić, że osie optyczne stanowią jedną prostą linię, która będąc przedłużona spotka środek siatki w A' i A'' czyli, że wtedy C' C'' jest równe B' B'' i równe A' A''. Najmniejsze wydłużenie sztaby środkowej narusza tę koincydencyę, albowiem wtedy objektyw ulega przesunięciu.

Z początku doprowadza się temperaturę trzech wanien do 0°, następnie reguluje się długość sztaby środkowej za pomocą specyalnych części, przedstawionych oddzielnie na figurze 406.

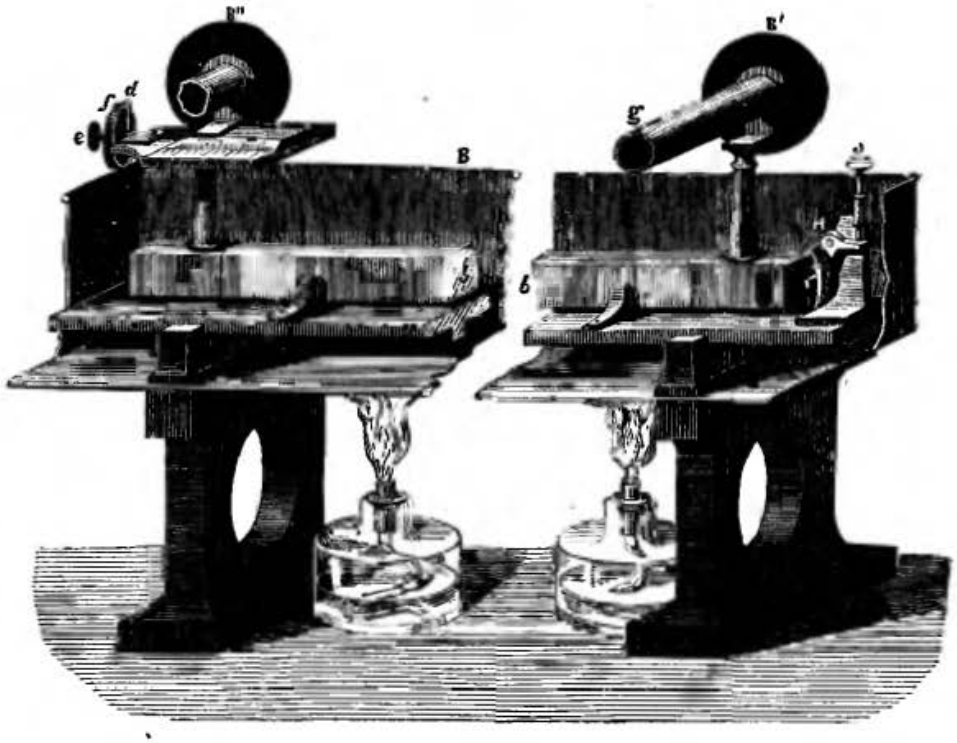


Fig. 406. Oddzielne szczegóły przyrządu Ramsdena.

Mianowicie jeden koniec sztaby od strony B' przylega do dźwigni, którą przesuwa się za pomocą szruby J i która służy do utrzymywania końca tego w niezmiennem położeniu. Na drugim końcu przy B'' znajduje się tak zwana szruba mikrometryczna, pozwalająca przesuwać rurę z objektywem wzdłuż sztaby i oceniająca wielkość tego przesunięcia do $^1/_{500}$ milimetra. Gdy następnie ogrzewa się wannę środkową, objektyw B'' oddala się wsku-

tek rozszerzenia sztaby; sprowadza się go napowrót aż do koincydencyi za pomocą szruby mikrometrycznej, liczba zaś obrotów, jaką przy tem szruba robi, pozwala z wielką dokładnością obliczyć wydłużenie sztaby, z którego łatwo już oznaczyć spółczynnik jej rozszerzalności.

Nad rozszerzalnością ciał pracowali jeszcze De Luc, Borda, Dulong i Petit oraz wielu innych. Z prac ostatnich dwóch uczonych wynika bardzo ważny rezultat a mianowicie, że rozszerzalność ciał stałych przy wysokich temperaturach nie jest już proporcyonalną do temperatury, mierzonej za pomocą rtęciowego termometru, lecz wzrasta w miarę jej podwyższania; spółczynnik powiększa się pomiędzy 100° i 200°, wzrasta jeszcze pomiędzy 200° i 300° i tak dalej do punktu wrzenia.

Podajemy tutaj spółczynnik k rozszerzalności linijnej niektórych ciał stałych, znaleziony przy ogrzewaniu od 0° do 100° i wyrażony jako ułamkowa część pierwotnej długości danego ciała: [1])

Flintglas	0,00081166	Złoto	0,00146606
Szkło w rurkach bez ołowiu	0,00089694	Miedź	0,00171733
Stal niehartowana	0,00107915	Srebro	0,00190974
Stal hartowana	0,00123956	Ołów	0,00284836
Żelazo miękkie	0,00122045	Platyna	0,00085655

Chcąc z podanych tutaj liczb obliczyć spółczynnik α rozszerzalności linijnej przy ogrzaniu od 0° do 1°, należy je podzielić przez 100; mnożąc zaś przez 3 otrzymamy spółczynnik rozszerzalności sześciennej.

Nie wszyscy badacze znaleźli dla niektórych substancyj ten sam spółczynnik rozszerzalności, owszem dane ich dla wielu ciał różnią się niemało tak, że każda liczba stosuje się właściwie tylko do tego kawałka, który podlegał doświadczeniu. I tak Regnault znalazł, że spółczynnik rozszerzalności szkła jest różny dla rozmaitych gatunków i zmienia się nawet wraz z kształtem nadanym tej substancyi. Zależy to szczególniej od układu czą-

[1]). Podług Lavoisier'a i Laplace'a.

stek w ciele, tak np. żelazo rozszerza się w stopniu nader rozmaitym zależnie od tego, czy jest lanem, kutem lub też wyciągniętem w druty. Jeżeli ciała stałe posiadają w rozmaitych kierunkach różną budowę, to nie wszędzie jednakowo się rozszerzają tak np. suche drzewo ma w kierunku włókien inny spółczynnik rozszerzalności, aniżeli w kierunku prostopadłym do nich. Również w kryształach podwójnie załamujących światło, rozszerzalność w kierunku osi optycznej jest inna, aniżeli w kierunku do niej prostopadłym. Mitscherlich i Fizeau pokazali, że w jednym lub w drugim kierunku może nawet mieć miejsce kurczenie się, jakkolwiek ogólna objętość przytem się powiększa. Podczas gdy spółczynnik rozszerzalności spatu wapiennego wynosi w kierunku osi optycznej 29 milionowych, to w kierunku do niej prostopadłym kryształ się kurczy. Podobne obserwacye zrobiono także nad szmaragdem, ortoklasem i innemi kryształami. Różnice w budowie zależnie od kierunku wewnątrz kryształu, ujawniające się przez rozmaity sposób załamywania światła, występują tedy i przy działaniu ciepła. Czytelnik rozumie obecnie dlaczego przy obliczaniu spółczynnika rozszerzalności sześciennej ze spółczynnika rozszerzalności linijnej, przyjmowaliśmy, iż budowa ciała jest wszędzie jednakową. Tylko wtedy bowiem rozszerzalność jest we wszystkich kierunkach jednakowa i nie zachodzi zmiana kształtu tak, że np. sześcian pozostaje sześcianem. Stosuje się to do ciał niekrystalicznych, a z kryształów jedynie do tych, które należą do prawidłowego systemu.

Wspomniane wyżej zboczenia nie stanowią wcale wyjątków z ogólnego prawidła, że ciała rozszerzają się pod wpływem ciepła, jeżeli bowiem w pewnych kierunkach kurczą się, to jednak cała objętość się powiększa. Tymczasem takie ciała, jak kauczuk, jodek ołowiu, podwójny jodek ołowiu i srebra, jodek srebra aż do 156°, 5 C., granaty i woda pomiędzy 0° i 3°, 9 kurczą się przy ogrzewaniu; powiadamy, że ciała te mają odjemny spółczynnik rozszerzalności.

Drzewa, również jak i większość substancyj organicznych, zmniejszają swą objętość przy ogrzewaniu, jeżeli przedtem nie były doskonale osuszone; oziębione zaś do pierwotnej temperatu-

ry, nie powracają wcale do dawnej objętości. Gdybyśmy je zważyli przed i po ogrzaniu, przekonalibyśmy się, że waga ich się zmniejszyła, a to dlatego, że pod działaniem ciepła wydzielają się z nich pewne materye, jak np. woda, zawarta pomiędzy ich cząstkami. To objaśnia nam zmniejszanie się ich objętości. Podobnemu kurczeniu ulega także glina, a zjawisko to trwa jeszcze i wtedy, gdy cała ilość swobodnej wody została z gliny wydalona; prawdopodobnie składniki gliny wchodzą w jakiś silniejszy związek, albowiem po ogrzaniu posiada ona zupełnie inne własności, których nie traci po oziębieniu, podobnie jak nie powraca wtedy do pierwotnej objętości.

Obecnie pokażemy na kilku przykładach jaki pożytek osiągamy z dokładnej znajomości wpływu ciepła na ciała stałe.

Gdy łatwo łamliwe ciało, w którem ciepło powoli się rozchodzi, poddajemy nagłej zmianie temperatury, wtedy ono zwykle pęka; wiadomo wszak, że zimne szkło, zetknięte z gorącym przedmiotem albo też na odwrót, szkło gorące zetknięte z ciałem zimnem, ulegają pęknięciu. W pierwszym wypadku części szkła, stykające się z ciałem gorącem, nagle się rozszerzają, podczas gdy sąsiednie części nie zdążyły jeszcze ogrzać się, wskutek czego następuje ich rozdział; w drugim zaś wypadku pęknięcie jest rezultatem nagłego skurczenia się najbliższych części. W podobny sposób pękają zimne naczynia, gdy wlewamy do nich gorącą ciecz, albo też naczynia gorące, gdy wlewamy do nich ciecz zimną. Rozszerzanie się metali, użytych do budowli podczas gorącej pory roku i kurczenie się ich w czasie zimna, powodują niekiedy zjawiska tem bardziej uderzające, im większą jest różnica pomiędzy rozszerzalnością metali i rozszerzalnością materyałów, z któremi są zetknięte. Ołów pokrywający dachy rozszerza się dniem i kurczy nocą; ponieważ siła ciężkości ułatwia pierwsze, a przeszkadza drugiemu, to ostatecznym wynikiem jest opuszczanie się ołowiu ku dołowi. Tyndal w swojem dziele o cieple przytacza podobny wypadek, jaki zdarzył się w Bristolu: ołowiany dach katedry zesunął się w ciągu dwóch lat na 18", siła zaś, dzięki której to się odbywało, była tak wielka, że gwoździe wbite w szpary dachu, w celu przytrzymania go, zostały

wyrwane. Z przykładu tego widać jak ważnem jest branie w rachubę rozszerzalności ciał stałych przy stawianiu budowli i w ogóle w przemyśle. Szyny na drogach żelaznych nie są układane szczelnie, należy im bowiem dać możność roszerzania się latem i kurczenia zimą. Obręcz na koła nasadza się wtedy, gdy ona jest rozgrzaną; przy oziębieniu kurczy się i ściska oddzielne części koła w jedną całość.

Niejednakowa rozszerzalność metali znalazła bardzo ważne zastosowanie w *wahadle kompensacyjnem*, mającem stałą długość bez względu na temperaturę.

Gdyby wahadło było zwyczajną sztabą metalową, wahałoby się nieprawidłowo, to jest prędzej zimą, aniżeli latem i nie mogłoby służyć jako regulator przy zegarze. W wahadle kompensacyjnem soczewka *L* (fig. 407) jest zawieszona na ramce, zbudowanej ze sztabek żelaznych (na rysunku ciemne) i mosiężnych (na rysunku jasne). Sztabka *i* jest u góry przymocowana do poprzecznej beleczki, dolny zaś jej koniec przechodzi swobodnie przez walcowate otwory w dolnych poprzecznych beleczkach. Sztabki żelazne i mosiężne są ułożone w taki sposób, że pierwsze mogą rozszerzać się jedynie z góry na dół, drugie zaś przeciwnie tylko z dołu ku górze; rozszerzanie się tedy sztabek żelaznych obniża soczewkę, rozszerzanie się mosiężnych podnosi ją ku górze. Urządziwszy odpowiednio całą ramkę, można oba te działania wzajemnie zrównoważyć.

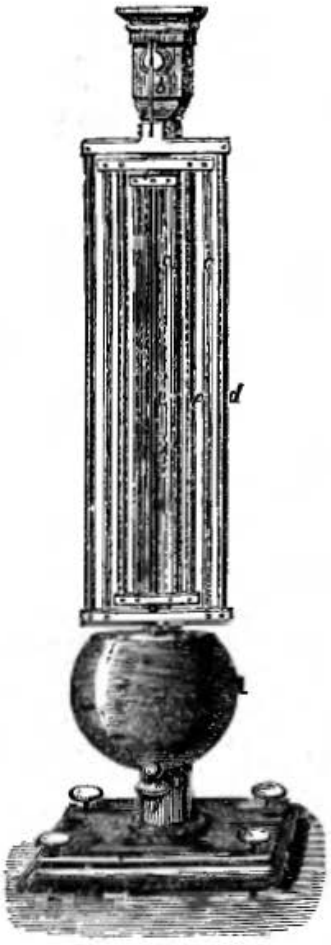


Fig. 407. Wahdło kompensacyjne.

Można także skompensować wahadło za pomocą osadzonej na niem poprzecznej beleczki (fig. 408), a składającej się ze sztabek miedzianej i żelaznej razem połączonych. Sztabka

miedziana, bardziej rozszerzalna i bardziej kurczliwa, znajduje się poniżej żelaznej.

Gdy temperatura się obniża i pręt wahadła staje się krótszy a soczewka podnosi się ku górze, wtedy beleczka poprzeczna ulega takiemu zgięciu (*b*), że dwie kulki metalowe, osadzone na jej końcach opuszczają się i — jeżeli masa ich jest odpowiednio dobraną — obniżają środek ciężkości całego wahadła. Gdy temperatura wzrasta, beleczka wygina się w taki sposób (*c*), że kulki metalowe wznoszą się do góry, a środek ciężkości całego wahadła zostaje podniesiony.

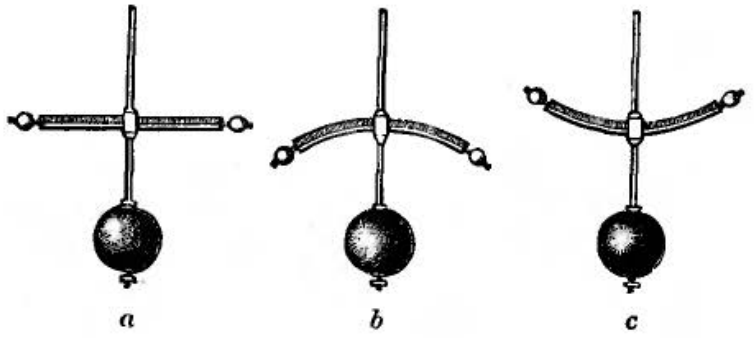


Fig. 408. Beleczka kompensacyjna, osadzona na wahadle.

§ 4. Rozszerzalność cieczy.

Rozszerzenie linijne cieczy nie może mieć miejsca, lecz jedynie rozszerzenie sześcienne. Nawet wydłużanie się słupa cieczy określamy za pomocą spółczynnika sześciennego. Ponieważ dalej ciecze są zawsze zawarte w naczyniach, przeto nie można podnieść ich temperatury, nie ogrzawszy jednocześnie tych naczyń, rozszerzenie których maskuje, że tak powiemy, istotne powiększanie się objętości cieczy. Dlatego też należy odróżnić *pozorne* albo względne rozszerzanie się cieczy w rozszerzającem się naczyniu i rozszerzenie istotne czyli *absolutne*, niezależne od naczynia. Doświadczenie, opisane przez nas (str. 643) w pierwszym § niniejszego rozdziału, może nam pokazać, jaki jest wpływ rozszerzalności naczynia na objętość znajdującej się w niem cieczy; w pierwszej chwili po ogrzaniu przyrządu ciecz w rurce opada,

co zależy od tego, że balon ogrzawszy się wcześniej, aniżeli ciecz, ulega rozszerzeniu, czyli objętość jego się powiększa, a ciecz pozornie się kurczy. Lecz wkrótce ciepło udziela się cieczy, a ponieważ ona rozszerza się bardziej, aniżeli szkło, poziom w rurce szybko się podnosi. Ażeby czytelnik lepiej zrozumiał, co pojmujemy pod pozorną rozszerzalnością cieczy, wyobraźmy sobie naczynie, podzielone na części o jednakowej objętości i przypuśćmy, że przy temperaturze 0^0 zawarta w niem ciecz zajmuje takich części np. 64, przy temperaturze zaś 100^0 części 65. Objętość tedy cieczy równa 64 powiększyła się przy ogrzaniu na sto stopni o 1, jednostka zaś objętości powiększyła się o $^1/_{64}$ część. Ten ułamek wyraża rozszerzalność cieczy i znaleziony jak widzimy bez uwzględnienia rozszerzalności samego naczynia, stanowi *spółczynnik pozornej jej rozszerzalności.* Oczywiście, że rozszerzalność absolutna jest większa od pozornej, o rozszerzalność naczynia; rachunek też pokazuje, że *spółczynnik* Δ *absolutnej rozszerzalności cieczy jest równy jej spółczynnikowi* α *rozszerzalności pozornej więcej spółczynnik* K *rozszerzalności samego naczynia* czyli, że $\Delta = \alpha + K$.

Przy badaniu rozszerzalności cieczy możemy się posługiwać dwiema metodami. Podług jednej obserwujemy pozorną zmianę objętości cieczy w naczyniach, których spółczynnik rozszerzalności jest znany i następnie obliczamy z tych dwóch danych rozszerzałność cieczy, druga zaś metoda pozwala nam określić tę rozszerzalność niezależnie od rozszerzalności naczynia. Obydwie te metody zostały zastosowane do oznaczenia rozszerzalności rtęci.

Przy posługiwaniu się pierwszą z nich, obserwuje się rozszerzenie rtęci w przyrządzie, zbudowanym podobnie jak termometr. Włoskowata rurka tego przyrządu jest podzielona na części, przyczem wzajemny stosunek oddzielnych objętości, zawartych pomiędzy dwiema podziałkami, jest dokładnie wiadomy, również jak i stosunek takiej objętości do objętości zbiornika termometru.

Lavoisier i Laplace badali poziom rtęci w takim przyrządzie, doprowadzanym przez nich stopniowo do temperatury 0^0,

t^0, t'^0 i z tego z łatwością obliczali pozorną rozszerzalność jednostki objętości cieczy od 0^0 do rozmaitych punktów skali termometrycznej. Z drugiej strony uczeni ci oznaczyli, za pomocą swojej metody, spółczynnik rozszerzalności linijnej sztaby, zrobionej ze szkła tego samego gatunku, co szkło owego przyrządu, użytego do badań, mnożąc zaś znalezioną liczbę przez trzy, otrzymywali spółczynnik rozszerzalności sześciennej tegoż szkła. Otóż potrzeba było tylko do pozornej rozszerzalności rtęci, poprzednio zaobserwowanej, dodać rozszerzalność sześcienną szkła termometru, ażeby otrzymać absolutną rozszerzalność rtęci.

W taki sposób Lavoisier i Laplace znaleźli, że jednostka objętości rtęci, ogrzana od 0^0 do 100^0, rozszerza się o $^1/_{55,21}$ czyli, że spółczynnik absolutnej rozszerzalności tej cieczy, ogrzanej na 1^0, jest równy $^1/_{5521}$ albo 0,0001786.

Metodzie tej, którą posługiwali się także Cavendish, Haelstroem i inni, można zrobić pewien zarzut. Widzieliśmy mianowicie wyżej, że, jak to wynika z doświadczeń Regnault'a, nietylko rozmaite gatunki szkła rozszerzają się niejednakowo, lecz że nawet kształt nadany tej substancyi wpływa na jej rozszerzalność. Chcąc tedy za pomocą tej metody otrzymać zupełnie dokładny rezultat, nie dosyć jest obliczyć rozszerzalność sześcienną naczynia, zawierającego badaną rtęć, z rozszerzalności linijnej szkła tego samego gatunku, lecz należy określić bezpośrednio rozszerzalność samego naczynia.

Druga metoda oznaczania rozszerzalności cieczy jest bezpośrednia, albowiem pozwala ją mierzyć niezależnie od rozszerzalności innego ciała. Opiera się ona na prawie hydrostatycznem, że w naczyniach połączonych dwa słupy cieczy równoważą się wzajemnie, jeżeli ich wysokości są odwrotnie proporcyonalne do ich ciężarów właściwych (patrz str. 94). Z drugiej zaś strony gdy objętość ciała się zmienia, lecz waga jego pozostaje tą samą, wtedy jego ciężar właściwy zmienia się w stosunku odwrotnym do objętości. Wreszcie wiemy, że objętość zajmowana przez ciało zależy od temperatury i od jego *spółczynnika rozszerzalności*. Rzecz oczywista tedy, że stosunek ciężarów właściwych cieczy, równy odwrotnemu stosunkowi objętości przy dwóch różnych temperatu-

rach, można przedstawić także jako stosunek dwóch wartości, wyrażających te objętości i w które wchodzi wielkość Δ to jest spółczynnik absolutnej rozszerzalności tejże cieczy. Taką jest zasada metody Dulong'a i Petit'a oznaczania rozszerzalności rtęci, do której to metody nie jest potrzebna znajomość rozszerzalności szkła. Rtęć wprowadza się do dwóch szklanych naczyń połączonych, niezbyt wązkich; jedno z nich znajduje się niezmiennie przy temperaturze 0^0, drugie doprowadza się do temperatury t^0, przyczem przedsięwzięte są wszelkie środki ostrożności, ażeby dwa te słupy cieczy niejednakowo ogrzane nie mięszały się ze sobą. Wysokości takich słupów są odwrotnie proporcyonalne do ich ciężarów właściwych i zmierzywszy je można już było z łatwością obliczyć absolutną rozszerzalność rtęci. Zmiana objętości naczyń nie wpływała wcale na stosunek tych wysokości.

Oto opis przyrządu, użytego przez Dulong'a i Petit'a. Na stoliku z drzewa massywnego znajduje się sztaba żelazna, mająca kształt litery T i zaopatrzona w dwie libelle, pozwalające sprowadzić do poziomego położenia tę część sztaby, która podtrzymuje dwa szklane naczynia A i B, połączone za pomocą bardzo wązkiej rurki (fig. 409 str. 676). Małe przecięcie tej ostatniej przeszkadza mięszaniu się dwóch słupów rtęci, niejednakowo ogrzanych, lecz niemniej przeto komunikują one ze sobą. Same zaś naczynia A i B są w górnej części dość szerokie, a to w celu uniknięcia wpływu włoskowatości na wysokość rtęci. Naczynie A całkowicie otoczone jest tłuczonym lodem, zawartym w metalowym rękawie M, w górnej części którego znajduje się wyżłobienie, pozwalające w danej chwili usunąć nieco lodu i odsłonić poziom rtęci w tem naczyniu.

Podobny rękaw metalowy M' otacza także naczynie B; jest on napełniony oliwą, temperatura której może być doprowadzona do 250^0 i 300^0. Ogrzewa ją ognisko otaczające rękaw M', temperaturę zaś jej mierzy się za pomocą termometru powietrznego i drugiego zwanego wagowym w znacznej swej części zanurzonych w oliwie.

Doświadczenie rozpoczyna się od ogrzania oliwy do żądanej temperatury t^0 przy której — za zachowaniem pewnych środków ostrożności — utrzymuje się ona przez pewien przeciąg czasu.

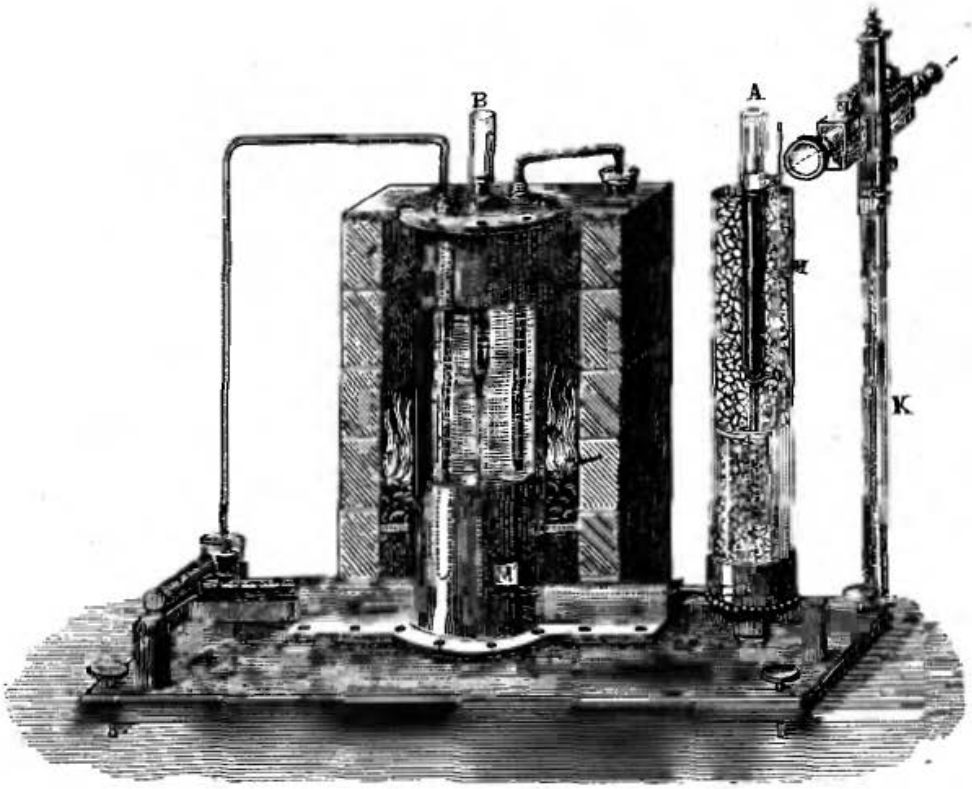


Fig. 409. Przyrząd Dulong'a i Petit'a.

Należy koniecznie starać się o to, ażeby podczas ogrzewania rtęć w naczyniu B nie podnosiła się powyżej pokrywki zamykającej rękaw M'. Dopiero przed samem mierzeniem dolewa się do naczynia B nieco ogrzanej poprzednio rtęci tak, ażeby menisk jej wystawał ponad pokrywkę. Dulong i Petit dokonywali mierzeń za pomocą umyślnie w tym celu zbudowanego katetometru K, pozwalającego bezpośrednio odczytywać 0,05 milimetra. Lunetę katetometru (jak wiemy w zasadzie jest to pionowy słup na którym oznaczone są podziałki i wzdłuż którego przesuwa się luneta) skierowywano najprzód na wierzchołek gorącego słupa rtęci, następnie na wierzchołek słupa zimnego, a różnica w położeniu lunety dawała *różnicę* pomiędzy wysokością h_t pierwszego i wysokością h_o drugiego. Następnie skierowywano lunetę na oś wązkiej rurki, łączącej oba naczynia A i B częściowo obnażonej

i otrzymywano w ten sposób wysokość h_o zimnego słupa rtęci. Powtarzamy, że mając te dane, można już było łatwo obliczyć wartość spółczynnika absolutnej rozszerzalności rtęci.

Dulong i Petit znaleźli, że spółczynnik ten obliczony dla 1° jest równy $^1/_{5550}$ przy temperaturze 100°; przy 200° równy $^1/_{5425}$; przy 300° równy $^1/_{5300}$. Rozszerzalność tę dla 1° obliczali w taki sposób, że przyrost objętości zaobserwowany przy 100° dzielili przez 100, przy 200° przez 200, przy 300° przez 300.

Przytoczone liczby ułamkowe są, jak widzimy, coraz większe, w miarę doprowadzania do coraz wyższej temperatury, z czego wynika, że rozszerzalność rtęci nie jest proporcyonalna do temperatury, mierzonej za pomocą termometru powietrznego, lecz że wzrasta szybcej, aniżeli ta temperatura, podobnie jak rozszerzalność ciał stałych wzrasta prędzej od temperatury, mierzonej za pomocą termometru rtęciowego.

Należy jeszcze wspomnieć, że najpewniejszą metodą oznaczania rozszerzalności sześciennej naczynia jest obliczenie jej z zaobserwowanej pozornej rozszerzalności danej cieczy, zawartej w tem naczyniu oraz ze znanej absolutnej rozszerzalności tejże cieczy. Przy pomocy znanej rozszerzalności rtęci Dulong i Petit oznaczyli spółczynnik rozszerzalności szkła i dowiedli, że ta ostatnia wzrasta szybcej, aniżeli temperatura. W podobny sposób Dulong i Petit oznaczyli rozszerzalność żelaza, miedzi i platyny, Dulong zaś i Mitscherlich — rozszerzalność sześcienną spatu wapiennego.

Badaniem absolutnej rozszerzalności innych cieczy zajmowali się Deluc, Gay-Lussac, Biot, Despretz oraz Pierre. Metoda przez nich stosowana polega na tem, że z badaną cieczą urządza się termometr, zupełnie podobny do zwykłego i porównywa jego wskazówki ze wskazówkami dobrego rtęciowego termometru, znajdującego się w tych samych warunkach. Jeżeli dwa te porównywane ze sobą termometry posiadają rurki i zbiorniki jednakowych rozmiarów i jeżeli obadwa są kompletnie zanurzone w jednej i tej samej kąpieli, to absolutna rozszerzalność cieczy od 0° do rozmaitych innych temperatur z łatwością daje się wtedy obliczyć. Prosty bowiem rachunek pokazuje, że spół-

czynnik absolutnej rozszerzalności cieczy przy ogrzaniu na t^0 wyraża się wtedy formułą, w którą wchodzą objętość cieczy przy 0^0 oraz przy t^0, spółczynnik rozszerzalności szkła i temperatura, a więc wartości, mogące bezpośrednio być zaobserwowane.

Badanie absolutnej rozszerzalności innych jeszcze cieczy, oprócz rtęci, doprowadziło do wniosku, że rozszerzalność ta jeszcze bardziej odstępuje od prawa prostej proporcyonalności do temperatury, aniżeli rozszerzalność rtęci. Gdy porównamy ze sobą różne ciecze pod względem ich rozszerzalności, zobaczymy, że dla każdej z nich czynniki formuły empirycznej, pozwalającej obliczyć rozszerzenie jednostki objętości ogrzanej od 0^0 do t^0, są inne.

Ciekawą jest rozszerzalność cieczy, które wrą przy niskiej temperaturze. I tak Thilorier w roku 1835 mówił o wielkiej rozszerzalności ciekłego kwasu węglanego przy przejściu jego od temperatury 0^0 do 30^0; oceniał ją jako cztery razy większą od rozszerzalności powietrza, znajdującego się w takich samych warunkach. Fakt ten podawany był w wątpliwość przez niektórych fizyków, lecz nowsze doświadczenia nie pozostawiają żadnej co do niego wątpliwości. Dowodzą one, że dla cieczy bardzo lotnych, spółczynnik rozszerzalności może znacznie przewyższyć takiż spółczynnik dla powietrza i innych gazów. Naprzykład dla kwasu siarkawego spółczynnik rozszerzalności przy 80^0 jest równy spółczynnikowi dla powietrza, zaś przy 130^0 jest od niego trzy razy większy [1]).

Prawo rozszerzalności wody różni się bardzo od praw rozszerzalności innych cieczy. Woda przedstawia tę ciekawą właściwość, że objętość jej, począwszy od temperatury 0^0 *zmniejsza się* w miarę podwyższania temperatury do 4^0 blizko.

Powyżej tej ostatniej objętość znów się powiększa tak, że przy 8^0 woda posiada tę samę objętość co przy 0^0. Wynika z tego, że przy 4^0 dana ilość wody zajmuje *najmniejszą* objętość, ponieważ zaś, jak widzieliśmy wyżej, ciężar właściwy czyli gęstość ciała przy niezmiennej jego wadze jest w stosunku od-

---

[1]) *Boutan* et *d'Almeida* Cours élémentaire de Physique.

wrotnym do objętości, to woda przy 4° przedstawia także *największą* gęstość.

Następujące doświadczenie Hope'a dowodzi, że istotnie woda przy 4° posiada maximum gęstości. Szklane naczynie (fig. 410) otoczone jest w górnej swej części rękawem, napełnionym lodem tłuczonym albo też mieszaniną oziębiającą. Przez otwory w ścianie jego przechodzą dwa termometry umieszczone poziomo tak, że kulki ich wypadają na osi naczynia. Napełnijmy to ostatnie wodą przy temperaturze pokojowej i pozostawmy je samemu sobie, a zobaczymy, że dolny termometr będzie wskazywał dość szybkie obniżanie się temperatury, podczas gdy temperatura górnego będzie spadała nader nieznacznie. Wkrótce pierwszy z nich osiągnie *stałą* temperaturę blizką 4°, drugi będzie wskazywał dalej stopniowo obniżającą się temperaturę, która spadnie do 0°, a nawet niżej. Zjawisko to tłomaczy się w sposób następujący. Woda w naczyniu oziębia się wskutek zetknięcia ścian jego z lodem, jako cięższa opada ku dołowi i obniża termometr dolny; odbywa się to tak długo, dopóki dolne warstwy nie osiągną temperatury 4°. Od tej chwili ciągłe obniżanie się temperatury górnego termometru wskazuje, że woda przestaje opadać ku dołowi. Wynika z tego, że woda przy 4°, która pozostaje w dolnej części naczynia, posiada gęstość większą od gęstości przy każdej innej temperaturze.

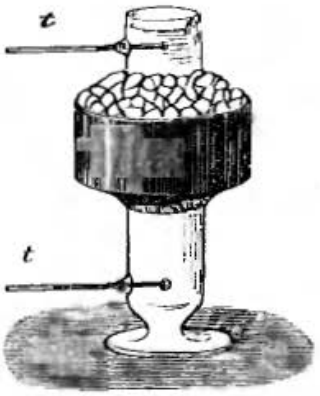


Fig. 410. Naczynie służące do pokazania, że woda przy 4° ma największą gęstość.

Opisane doświadczenie nie pozwala jednak w sposób dostatecznie ścisły ocenić temperatury, przy której gęstość wody osiąga swoje maximum. Lecz dokładna znajomość tej temperatury jest bardzo ważna, albowiem, jak wiemy, za jednostkę wagi (gram) przyjęto wagę jednego sześciennego centymetra wody dy-

stylowanej przy temperaturze największej jej gęstości. Lefévre-Gineau, zobowiązawszy się dać wzorzec kilograma, gdy przyjęto nowy system miar, ważył jeden i ten sam sześcian metalowy w czystej wodzie, kolejno ogrzewanej do różnych temperatur. Oczywiście że w chwili gdy ciśnienie wody z dołu do góry jest największe, to jest gdy sześcian traci najwięcej na wadze, woda ma największą gęstość, należy więc tylko zaobserwować przy jakiej temperaturze to ma miejsce. W taki sposób Gineau znalazł liczbę 4°, 4. Haelstroem posługiwał się podobną metodą; ważąc w wodzie kulkę szklaną odpowiednio obciążoną, otrzymał liczbę 4°, 1. Ułożył on tablicę objętości wody i jej gęstości od 0° do 30°. Wreszcie Despretz, który wykonywał odnośne doświadczenia w warunkach bardziej sprzyjających dokładnym rezultatom, aniżeli warunki doświadczeń Gineau i Haelstroema, otrzymał liczbę 3°,997 a więc nader blizką 4°. Oprócz tego Despretz zbadał dokładnie roztwory solne i alkohol zawierający wodę. I dla tych także cieczy, głównym składnikiem których jest woda, znalazł on maximum gęstości, lecz przy niższej temperaturze i to tem niższej im większa jest ilość obcej substancyi, dodanej do wody. Naprzykład roztwór 7,4 części wagowych alkoholu w 100 cz. wody przedstawia maximum gęstości przy temperaturze 2°,3. Roztwór 1,25 części soli kuchennej w 100 cz. wody ma największą gęstość przy 1°,2, a więc przy temperaturze niższej o 2°,8 aniżeli dla czystej wody; rozpuściwszy zaś dwa razy większą ilość soli w tej samej ilości wody, obniżamy przez to temperaturę największej gęstości roztworu do 1°,7 poniżej zera. [1])

§ 5. Rozszerzalność i gęstość gazów.

Rozszerzalność gazów, a szczególniej powietrza atmosferycznego, była badaną przez bardzo wielu fizyków, dawniejsze jednak odnośne doświadczenia nie wzbudzały wielkiego zaufa-

[1]) Wüllner, l. c.

nia dlatego, że nie zwracano przy nich dosyć uwagi na to, ażeby badane gazy były zupełnie suche. Liczby najbardziej zgodne z nowszemi wynikami otrzymali Lambert, De Luc i Mayer. Pierwsi znaleźli, że suche powietrze ogrzane od 0° do temperatury wrzenia wody, rozszerza się o 0,375 respective 0,372 pierwotnej objętości, zajmowanej przy 0°; Mayer zaś znalazł raz liczbę 0,3755, drugi raz 0,3656.

Pierwszym, który starał się badać rozszerzalność powietrza w stanie zupełnie suchym, był Gay-Lussac. Metoda jego podobną jest do tej, jaką opisaliśmy przy rozszerzalności cieczy, obserwował on mianowicie pozorne rozszerzenie powietrza w rurce termometrycznej i z tego, jakoteż ze znanego spółczynnika rozszerzalności szkła, obliczał absolutną rozszerzalność powietrza.

Figura 411 przedstawia przyrząd, jakim Gay-Lussac posługiwał się w swoich doświadczeniach. Widzimy tutaj kulkę

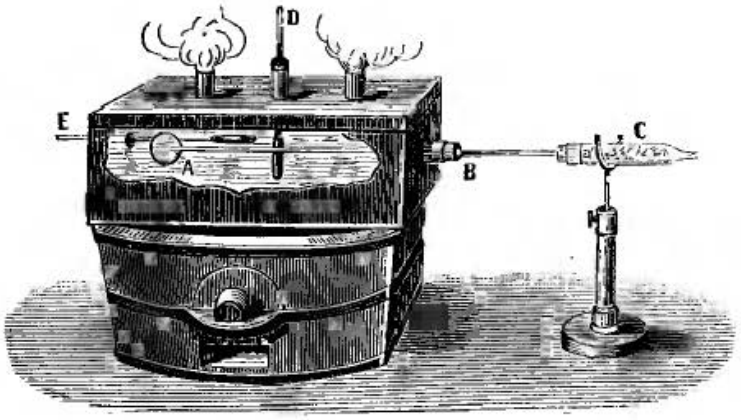


Fig. 411. Przyrząd Gay-Lussac'a.

szklaną, zaopatrzoną w takąż długą rurkę *AB*. podzieloną na części, stosunek objętości takiej części do objętości kulki ściśle był określony. Chcąc wprowadzić do rurki suche powietrze, Gay-Lussac napełnił ją z początku rtęcią, którą gotował w celu wypędzenia wilgoci, następnie połączył jej koniec z szerszą rurką *C*, zawierającą chlorek wapnia — substancyę silnie pochłaniającą wodę. Oprócz tego wprowadził do rurki *AB* cienki drut platynowy, którego koniec wystawał z ruki C. Przy lekkiem potrząsaniu tym drutem, kropelki rtęci wypływały, ich zaś miej-

sce zajmowały pęcherzyki powietrza, które przeszły przez rurkę C i tutaj uległy osuszeniu. Gdy już kulka i rurka napełnione były suchem powietrzem, wyciągano ów drut platynowy, przyczem starano się, ażeby w rurce pozostała pewna ilość rtęci, mająca służyć jako wskaźnik.

Tak przygotowaną rurkę umieszczano poziomo w naczyniu, które z początku napełniano topniejącym lodem. Temperaturę mierzono za pomocą dwóch rtęciowych termometrów E i D. Gdy rurka osiągała temperaturę 0^0, obserwowano położenie rtęciowego wskaźnika i określano tym sposobem objętość, jaką przy temperaturze topniejącego lodu oraz przy danem ciśnieniu atmosferycznem zajmowało powietrze, zamknięte w rurce. Niechaj objętość ta będzie równa V_o. Następnie przyrząd napełniano wodą i ogrzewano, starając się przytem, ażeby temperatura jej była wszędzie jednakowa. Rozszerzające się w rurce powietrze pchało przed sobą kroplę rtęci, dopóki ciśnienie jego nie stało się równem ciśnieniu zewnętrznego powietrza; położenie kropli wskazywało objętość V_t badanego powietrza przy temperaturze t i danem ciśnieniu barometrycznem. Gdyby ciśnienie zewnętrznego powietrza nie zmieniało się w ciągu całego doświadczenia i gdyby objętość szkła również nie uległa zmianie, to objętość V_t badanego powietrza równałaby się jego objętości V_o przy temperaturze 0^0 więcej przyrost objętości pod wpływem ogrzania na t^0 czyli, że $V_t = V_o (1 + k_t)$, gdzie k_t oznacza spółczynnik rozszerzalności powietrza. Ponieważ jednak objętość szkła także się powiększyła, to do przytoczonej formuły wprowadzono jeszcze znany spółczynnik rozszerzalności sześciennej szkła i wtedy dopiero obliczano z niej wartość spółczynnika k_t. Jeżeli w ciągu doświadczenia ciśnienie barometryczne ulegało zmianie, brano ją również pod uwagę, albowiem objętość V_t redukowano za pomocą rachunku do ciśnienia, przy którem oznaczano objętość V_o.

Za pomocą wielu doświadczeń Gay-Lussac znalazł, że spółczynnik rozszerzalności suchego powietrza przy ogrzaniu od 0^0 do 100^0 jest równy 0,375. Uczony ten badał rozszerzalność innych jeszcze gazów i doszedł do wniosku, że *wszystkie gazy, ogrzane od 0^0 do 100^0 rozrzerzają się jednakowo, to jest że objętość ich powiększa się o 0,375 pierwotnej objętości.*

Zdanie Gay-Lussac'a, że wszystkie gazy rozszerzają się jednakowo, również jak i wartość spółczynnika tej rozszerzalności, zostały z początku powszechnie uznane za prawdziwe, tembardziej, że wartość tę pośrednio potwierdziły poszukiwania Dulong'a i Petit'a. Następnie jednak zaczęto podawać ją w wątpliwość. Rudberg pierwszy rozpoczął na nowo badania nad rozszerzalnością suchego powietrza, posługując się przytem metodą, różną od metody Gay-Lussac'a i znalazł, że powyższy spółczynnik (0,375) jest za wielki, podług niego bowiem wynosi on tylko 0,365. Jednocześnie także inni uczeni, jak Magnus i Regnault przedsięwzięli badanie spółczynników rozszerzalności gazów i znaleźli liczbę 0,3665.

W doświadczeniu Gay-Lussac'a istniały dwie przyczyny pomyłek, a mianowicie gaz nie był zupełnie suchy i wskaźnik rtęciowy, przesuwający się w rurce termometrycznej, nie zamykał jej hermetycznie tak, że zewnętrzne powietrze mogło przenikać do wnętrza rurki. Metody Regnault'a są wolne od tych braków. Znakomity ten fizyk posługiwał się kolejno rozmaitemi sposobami do oznaczenia rozszerzalności gazów; raz badał je przy zmiennem ciśnieniu i zmiennej objętości, drugi raz przy stałem ciśnieniu i zmiennej objętości albo też naodwrót przy stałej objętości i zmiennem ciśnieniu. Regnault zastosował metodę swą do innych jeszcze gazów, oprócz powietrza atmosferycznego i doszedł do bardzo ciekawych rezultatów. Okazało się mianowicie, że spółczynniki rozszerzalności rozmaitych gazów różnią się nader znacznie pomiędzy sobą oraz, że wartość tych spółczynników zależy od sposobu ich określania. Gdy określamy spółczynnik przez bezpośrednią obserwacyę zmian objętości, jakim ulega dana masa gazu o stałem ciśnieniu, otrzymujemy wartość inną, aniżeli wtedy gdy obliczamy go na zasadzie obserwacyi zmian w ciśnieniu, wywieranem przez stałą objętość gazu, którego temperatura się podnosi. Davy, opierając się na swoich własnych doświadczeniach, wygłosił zdanie, że rozszerzalność powietrza jest niezależna od jego ciśnienia lub od jego gęstości, zdania tego jednak nie potwierdziły doświadczenia Regnault'a. Ten ostatni badał najprzód powietrze przy ciśnienin słabszem, aniżeli ciśnienie jednej

atmosfery ($^1/_5$ lub $^1/_6$ atmosf.), następnie zaś przy ciśnieniu 4 do 5 atmosfer i przekonał się, że przy tych samych warunkach temperatury powietrze rozszerza się tem bardziej, im większą jest jego gęstość, to jest im bardziej cząstki jego są do siebie zbliżone. Podobne doświadczenia Regnault urządzał także z innemi gazami i zawsze dochodził do tego samego rezultatu. Naprzykład spółczynnik rozszerzalności kwasu węglanego przy ogrzaniu od 0° do 100°, równy 0,3685 gdy gęstość jego równa 1, wynosi już 0,3752 przy gęstości 2,2976, wzrasta zaś do wartości 0,3859 gdy gęstość równa 4,7318.

Z licznych prac Regnault'a wynika, że spółczynniki rozszerzalności różnych gazów tembardziej zbliżają się do jednej wspólnej wartości, im słabszem jest ciśnienie, przy którem bada się te gazy. Prawo Gay-Lussac'a, że wszystkie gazy mają jeden i ten sam spółczynnik rozszerzalności, stosuje się właściwie do substancyj lotnych w stanie nadzwyczajnego rozrzedzenia. W ogóle można tutaj powtórzyć to, co po części powiedzieliśmy już przy prawie Mariotte'a (str. 170), a mianowicie, że w miarę jak temperatura się podnosi i ciśnienie słabnie, gazy zbliżają się do *idealnego stanu gazowego*, któremu odpowiadają dla wszystkich gazów jednakowe spółczynniki rozszerzalności i ściśliwości. Innemi słowy, każdy gaz przy pewnej dostatecznie wysokiej temperaturze i dostatecznem rozrzedzeniu stosowałby się ściśle do praw Mariotte'a i Gay-Lussac'a.

Gęstością gazu nazywamy często stosunek wagi tego gazu do równej objętości powietrza, wziętego przy tych samych warunkach ciśnienia i temperatury. Przy oznaczaniu gęstości gazów należy zwracać daleko większą uwagę na temperaturę, aniżeli przy oznaczaniu gęstości ciał stałych i cieczy, albowiem gęstość gazów, dzięki wielkiej ich rozszerzalności pod wpływem ciepła, zależy w nader znacznym stopniu od temperatury. Podane określenie gęstości gazu wtedy tylko byłoby ścisłem, gdyby prawo Mariotte'a, że objętość gazu jest odwrotnie proporcyonalna do ciśnienia oraz prawo Gay-Lussac'a, że wszystkie gazy rozszerzają się jednakowo pod wpływem ciepła, były zupełnie słuszne. Jakkolwiek zboczenia od tych praw są bardzo małe, to jednak

ściślejszem jest następujące określenie: gęstością gazu nazywamy stosunek wag równych objętości gazu i powietrza atmosferycznego przy temperaturze 0° i ciśnieniu 760 milim. Niechaj gęstość ta będzie równą d. Przy tej samej temperaturze, lecz przy innem jakiem ciśnieniu H, gęstość d powiększy się lub zmniejszy stosownie do powiększenia lub zmniejszenia ciśnienia. Jeżeli zaś przy niezmiennem ciśnieniu H gaz zostanie ogrzany do temperatury t, rozszerzy się on w stosunku V do $V + k_t$. gdzie k oznacza spółczynnik rozszerzalności tegoż gazu, a gęstość jego zmniejszy się w tym samym stosunku.

Chcąc tedy oznaczyć gęstość gazu, należy porównać wagę jednakowych objętości tegoż gazu i powietrza przy temperaturze 0° i ciśnieniu 760 milim. Następnie znając wagę jednego litra powietrza można już określić bezwzględną wagę danej masy gazu.

Pierwsi, którzy przedsięwzieli ściślejsze badania w tym kierunku byli Arago i Biot. Przy oznaczaniu gęstości gazów odnośnie do powietrza atmosferycznego, posługiwali się oni metodą następującą. Szklany balon objętości około 6 litrów, zaopatrzony w szyjkę z kranem (patrz str. 141), napełnia się suchem powietrzem i waży przy danem ciśnieniu barometrycznem oraz temperaturze. Niechaj istotna waga jego będzie równa P. Następnie wypompowuje się zeń powietrze, o ile to jest możliwe, zamyka kran i waży powtórnie; jeżeli teraz istotna waga balonu wynosi p, to $P - p$ stanowi wagę wypompowanego powietrza. Za pomocą rachunku, w który wchodzą ciśnienie, temperatura, spółczynniki rozszerzalności powietrza i szkła, dowiadujemy się jaką byłaby waga powietrza, wypełniającego balon przy temperaturze 0° i ciśnieniu 760 milim. Poczem do balonu, możliwie przedtem wypróżnionego, wprowadza się gaz, którego gęstość ma być oznaczoną, następnie wypompowuje się ten gaz, wprowadza nową ilość do balonu i tak naprzemian, dopóki nie jest się pewnym, że balon nie zawiera już śladów powietrza lub wilgoci, lecz jedynie suchy gaz. Wtedy zamyka się kran, przyczem obserwuje się stan barometru i temperaturę w chwili zamknięcia i waży napełniony balon; otrzymuje się wagę P'. Następnie wypom-

powuje się badany gaz i waży balon powtórnie; jeżeli obecnie waga jego jest równa p', to $P - p'$ stanowi wagę wypompowanego gazu. I znów za pomocą rachunku analogicznego, dowiadujemy się, jaką byłaby waga badanego gazu, wypełniającego balon przy 0^0 i ciśnieniu 760 milim. Gęstość zaś tegoż gazu odnośnie do powietrza równa się ilorazowi, otrzymanemu z podzielenia tej wagi przez poprzednio otrzymaną wagę powietrza. Biot i Arago oznaczyli w ten sposób gęstość *tlenu* (1,10359 jeżeli gęstość powietrza atmosferycznego przyjmiemy za 1), *azotu* (0,96913), *wodoru* (0,07321), *kwasu węglanego* (1,51961), *amoniaku* (0,59669), *gazowego kwasu solnego* (1,24740).

W celu znalezienia gęstości powietrza atmosferycznego odnośnie do wody Biot i Arago ważyli ten sam balon napełniony wodą i ze znalezionej jej wagi oraz ze znanej rozszerzalności tej cieczy jakoteż i naczynia, obliczyli wiele sześciennych centymetrów wody przy 0^0 mieści się w balonie. Dzieląc następnie znaną wagę powietrza, napełniającego balon przy 0^0, przez znalezioną ilość, otrzymali wagę jednego sześciennego centymetra powietrza, czyli jego *ciężar właściwy*. Znaleźli oni liczbę 0,001299075.

Opisana metoda oznaczania gęstości gazów jest bardzo dokładna, pomimo to jednak jest rzeczą nadzwyczaj trudną otrzymać przy jej pomocy rezultaty zupełnie pewne, a to dlatego, że ścisłe obliczenie istotnej wagi balonu, a więc i powietrza, wycieśnionego przez tenże balon, przedstawia ogromne trudności. Jest to zaś koniecznem z tego względu, że często szukana waga gazu jest mniejsza od wagi wycieśnionego przez balon powietrza. Powietrze w którem odbywają się ważenia, zmienia ustawicznie swój skład, stan wilgotności oraz temperaturę. Oprócz tego balon zawsze zgęszcza na swej powierzchni znaczną ilość pary wodnej, a ponieważ ilość jej w powietrzu jest zmienna, wynika z tego, że waga balonu w rozmaitym czasie bywa różną, co jest tem gorsze, że nie ulega obliczeniu.

Trudności te usunął Regnault za pomocą wielce dowcipnego ulepszenia powyższej metody. Zamiast gwichtów, jakie dla zrównoważenia balonu kładziono na szalce wagi, używał on drugie-

go balonu z tego samego szkła i możliwie tej samej zewnętrznej objętości. Zawiesza go się pod szalką zupełnie tak samo, jak i pierwszy balon (fig. 412); obadwa, znajdując się w tej samej warstwie powietrza, wycieśniają jednakowe objętości tego gazu o jednakowym składzie. Wszystkie zmiany powietrza wpływają z obu stron jednakowo tak, że wagi będąc raz doprowadzone do stanu równowagi, pozostają w nim niezależnie od zmian ciśnienia barometrycznego i temperatury.

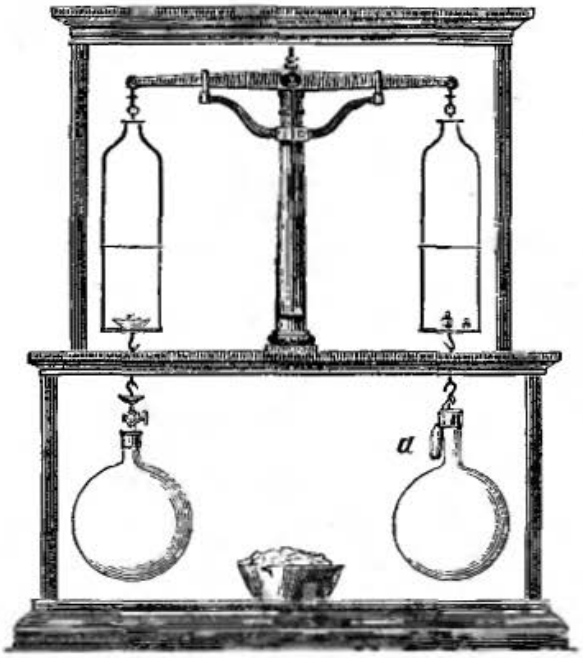


Fig. 412. Metoda Regnault'a oznaczania gęstości gazów.

Ażeby zrównać zewnętrzne objętości obu balonów, Regnault napełnił je wodą i ściśle zrównoważył w powietrzu, następnie zanurzył je w jednem naczyniu z wodą. Ewentualnie mniejszy z dwóch balonów wycieśniał wtedy mniejszą objętość wody, aniżeli większy balon, przez co równowaga ulegała naruszeniu, albowiem pierwszy mniej tracił na wadze; dla przywrócenia równowagi należało po stronie większego balonu dołożyć np. *n* gramów. Otóż wtedy Regnault na mniejszym balonie zawiesił zamknięte na obu końcach szklane naczyńko *a*, takiej wielkości, że wycieśniało *n* sześciennych centymetrów wody, przez co wreszcie doszedł do tego, że mniejszy balon wycieśniał akuratnie taką samą objętość wody lub powietrza, jak balon większy. Gdy następnie po dołożeniu odpowiedniej ilości gwichtów do lżejszego balonu doprowadzono przyrząd do stanu równowagi w powietrzu, utrzymywała się ona także po zanurzeniu obu balonów w wodzie oraz w powietrzu, którego gęstość i temperatura ulegały zmianie. Balony wypróżniono i osuszono, a jeden z nich służący tylko jako przeciwaga, hermetrycznie zamknięto. Przed rozpoczęciem doświadczeń próbowano jeszcze czy zewnętrzne objęto-

ści obu balonów są istotnie równe. W tym celu zamykano także kran balonu, do którego miano wprowadzić badane gazy i po doprowadzeniu do równowagi pozostawiono balony, wiszące u szalek, przez dni piętnaście. Równowaga w najmniejszym nawet stopniu nie została naruszoną, pomimo iż w tym przeciągu czasu ciśnienie barometryczne wahało się pomiędzy 741 m. i 771 m., temperatura zaś podniosła się od 0° do 17°.

Cyfry otrzymane przez Regnault'a różnią się nieco od tych jakie przytoczyliśmy wyżej, lecz zgadzają się prawie zupełnie z rezultatem doświadczeń innych uczonych, jak Dumas, Boussingault i Berzelius.

Powiedzieliśmy już, że z powodu zbaczania gazów od praw Boyle'a-Mariotte'a i Gay-Lussac'a, określenie gęstości gazów jako stosunku wag jednakowych objętości gazu i powietrza przy tych samych warunkach ciśnienia i temperatury, nie jest zupełnie ścisłe. Otóż Regnault dowiódł tego za pomocą całego szeregu doświadczeń. Dla gazów bardzo trudno ściśliwych, jak powietrze, wodór, tleni azot, znalazł on wprawdzie, że gęstość oznaczona podług tego określenia zgadza się z gęstością, znalezioną przy 0° i ciśnieniu 760 milim., czyli, że gęstość wymienionych gazów odnośnie do powietrza jest niezależna od ciśnienia i temperatury. Inaczej zachowuje się kwas węglany i w ogóle gazy blizkie punktu skroplenia. Przy temperaturze 0° stosunek wagowy kwasu węglanego i powietrza przy tem samem ciśnieniu wynosił:

przy 224,17 mm. 1,52145
„ 374,13 „ 1,52366
„ 760,00 „ 1,52910.

Widzimy tedy, że przy temperaturze 0° gęstość kwasu węglanego wzrasta, wraz z ciśnieniem; a to dla tego, że gaz ten jest bardzo ściśliwy.

Co do wpływu temperatury to stosunek wagi kwasu węglanego i powietrza, napełniających balon przy 100° i ciśnieniu 760 milim, równa się tylko 1,52418 tak, że gęstość kwasu węglanego odnośnie do powietrza przy tej samej temperaturze zmniejsza się w miarę wzrostu temperatury. Okazało się natomiast, że przy

temperaturze 100° gęstość kwasu węglanego, odnośnie do powietrza przy tem samem ciśnieniu, jest niezależną od ciśnienia. Albowiem przy 100° stosunek wagowy jednakowych objętości kwasu węglanego i powietrza, pozostających pod ciśnieniem 383,39 mm., okazał się prawie równym stosunkowi przy ciśnieniu 760 mm., wynosił mianowicie 1,5241. Wynika z tego, że przy 100° i przy powiększeniu ciśnienia od 383 mm. do 760 mm. kwas węglany nie zostaje bardziej ścieśniony od powietrza, czyli że przy tej temperaturze kwas węglany tak samo ulega prawu Mariotte'a jak powietrze atmosferyczne.

Regnault posługiwał się także opisanym wyżej balonem przy oznaczaniu wagi jednego sześciennego centymetra powietrza przy 0° i ciśnieniu 760 mm. i otrzymał liczbę 0,00129318. Z wagi tej oraz z przytoczonych gęstości azotu, tlenu, wodoru i kwasu węglanego oblicza się wagę jednego sześc. cm. tych gazów, zkąd łatwo już obliczyć także wagę dowolnej ilości każdego z nich przy jakiejkolwiek temperaturze i ciśnieniu.

ROZDZIAŁ II.

Zmiana stanów skupienia [1]).

§ 1. Topienie. Rozpuszczanie w cieczy.

W poprzednim rozdziale obszernie mowiliśmy o tem, że ciała stałe pod wpływem ogrzewania rozszerzają się. Otóż jeżeli ogrzewanie to jest dostatecznie silne, wtedy wpływ jego objawia się jeszcze w inny sposób, a mianowicie ciało stałe zmienia swój stan skupienia i przechodzi w ciało ciekłe, czyli topi się.

Liczne ciała pod działaniem dostatecznie wysokiej temperatury przechodzą odrazu ze stanu stałego w ciekły, nie przedsta-

---

[1]) Przez pomyłkę tytuł rozdziału II-go wydrukowano obok tytułu rozdziału I-go niniejszej księgi.

wiając przytem, w sposób widoczny, stanów pośrednich. Temperatura, przy której ciało zmienia swój stan skupienia, jest ściśle określoną i niezmienną przy tem samem ciśnieniu, zowie się ona *temperaturą topliwości*; jest ona tak stałą i charakterystyczną dla ciał, że w niektórych wypadkach stanowi środek do poznania pewnej substancyi lub do ocenienia stopnia jej czystości.

Pod względem temperatury topliwości rozmaite ciała przedstawiają różnice nader znaczne. Począwszy np. od kwasu siarkowego, który topi się przy — 100° a skończywszy na platynie, topniejącej przy 2000°, można ułożyć szereg ciał, których temperatura topliwości przebiega wszystkie stopnie skali termometrycznej. Zjawiska dawniej już zaobserwowane, jako też rezultaty nowszych doświadczeń, pokazują, że w miarę wynajdywania coraz nowych środków do wytwarzania bardzo wysokich temperatur, zmniejsza się liczba ciał uważanych za nietopliwe pod wpływem ciepła. Znaczna ilość ciał, które uchodziły dawniej za najbardziej nietopliwe, zostały stopione. I tak Gaudin stopił kwarc i wapno, Despretz stopił za pomocą prądu galwanicznego krzem, bor, tytan i molybden. Ten ostatni uczony podaje, że udało mu się doprowadzić węgiel do stanu zmiękczenia i że nawet w naczyniach, w których ciało to się znajdowało, pojawiły się wyraźne, stopione kulki. Należy zauważyć jeszcze, że niektóre ciała stałe pod wpływem ogrzewania, zamiast topić się, ulegają rozkładowi, jak np. węglan wapnia, celuloza i t. p. Węglan wapnia topi się wprawdzie, gdy jest ogrzewany w naczyniu o silnych ścianach i hermetycznie zamkniętem; ciało to częściowo ulega wtedy rozkładowi i wydziela kwas węglany, który wywiera pewne określone ciśnienie, przyczem pozostała nierozłożona część węglanu wapnia topi się. Niektóre wreszcie ciała stałe pod wpływem ciepła nie odrazu ulegają zmianie tego stanu w stan ciekły, lecz przechodzą kilka stanów pośrednich, jednocześnie zaś termometr wskazuje wtedy stopniowe podnoszenie się temperatury. Z początku ciastowato-miękkie stają się coraz bardziej ciekłe. Szkło np. w stanie takiej miękkości jest nader plastyczne; można je wtedy wydymać, wyciągać w długie nici i w ogóle nadawać mu wszelkie dowolne kształty. Również żelazo i platyna

przechodzą, przed stopieniem, przez taki stan pośredni, w którym są bardziej miękie i łatwiej dają się kuć.

Powiedzieliśmy wyżej, że temperatura ciała topniejącego jest stałą; innemi słowy jest ona niezależną od temperatury tego źródła ciepła, które ogrzewa to ciało. Jeżeli w danym przeciągu czasu ciało otrzymuje większą ilość ciepła, wtedy topi się szybciej, lecz temperatura jego nie zmienia się. Własność ta pozwoliła nam wszakże oznaczyć jeden ze stałych punktów na skali termometrycznej. Dopiero wtedy, gdy już cała masa ciała przeszła w stan ciekły, dalsze ogrzewanie wpływa na podniesienie jego temperatury.

Fakt ten pierwszy zauważył Deluc przy topieniu lodu. Dowodzi on, że chcąc przeprowadzić jakieś ciało ze stanu stałego w ciekły, nie dosyć jest ogrzać je do temperatury topliwości, lecz tak ogrzanemu ciału należy jeszcze dostarczać wciąż tego, co nazywamy ciepłem. Ciepło to nie podnosi temperatury ciała, lecz przy niezmiennej jego temperaturze zużywa się na zamianę jego w ciało ciekłe. Ponieważ dla termometru ciepło to znika całkowicie, otrzymało ono nazwę *ciepła utajonego*.

Następujące doświadczenie Black'a dowodzi w sposób bardzo wymowny, że przy topieniu ciała pewna ilość ciepła ulega utajeniu. Zmieszajmy kilogram drobno tłuczonego lodu, mającego dokładnie temperaturę 0^0, z kilogramem wody przy temperaturze 80^0 i poruszajmy dostatecznie tę mieszaninę, a lód całkowicie się stopi. Przy zachowaniu pewnej ostrożności otrzymamy wtedy 2 kilogramy wody, mającej temperaturę 0^0. Wynika z tego, że całe ciepło, jakie oddał kilogram wody przy oziębieniu od 80^0 do 0^0, zostało zużyte na to, ażeby kilogram lodu przy 0^0 zamienić w kilogram wody przy 0^0, temperatura zaś wcale się przytem nie podnosi. W istocie tedy podczas topienia ciał ciepło znika jako takie i zużywa się na przezwyciężenie spójności cząstek ciała stałego. Fakt ten czytelnik zrozumie dopiero wtedy, gdy pozna teoryę ciepła.

Zgodzono się, ażeby tę ilość ciepła, jaką przy stopieniu pochłania jednostka wagi danego ciała, nazwać utajonem ciepłem topliwości tego ciała. W jednym z następnych rozdziałów po-

znamy metody, pozwalające mierzyć te ilości ciepła, tutaj nadmienimy tylko, że jednostka wagi każdej substancyi potrzebuje do stopienia stałej ilości ciepła i że liczba wyrażająca ją, jest nową daną specyficzną, służącą do scharakteryzowania substancyi.

Ciało, topiąc się, powiększa swą objętość. Znamy tylko kilka wyjątków z tego ogólnego prawa, a mianowicie lód, lane żelazo, bizmut, antymon i srebro. Zwykle zmiana objętości występuje nagle w chwili topienia. Billet jeden z pierwszych oznaczył rozszerzenie, jakie wtedy następuje; badał on fosfor, siarkę i jod. Kopp rozciągnął badania podobne na większą ilość substancyj. Gdy chodziło o takie naprzykład ciało jak stearyna, używał on termometru z rurką, podzieloną jak zwykle na części o jednakowej objętości; stosunek tych części do objętości zbiornika był wiadomy. Stearynę w stanie ciekłym wprowadzano do przyrządu i pozwalano jej w nim zakrzepnąć, następnie ogrzewano ten rodzaj termometru i obserwowano objętości, jakie kolejno zajmowała stearyna przy rozmaitych temperaturach. Znając spółczynnik rozszerzalności sześciennej szkła przyrządu, można było oznaczyć absolutne powiększanie się objętości, zajętej przez stałe ciało, napełniające termometr, oraz ocenić nagłą jej zmianę, towarzyszącą stopieniu. Stała stearyna przedstawia tę ciekawą właściwość, że przy 50° objętość jej zmniejsza się nagle w stosunku 1 do 0,9775, następnie od 50° do 60° rozszerza się w sposób zwykły; topi się przy 60° i w tej chwili objętość jej powiększa się odrazu w stosunku 1 do 1,0496.

Fig. 413. Przyrząd Koppa.

Gdy badane ciało było twardszem od poprzedniego, Kopp wprowadzał je pod postacią walca do szklanego naczynia tak, że ono napełniało je całkowicie (fig. 413 C.); naczynie zaś z kolei umieszczał w długim zbiorniku *V*, podobnym do zbiornika termometru i połączonym z wązką rurką *T*, podzieloną na części o jednakowej objętości. Rurka i zbiornik są połączone za pomocą nieprzemakalnego korka. Zbiornik i część rurki napełnia się cieczą, nie działającą chemicznie na dane ciało stałe (zawarte w naczyniu *C*) i rozszerzalność której dla ro-

zmaitych temperatur jest znaną. Ponieważ znano także wagę wprowadzonego ciała stałego oraz wagę cieczy, napełniającej przyrząd do 0 podziałek, można było obliczać, na zasadzie gęstości , objętość obu substancyj przy danej temperaturze. Gdy następnie przyrząd zanurzono w kąpieli z oliwy, którą stopniowo ogrzewano, wtedy zmiana wysokości słupa cieczy w rurce T pozwalała śledzić za powiększaniem się objętości ciała stałego przy rozmaitych punktach skali termometrycznej, a więc także w chwili zmiany stanu jego w ciekły. Przytaczamy tutaj niektóre rezultaty Kopp'a [1]):

	Temperatura topliwości	Nagła zmiana objętości podczas topienia w stosunku
Fosfor	44°	1 do 1,0343
Siarka	115°	1 do 1,0500
Wosk	64	nieznaczne
Kwas stearynowy	70°	1 do 1,1100
Stearyna	60°	1 do 1,0496.

Kopp mierzył także kurczenie się lodu w chwili topienia i znalazł, że objętość jego zmieniała się w stosunku 1 do 0,814. Ciekawy ten fakt objaśnia wiele zjawisk, o których będziemy mówili w następnym paragrafie.

Dawniej sądzono, że temperatura topliwości ciała jest niezależna od zewnętrznych warunków, lecz Thomson i Clausius, drogą teoretycznych rozumowań, doszli do wniosku, że zmiana ciśnienia, pod jakiem ciało pozostaje, musi wpływać także na zmianę jego temperatury topliwości. Jeżeli topieniu towarzyszy powiększenie objętości, to oczywiście, że wszystko co przeszkadza rozszerzaniu się ciała stałego, musi opóźniać przejście jego w stan ciekły; stosuje się to do większości ciał. Przeciwnie dla substancyj, które przy przejściu ze stanu stałego w ciekły zmniejszają swą objętość, jak np. lód, bizmut, każdy czynnik, wpływający na zbliżanie się ich cząstek, musi przyśpieszać topienie tak, że ono może wtedy rozpocząć się przy niższej temperaturze. I tak

---

[1]) Boutan et d'Almeida. Cours de Physique.

lód przy ciśnieniu większem od ciśnienia atmosferycznego, powinien topić się przy temperaturze niższej, aniżeli 0°. Teoretyczne te wyniki J. Thomsona i Clausiusa znalazły potwierdzenie na drodze doświadczalnej, mianowicie William Thomson dowiódł ich prawdziwości dla wody, Bunsen zaś dla dwóch innych ciał. William Thomson ściskał lód w przyrządzie, podobnym do tego, jakim posługiwano się przy badaniu ściśliwości gazów i znalazł, że przy ciśnieniu 8,1 atmosfer, temperatura jego topliwości spadła do — 0,0585° C, przy ciśnieniu zaś 16,8 atmosfer do — 0,1287° C.

Doświadczenie W. Thomsona powtórzył następnie w nieco zmienionej formie Mousson i otrzymał równie zadawalniające rezultaty. Ściskał on wodę i przekonał się, że gdy jednocześnie była wystawiona na wpływ niskiej temperatury, lecz wysokiego ciśnienia, wtedy nie ulegała zamarzaniu; innym znów razem ściskał lód i pokazał, że przy nizkiej temperaturze ciało to topiło się. W tem ostatniem doświadczeniu Mousson, chcąc wywierać bardzo silne ciśnienie, zmuszony był posługiwać się nader mocnem naczyniem metalowem. Ponieważ nieprzezroczyste ściany tego naczynia nie pozwalały dojrzeć, w jakiej mianowicie chwili lód zmieniał swój stan, eksperymentator uciekł się do następującego sposobu.

Stalowy pryzmat *P* (fig. 414), wydrążono na wylot w kierunku jego długości; powstały przez to kanał można było od dołu silnie zamknąć za pomocą szruby *O*, z góry zaś, również za pośrednictwem szruby i mutry *E*, można było weń wciskać tłok *A*. Otóż po zamknięciu górnego otworu i odwróceniu, napełniono wydrążenie przegotowaną wodą, wpuszczono mały kawałek miedzi i wystawiono przyrząd na działanie zimna. Woda zamarzła i utworzyła massywny cylinder lodu *K*. Następnie zaciśnięto silnie dolną szrubę *O* i przymocowano przyrząd w taki sposób, że ów kawałek miedzi, zamrożony wewnątrz lodu, znajdo-

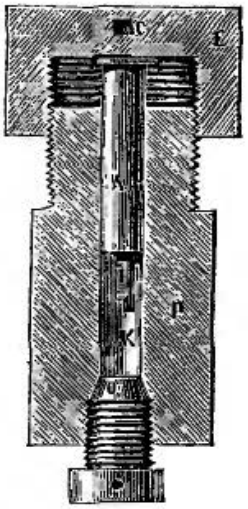


Fig. 414. Przyrząd Moussona.

wał się obecnie u góry (*J*), tuż pod tłokiem. W celu uniknięcia wszelkiego ogrzania, otoczono cały przyrząd mieszaniną oziębiającą, której temperatura dochodziła do 18° poniżej zera. Gdy wciśnięto tłok do wnętrza wydrążenia na 9 blizko milimetrów, przez co wytworzono tam ciśnienie równe, według Moussona, 13000 atmosfer i następnie otworzono dolną szrubę *O*, wtedy z otworu wyszedł najprzód ów kawałek miedzi, po nim zaś walec lodu. Dowodzi to, że pod wpływem wielkiego ciśnienia, jakie tłok wywierał na lód, ten ostatni zamienił się w wodę, wskutek czego miedź spadła na dolną szrubę, jakkolwiek przy wyjmowaniu tej szruby stopiony lód w obec nieustającego zimna znów zamarzał.

Doświadczenie to pokazuje, że przy owem wysokiem ciśnieniu i temperaturze — 18° lód znajdował się w stanie ciekłym, czyli, że jego temperatura topliwości obniżyła się wtedy o 18°.

Widzimy tedy, że temperatura topliwości lodu nie jest zupełnie stałą, zmienia się bowiem zależnie od zewnętrznego ciśnienia; z drugiej jednak strony zmiany te przy niewielkich wahaniach w ciśnieniu są tak nadzwyczajnie małe, że przy określaniu jednego ze stałych punktów na termometrze temperaturę topliwości lodu można uważać za stałą.

Co do podnoszenia się temperatury topliwości innych ciał pod wpływem ciśnienia, to Bunsen dowiódł tego dla olbrotu i parafiny, przyczem okazało się, że zmiany tej temperatury są daleko znaczniejsze, aniżeli dla wody. Do podobnych rezultatów doszedł także Hopkins przy badaniu temperatury topliwości olbrotu, wosku, siarki i stearyny. Pod ciśnieniem 1 atmosfery wosk np. topi się przy 64°,5 C, pod ciśnieniem 519 atmosfer temperatura ta wynosi już 74°,5 C, wreszcie pod ciśnieniem 792 atmosfer dochodzi ona do 80°,2 C.

Temperatura topliwości mieszaniny, powstałej przez stopienie kilku substancyj, różni się zawsze od temperatury topliwości każdej z tych substancyj, wziętej oddzielnie, przyczem pierwsza jest zwykle niższą od ostatniej. Naprzykład *ołów* topi się przy 330°C, *bizmut* przy 265°C, *cyna* przy 230°C, stop zaś składający się z ośmiu części ołowiu, ośmiu części bizmutu i trzech części cy-

ny, topi się już przy 94°,5 C, a więc zamienia się w ciecz po wrzuceniu do wrzącej wody. Stop z jednej części cyny i półtory części ołowiu topi się przy 211° C. Temperatura topliwości mięszaniny kwasów tłuszczowych jest zawsze niższa od temperatury topliwości kwasu najtrudniej topliwego i często niższą od temperatury topliwości kwasu, który najłatwiej się topi. Nawet gdy do mięszaniny dwóch kwasów dodamy nieco substancyi trudniej topliwej, temperatura topliwości jeszcze się obniża. I tak np. kwas stearynowy topi się przy 70°, kwas palmitynowy przy 62°, mieszanina zaś z 30 części pierwszego i 70 części drugiego topi się już przy 55°. Dla innych jeszcze substancyj zaobserwowano obniżenie temperatury topliwości w mieszaninie i spożytkowano fakt ten w celach technologicznych. Rozmaite środki, służące do tego, ażeby trudno topliwe metale uczynić łatwiej topliwemi, opierają się na znajomości tego faktu. Często substancya dodawana w tym celu do innej, jest trudniej topliwą, aniżeli ta ostatnia. Stal np. topi się łatwiej, niż żelazo, różni się zaś od niego jedynie zawartością węgla.

Ciało stałe może także zmienić swój stan skupienia w warunkach, zupełnie odmiennych od tych, o jakich mówiliśmy dotychczas. I tak np. rozpuszczanie się soli kuchennej lub cukru w wodzie, jodu w alkoholu, siarki i fosforu w siarku węgla, można porównać do topienia, tutaj bowiem, podobnie jak i tam, cząstki ciała stałego oddalają się od siebie. Podczas rozpuszczania ciał stałych zachodzi również zjawisko utajania się ciepła. Wrzućmy do wody drobno sproszkowaną sól i rozpuśćmy ją szybko za pomocą wstrząsania, a zobaczymy, że zanurzony w cieczy termometr znacznie się obniży. Jedna część drobno sproszkowanego salmiaku, rozpuszczając się szybko w dwóch częściach wody, powoduje obniżenie temperatury równe 20°.

Przy rozpuszczaniu rozdział cząstek jest jeszcze zupełniejszy, aniżeli przy topieniu. Ciało, które się rozpuszcza, pochłania najprzód ciepło topliwości, oprócz tego pochłania ono jeszcze pewną ilość ciepła, które się zużywa na rozprowadzenie cząstek jego po całej masie cieczy, to jest na jego dyffuzyę. Jeżeli przy rozpuszczaniu nie zachodzi żadna reakcya chemiczna, cie-

pło pochłonięte przez ciało, które się rozpuszcza, stanowi sumę dwóch ilości: ciepła topliwości i ciepła dyffuzyi. Person dowiódł, żeroztwór pochłania tem więcej ciepła, im bardziej rozcieńcza go się wodą. Przygotowanie roztworu z jednego grama soli wymaga rozmaitej ilości ciepła, zależnie od ilości wody, w której się sól rozpuszcza. Im mniej jest wody, a więc im bardziej stężonym jest roztwór, tem mniej potrzeba ciepła do wytworzenia roztworu. Fakt ten staje się zrozumiałym w obec tego, że jak powiedzieliśmy, pewna ilość ciepła zużywa się na rozprowadzenie cząstek ciała rozpuszczonego po całym rozpuszczalniku. Jeżeli ta ilość ciepła, która się zużywa przy przejściu ciała ze stanu stałego w ciekły, czyli ciepło topliwości, jest niezależne od ilości rozpuszczalnika, to ciepło dyffuzyi musi wzrastać w miarę coraz większej ilości tego ostatniego, albowiem cząstki ciała rozpuszczonego przebywają wtedy dłuższe drogi.

Zjawisko pochłaniania ciepła przy rozpuszczaniu się niektórych ciał stałych znalazło praktyczne zastosowanie, a mianowicie w przygotowywaniu tak zwanej *mieszaniny oziębiającej*. Jeżeli np. podczas rozpuszczania się jakiejś soli w wodzie nie dopuścimy z zewnątrz żadnego ciepła, wtedy rozpuszczająca się sól będzie je czerpała z samej cieczy, wskutek czego ta ostatnia ulegnie oziębieniu. Widzieliśmy wyżej, że mięszanina jednej części salmiaku z dwiema częściami wody może spowodować obniżenie temperatury równe 20°. Mieszanina śniegu lub tłuczonego lodu z solą stanowi źródło daleko większego obniżenia temperatury, aniżeli mieszanina wody z solą. Dzięki przyciąganiu, istniejącemu pomiędzy cząstkami soli i cząstkami śniegu, ten ostatni topi się, w cieczy zaś powstałej w ten sposób, sól się rozpuszcza. Pochłanianie ciepła jest tedy tutaj podwójne: przy przejściu śniegu ze stanu stałego w ciekły oraz przy rozpuszczaniu się soli. Mieszanina taka oziębia się do temperatury zamarzania roztworu, niżej zaś temperatura jej nie spada dlatego, że przy dalszem oziębianiu część wody znów marznie, przyczem, jak wkrótce zobaczymy, wydziela się ciepło, utajone podczas topienia. Ciepło to podnosi znów temperaturę do punktu zamarzania roztworu. Doświadczenie potwierdza to w zupełności. Gdy

zmięszamy 1 kilogram śniegu z $^1/_3$ kilograma soli kuchennej, otrzymamy ciekłą masę o temperaturze — 21° C, która podług Rüdorff'a, jest właśnie temperaturą zamarzania nasyconego roztworu solnego. Mięszanina 3 części krystalicznego chlorku wapnia z 1 częścią śniegu lub tłuczonego lodu powoduje obniżenie temperatury do — 33° C, co także zgadza się z doświadczeniami Rüdorff'a, podług których temperatura zamarzania podobnego roztworu ma wynosić — 34° C.

Bardzo silną mieszaninę oziębiającą można otrzymać przez zmieszanie śniegu z takiemi cieczami, które dzięki swemu powinowactwu do wody powodują jego topienie i które następnie zmieszane z wodą posiadają bardzo nizką temperaturę zamarzania. Ma to miejsce przy mieszaniu śniegu z kwasem siarczanym, azotnym, solnym lub z innym jakim kwasem, zamarzającym dopiero przy nizkiej temperaturze. Oziębienie stanowi wtedy skutek utajania się ciepła przy przejściu śniegu w stan ciekły, najniższą zaś temperaturą, jaką można wtedy osiągnąć, jest temperatura zamarzania mieszaniny. Należy jednak zauważyć, że przy przygotowaniu mieszaniny oziębiającej ze śniegu i kwasu siarczanego, trzeba pilnie brać pod uwagę stosunek wagowy dwóch tych substancyj. Podczas bowiem gdy 5 części śniegu i 1 część kwasu siarczanego powodują silne oziębienie, to 5 części kwasu siarczanego i 1 część śniegu powodują silne podwyższenie temperatury. Kwas solny wreszcie i siarczan sodu są używane do zamrażania wody w tak zwanych sztucznych lodowniach, obecnie dość rozpowszechnionych; mieszanina 8 cz. siarczanu sodu i 5 cz. kwasu solnego obniża temperaturę do — 16°. Ponieważ codzienne używanie kwasów może stać się niebezpiecznem, lepiej jest używać mieszaniny azotanu amonu i wody; wprawdzie sól ta jest droga, lecz można ją za to, przez wyparowywanie roztworu, ciągle otrzymywać z tego ostatniego w stanie krystalicznym. W każdym jednak razie w obec mieszaniny tej woda marznie tylko wtedy, gdy temperatura otaczającego powietrza nie jest zbyt wysoka.

§ 2. Krzepnienie.

Krzepnienie cieczy stanowi zjawisko wprost przeciwne topieniu się ciał stałych; jak wiemy, te ostatnie topią się, gdy są dostatecznie ogrzane, naodwrót zaś ciecze krzepną, gdy są dostatecznie oziębione. Zjawiska obserwowane podczas topienia powtarzają się w odwrotnym kierunku przy krzepnieniu, a mianowicie termometr, zanurzony w cieczy, wystawionej na działanie zimna, spada z początku, lecz tylko tak długo, dopóki krzepnienie cieczy się nie rozpocznie. Od tej chwili termometr wskazuje *stałą temperaturę przez cały czas krzepnienia*, poczem dopiero znów poczyna spadać. Wynika z tego, że podczas procesu krzepnienia oswobadza się ciepło, albowiem ciało oddaje ciepło swemu otoczeniu dopóki jest od niego cieplejsze, a więc oddaje je tak dobrze podczas krzepnienia, jak i przed niem lub po niem. Ponieważ tedy podczas krzepnienia ciała temperatura jego nie spada, to należy przyjąć, że oddane otoczeniu ciepło zostaje zastąpione przez inne ciepło. W istocie tak jest, albowiem *ciepło utajone przy topieniu oswobadza się napowrót podczas krzepnienia*. Do prawa tego powrócimy w rozdziale o kalorymetryi.

Rozmaite ciecze krzepną przy nader różnych temperaturach, niekiedy bardzo wysokich, niekiedy znów średnich lub nizkich. W miarę wynajdywania coraz to nowych środków do obniżania temperatury, można było otrzymywać w stanie stałym takie ciecze, które do tego czasu znane były tylko w stanie ciekłym. I tak większość skroplonych gazów została zamrożoną, a mianowicie kwas węglany przy — 58°, amoniak przy — 75°, tlenek azotu przy — 100°, azot przy — 200°. Despretz pokazał, że alkohol, otoczony mieszaniną eteru, stałego kwasu węglanego i ciekłego tlenku azotu, przechodzi w stan lepki, pośredni między ciekłym i stałym. Wreszcie Wróblewski i Olszewski określili temperaturę zamarzania takich cieczy, jak chlorek fosforu, który marznie przy — 111°,8 i siarku węgla, który z początku gęstnieje i krzepnie przy — 116°.

Wspomnieliśmy już, że temperatura przy której ciało krzepnie, jest stałą, podobnie jak temperatura topliwości; jest ona nawet, dla jednej i tej samej substancyi, identyczna z tą ostatnią temperaturą. Lód naprzykład topi się przy 0^0, przy wyższych temperaturach nie może on już być stałym; podobnie woda w ogóle marznie przy 0^0, w zwykłych bowiem warunkach nie może ona pozostać ciekłą przy temperaturze niższej od 0^0. Wynika to w ogóle z określenia temperatury topliwości, jako takiej, przy której ciało przechodzi ze stanu stałego w ciekły; jeżeli bowiem własności ciała nie zmieniły się wskutek topienia, to musi ono krzepnąć przy tej samej temperaturze, gdyż w przeciwnym razie byłoby ono już ciekłem poniżej swego punktu topliwości. Temperaturą zamarzania nazywamy tę temperaturę, jaką termometr, zanurzony w cieczy, wskazuje wtedy, gdy krzepnienie jej się rozpoczęło.

Istnieją jednak przykłady które dowodzą, że można oziębić ciecz poniżej jej punktu zamarzania i pomimo to ona nie zmarznie. Fahrenheit pierwszy zauważył to ciekawe zjawisko. Napełnił on wodą szklaną kulę, połączoną z wązką rurką, którą ogrzewał do temperatury wrzenia wody i zalutowywał podczas, gdy ciecz ta wrzała. Przekonał się następnie, że gdy przyrząd oziębił się do -10^0 C, woda w nim zawarta była jeszcze ciekła. Lecz w chwili, gdy odłamano zalutowany koniec rurki, cała kula nagle napełniła się lodem. W innym znów wypadku, w którym oziębienie również doszło do -10^0 C, cała woda nagle zamarzła po przypadkowem wstrząśnieniu, jakiemu uległa kula. Dowodzi to, że w pierwszym wypadku powodem nagłego utworzenia się lodu nie było powietrze, które wtargnęło po odłamaniu zalutowanego końca rurki; prawdziwą przyczyną było wstrząśnienie towarzyszące odłamaniu. Od owego czasu wiele razy zaobserwowano, że gdy woda spokojnie się oziębia i nie ulega żadnemu wstrząśnieniu, wtedy może ona pozostać ciekłą przy temperaturze zamarzania. Lecz gdy woda taka ulegnie najmniejszemu wstrząśnieniu, albo lepiej gdy zetknie się z kawałkiem lodu, wtedy cała jej masa odrazu zmarznie. Gay-Lussac pokrył wodę cienką warstwą oliwy, chroniącą ją od dostępu powietrza i przy

spokojnem oziębianiu doprowadził jej temperaturę do — 12° C, przy której woda znajdowała się jeszcze w stanie ciekłym. Despretz zaś utrzymał wodę w tym stanie przy temperaturze — 20° C. W każdym jednak razie cała masa wody nagle zamarzała, skoro tylko została dotkniętą przez obce ciało.

Zjawisko to nie jest właściwem tylko wodzie, odnajdujemy je bowiem także w innych ciałach. Można np. utrzymać fosfor w stanie ciekłym przy temperaturze o wiele niższej od jego zwykłej temperatury topliwości, równej 44°,2 pod warunkiem, że będzie się oziębiał w spokojnej wodzie. Figura 415 przedstawia przyrząd, wymyślony przez Gernez'a, który pozwala z łatwością urządzić odnośne doświadczenie z fosforem. Do wielkiego balonu o kilku litrach objętości, napełnionego wodą dystylowaną, wprowadza się dwie długie rurki, zamknięte u dołu i osadzone w szyjce balonu za pomocą korka, przepuszczającego także termometr, który wskazuje temperaturę wody. Każda z rurek zawiera fosfor, pokryty warstwą wody grubości 2 do 3 centymetrów. Doświadczenie rozpoczyna się od tego, że ogrzewa się wodę w balonie do 45° i wprowadza doń obydwie rurki, zawierające stopiony fosfor. Przyrząd pozostawiony samemu sobie oziębia się, przyczem fosfor pozostaje ciekłym poniżej 44°,2. Doświadczenie to może trwać kilka godzin, z powodu powolnego oziębiania się użytej masy wody, temperatura zaś może spaść do 30° a fosfor nie skrzepnie. Kawałek fosforu bezkształtnego, wrzucony wtedy do rurki, nie powoduje krzepnienia ciekłego fosforu, w niej zawartego, natomiast krzepnie on natychmiast po wprowadzeniu doń odrobiny fosforu zwykłego albo szklanej pałeczki, którą przedtem zetknięto z takim fosforem.

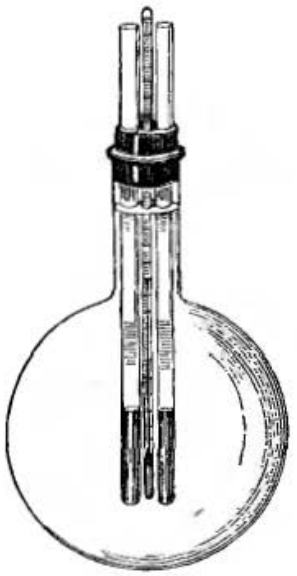


Fig. 415. Przyrząd Gernez'a.

Siarka przedstawia pod omawianym tutaj względem szczególnie ciekawe zjawisko. Ciało to topi się przy 115°, lecz mo-

żna je również utrzymać w stanie stopionym poniżej tej temperatury. Otóż jeżeli do ciekłej siarki, mającej temperaturę 110°, wprowadzimy oktaedryczny kryształ siarki, stopiona masa nie ulegnie zmianie stanu, to jest pozostanie ciekłą. Lecz gdy wrzucimy do niej kryształ pryzmatyczny, skrzepnie ona natychmiast, przyczem krzepnienie będzie rozchodziło się od wrzuconego kryształu po całej masie siarki. Wiadomo zaś, że poniżej 100° siarka krystalizuje w oktaedry, podczas gdy powyżej 100° jedynie możliwą formą krystaliczną jest pryzmat skośny.

Wprowadzenie stałej cząstki tego samego gatunku nie jest koniecznie potrzebne do wywołania skrzepnienia ciała, jeszcze ciekłego przy temperaturze niższej od jego temperatury topliwości. Pewien wpływ *mechaniczny, jak tarcie* pałeczki szklanej, opartej o dno naczynia i obracanej w cieczy, wystarcza w ogóle do wywołania jej skrzepnienia. Wiemy także, że nagły ruch nadany cieczy może spowodować ten sam rezultat.

W chwili gdy ciecz taka krzepnie, oswobadza się zawsze pewna ilość ciepła, które może doprowadzić ciało do temperatury jego normalnej topliwości. Gdy w przytoczonych wyżej doświadczeniach Fahrenheit'a, Gay-Lussac'a i innych, woda oziębiona do — 12° albo nawet do — 20°, nagle zamarzła, wtedy temperatura jej podniosła się do zera. Większa część normalnego utajonego ciepła topliwości zachowuje się tedy w takiej cieczy i oswobadza momentalnie przy jej zamarzaniu. Twierdzenie, że temperatury zamarzania i topliwości są identyczne nie zostaje więc wcale obalonem przez fakt, że ciało może pozostać ciekłem poniżej punktu topliwości, należy tylko pamiętać o tem, że temperaturą topliwości nazywamy tę temperaturę, jaką termometr, *zanurzony w cieczy, wskazuje w chwili, gdy ona poczyna* krzepnąć.

Woda, zawierająca rozpuszczoną sól, marznie przy niższej temperaturze, aniżeli czysta woda. Oprócz tego z roztworu solnego wydziela się pod postacią lodu tylko czysta woda, jak tego dowodzi znany fakt, że w zimnych miejscowościach poddają morską wodę, przeznaczoną do wydobywania soli, częściowemu zamarzaniu i otrzymują przez to roztwór bogatszy w sól. Rüdorff

dowiódł tego bezpośrednio za pomocą doświadczeń. Badał on także specyalnie zmiany temperatury zamarzania wody, zależne od natury rozpuszczonej soli oraz od jej ilości. Z licznych jego doświadczeń wynika, że wszystkie sole obniżają punkt zamarzania wody i że obniżenie to jest proporcyonalne do procentowej zawartości soli w roztworze, to jest do tej ilości, jaka przypada na 100 części wody.

Ciało rozpuszczone można napowrót przeprowadzić w stan stały, usuwając rozpuszczalnik za pomocą parowania. Można to osiągnąć także przez obniżanie temperatury, jeżeli dane ciało jest bardziej rozpuszczalne na gorąco, aniżeli na zimno. W jednym i w drugim wypadku roztwór może być doprowadzony do stanu nasycenia. Otóż jeżeli po osiągnięciu tego stanu dalej usuwamy rozpuszczalnik, albo też dalej oziębiamy, to—w razie gdy w roztworze znajduje się choćby jedna cząstka *stała* substancyi rozpuszczonej — ciało rozpuszczone zawsze poczyna krzepnąć i pozostała masa substancyi przechodzi w stan stały, zwykle pod postacią kryształów. W razie zaś gdy nie ma w roztworze stałej cząstki materyi rozpuszczonej, krzepnienie nie koniecznie następuje; dla bardzo znacznej ilości ciał, roztwór staje się wtedy tylko coraz bardziej stężonym i pomimo, że zawiera większą wagową ilość ciała od tej, jaka może się w nim rozpuścić przy tej samej temperaturze, to jednak zachowuje on to ciało w stanie ciekłym. Roztwór taki jest więcej niż nasycony. Roztwory wielu soli można z łatwością obserwować w stanie takiego nasycenia; pozostają one ciekłe w pewnych granicach temperatury, zależnych od rodzaju substancyi rozpuszczonej i rozpuszczalnika. W podobnych warunkach niezawodnym środkiem do wywołania skrzepnienia jest wprowadzenie do cieczy odrobiny tej samej substancyi, jaka się znajduje w roztworze albo nawet ciała mającego z nią analogiczną budowę chemiczną. Wprowadźmy do szklanej rurki, ostro zakończonej (fig. 416 str. 704), skoncentrowany i gorący wodny roztwór siarczanu sodu i gotujmy go w celu wypędzenia powietrza z rurki, następnie zalutujmy tę ostatnią za pomocą dmuchawki i pozwólmy jej się oziębić. Pomimo, że roztwór oziębia się do zwykłej temperatury i zawiera

więcej siarczanu sodu, niż może go się rozpuścić przy danej temperaturze, to jednak nic się w roztworze nie osadza. Lecz gdy po odłamaniu zalutowanego końca rurki wprowadzimy do niej minimalny chociażby kryształ siarczanu sodu, roztwór skrzepnie. Igiełki krystaliczne tworzą się z początku na swobodnej powierzchni cieczy, następnie krystalizacya obejmuje stopniowo całą jej masę. Jednocześnie także oswobadza się dużo ciepła. Często nie potrzeba nawet wprowadzać kryształu, który powoduje krzepnienie, gdyż powietrze, wchodząc do rurki, może także wywołać krystalizacyę roztworu, zawiera ono bowiem— jak tego dowiodły bezpośrednie badania Gernez'a—pyłki krystalicznego siarczanu sodu. Co do wpływu czynników mechanicznych na roztwory, o których mowa, większość tych ostatnich nie krzepnie pod ich działaniem, mniejszość zaś zachowuje się podobnie jak ciała ciekłe poniżej punktu topliwości. Do tej drugiej grupy należą naprzykład roztwory więcej niż nasycone chlorku wapnia, które wylane na szklaną tafelkę, jeszcze nie krystalizują, a krzepną dopiero wtedy, gdy tafelkę tę potrze się dość żywo miedzianą naprzykład pałeczką.

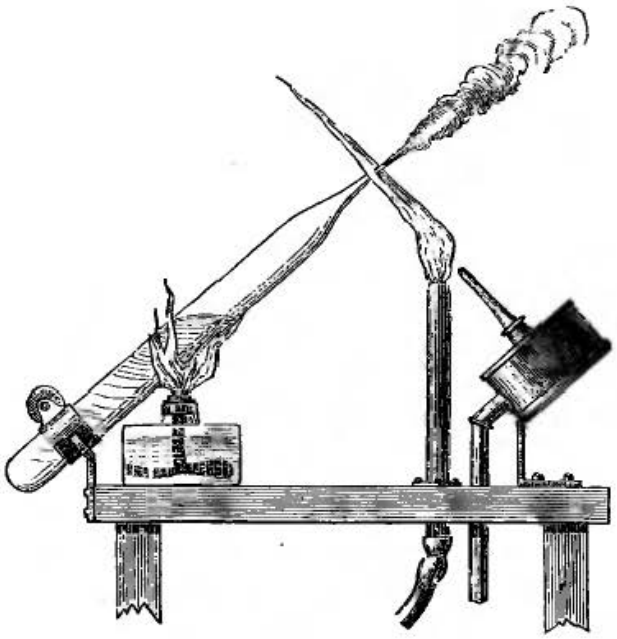


Fig. 416. Doświadczenie z roztworem.

Dodajmy wreszcie, że dostateczne obniżenie temperatury powoduje krzepnienie wszystkich podobnych roztworów. I tak np. roztwór więcej niż nasycony octanu ołowiu, który zachowuje się bez zmiany przy 15°, zaczyna krzepnąć po oziębieniu, za pomocą lodu, jednego punktu naczynia, zawierającego tenże roztwór; pierwszy kryształ, który się wtedy tworzy, powoduje skrzepnienie całej masy.

W każdym razie w chwili skrzepnienia oswobadza się ciepło, dzięki czemu występuje często dość znaczne podniesienie się temperatury. Ciepło to może nawet doprowadzić do wrzenia jakąś ciecz łatwo lotną, np. eter, zawarty w małej rurce i wprowadzony do wnętrza roztworu. Doświadczenie udaje się bardzo dobrze z podsiarkonem albo octanem sodu, do których dodano nieco wody i które doprowadzono do stanu ciekłego; temperatura może się wtedy podnieść do 48° lub 55°, zależnie od tego, czy używa się pierwszego albo drugiego z tych ciał.

W ogóle ciecze krzepnąc, kurczą się, istnieją jednak i pod tym względem wyjątki. Jednym z ciekawszych jest zjawisko rozszerzania się lodu w chwili jego tworzenia się. Ciężar właściwy lodu przy 0° jest mniejszy od ciężaru wody przy tej samej temperaturze i to nam objaśnia dlaczego podszas zimy kry lodowe pływają po powierzchni rzek. Siła rozprężliwa lodu w chwili jego powstawania jest bardzo wielka, dzięki jej naczynia, zawierające wodę, pękają, gdy woda ta marznie, tkanki zaś młodych pędów roślinnych ulegają we wszystkich kierunkach rozdarciu, gdy termometr spada poniżej 0° podczas zimnych nocy w pierwszych dniach wiosny. Można bezkarnie zamrozić wodę w dolnej części karafki lub butelki, albowiem wtedy lód rozszerza się swobodnie i niema obawy, że naczynie pęknie. Lecz gdy najprzód zamrozi się wodę w szyjce butelki, wtedy powstały w tem miejscu lód tworzy bardzo mocny korek, opierający się powiększeniu objętości masy, umieszczonej pod nim, a ponieważ powiększenie to musi mieć miejsce, przeto ściany naczynia pękają. To nagłe rozszerzanie się wody objaśnia tak częste w zimie pękanie rur wodociągowych, które daje się spostrzedz dopiero w czasie odwilży, albowiem do tej chwili woda z rur wyciekać nie może, gdyż szczeliny w niej są zatkane przez lód. Tyndall napełniał wodą względnie małe żelazne butelki, których ścianki miały grubość $1^1/_2$ centym. i zamykał je za pomocą żelaznych korków, przyszrubowanych do szyjki. Gdy następnie wystawiał je na działanie silnego zimna, ulegały zawsze rozsadzeniu. Inne ciekawe doświadczenie wykonał pewiem major artyleryi. Napełnił on bomby wodą, do otworów wprowadził mocne żelazne korki

i wystawił na działanie zimna; podczas zamarzania wody jeden korek wyleciał z otworu z taką gwałtownością, że znaleziono go na odległości 150 metrów od bomby, jednocześnie z otworu wyszedł długi cylinder lodu. Druga bomba pękła poprzecznie, a przez szczelinę wyszedł gruby wałek lodu (fig. 417). Podobnie jak za pomocą lodu rozsadza się żelazne naczynia, tak też można to osiągnąć przez napełnianie ich stopionym bizmutem, szczelne zamknięcie i oziębienie.

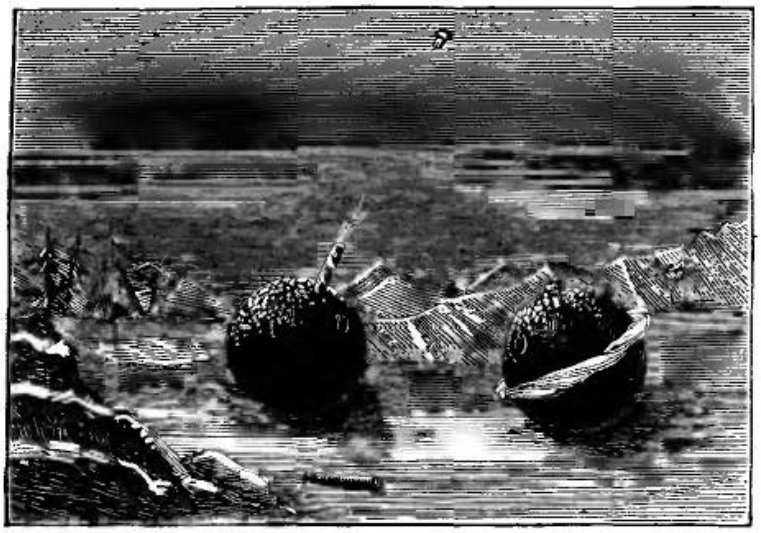
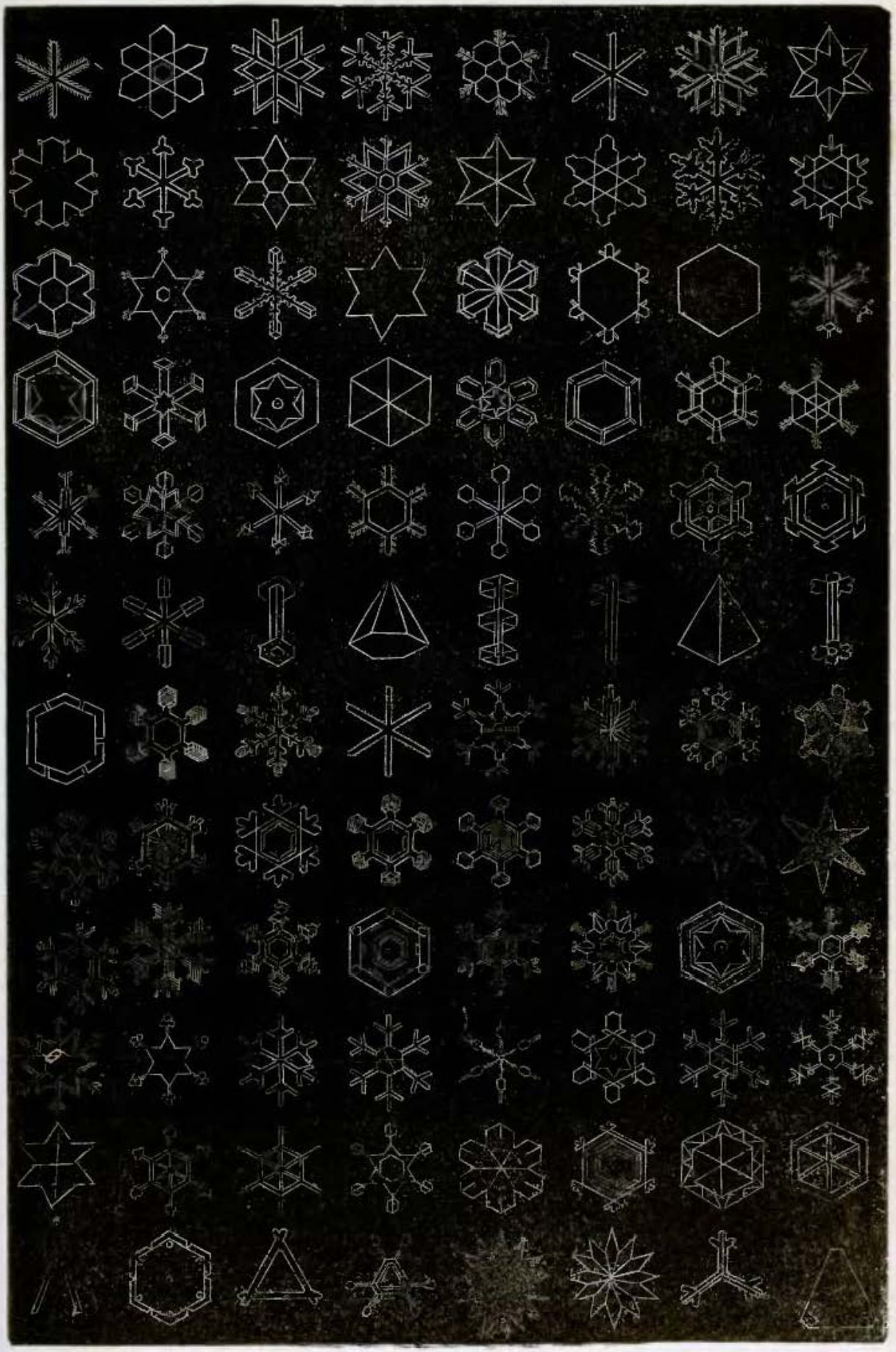


Fig. 417. Doświadczenie z marznącą wodą.

Woda, marznąc, tworzy kryształy, należące do systemu romboedrycznego. Są to kryształy jednoosiowe, jak spat islandzki, czego dowiodły obserwacye Brewstera i w ostatnich latach doświadczenia bardziej szczegółowe Bertin'a. Gdy para wodna, osiadająca w zimie na szybach okien, marznie, wtedy można wyraźnie rozróżnić małe kryształy pryzmatyczne, ułożone jedne obok drugich pod kątem 60° i tworzące rozgałęzienia bardzo prawidłowe, podobne w ogólnych zarysach do liści paproci. Gdy w spokojnem powietrzu pada śnieg, wtedy, zebrawszy płatki jego na jakim złym przewodniku np. na czarnem suknie i patrząc na nie przez lupę, widzimy małe pryzmaty hexagonalne, które tworzą razem figury zupełnie symetryczne (patrz tablicę p. t. „Kształt kryształów śniegu“).

Lód również posiada budowę krystaliczną, co można uwidocznić za pomocą następującego doświadczenia Tyndall'a. Na tafelkę lodu o ścianach równoległych i doskonale przezroczystych rzuca się wiązkę promieni słonecznych, za pomocą zaś soczewki otrzymuje się na ekranie powiększony obraz tej tafelki. Po pe-



Tabl. III. **Kształt kryształów śniegu** według **Scoresby'ego.**

Дозв. Ценз. Варшава, 9 Марта 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Wyższa Szkoła Kadrowa
Biblioteka
Filia

wnym czasie spostrzega się na ekranie gwiazdy, mające barwę nieco jaśniejszą, niż tło ogólne i przedstawiające pośrodku ciemną plamkę (fig. 418); są one podobne do kwiatów i dlatego doświadczenie to jest znane pod nazwą *kwiatów lodowych*

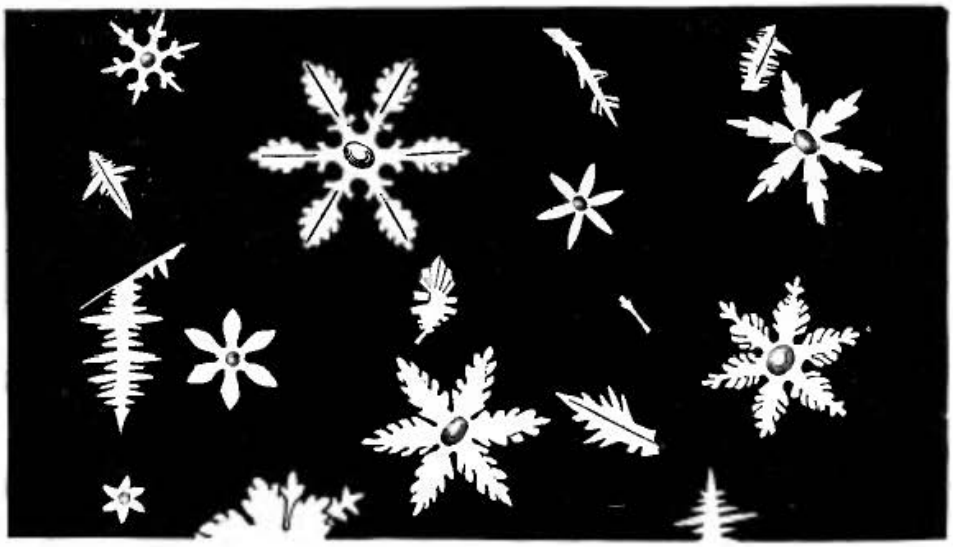


Fig. 418. Kwiaty lodowe.

Pod wpływem ciepła słonecznego kryształy lodu topią się; tutaj promień słoneczny działa jak skalpel bardzo delikatny, oddzielający kryształy te od otaczającej masy, w której są osadzone. Mała ciemna plamka jest próżnią, pozostałą po zmniejszeniu objętości, jakiemu ulega woda, przechodząca ze stanu stałego w ciekły.

Dwa kawałki lodu, zetknięte ze sobą, spajają się natychmiast, nawet gdy znajdują się w ciepłej wodzie. Spojenie to odbywa się tem szybciej, im silniej kawałki te są przyciskane jeden do drugiego. Gdy w naczyniu, napełnionem wodą, pływają małe odłamki lodu, wtedy można widzieć, jak one spajają się ze sobą w punktach zetknięcia; podnosząc jeden z nich, pociąga się jednocześnie pozostałe. Bryła lodu może być przepołowioną za pomocą zawieszonego na niej drutu żelaznego, który ciągną ku dołowi dwa ciężary, przymocowane do jego końców (fig. 419). Dwie połowy tej bryły spajają się napowrót w miarę jak drut przechodzi pomiędzy niemi i gdy ciężary spadły już na ziemię, można całą bryłę unieść za jedną z połów. Płaszczyznę spojenia

można odróżnić jedynie dzięki odbiciu, jakiemu światło ulega na jej powierzchni. Doświadczenie to, łatwe jak widzimy do powtórzenia, obmyślił J. Thomson.

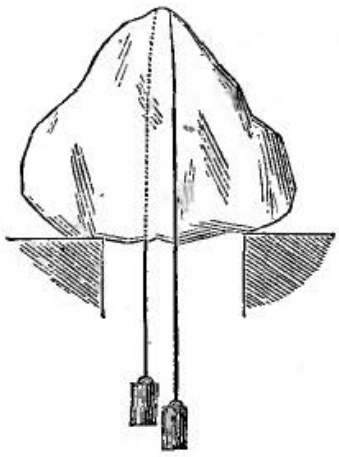


Fig. 419. Doświadczenie Thomsona.

Tyndall ściskał bardzo silnie kawałek lodu G (fig. 420) pomiędzy dwiema mocnemi deseczkami MM, zaopatrzonemi w wydrążenia CC, które razem dają jedną soczewkowatą jamkę. Z początku lód rozpada się na mnóstwo małych odłamków, które w ciągu kilku sekund spajają się i cała masa zamienia się w przezroczystą soczewkę, dokładnie wypełniającą ową jamkę. Przepuszczając prostą sztabę lodu kolejno przez szereg form coraz bardziej krzywych, można jej nadać kształt pierścienia. Tyndall otrzymał figury jeszcze bardziej złożone, lecz zawsze przezroczyste, tak jak gdyby lód był substancyą plastyczną.

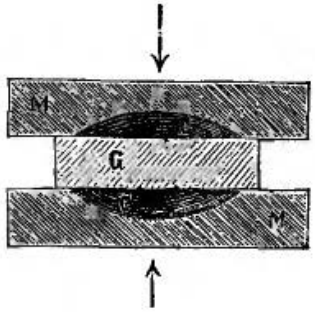


Fig. 420. Doświadczenie Tyndalla.

Pozorną tę plastyczność objaśnia nam fakt, o którym mówiliśmy w poprzednim paragrafie, a mianowicie, że lód ściskany topi się przy temperaturze niższej niż 0°; wtedy częściowo zamienia się on w wodę, wskutek zaś utajania się przytem ciepła, temperatura się obniża. Powstała woda, ściśnięta i oziębiona, zostaje wpędzona do szczelin; tutaj ciśnienie jest mniejsze i temperatura podnosi się do zera tak, że woda marznie napowrót i spaja oddzielne kawałki lodu. Na mocy przytoczonych doświadczeń objaśnia się obecnie ruchy lodników oraz łatwość przybierania w pochodzie kształtu dolin, służących im za łożysko. Lód jest więc tylko pozornie substancyą plastyczną i pod tym względem różni się od ciał, które będąc ogrzewane przy stałem ciśnieniu, przechodzą przez stan ciastowato miękki.

§ 3. Wrzenie.

Gdy ogrzewamy ciała stałe do pewnej określonej temperatury, przechodzą one, jak widzieliśmy, w stan ciekły; gdy następnie ogrzewamy ciecze, to z początku one się rozszerzają, lecz po osiągnięciu pewnej temperatury ulegają zmianie, analogicznej do topienia, a mianowicie przechodzą w stan lotny, czyli zamieniają się w parę. Gdy np. ogrzewamy wodę mającą już 100°, wtedy wewnątrz niej pojawiają się pęcherzyki, głównie na dnie i ścianach naczynia, które biegnąc do góry, podnoszą poczęści znajdującą się nad niemi wodę i powodują jej kipienie. Stają się one coraz większe, aż wreszcie, gdy dotkną powierzchni wody, pękają i zawarta w nich para uchodzi w powietrze. Powiadamy wtedy, że woda wrze. Przez dostatecznie długie gotowanie można w ten sposób całą ciecz zamienić w ciało lotne.

Ciała wrą przy ściśle określonej, charakterystycznej dla każdego z nich temperaturze, przyczem przyjmujemy, że znajdują się pod ciśnieniem zewnętrznej atmosfery, równem 760 milim. Temperatury wrzenia rozmaitych ciał różnią się nader znacznie pomiędzy sobą; niektóre ciała wrą przy względnie nizkiej temperaturze, jak eter siarczany (+ 36°) alkohol (+ 78°), a nawet poniżej 0° jak kwas siarkawy (— 10°). Inne ciała wrą dopiero przy wyższej temperaturze jak rtęć (+ 350°), olej lniany (+ 316°), fosfor (+ 290°). Są i takie ciała, jak trudno topliwe metale, których nie udało się jeszcze ogrzać do temperatury wrzenia, można jednak przypuścić, że i one mogłyby być doprowadzone do tego stanu, gdybyśmy znaleźli środki do wytworzenia dostatecznie wysokiej temperatury. Wreszcie istnieje pewna grupa ciał, których nie można doprowadzić do wrzenia dlatego, że przy wyższej temperaturze ulegają chemicznemu rozkładowi.

Wrzenie cieczy nietylko pod tym względem jest analogiczne do topienia, że poczyna się przy określonej temperaturze, lecz także i pod tym, że podczas wrzenia temperatura jest stałą, przy niezmiennem ciśnieniu. Zanurzywszy termometr we wrzącej

wodzie przekonywamy się, że—pomijając nieznaczne wahania— pokazuje on tę samą temperaturę dopóki woda wrze, spada zaś gdy wrzenie ustaje, a podnosi się tylko wtedy, gdy ogrzewamy dalej naczynie po wyparowaniu całej wody.

Ponieważ i tutaj ciepło z ogniska przechodzi do cieczy tak długo, dopóki się ją ogrzewa, wynika z tego, że i przy wrzeniu, to jest przy przejściu ciała ze stanu ciekłego w lotny, pewna ilość ciepła zostaje pochłoniętą czyli utajoną. Chcąc zamienić ciecz w ciało lotne nie dość jest ogrzać ją do temperatury wrzenia, należy ją bowiem dalej ogrzewać. Mniejsza lub większa ilość dostarczanego jej wtedy ciepła wpływa na przebieg procesu wrzenia w ten sposób, że przy silniejszem ogrzewaniu ciecz kipi mocniej i para uchodzi z niej w wielkiej ilości, przeciwnie przy słabszem ogrzewaniu, zjawisko jest powolniejsze i odbywa się stopniowo.

Podajemy tutaj temperaturę wrzenia dla niektórych ciał, pozostających pod ciśnieniem 760 milim.

Rtęć	350° C.	Benzol	80,4° C.
Olej lniany	316° „	Alkohol	78,4° „
Siarka	316° „	Eter octowy	74,3° „
Terpentyna	293° „	Siarek węgla	46,6° „
Fosfor	290° „	Eter siarczany	34,9° „
Jod	175° „	Bezwodny kwas siarczany	25° „
Woda	100° „	Aldehyd	20,8° „
Kwas azotny	86° „	Eter kwasu solnego	11° „

Powiedzieliśmy wyżej, że pomijając pewne wahania, temperatura wrzenia cieczy, przy niezmiennem ciśnieniu, jest stałą. Otóż jeżeli pod tem będziemy rozumieli temperaturę, jaką pokazuje termometr, zanurzony we wrzącej cieczy, to rzeczywiście znajdziemy tutaj wahania, albowiem rodzaj ścian naczynia, w którem wrze ciecz, wpływa wprawdzie nieznacznie, lecz wyraźnie na tę temperaturę. Gay-Lussac pierwszy badał dokładnie ten przedmiot i znalazł, że temperatura wody wrzącej w szklanem naczyniu jest wogóle wyższą od temperatury wody wrzącej w naczyniu metalowem. W tem ostatniem temperatura wody była zawsze równą 100°, niezależnie od kształtu i wielkości naczynia. Przeciwnie, w czystem szklanem naczyniu termometr

podniósł się do 101,23°; gdy do tegoż naczynia wprowadzono sproszkowane szkło, temperatura spadła do 100,33°, po wrzuceniu zaś opiłek metalowych spadła do 100°. Munke i Rudberg potwierdzili te rezultaty; pierwszy z nich podaje, że w naczyniach z różnych metali i różnego szkła temperatura wrzącej wody jest rozmaita, Rudberg zaś znalazł, że temperatura wody, wrzącej w żelaznem naczyniu, jest o 1,3° niższą niż w naczyniu szklanem.

Najrozleglejsze badania w tym kierunku przeprowadził Marcet; dowodził on, że temperatura wrzących cieczy zależy w znacznym stopniu od tego, czy dana ciecz przylega lub nie do ścian naczynia. Im silniejszem jest przyleganie danej cieczy do substancyi, z której naczynie jest zrobionem, tem wyższą jest temperatura wrzenia tejże cieczy. To nam objaśnia dlaczego woda wrze prędzej w naczyniu metalowem, aniżeli w szklanem oraz dlaczego jej punkt wrzenia spada po wrzuceniu opiłek żelaznych. Marcet pokrył wewnętrzną powierzchnię szklanej kolby cienką warstwą siarki i przekonał się, że woda w kolbie tej wrzała już przy 99,85°, podczas gdy przedtem, to jest w czystej kolbie, temperatura wrzenia wynosiła 101,2°. Po pociągnięciu wnętrza naczynia żelaznego lub miedzianego cienką warstwą gumy, zawarta w niem woda wrzała przy 99,8°. Oprócz tego Marcet urządzał jeszcze następujące doświadczenia. Do kolby z zielonego szkła, w której woda wrzała przy temperaturze 101°, wprowadził, po opróżnieniu z wody, stężony kwas siarczany i pozostawił tak przez kilka godzin, następnie przepłukiwał kolbę gorącą wodą tak długo, dopóki nie został w niej nawet ślad kwasu. Gdy potem w kolbie tej gotował dystylowaną wodę, przekonał się, że temperatura wrzenia podniosła się do 105° — 106° C. Podobny rezultat otrzymał z inną kolbą, na którą działał stężonym i gorącym roztworem potażu gryzącego: przed tem woda wrzała w kolbie przy temperaturze 101°, później zaś przy 103°. Działanie kwasu i potażu w tych doświadczeniach nietrudno nam będzie objaśnić, gdy przypomnimy sobie, że woda daleko silniej przylega do czystego szkła, niż do nieczystego. Kwas i potaż gryzący czyszczą doskonale kolbę, zabierają bowiem wszystkie przyle-

gające do niej cząstki, których nie można spłukać gorącą wodą. Z objaśnieniem tem zgadza się także fakt, że gdy do wody wrzącej przy 105° wrzucono odpadki żelazne, termometr zaraz spadł prawie do 100° i wrzenie stało się o wiele gwałtowniejsze. Gdy do wody, ogrzanej powyżej 100° i jeszcze nie wrzącej, wprowadzono takie odpadki, poczynała ona natychmiast gwałtownie wrzeć. Podobne rezultaty Marcet otrzymał także z innemi cieczami, które również podczas wrzenia posiadały rozmaitą temperaturę, zależnie od natury ścian naczynia, w którem wrzały. Tak np. temperatura wrzącego alkoholu (ciężar wł. 0,801) w metalowem naczyniu była równą 78,5°, w szklanej zaś kolbie wynosiła 79,20° [1]).

Pomimo tych różnic w temperaturze wrzących cieczy, zależnych od natury naczyń, możemy jednak twierdzić, że punkt wrzenia cieczy przy tem samem ciśnieniu jest stały, pod warunkiem, że temperaturą wrzenia będziemy nazywali nie tę temperaturę, jaką wskazuje termometr, zanurzony w samej cieczy, lecz tę *jaką pokazuje, gdy jest całkowicie otoczony parami wrzącej cieczy.* Rudberg oparł na tem przepis określania punktu wrzenia na termometrze, polegający jak widzieliśmy na tem, że przyrząd zanurza się jedynie w parze, wydobywającej się z wody, która wrze przy ciśnieniu 760 milim.

Doświadczenia Marceta, w których badał także temperaturę pary, pokazały w sposób bardzo przekonywujący, że podwyższenie temperatury wrzącej cieczy, zależne od ścianek naczynia, nie wpływa na temperaturę par tak, że ta ostatnia pod tem samem ciśnieniem jest zawsze stałą.

Lecz temperatura wrzenia cieczy zmienia się, gdy są w niej rozpuszczone pewne stałe substancye, które same się nie ulatniają, jak np. sole. Z roztworów solnych paruje jedynie czysta woda, jak to wynika z tego chociażby faktu, że przez wyparowanie takiego roztworu można otrzymać całą ilość zawartej w nim soli; w tym więc wypadku tylko woda przechodzi w stan lotny to jest

---

[1]) Wüllner. l. c. Do kwestyi tej powrócimy jeszcze przy objaśnieniu procesu wrzenia.

ona właściwie tylko wrze. Pomimo to jednak wodny roztwór solny wrze przy wyższej temperaturze, aniżeli czysta woda i to tem wyższej, im większą jest ilość rozpuszczonej soli. *Fakt ten* oddawna jest znany, lecz dopiero Legrand pierwszy zbadał dokładniej stosunek podwyższenia temperatury do ilości rozpuszczonych soli. Z tablicy obejmującej liczne rezultaty jego doświadczeń wyjmujemy dla przykładu niektóre tylko dane. I tak 39,7 części soli kuchennej rozpuszczone w 100 cz. wody podnoszą jej temperaturę wrzenia o 8°; 73,6 części chlorku wapnia w 100 częściach wody podnoszą tę temperaturę o 20° i takie same podwyższenie powodują 275,3 części azotanu amonu w 100 częściach wody. Co do temperatury pary z wrzących roztworów solnych, to Rudberg, na zasadzie całego szeregu swoich doświadczeń, przyjmował, że jest ona równą temperaturze pary, wydobywającej się z wrzącej czystej wody.

Twierdzono tedy, że para z wrzących roztworów solnych *również posiada tylko temperaturę* 100° i starano się na podstawie pewnych teoretycznych danych objaśnić dlaczego para z roztworu może jakoby być o kilkadziesiąt stopni mniej ciepłą, aniżeli sam roztwór. Dopiero Regnault wystąpił przeciwko temu twierdzeniu; wnioskował on, że ostatecznie nie można przypuścić, ażeby *para z wrzącego roztworu miała tak uderzająco niższą temperaturę* od temperatury górnych warstw roztworu. W istocie później Magnus dowiódł eksperymentalnie, że temperatura pary z wrzących roztworów solnych wynosi więcej niż 100°; w ogóle z doświadczeń Magnusa wynika, że temperatura takiej pary jest równa temperaturze samego roztworu czyli, że roztwory solne posiadają wyższy punkt wrzenia, aniżeli czysta woda.

Dotychczas mówiliśmy o wrzeniu cieczy przy ciśnieniu atmosferycznem, równem 760 milim i pod tym jedynie warunkiem przyjęliśmy, że punkt wrzenia jest stały dla jednej i tej samej cieczy, z wyjątkiem gdy są w niej rozpuszczone pewne substancye. Lecz punkt wrzenia cieczy zmienia się, gdy zewnętrzne działające na nią ciśnienie ulega zmianie. Można się o tem z łatwością przekonać gotując wodę w powietrzu atmosferycznem i mierząc — z zachowaniem pewnych ostrożności — temperatu-

rę pary, wydobywającej się wtedy z wody. Jedynie przy ciśnieniu 760 milim. temperatura pary jest równa 100°; przy słabszem ciśnieniu termometr wskazuje niższą temperaturę pary, przy silniejszem natomiast i punkt wrzenia się podnosi. Gdy ciśnienie barometryczne wynosi tylko 733 milim, woda wrze przy 99°, gdy ono jest równe 720 milim. wrze już przy 98,5°. Przeciwnie, gdy barometr podnosi się do 770 milim., temperatura pary równa 100,4°.

Za pomocą pompy powietrznej można urządzić niektóre doświadczenia, które dowodzą, że woda może wrzeć przy bardzo nizkiej temperaturze, jeżeli tylko zmniejszy się działające na nią ciśnienie. Ogrzejmy w naczyniu wodę do 50° i ustawmy je pod kloszem pompy powietrznej, a następnie rozrzedzajmy w nim powietrze dopóki manometr nie wskaże około 90 milim. ciśnienia; zobaczymy, że wtedy woda pocznie bardzo gwałtownie wrzeć, przyczem w całej jej masie pojawią się pęcherzyki pary, powiększające się i unoszące do góry, zupełnie tak samo jak w wypadku, gdy woda pod zwykłem ciśnieniem wrze przy 100°. Jeszcze wyraźniej można dowieść zależności punktu wrzenia od ciśnienia zewnętrznego przy użyciu przyrządu, przedstawionego na fig. 421.

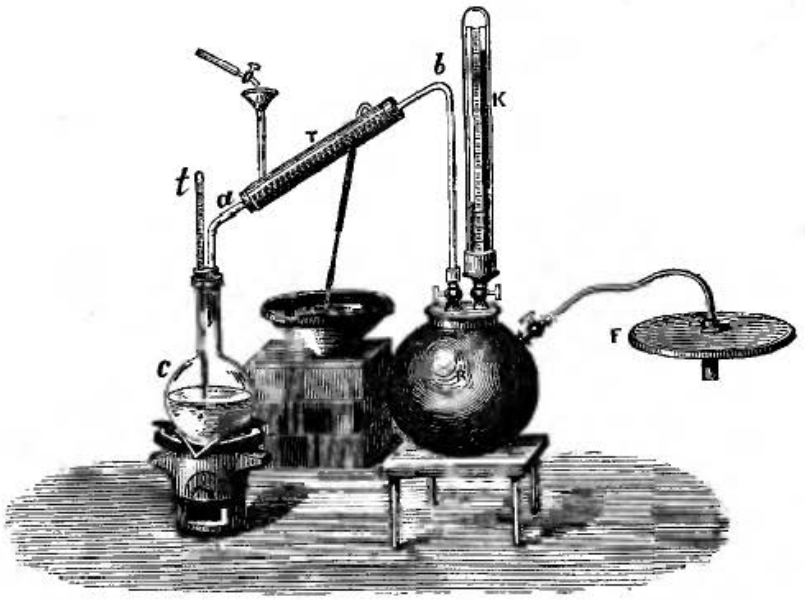


Fig. 421. Przyrząd służący do pokazania zależności punktu wrzenia od ciśnienia zewnętrznego.

Szklany balon C, do połowy napełniony wodą, komunikuje za pośrednictwem zgiętej rurki ab z dużym balonem R, w którym wytwarza się częściową próżnią za pomocą pompy powietrznej, stolik F której widoczny jest na rysunku. Manometr K wskazuje wielkość ciśnienia w przyrządzie, termometr zaś t, którego zbiornik jest zanurzony w górnej warstwie cieczy, pokazuje temperaturę. Rurka ab jest otoczona rękawem T, przez który ciągle przepływa prąd zimnej wody; dzięki temu rurkę utrzymuje się stale przy nizkiej temperaturze. Po wypompowaniu do pewnej granicy powietrza z balonu R — a więc i z całego przyrządu—woda w naczyniu C wrze przy temperaturze niższej, odpowiedniej do zmniejszonego ciśnienia. Gdy np. zmniejszymy ciśnienie w przyrządzie do 30 milim. i następnie będziemy ogrzewali wodę w naczyniu C, ta ostatnia pocznie wrzeć w chwili, gdy termometr dojdzie do 29°. Podczas wrzenia termometr wskazuje stale tę samę temperaturę, pod warunkiem, że ciśnienie nie ulega zmianie, z czego wynika, że punkt wrzenia w tym wypadku jest równie stały, jak pod ciśnieniem atmosfery. To samo stosuje się do innych cieczy. Gdy do balonu C wprowadzimy, zamiast wody, absolutny alkohol, zobaczymy, że pod ciśnieniem 30 milim. wrze on już przy 11° oraz, że temperatura wrzenia jest stałą, dopóki ciśnienie wewnątrz przyrządu się nie zmienia.

Wreszcie i bez pompy powietrznej można pokazać, jaka istnieje zależność pomiędzy temperaturą wrzenia cieczy i zewnętrznem ciśnieniem. Gotuje się mianowicie wodę w szklanej kolbie przez dość długi czas tak, ażeby powietrze wyszło z niej całkowicie i następnie szczelnie zakorkowuje. Po odjęciu kolby od ognia wrzenie wody ustaje. Lecz gdy po znacznem nawet oziębieniu kolby obrócimy ją dnem do góry (fig. 422) i będziemy leli na nią zimną wodę, ciecz w kolbie pocznie znów silnie wrzeć. Po zamknięciu bowiem kolby znajdowała się w niej jedynie woda oraz para wodna, cisnąca na nią tak samo jak powietrze. Pod wpływem oziębiającego wpływu zimnej wody część pary w kolbie skrapla się, przez co ciśnienie wewnątrz przyrządu zmniejsza się o tyle, że temperatura cieczy przewyższa wtedy jej tem-

peraturę wrzenia przy tem ciśnieniu i dlatego wrzenie znów się rozpoczyna.

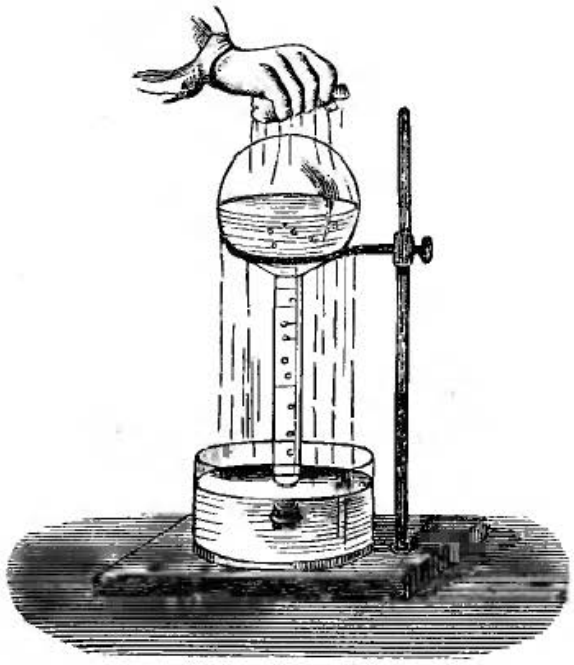


Fig. 422 Wrzenie wody przy temperaturze niższej niż 100°

Podnoszenie się temperatury wrzenia przy powiększonem ciśnieniu znalazło praktyczne zastosowanie w tak zwanym kociołku Papina, w którym wrząca woda ma tak wysoką temperaturę, że można w niej rozgotowywać pewne substancye, jak koście, skórę, ścięgna, czego nie można osiągnąć z wodą mającą tylko 100°.

Kociołek Papina (fig. 423) składa się z żelaznego naczynia *T* o grubych ścianach, zaopatrzonego w pokrywę, którą można silnie przyszrubować. W pokrywie znajduje się mały otwór (*o*), który się zamyka za pomocą dopasowanego doń stożka, przymocowanego do dźwigni *l*. Ciężar *P*, zawieszony na dźwigni, wciska ten stożek do otworu z pewną siłą, zależną od długości dźwigni i zamyka go. Gdy ogrzewa się wodę w kociołku, wtedy para napełnia przestrzeń nad wodą i zbiera się tutaj tak długo, dopóki ciśnienie jej na ścianki nie staje się równem sile z jaką stożek jest wciskany do otworu;

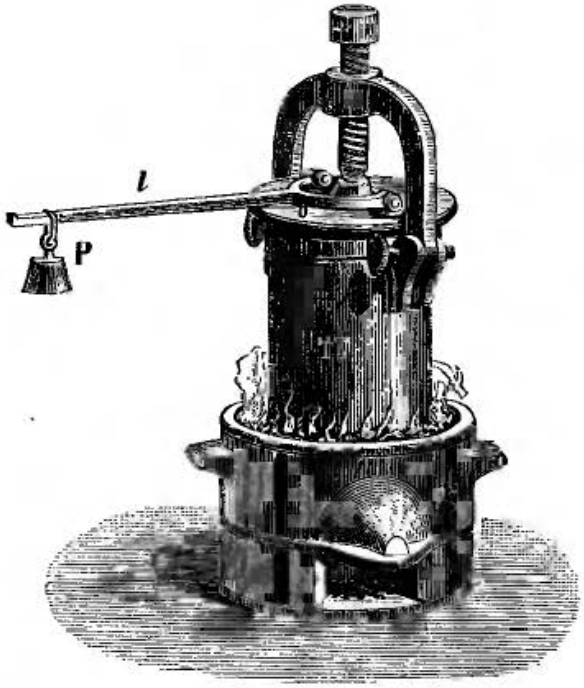


Fig. 423. Kociołek Papina.

tak długo także podnosi się stan ciepłoty wody, która wrze wtedy przy temperaturze, odpowiadającej temu ciśnieniu. Ciśnienie pod jakiem woda wrze oraz jej temperatura nie mogą — przy danej długości dźwigni — być wyższe. Gdy bowiem w kociołku nagromadza się więcej pary i ciśnienie jej staje się większe, wtedy stożek zostaje zaraz podniesiony i nadmiar pary wychodzi przez otwór *o*. W taki sposób woda wrze zawsze pod danem ciśnieniem, wywieranem przez stożek, jej zaś temperatura jest równa temperaturze wrzenia przy tem ciśnieniu.

Następujące doświadczenie Tyndalla stanowi ciekawy przykład, jak w niektórych warunkach wpływa zmiana temperatury wrzenia. Rura *A* 2 metry długa, dostatecznie wązka i zamknięta u dołu, otwiera się u góry do basenu *C D* (fig. 424 str. 718.) Napełniamy ją gorącą wodą, którą ogrzewamy od dołu za pomocą ogniska *B*. Temperatura potrzebna do tego, ażeby wywołać wrzenie cieczy w tem miejscu wynosi więcej niż 100°, albowiem tutaj ciśnienie jest prawie równe 1,2 *atmosfery*. *Ponieważ zaś* ciepło przychodzi od dołu, oziębienie zaś może mieć miejsce tylko na swobodnej powierzchni cieczy w basenie *C D*, to temperatura słupa cieczy w rurce *A* powinna być coraz mniejsza w miarę posuwania się od dołu ku górze. W chwili gdy woda w *B* osiąga temperaturę wrzenia, tworzy się pęcherzyk pary, który podnosi ciecz, równowaga w całym słupie zostaje nagle naruszona, temperatura zaś każdej kropli wody staje się wyższą od temperatury normalnego wrzenia na wysokości, na jakiej kropla w danej chwili się znajduje. Wskutek tego wytwarza się taka obfitość pary, że większa część cieczy zostaje wyrzucona na zewnątrz pod postacią słupa wrzącej wody, który spada napowrót do basenu. Chłodniejsza woda z tego ostatniego wchodzi do rury i wrzenie nagle ustaje, lecz wkrótce znów się rozpoczyna i powoduje nowy wybuch.

Doświadczenie to jest jakby powtórzeniem zjawisk naturalnych, zachodzących we wnętrzu gejzerów w Islandyi. Bunsen badał jaknajstaranniej te szczególnego rodzaju studnie naturalne i udało mu się na krótki czas przed wybuchem dokonać mierzeń *termometrycznych*, *na których oparł* swą teoryę gejzerów.

Mierzenia te pokazały, że istnieje względne maximum temperatury w pewnym punkcie, leżącym bliżej dna naturalnej studni

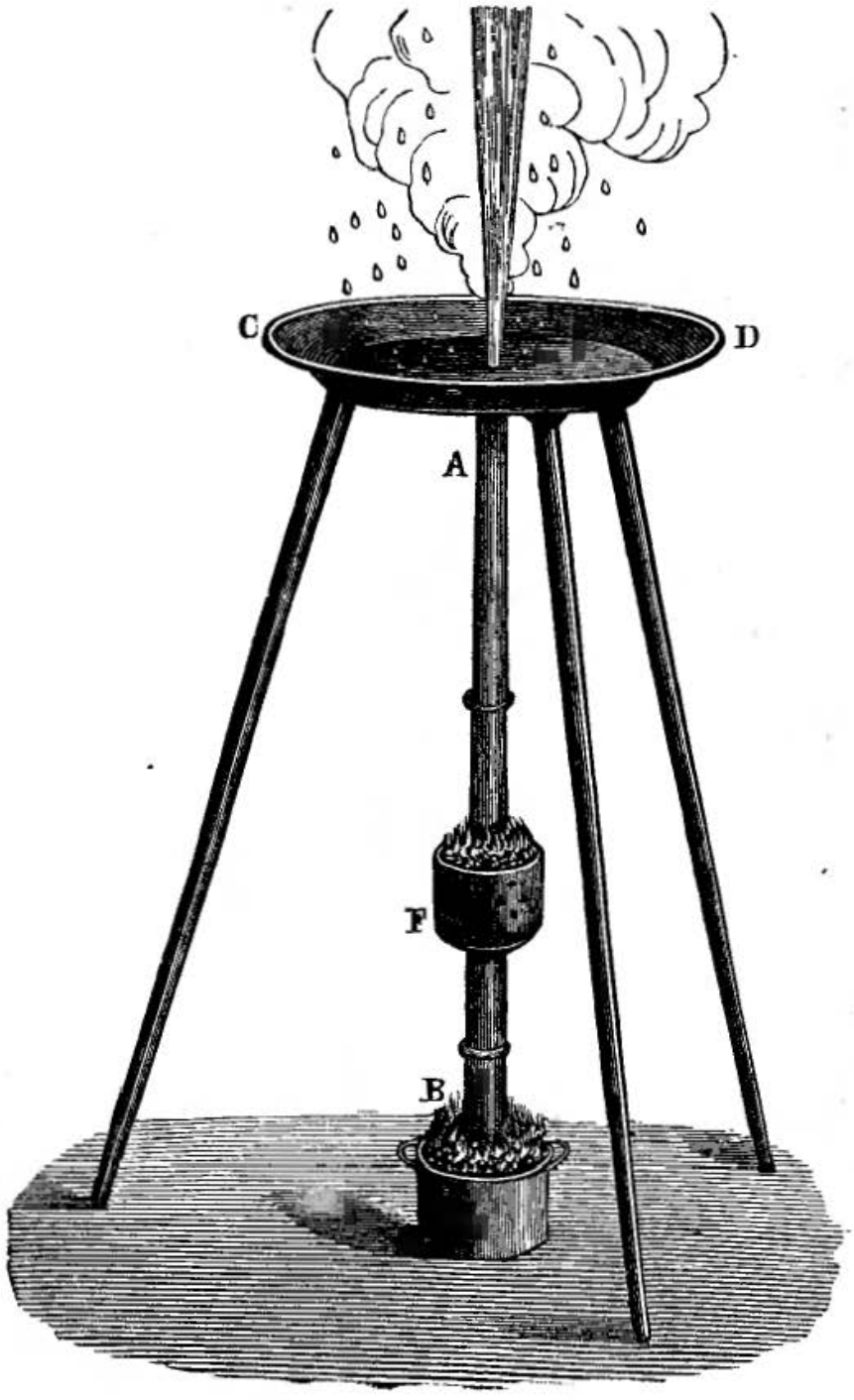


Fig. 424. Doświadczenie Tyndalla.

gejzeru aniżeli jej powierzchni. Chcąc odtworzyć aż do najdrobniejszych szczegółów warunki w tych naturalnych studniach,

Tyndall dodał do opisanego wyżej przyrządu ognisko *F*, mające naśladować to maximum temperatury [1]).

§ 4. Parowanie i własności par.

Ciecze przechodzą w stan lotny nietylko podczas wrzenia, lecz także przy temperaturze o wiele niższej; pęcherzyki pary nie wychodzą wtedy z wnętrza cieczy, a powstają jedynie na jej powierzchni. Wiadomo wszak, że ciecz zawarta w otwartem naczyniu i znajdująca się na wolnem powietrzu znika stopniowo; tłomaczymy to sobie przez stopniowe przechodzenie jej ze stanu ciekłego w lotny i powiadamy wtedy zwykle, że ciecz paruje. Parowanie poniżej temperatury wrzenia odbywa się o wiele wolniej, aniżeli zamiana w parę podczas wrzenia i to tem wolniej, im temperatura jest niższa od temperatury wrzenia. Widzimy tedy, że istnieje ważna różnica pomiędzy przechodzeniem ciał ze stanu stałego w ciekły, a przechodzeniem ich ze stanu ciekłego w lotny. Pierwsze ma miejsce tylko wtedy, gdy ciało jest ogrzane do temperatury topliwości, drugie zaś odbywa się przy każdej temperaturze; innemi słowy ciecze zawsze objawiają dążność do przechodzenia w stan lotny, tylko że dążność ta ujawnia się tem silniej, im wyższą jest ich temperatura, gdy zaś ta ostatnia dochodzi do temperatury wrzenia, wtedy pęcherzyki pary wydobywają się z całej masy cieczy. Lecz, jak wiemy, temperatura wrzenia zależy od ciśnienia, działającego na ciecz i jest tem wyższa, im ono jest większe. Podwyższanie tedy temperatury przezwycięża przeszkodę, jaką ciśnienie zewnętrzne stawia dążności cieczy do przechodzenia w stan lotny. Jakiego więc rodzaju rolę odgrywa w tym razie podwyższanie temperatury? Otóż przy danem ciśnieniu działa ono w taki sam sposób, jak zmniejszanie ciśnienia przy niższej temperaturze. Wpływ ten zrozumiemy lepiej gdy poznamy własności par. W tym celu wytwórzmy pary w przestrzeni, w której oprócz nich nic się już

---

[1]) Jamin, Cours de Physique, Tom II.

nie znajduje. Przestrzenią doskonale do tego się nadającą jest próżnia barometryczna. Ustawmy w jednem i tem samem naczyniu z rtęcią kilka starannie przygotowanych barometrów tak, ażeby utworzyły szereg barometrów naczyńkowych, o wspólnym zbiorniku; oczywiście, że rtęć będzie wtedy stała we wszystkich na jednakowym poziomie. Następnie wprowadźmy do jednego z nich (fig. 425, *B*) wodę, do drugiego (*C*) alkohol, do trzeciego (*D*) eter siarczany, a zobaczymy, że rtęć w barometrach tych natychmiast spadnie i to najwięcej w tym, który zawiera eter, najmniej zaś w tym, który zawiera wodę. Jeżeli temperatura otaczającego powietrza jest równa 20°, to obniżenie w barometrze *B* (woda) wynosi około 17 milim., w *C* (alkohol) 45 milim., zaś w *D* (eter) 435 milim. Podczas tego doświadczenia jeden z barometrów (*A*) pozostawiamy bez zmiany, ażeby mógł służyć do porównania wysokości słupów rtęci przed i po doświadczeniu.

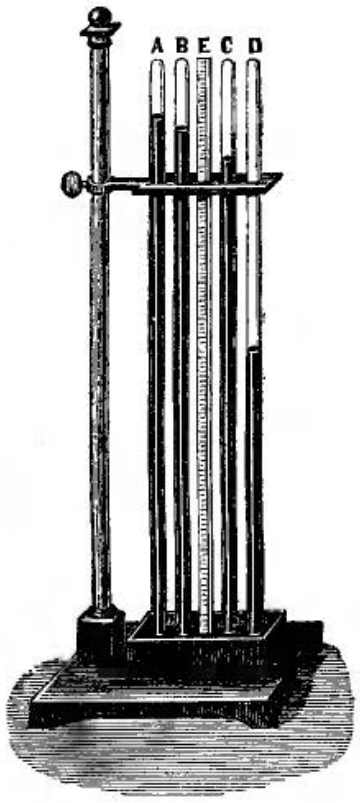


Fig. 425. Wpływ pary w próżni barometrycznej.

Obniżenie rtęci w barometrach pokazuje, że przez wprowadzenie cieczy wytwarza się w dotychczasowej próżni barometrycznej jakaś siła, która ciśnie na tę rtęć. Waga cieczy, wprowadzonych w małej ilości, nie może stanowić przyczyny ciśnienia, równego ciśnieniu słupa rtęci, mającego wysokość 17 (w barometrze z wodą) 45 (w barometrze z alkoholem) albo wreszcie 435 milimetrów (w barometrze z eterem). Wynika z tego, że obniżenie rtęci spowodowane jest przez ciśnienie pary, która przy danej temperaturze powstała z cieczy. Para ta zachowuje się tutaj jak gaz, podobnie bowiem jak ten ostatni objawia ona dążność do rozszerzania się. Zachodzi więc pytanie, czy własności par i gazów są identyczne, czy też istnieją pomiędzy niemi jakie różnice? Postaramy się odpowiedzieć

na to pytanie i rozważymy dwa wypadki: jeden, w którym barometr zawiera jedynie parę bez cieczy, drugi zaś, w którym barometr, oprócz pary, zawiera pewną ilość nieulotnionej cieczy.

W pierwszym razie można się posługiwać przyrządem, podobnym do tego, który używa się do badania gazów, pozostających pod ciśnieniem mniejszem od jednej atmosfery (patrz str. 168, figura 130) z tą różnicą, że górny koniec rurki barometrycznej, służącej do przyjmowania pary, jest zgięty kolankowato i zaopatrzony w kran. Koniec ten łączy się z małą kolbą, zawierającą eter. Po otwarciu kranu i zanurzeniu dolnego otwartego końca rurki w długiem naczyniu *PM* z rtęcią, gotuje się eter przez dość długi czas; pary eteru wychodzą przez dolny koniec rurki i zabierają ze sobą wszystko powietrze, zawarte w tej ostatniej oraz w kolbie. Następnie pozwalamy, ażeby przyrząd się oziębił i otaczamy wreszcie kolbę tłuczonym lodem. Wtedy prężność par szybko się zmniejsza, rtęć w rurce się podnosi i po niejakim czasie zatrzymuje się na poziomie, leżącym o 183 milimetry niżej, aniżeli poziom rtęci w zwykłym barometrze. Po zamknięciu kranu mamy więc w rurce ponad rtęcią pewną ilość par eteru, ciśnienie których przy temperaturze otaczającego powietrza wynosi około 183 milim.

Powtarzając z parami temi te same doświadczenia, które wykonywaliśmy w celu dowiedzenia słuszności prawa Boyle'a-Mariotte'a dla gazów pod ciśnieniem mniejszem od jednej atmosfery (patrz str. 169), przekonywamy się, że prawo to stosuje się również do par. Przyjmijmy, że temperatura otaczającego powietrza wynosi 20^0. Wcisnąwszy rurkę do długiego naczynia *PM* tak, ażeby pary eteru w niej zawarte, zajmowały tylko połowę pierwotnej swej objętości, widzimy, że rtęć w rurce się obniża, ciśnienie zaś pary wynosi w przybliżeniu 370 milim., to jest mniej więcej dwa razy tyle co poprzednio. Wyciągając zaś rurkę z długiego naczynia przekonywamy się, że ciśnienie pary zmniejsza się w takim samym stosunku, w jakim objętość się powiększa. Można dowieść także, że do par tych stosuje się również i prawo Gay-Lussac'a to jest, że rozszerzalność ich jest proporcyonalna do temperatury i że spółczynnik rozszerzalności

jest równy spółczynnikowi dla gazów. W tym celu otaczamy rurkę obszernym cylindrem, który napełniamy wodą o różnej temperaturze i obserwujemy ciśnienie, wywierane przez pary zawarte w rurce wtedy, gdy objętość ich jest stała.

Lecz prawo Boyle'a-Mariotte'a w zastosowaniu do par jest, podobnie jak i dla gazów tylko przybliżenie słusznem, a zboczenia są tem większe, im silniejszem jest ciśnienie, pod jakiem pary *się znajdują, czyli im większą jest ich prężność. Gdy ciśnienie* dochodzi do pewnej granicy, zależnej od temperatury, wtedy wspomniane prawo nie stosuje się nawet w przybliżeniu i *ciśnienie par nie zmienia się już ze zmianą objętości.* Wciśnijmy w powyższem doświadczeniu rurkę do długiego naczynia tak, ażeby prężność par doszła do 430 milim. Jeżeli potem będziemy jeszcze dalej zmniejszali objętość par, ciśnienie ich pozostanie to samo i *część pary przejdzie w stan ciekły.* Wtedy mamy już drugi z wymienionych wyżej wypadków, gdzie para styka się z nadmiarem nieulotnionej cieczy.

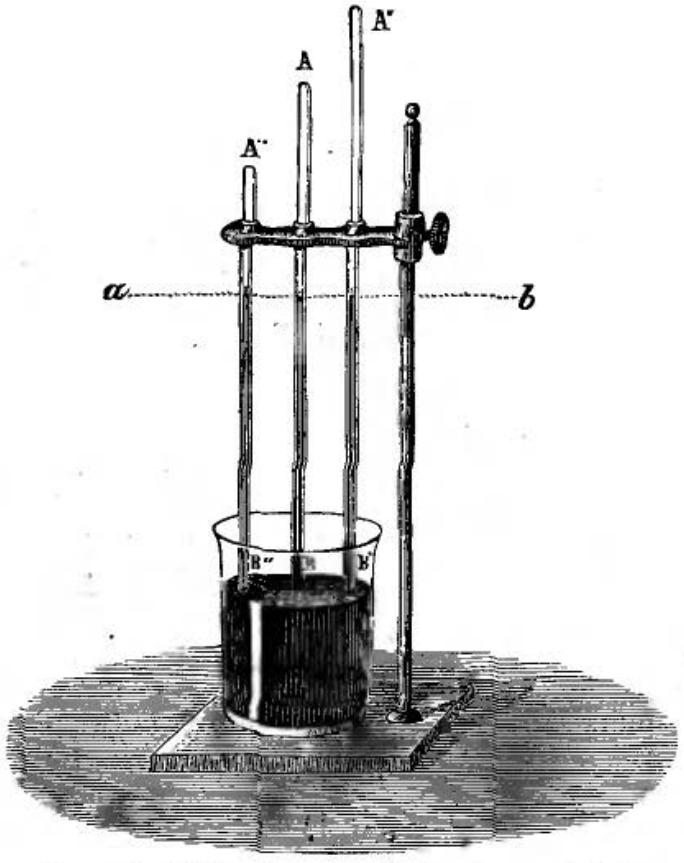


Fig. 426. Ciśnienie par nasyconych przy stałej temperaturze nie zmienia się.

W celu bliższego zbadania tego wypadku wprowadzamy do rurki barometrycznej *AB* (fig. 426) pewną ilość eteru, który parami swemi napełnia próżnię barometryczną. Jeżeli następnie wyciągniemy rurkę z naczynia tak, ażeby przyjęła położenie *A' B'*, przekonamy się, że poziom *ab* rtęci w niej zawartej *pozostaje bez zmiany*, niezależnie od wielkości przestrzeni ponad tą rtęcią, pod warunkiem, że w przestrzeni tej

znajduje się pewna ilość nieulotnionej cieczy. W przytoczonym przez nas przykładzie, to jest gdy rurka zawiera eter i temperatura wynosi 20°, wysokość aB słupa rtęci w rurce jest stale równa 330 milim. Wynika z tego, że dopóki w rurce barometrycznej znajduje się ciecz, przy każdem powiększeniu objętości tworzy się nowa ilość pary tak, że każda objętość natychmiast wypełnia się parą, mającą prężność 430 milim. (760—330). Zepchnąwszy rurkę tak, ażeby przyjęła położenie A'' B'' widzimy, że zmniejszenie objętości, zajętej przez parę, nie wpływa na powiększenie jej prężności, albowiem wysokość aB'', równa aB, pozostaje ta sama. W miarę zmniejszania objętości, zajętej przez parę, ta ostatnia skrapla się i gdy rurkę wciśniemy tak głęboko, że ciecz dojdzie w niej aż do zamkniętego jej końca, wtedy cała ilość pary zniknie. Doświadczenie to pokazuje, że jeżeli w danej przestrzeni znajdują się jednocześnie para i ciecz, to przy niezmiennej temperaturze dalsze ściskanie pary jest niemożliwe, albowiem przy każdem powiększeniu ciśnienia, część pary skrapla się, pozostała zaś część zachowuje stale tę samą prężność. Prężność ta jest największą, jaką para może osiągnąć przy danej temperaturze i dlatego stanowi ona tak zwane *maximum prężności*; przestrzeń zaś napełniona takiemi parami zowie się *nasyconą*. *Pod prężnością pary cieczy przy* danej temperaturze rozumiemy zwykle to maximum prężności.

Wpływ temperatury na pary w stanie nasycenia jest zupełnie inny, aniżeli na pary w stanie nienasyconym. Podwyższenie temperatury nietylko powiększa prężność pary nasyconej, już istniejącej, *lecz powoduje utworzenie nowej jej ilości, mającej* większą prężnośc tak, że ta ostatnia wzrasta o wiele szybciej, niż tego wymaga prawo Gay-Lussac'a. Przy każdej temperaturze pary cieczy posiadają określone maximum prężności, które wzrasta bardzo szybko i dla każdej cieczy według oddzielnego prawa. Podczas gdy prężność gazów i par w stanie nienasyconym zależy od objętości, jaką one zajmują oraz od temperatury, prężność par w stanie nasyconym zależy jedynie od temperatury przestrzeni, w której się znajdują. Jeżeli przestrzeń napełniona parami, stykającemi się z cieczą, posiada w różnych miejscach rozma-

itą temperaturę, wtedy występuje jeszcze inna różnica w zachowaniu się gazów i nasyconych par. A mianowicie prężność pary w takiej przestrzeni jest równa prężności, jaką para ta posiadałaby, gdyby cała przestrzeń miała tę temperaturę, jaką posiada w miejscu zimniejszem. Weźmy dwa balony A i B (fig. 427),

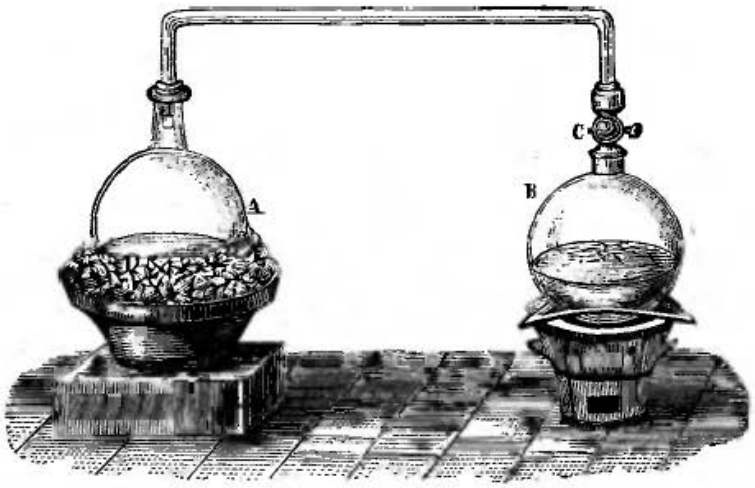


Fig. 427. Doświadczenie ilustrujące zasadę Watt'a.

z których pierwszy napełniony jest wodą, utrzymywaną przy 0°, drugi zaś wodą utrzymywaną przy 100°. Dopóki one nie komunikują ze sobą, prężność pary w balonie A jest równa 4,6 milim, w balonie zaś B równa 760 milim. Lecz po otwarciu krana C, para z balonu B przechodzi do balonu A, gdzie ulega po części skropleniu, dopóki prężność w całej przestrzeni nie stanie się równą 4,6 milim. W balonie B tworzy się nowa ilość pary, która znów ulega częściowemu skropleniu w balonie A i tak proces ten trwa, dopóki cała woda nie przedystyluje z jednego balonu do drugiego i dopóki prężność pary nie będzie jednostajnie równą maximum prężności przy temperaturze 0° to jest 4,6 milim. [1]).

§ 5. Mierzenie prężności par.

Prężność par, stykających się z cieczą, a szczególniej prężność par wodnych, była badaną wiele razy i przez różnych fizyków.

---

[1]) Wüllner, l. c.

Istnieją dwie metody mierzenia prężności par przy rozmaitej temperaturze. Podług jednej wytwarza się pary w zamkniętej przestrzeni i obserwuje ciśnienie, wywierane przez nie przy danej temperaturze. Podług drugiej metody gotuje się ciecz przy określonem ciśnieniu i bada temperaturę wrzących par; ponieważ, jak wkrótce zobaczymy, temperatura wrzenia w ten sposób znaleziona jest właśnie temperaturą, przy której prężność par jest równa zewnętrznemu ciśnieniu, działającemu na ciecz, to wielkość tego ciśnienia, pod którem ona wrze, daje nam zarazem szukaną prężność par dla temperatury wrzenia.

Gay-Lussac określił prężność par wodnych przy temperaturach niższych od 0°, przyczem opierał się na wspomnianej przez nas zasadzie, że prężność par w przestrzeni niejednakowo ogrzanej jest równa prężności, jakąby one posiadały, gdyby cała przestrzeń miała niższą z dwóch temperatur. Gay-Lussac umieścił obok siebie w jednem naczyniu dwa barometry *A* i *C* (fig. 428); jeden z nich, zgięty u góry, był zanurzony w naczyniu *B*, napełnionem mieszaniną oziębiającą. Po wprowadzeniu wody ponad rtęć w barometrze *C*, woda ta przechodzi, jak wiemy, drogą parowania albo dystylacyi do tej części rurki barometrycznej, która znajduje się w mieszaninie oziębiającej i prężność pary jest zupełnie ta sama, jak gdyby cała przestrzeń, zajęta przez parę, była otoczona tą mieszaniną. Prężność pary mierzy się wtedy różnicą w wysokości słupów rtęci w obu barometrach, temperaturę zaś wskazuje termometr *t*, zanurzony w mieszaninie oziębiającej.

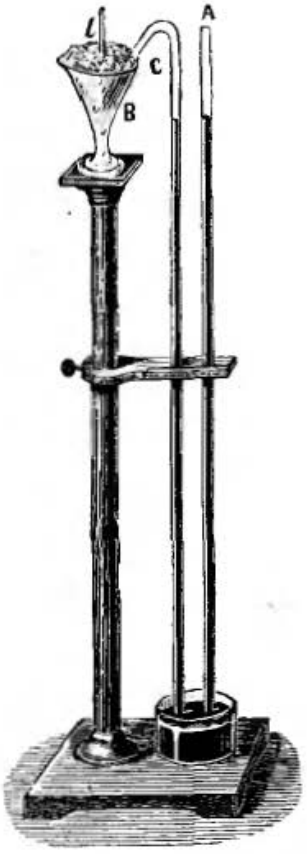


Fig. 428. Przyrząd Gay-Lussac'a do mierzenia prężności par.

Dalton mierzył prężność pary pomiędzy temperaturami 0° i 100°. Do zwykłego barometru *A* (fig. 429 str 726), wprowadzał małą ilość badanej cieczy i otaczał go na całej długości szklanym cylindrem; dno tego ostatniego stanowiła powierzchnia rtęci w naczyniu *M*, w którem zanurzony był również

barometr A oraz barometr B, służący do porównania. Cylinder napełniał wodą, którą ogrzewał od dołu za pomocą piecyka, temperaturę zaś pary, która tworzyła się w barometrze A, przyjmował jako równą temperaturze wody, mierzonej termometrem T. Następnie notował stopniowo na skali E obniżenie poziomu rtęci w barometrze A, starając się po każdej obserwacyi zredukować do zera wysokość rtęci w rurkach barometrycznych co, jak wiemy, jest konieczne z powodu rozszerzalności rtęci pod wpływem ciepła. Różnice w poziomach w obu barometrach pozwalały ocenić prężność pary w barometrze A. W taki sposób Dalton ułożył tablicę maximalnej prężności pary wodnej pomiędzy 0^0 i 100^0.

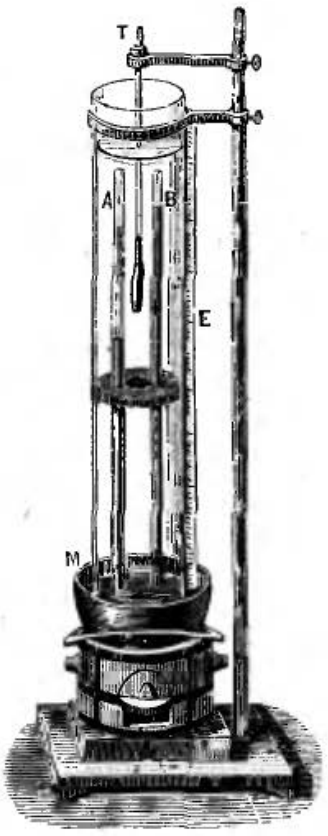


Fig. 429. Przyrząd Daltona.

Metoda Daltona nie jest dokładna z tego względu, że słup wody, mający wysokość barometru, nie może być tak ogrzanym, ażeby posiadał wszędzie jednakową temperaturę, z czego wynika, że i temperatura pary nie jest w tym razie ściśle znana, nie wiadomo więc, czy zaobserwowana prężność stanowi istotnie szukane maximum przy danej temperaturze. W samej rzeczy rezultaty poszukiwań Daltona nie odpowiadają nowszym doświadczeniom.

W celu określenia prężności pary przy wyższych temperaturach Dalton posługiwał się drugą z wymienionych metod, obserwował mianowicie temperaturę cieczy, które wrzały pod kloszem pompy powietrznej albo w ogóle pod określonem zewnętrznem ciśnieniem, lecz i ta metoda dała tylko przybliżenie prawdziwe rezultaty.

Opisane sposoby mierzenia prężności par nie nadają się do wypadków, w których temperatura cieczy o wiele przewyższa jej temperaturę wrzenia. Ponieważ oprócz obserwacyj, dość dokładnych jedynie dla celów technicznych, nie istniały pod tym względem żadne inne, to Arago i Dulong, zachęceni przez Akademię paryzką, przedsięwzięli badania w tym kierunku. Przyrząd używany przez tych fizyków przedstawiony jest w przecięciu na figurze 430. Mierzyli oni prężność pary bezpośrednio

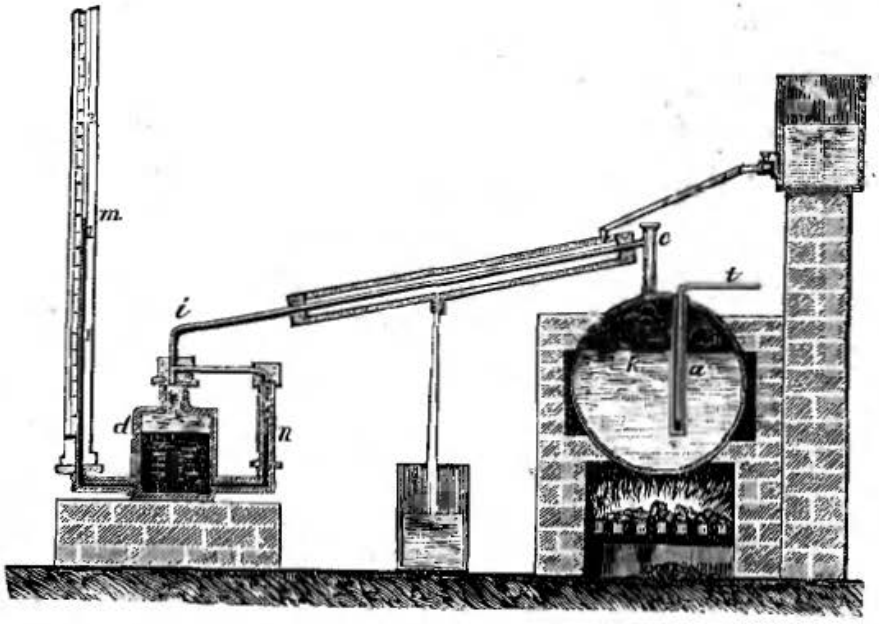


Fig. 430. Przyrząd Dulonga i Arago.

na mocy zmniejszenia objętości, jakiemu ulegała zamknięta ilość powietrza. Do wytwarzania pary służył wielki kocioł k, wmurowany w piec. W pokrywie kotła znajdowały się cztery otwory. Jeden z nich był zamknięty klapą bezpieczeństwa, na ktorej przesuwano ciężary odpowiednio do spodziewanego ciśnienia. Przez dwa inne otwory przechodziły zamknięte u dołu rurki, z których jedna a, widoczna na rysunku, dochodziła prawie do dna kotła, druga zaś sięgała tylko do jego połowy tak, że zawsze otoczona była tylko parą wodną; rurki te służyły jako rodzaj fu-

terałów dla dwóch termometrów, zbiorniki których — dzięki takiemu urządzeniu — nie podlegały ciśnieniu pary, a więc nie zmieniały swej objętości. Jeden z termometrów wskazywał temperaturę wody, drugi zaś temperaturę pary. W czwartym otworze kotła umocowana była rura, składająca się z części pionowej oraz pochyłej *ci* i otwierająca się do żelaznego naczynia *d*. Za pośrednictwem tej rury ciśnienie pary w kotle udzielało się manometrowi *m*, który składał się z takiej samej u góry zamkniętej rurki szklanej, jaka wspomnianym fizykom służyła do badań nad prawem Boyle'a-Mariotte'a. Manometr komunikował u dołu z naczyniem *d*, napełnionem do pewnej wysokości rtęcią, w celu zaś umożliwienia obserwacyj poziomu tej ostatniej, nieprzezroczyste naczynie *d* połączono ze szklaną rurką *n*, komunikującą także z rurą *ci*. W taki sposób rtęć w rurce *n* znajdowała się pod tem samem ciśnieniem, co rtęć w naczyniu *d* i poziom jej w obu leżał na jednej prostej linii. Pozostała część naczynia *d* i rurki *n* ponad rtęcią oraz część *ci* napełnione były wodą utrzymywaną przy stałej temperaturze, a więc i stałej gęstości za pomocą prądu wody, przepływającego ustawicznie dokoła rury *ci* i wyciekającego ze zbiornika, który widać po prawej stronie rysunku. A więc woda przeprowadzała ciśnienie, wywierane na nią przy *c* przez parę, aż do naczynia *d*, przez co podnosiła się rtęć w manometrze *m*. Zmniejszenie objętości, jakiemu ulegało zamknięte w nim powietrze, dawało miarę prężności pary, przyczem do ciśnienia, potrzebnego na zasadzie prawa Boyle'a-Mariotte'a do wywołania danego zmniejszenia objętości, dodawano ciśnienie słupa rtęci, wzniesionego w manometrze powyżej poziomu rtęci w naczyniu *d* i odejmowano ciśnienie słupa wody *cd*. Doświadczenia Dulonga i Arago obejmowały skalę termometryczną od 100° do 224°, ciśnienie zaś par dochodziło do 24 atmosfer.

Doświadczeniom tym można zrobić ten zarzut, że temperaturę pary obserwowano w kotle, gdy tymczasem ciśnienie wywierała ona w pionowej rurce *c*. Ponieważ nie ulega wątpliwości, że tutaj temperatura była niższa, aniżeli w kotle to — na zasadzie tego, że w niejednakowo ogrzanej przestrzeni prężność

nie może być wyższą od tej, jaka istnieje w zimniejszej części— zaobserwowana prężność pary była za małą czyli odpowiadała temperaturze niższej od tej, jaką wskazywał termometr. Okoliczność ta, również jak i różnice w rezultatach, znalezionych przez rozmaitych eksperymentatorów, skłoniły Magnusa i Regnault'a do przedsięwzięcia nowych badań nad prężnością par. Uczeni ci posługiwali się różnemi metodami, lecz doszli do identycznych prawie rezultatów, przez co została dowiedzioną dokładność ich badań oraz stwierdzoną liczebna wartość prężności pary wodnej.

Regnault uciekał się do trzech metod przy badaniu prężności par. Dla temperatur niższych od punktu zamarzania wody posługiwał się on metodą Gay-Lussac'a, dla temperatur pomiędzy 0^0 i 58^0 metodą używaną już przez Watt'a, dla wyższych zaś temperatur wreszcie metodą Daltona, lecz znakomicie ulepszoną. Rozpatrzymy bliżej tylko ostatnią, zasada której, jak wiemy, polega na obserwowaniu temperatury wrzenia cieczy pod danem ciśnieniem. Ponieważ prężność pary z wrzącej cieczy, jest równa zewnętrznemu ciśnieniu, to wielkość jego daje nam szukaną prężność przy danej temperaturze wrzenia. (Figura 431 str. 730), przedstawia przyrząd Regnault'a. Do gotowania cieczy służy miedziana retorta C, ustawiona na piecyku i szczelnie zamknięta pokrywką. Szyjka retorty łączy się z rurką AB, otoczoną aparatem oziębiającym D, przez który przepływa ciągły strumień zimnej wody, a to w celu stałego utrzymania jej przy nizkiej temperaturze. Rura AB komunikuje z dużym balonem M o 24 litrach objętości, umieszczonym z kolei w obszernem naczyniu K pełnem wody o temperaturze otoczenia. Balon przedłuża się w dwuramienną rurkę. Jedno ramię (poziome) łączy się z manometrem O, w którym różnica w wysokości słupów rtęci w obu kolanach wskazuje wielkość ciśnienia wewnątrz przyrządu. Drugie ramię (pionowe), zaopatrzone w kran, łączy się za pomocą rurki HH' z pompą powietrzną albo — gdy prężność par ma być obserwowaną powyżej 100^0 — z pompą ściskającą. Przez to można w balonie M, a więc także w retorcie A, wytwarzać

dowolne ciśnienie. Do określania temperatury wrzenia służą cztery termometry rtęciowe, osadzone podobnie jak termometry w przyrządzie Dulonga i Arago, od pokrywki mianowicie schodzą

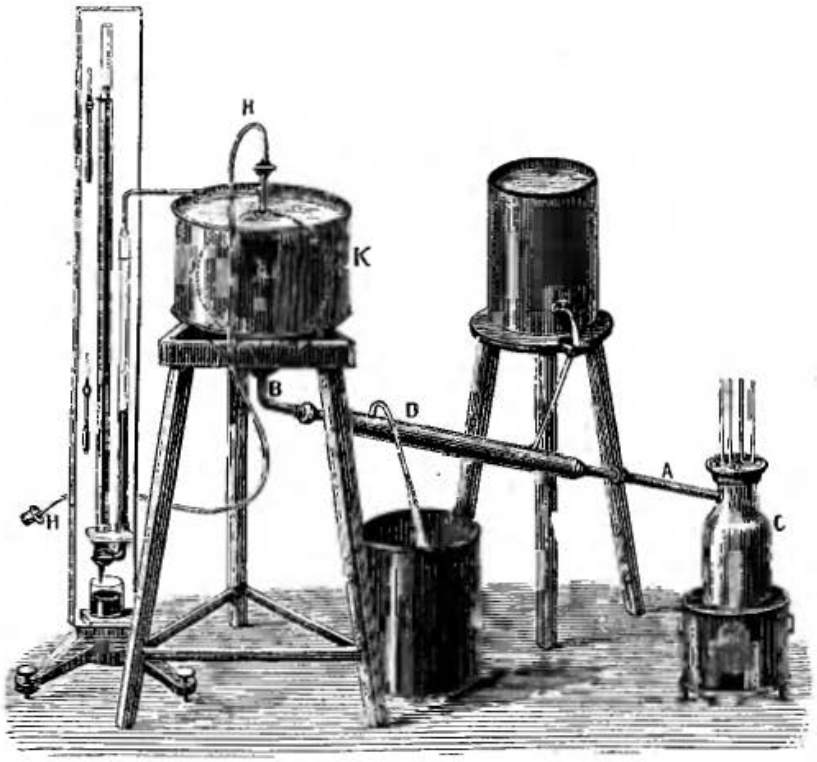


Fig. 431. Przyrząd Regnault'a.

do retorty cztery zamknięte u dołu rurki żelazne, z których dwie sięgają aż do wody, dwie zaś otoczone są tylko parą. Rurki te są prawie całkowicie napełnione rtęcią, w której zanurza się termometry.

Doświadczenie rozpoczynano od tego, że przez wypompowywanie lub wciskanie powietrza do balonu *M* wytwarzano wewnątrz przyrządu pewne określone ciśnienie i następnie ogrzewano retortę. Para, tworząca się wskutek ogrzewania, nie mogła zmieniać danego ciśnienia, albowiem ulegała skropleniu w rurce *A B*. Retortę ogrzewano tak długo, dopóki termometry nie wskazywały stałej temperatury, to jest dopóki ciecz zawarta w retorcie nie poczynała wrzeć, jak wiemy bowiem, ciecz albo para z niej wychodząca, tylko wtedy nie ogrzewa się przy dalszym dopływie ciepła, gdy znajduje się w stanie wrzenia. Ponieważ wrzenie można było podtrzymywać tak długo, jak się podobało,

albowiem ulotniona ciecz, po skropleniu w rurce *A B*, powracała do retorty, to mierzenie temperatury oraz odpowiadającego jej ciśnienia mogło być dokonywane z wielką ścisłością. To właśnie stanowi ogromną zaletę metody Regnault'a w obec wszystkich innych metod mierzenia prężności pary.

Prężność pary wodnej, szczególnie ważna tak ze względów naukowych, jakoteż i technicznych, była przedmiotem najliczniejszych badań. Co do rezultatów, podamy tylko te, które znalazł Regnault. Następująca tablica obejmuje maximum prężności pary wodnej począwszy od temperatury — 10° do 230°; liczby od — 10° do 100° zostały znalezione za pomocą tylko co opisanego przyrządu, liczby zaś od 100° do 230°,9 obliczono na mocy formuły matematycznej, w którą tutaj wchodzić nie możemy.

Prężność pary wodnej od — 10° do 100°.

Temperatura.	Prężność w milimetrach rtęci przy zerze.	Temperatura.	Prężność w milimetrach rtęci przy zerze.
— 10°	2,093	50°	91,982
— 5	3,131	55	117.478
0	4,600	60	148,791
+ 5	6,534	65	186,945
10	9,165	70	233,093
15	12,699	75	288 517
20	17,391	80	354,643
25	23,550	85	433,041
30	31,548	90	525,450
35	41,827	95	633,778
40	54,906	100	760,000
45	71,391		

Prężność pary od 100° do 230,9 podana w atmosferach.

Temperatura.	Liczba atmosfer.	Temperatura.	Liczba atmosfer.
100,0°	1	198,8°	15
120,6	2	201,9	16
133,9	3	204,9	17

Temperatura.	Liczba atmosfer.	Temperatura.	Liczba atmosfer.
144,0°	4	207,7°	18
152,2	5	210,4	19
159,2	6	213,6	20
165,3	7	215.5	21
170,8	8	217,9	22
175,8	9	220,8	23
180,3	10	222,5	24
184,5	11	224,7	25
188,4	12	226,8	26
192,1	13	228,9	27
195,5	14	230,9	28

Tablice te pokazują, że prężność pary wodnej wzrasta daleko szybciej, aniżeli temperatura.

Podane wartości prężności pary wodnej stosują się tylko do czystej wody, lecz nie do takiej, która zawiera np. sole rozpuszczone albo inne jakie substancye, nie dające pary. Prężność pary z roztworów jest zawsze mniejsza od prężności pary z czystej wody. Fakt ten dawno już zauważono, lecz w nowszych dopiero czasach zajęto się bliższem jego zbadaniem. Liczne doświadczenia Wüllnera pokazały, że rozpuszczone substancye zmniejszają prężność pary proporcyonalnie do swej ilości. I tak: 10 cz. soli kuchennej, rozpuszczone w 100 cz. wody, zmniejszają prężność pary o 0,06 prężności wody przy tej samej temperaturze; 20 cz. soli w 100 cz. wody zmniejszają ją o 0,12 i 30 cz. soli o 0,18 prężności pary z czystej wody przy jednakowej temperaturze. To samo stosuje się do wszystkich roztworów tak, że w ogóle można powiedzieć: jeżeli zmniejszenie prężności przy danej temperaturze i jednej części soli rozpuszczonej w 100 cz. wody jest równe a, to przy tej temperaturze i p częściach soli w 100 cz. wody zmniejszenie prężności jest p razy większe, czyli wynosi $p. a$. Co do wpływu w danym razie ciepła, to zmniejszenie prężności pary wodnej przez określoną ilość soli jest rozmaite dla różnych temperatur; dokładne prawo nie jest tutaj znane, wiadomo tylko, że zmniejszenia wzrastają wraz z temperaturą.

Podane tutaj fakty o prężności pary z roztworów solnych objaśniają nam przyczynę podnoszenia się ich punktu wrzenia. Przy jednej i tej samej temperaturze para, wydobywająca się z takich roztworów i leżąca nad niemi, posiada prężność mniejszą, aniżeli para z czystej wody, gdy więc obydwie mają posiadać tę samę prężność, temperatura wrzenia roztworów czyli temperatura, przy której prężność ich pary jest równa zewnętrznemu ciśnieniu, równemu np. 760 milim., musi być wyższa. Jednocześnie także temperatura samej pary, wbrew przypuszczeniu Rudberga musi wynosić w danym razie więcej niż 100°. Jeżeli bowiem prężność par wodnych, leżących nad roztworem solnym, jest mniejsza od prężności par czystej wody, wynika z tego, że po nad roztworem para wodna nie znajduje się w stanie swej maximalnej prężności, albo raczej, że wskutek przyciągania ze strony soli osiąga maximum przy niższej prężności. Skoro więc para ta ma osiągnąć wyższą prężność, musi ona stać się cieplejszą, albowiem pod wpływem ogrzewania para o danej gęstości staje się coraz bardziej rozprężliwą. Jak widzieliśmy wyżej (patrz str.713) Magnus istotnie dowiódł, że para z roztworów posiada wyższą temperaturę, aniżeli para z czystej wody.

Pierwszym, który badał jeszcze inne pary, oprócz wodnych, był Betancourt. Określił on prężność par alkoholu i porównawszy ją z prężnością pary wodnej wywnioskował, że pierwsza przy każdej temperaturze jest 2,333 razy większa od drugiej, czyli że stosunek wzajemny dwóch tych prężności jest zawsze jeden i ten sam. Wniosek ten jednak został obalony przez Daltona. Ten ostatni na zasadzie doświadczeń nad sześcioma cieczami wygłosił inne prawo, zwane prawem Daltona, podług którego *prężność pary wszystkich cieczy, jednakowo oddalonych od swych punktów wrzenia, jest jednakowa.* I tak np. alkohol wrze przy 78,4° i wtedy prężność jego pary, równa 760 milim, równa także prężności pary wodnej przy 100°. Otóż, podług wymienionego prawa prężność par alkoholu przy 68,4° jest równa prężności pary wodnej przy 90°; prężność par alkoholu przy 58,4° równa prężności par wodnych przy 80° i tak dalej powyżej albo poniżej

temperatury wrzenia. Gdyby prawo to było słuszne, wtedy, znając prężność par wodnych oraz temperaturę wrzenia danej cieczy, możnaby było z łatwością obliczać prężność par tej cieczy przy każdej temperaturze. Lecz liczne doświadczenia Ure'a obaliły prawo Daltona, które przed tem jeszcze podawane było w wątpliwość. Ure pokazał, że nie istnieje żadne ogólne prawo, dotyczące prężności różnych cieczy, które pozwalałoby ją określać ze znanych już własności albo z temperatury wrzenia. To samo wynika także z nowszych doświadczeń Regnault'a, który badał znaczną ilość cieczy. Niemniej przeto nie można twierdzić, że prężność par cieczy nie znajduje się w żadnym ogólnym związku z pewnemi ich własnościami, ilość bowiem zbadanych substancyi jest jeszcze zbyt mała, ażeby rezultaty pozwoliły na takie twierdzenie. Kwestyę tę, mającą pierwszorzędne znaczenie dla nauki o cieple, mogą roztrzygnąć tylko dalsze badania empiryczne.

Podajemy tutaj prężność par niektórych cieczy podług Regnault'a.

Temperatura.	Alkohol.	Eter	Siarek węgla.	Chloroform.
— 20°	3,34 m.	68,90 m.	47,30 m.	—
0	12,70 „	184,39 „	127,91 „	—
30	78,52 „	634,80 „	434 62 „	247,51 m.
50	219,90 „	1264,83 „	857,07 „	535,05 „
80	812,91 „	3022,79 „	2032,53 „	1407,64 „
100	1697,55 „	4953,30 „	3325,15 „	2428,54 „
120	3231,73 „	7719,20 „	5148,79 „	3925,74 „
150	7318,40 „	—	9065,94 „	7280 62 „
165	—	—	—	9527,82 „

Ciekawe są następujące dane o prężności par rtęciowych.

Temperatura.	Prężność par rtęci.
0°	0,020 milim.
20	0,037 „
60	0,164 „
80	0,353 „
100	0,746 „

Temperatura.	Prężność par rtęci.
150°	4,266 milim.
250	75, 75 „
350	663, 18 „
450	3384, 35 „
520	8264, 96 „

Widzimy, że prężność par rtęciowych do 100° jest nader nieznaczna tak, że przy mierzeniu ciśnień za pomocą manometrów rtęciowych i przy zwykłej temperaturze można ją zupełnie pomijać. W każdym jednak razie nie należy wnosić z tego, że pary rtęciowe w stanie rozrzedzenia, w jakim znajdują się w pracowniach, w których często ma się do czynienia z rtęcią, nie wywierają żadnego wpływu. Skonstatowano, że nawet przy —40° rtęć wytwarza parę, która rozchodzi się w powietrzu. Merget dowiódł jej obecności przy tej temperaturze i do pewnego stopnia zmierzył ilość jej za pomocą bardzo czułego odczynnika, amoniakalnego azotanu srebra, który ulega redukcyi przez pary rtęciowe.

Z kwestyą prężności par rozmaitych cieczy łączy się pytanie, jaka jest prężność par, wydzielających się z mieszaniny kilku cieczy. Przez długi czas sądzono, że pary takie zachowują się podobnie jak gazy, to jest, że prężność mieszaniny par równa sumie prężności pojedyńczych jej części składowych (patrz str. 171). Lecz Magnus dowiódł, że stosuje się to jedynie do takich cieczy, które nie mieszają się ze sobą, jak np. woda i oliwa. Dla cieczy zmieszanych pokazał on, że prężność par mieszaniny jest znacznie mniejsza i że nawet nie dorównywa prężności pary cieczy bardziej lotnej. Znalazł on np., że prężność pary eteru, zawartej w barometrze, natychmiast się zmniejszała po dodaniu do eteru alkoholu oraz, że prężność mieszaniny zbliżała się tembardziej do prężności alkoholu, im więcej dodawano tego ostatniego.

Regnault, który również zajmował się tym przedmiotem, potwierdził i rozszerzył badania Magnusa. Tak np. dla wody i eteru, które mieszają się ze sobą w ograniczonej ilości, Regnault znalazł, że prężność par takiej mieszaniny przy temperaturze 33,08° jest równa 710,02 milim., podczas gdy prężność pary

wodnej przy tej samej temperaturze wynosi 37,58 milim., prężność zaś pary eteru 711,6 milim.

Wreszcie Wüllner badał ciecze, które mieszają się ze sobą we wszystkich stosunkach i znalazł, że w tym wypadku zmniejszenie prężności występuje jeszcze wyraźniej, aniżeli w dwóch poprzednich. Stosunek prężności każdej mieszaniny do sumy prężności pojedynczych jej części składowych posiada stałą wartość, przynajmniej w razach, gdy zmieszane ciecze wzięte są w ilościach mniej więcej jednakowych. Prawo to nie jest zaś zupełnie ścisłem w wypadku, gdy jedna z cieczy w mieszaninie jest wzięta w znacznej ilości.

§ 6. Gęstość par. Mieszanina par i gazów. Hygrometrya.

Gęstością pary nazywamy stosunek wagi danej objętości pary przy określonej temperaturze i ciśnieniu do wagi równej objętości powietrza atmosferycznego przy tych samych warunkach temperatury i ciśnienia. Jeżeli p oznacza wagę pewnej objętości v pary, mającej temperaturę t i prężność f, a p' oznacza wagę równej objętości powietrza przy tej samej temperaturze i prężności, to gęstość d pary jest równa stosunkowi dwóch tych wartości, czyli $d = \frac{p}{p'}$. Wagę p' objętości powietrza przy temperaturze t i prężności f oblicza się na zasadzie formuły, w którą wchodzą waga jednego sześciennego centymetra powietrza oraz spółczynnik jego rozszerzalności.

Zbadajmy tedy, czy pary, do chwili skroplenia, ulegają prawom Boyle'a-Mariotte'a i Gay-Lussac'a w tym samym stopniu przybliżenia, co gazy. Gdyby tak było, to gęstość par, określona w przytoczony sposób, byłaby zawsze mniej więcej ta sama, niezależnie od ich temperatury, ciśnienia pod jakiem się znajdują oraz od tego, czy prężność ich jest maximalną lub nie maximalną; zboczenia nie byłyby większe od tych, o jakich wspominaliśmy przy gazach (patrz str. 684 i 688), które także nie zupełnie ściśle ulegają wymienionym dwóm prawom. Zbadanie gęstości par da nam daleko pewniejsze wskazówki co do ich zachowania się,

aniżeli opisane w jednym z poprzednich paragrafów doświadczenia, które pokazały nam różnicę pomiędzy parą w stanie nasyconym i nienasyconym.

Chcąc oznaczyć gęstość pary należy — stosownie do powyższej formuły — określić cztery wielkości, a mianowicie wagę p badanej pary, jej objętość v, temperaturę t oraz ciśnienie f, pod jakiem się znajduje. Do określeń tych służą głównie dwie metody. Pierwsza Gay-Lussac'a polega na tem, że oznacza się objętość, jaką przy danej temperaturze i prężności zajmuje para zważonej ilości cieczy; nadaje się ona szczególniej do badania par cieczy bardzo lotnych. Druga metoda Dumasa, pozwala bezpośrednio określić wagę znanej objętości pary przy danej temperaturze i ciśnieniu.

Figura 432 przedstawia przyrząd, używany przez Gay-Lussac'a. W żelaznem naczyniu P, napełnionem do połowy rtęcią, zanurzony jest dolny otwarty koniec szerokiej szklanej rury C, u góry zamkniętej i na początku doświadczenia całkowicie napełnionej rtęcią. Rurę tę, dokładnie podzieloną na sześcienne centymetry, otacza szklany rękaw M, również zanurzony dolnym otwartym końcem w naczyniu P; rękaw ten napełniony jest wodą, utrzymywaną w ciągłym ruchu za pomocą mieszadła, przez co temperatura jej jest wszędzie jednakowa. Temperaturę wody wskazuje termometr T. Cały przyrząd stawia się na piecyku i ogrzewa do żądanej temperatury. Do rury C wprowadza się odważoną ilość cieczy, następnie zaś określa objętość, jaką przy danej temperaturze i prężności zajmuje powstała z niej para. W tym celu przygotowuje się małe kulki z bardzo cienkiego szkła (A), przedłużone na jednym końcu w nader cienką rureczkę i określa ich wagę, poczem napełnia się je badaną

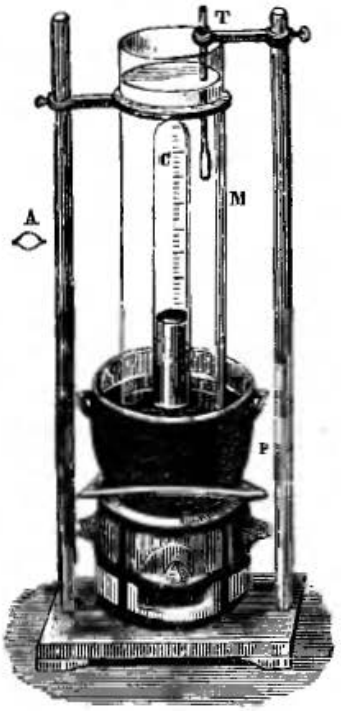


Fig. 432. Określenie gęstości par. Przyrząd Gay-Lussac'a.

cieczą i zalutowuje koniec rureczki. Zważywszy kulkę powtórnie otrzymuje się różnicę jej wagi gdy jest napełniona i pusta, a różnica ta daje wagę wprowadzonej cieczy. Kulkę taką wprowadza się do rury C wtedy, gdy ta nie jest jeszcze otoczona rękawem M. Gdy następnie ognisko piecyka ogrzewa przyrząd, zawarta w kulce ciecz rozszerza się, kulka pęka i ciecz zamienia się w parę. Szukana waga p tej pary jest wtedy równa wadze wprowadzonej do kulki cieczy. Objętość v pary otrzymuje się przez obserwacyę podziałki, przy której zatrzymuje się rtęć w rurce C; jeżeli objętość odczytana w ten sposób jest równa V_o sześciennym centymetrom, α jest spółczynnikiem rozszerzalności szkła i t jego temperaturą, to istotna objętość pary przy tej temperaturze jest rowna jak wiemy $V_o(1 + \alpha t)$. *Prężność f pary* jest równa różnicy (zredukowanej do 0^0) pomiędzy wysokością słupa rtęci w barometrze i jego wysokością w rurze C, wreszcie temperaturę t pary wskazuje termometr zanurzony w wodzie, która otacza rurę. W taki sposób otrzymuje się wszystkie cztery wartości, potrzebne do oznaczenia gęstości pary.

Metodę Gay-Lussac'a zmodyfikował Hofman; zastąpił on rurę C przez prawdziwą rurkę barometryczną, otoczoną na całej prawie długości szklanym rękawem, przez który przechodzi ciągły prąd pary z cieczy o znanej temperaturze wrzenia, jak np. wody, alkoholu amylowego, aniliny. Taki system ogrzewania jest jednocześnie wygodniejszy i dokładniejszy od systemu Gay-Lussac'a, pozwala bowiem otrzymać temperaturę ściśle jednakową we wszystkich punktach rurki, czego bez użycia mieszadła nie można osiągnąć w doświadczeniu Gay-Lussac'a.

Metoda tego ostatniego, nawet ulepszona przez Hofmana, nie daje się zastosować do cieczy, których temperatura wrzenia wynosi więcej niż 160^0, 150^0, a nawet niż 100^0, albowiem powyżej tej temperatury wpływ prężności par rtęciowych, zawartych w tej samej rurze, *co i badana para, nie może już być pominięty.* Podobna przyczyna pomyłki nie istnieje w metodzie Dumasa. Przyrząd przez niego używany przedstawiony jest na figurze 433 (str. 739). Do balonu B, wyciągniętego w cienką szyjkę i dokładnie zważonego, wprowadza się dostateczną ilość substan-

cyi, której gęstość pary ma być oznaczoną i umieszcza go między dwoma pierścieniami, przymocowanemi do żelaznej nóżki, którą można przesuwać wzdłuż pręta *E*. Następnie zanurza się balon w kąpieli *F* z oliwy albo też z łatwo topliwego aliażu czyli stopu metalowego, zależnie od mniej lub więcej wysokiego punktu wrzenia badanej substancyi. Po dostatecznem ogrzaniu kąpieli, substancya w balonie poczyna gwałtownie wrzeć i przez szyjkę wychodzi silny prąd pary. Gdy już cała ilość substancyi ulotniła się, co poznaje się potem, że ów prąd pary ustaje, zalutowuje się koniec szyjki i jednocześnie obserwuje stan barometru oraz temperaturę kąpieli, jaką pokazuje zanurzony w niej podczas doświadczenia termometr *D*. Podczas wrzenia cieczy w balonie, wychodzący z niego prąd pary zabiera z sobą wszystko powietrze tak, że po zalutowaniu wnętrze jego wypełnione jest tylko parą, której temperatura *t* równa temperaturze kąpieli, prężność zaś *f* — ciśnieniu barometrycznemu w chwili zamknięcia balonu. Mając te dwie dane należy jeszcze określić wagę *p* oraz objętość *v* pary, zawartej w balonie. W celu otrzymania pierwszej waży się zalutowany balon po oziębieniu, a różnica w wadze przed i po napełnieniu go parą daje szukaną wagę *p*. Następnie oblicza się objętość balonu przy 0°, zkąd łatwo już znaleść objętość jego przy temperaturze kąpieli, a więc także objętość *v* napełniającej go przy tej temperaturze pary.

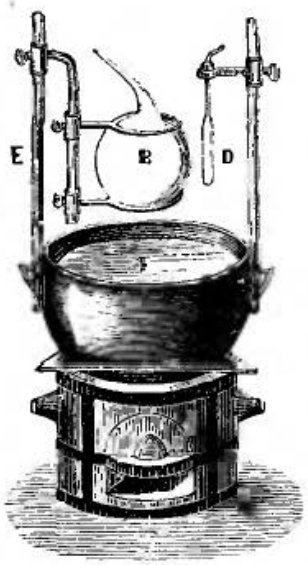


Fig. 433. Określenie gęstości par. Przyrząd Dumasa.

W celu zastosowania metody Dumasa do substancyj, które wrą dopiero przy bardzo wysokiej temperaturze, Sainte-Claire Deville i Troost zmodyfikowali ją w ten sposób, że balon szklany zastąpili porcelanowym, zamiast zaś kąpieli ciekłych używali pewnego rodzaju piecyków wypełnionych parami, które dawały zmienną lecz ciągłą temperaturę, gdy gotowano w nich jednę i tę samę ciecz przy zmiennem ciśnieniu, albo też szereg temperatur przerywany przy gotowaniu rozmaitych cieczy pod ciśnieniem

atmosferycznem. Deville i Troost otrzymali w taki sposób następujący szereg temperatur: Pary rtęci dawały 350°, siarki 440°, kadmu 815°, cynku 930°. Uczeni ci osiągnęli w doświadczeniach swych temperaturę 1000°, przyczem balony ogrzewali w glinianych tyglach, umieszczanych w odpowiednich piecach, temperaturę zaś mierzyli za pomocą powietrznego termometru o porcelanowym zbiorniku.

Dawniejsze doświadczenia nad gęstością par oparte były na przypuszczeniu, że pary aż do chwili skroplenia stosują się, przynajmniej z możliwem przybliżeniem, do praw Boyle'a-Mariotte'a i Gay-Lussac'a. Innemi słowy przypuszczano, że gęstość ich, czyli stosunek wag równych objętości pary i powietrza jest stały, a więc niezależny od temperatary i ciśnienia. Oznaczano tedy gęstość par przy jakiejkolwiek temperaturze i ciśnieniu, a znaleziona wartość wskazywała wiele razy dana para jest gęściejszą od powietrza przy jednakowych warunkach ciśnienia i temperatury. Gay-Lussac np. oznaczał podług swojej metody, przy temperaturze 100° i ciśnieniu mniejszem od jednej atmosfery, gęstość pary wodnej i znalazł liczbę 0,625 to znaczy $^5/_8$ powietrza. Odtąd przyjmowano wartość tę gdy obliczano wagę określonej objętości pary wodnej przy danej temperaturze i ciśnieniu.

Lecz już z dawniejszych doświadczeń Cagniard'a de la Tour'a wynika, że przypuszczenie, iż prawa Boyle'a-Mariotte'a i Gay-Lussac'a stosują się w takim samym stopniu do par jak i do gazów, nie wytrzymuje krytyki, doświadczenia te jednak nie są o tyle dokładne, ażeby mogły pokazać w jaki sposób gęstość par zmienia się wraz ze zmianą temperatury i ciśnienia. Niektóre doświadczenia Bineau nad gęstością pary kwasu mrówkowego przy stałej temperaturze i zmiennem ciśnieniu oraz doświadczenia Cahours'a nad gęstością pary kwasu octowego przy stałem ciśnieniu i zmiennej temperaturze pokazały, że prawo Boyle'a-Mariotte'a stosuje się jedynie do pary przy ciśnieniu dalekiem od maximum prężności, prawo zaś Gay-Lussac'a do pary mającej temperaturę bardzo odległą od tej, przy której — pod danem ciśnieniem — para ta jest nasycona. Przeciwnie gęstość pary bardzo szybko wzrasta wtedy, gdy zbliżają się one do stanu nasyce-

nia, jak pokazują następujące dane, dotyczące związku pomiędzy prężnością i gęstością pary kwasu mrówkowego przy stałej temperaturze 15° C.

Prężność.	Gęstość.
2,60 milim.	2,87
7,60 „	2,93
15,80 „	3,08
20,50 maximum.	—

Przy stałej temperaturze 30° C:

Prężność.	Gęstość.
3,80 milim.	2,61
8,80 „	2,70
18,30 „	2,76
27,80 „	2,81
50,00 maximum.	—

Cahours posługiwał się w swoich doświadczeniach metodą Dumasa. Określał on gęstość pary kwasu octowego przy stałem ciśnieniu, równem ciśnieniu atmosferycznemu a rezultaty, jakie otrzymał, pokazują, że gęstość ta zmniejsza się wraz z podwyższeniem temperatury, z czego wynika, że rozszerzalność wspomnianej pary jest większa od rozszerzalności powietrza. Należy jednak dodać, że spółczynnik tej rozszerzalności zbliża się tembardziej do spółczynnika dla powietrza, im wyższa jest temperatura; tak np. przy 250° gęstość pary kwasu octowego osiąga stałą wartość 2,08, którą zachowuje już przy dalszem ogrzewaniu. Te same zjawiska zauważył Regnault przy badaniu gęstości pary wodnej; rezultaty przez niego znalezione również pokazują, że dopiero w blizkości temperatury, przy której para jest nasycona, gęstość jej wzrasta. Lecz gdy prężność pary przy danej temperaturze wynosi tylko 0,85 prężności maximalnej, gęstość się nie zmienia tak, że od tej chwili można do pary stosować prawo Boyle'a-Mariotte'a.

Reasumując powyższe fakty widzimy, że w ogóle gęstość par jest stała tylko wtedy, gdy są one dalekie od stanu nasycenia, w blizkości zaś jego obniżanie temperatury oraz powiększa-

nie ciśnienia powodują tak zwaną nienormalną ściśliwość par, poprzedzającą przejście ich w stan ciekły. Gęstością par nazwiemy tedy tę, jaką posiadają wtedy, gdy są dosyć odległe od punktu skroplenia, a więc gdy istotnie zachowują się jak gazy. Podobne znaczne nieprawidłowości widzieliśmy także w zachowaniu się gazów, łatwo dających się skroplić. W ogóle tedy należy przyjąć, że nie istnieje żadna ścisła różnica pomiędzy gazami i parami.

Dotychczas, mówiąc o parach, przyjmowaliśmy, że tworzą się one w przestrzeni pozbawionej powietrza, jak np. w próżni barometrycznej. Zachodzi obecnie pytanie, czy pary w przestrzeni, napełnionej gazami, mają taką samą prężność, jak w próżni. Pierwszym, który zajął się zbadaniem tego przedmiotu, był Dalton. Wprowadził on do próżni barometrycznej najprzód powietrze o znanej prężności, następnie pewną ilość cieczy i mierzył prężność powstałej przez to mieszaniny powietrza i pary. Rezultaty otrzymane doprowadziły go do wniosku, że prężność par w przestrzeni napełnionej powietrzem, jest równa prężności w próżni, czyli że *prężność mięszaniny powietrza i pary jest równa sumie prężności tych dwóch substancyj, wziętych oddzielnie przy tej samej temperaturze.* Mieszanina tedy par i gazów zachowywałaby się jak mieszanina dwóch gazów albo par dwóch nie mieszających się ze sobą cieczy. Prawo Daltona stwierdził następnie Gay-Lussac. Doświadczenia jego jednak wystarczyły do przyjęcia prawa tego tylko jako przybliżone, lecz nie były o tyle liczne i ścisłe, ażeby mogły pokazać, iż ono jest zupełnie dokładne. W celu przekonania się o tem Regnault wykonał szereg nowych doświadczeń i znalazł, że prężność par w gazach jest zawsze nieco mniejsza, aniżeli w próżni. Prężność pary wodnej w próżni była zawsze większa od jej prężności w przestrzeni, zawierającej azot, a jakkolwiek różnice okazały się bardzo małe, to jednak ciągłość ich przemawia za tem, że prężność par w próżni jest nieco większa niż w gazach. Późniejsze doświadczenia z eterem, benzyną i siarkiem węgla potwierdziły ten rezultat; różnice okazały się tem większe, im lotniejszą była użyta substancya; z eterem np. dochodziła do 36 milim, przy temperaturze 29,3°.

Regnault sądzi jednak, że jego doświadczenia nie obalają prawa Daltona; przyjmuje on, że przyczyną zmniejszenia prężności jest zgęszczanie się pary na powierzchni ścianek naczynia oraz pewna przeszkoda przy tworzeniu się pary w przestrzeni, napełnionej powietrzem. Gdy w naczyniu znajduje się ciecz, paruje ona tak długo, dopóki para nie osiągnie maximum prężności, lecz ścianki zawsze zgęszczają pewną ilość tej pary i powodują zmniejszenie prężności. W próżni zgęszczoną parę natychmiast zastępuje nowa jej ilość, powstała z cieczy, w przestrzeni zaś napełnionej powietrzem, w której tworzenie się pary jest utrudnione, zastępywanie to jest stopniowe i dlatego prężność jest tutaj w istocie mniejsza. Zmniejszenie to zaś trwa stale dlatego, że osadzona na ściankach warstwa cieczy spływa wskutek ciężkości, coraz więc nowa ilość pary zgęszcza się na nich w miarę jak prężność znów się powiększa. Wreszcie dodajmy, że dla cieczy nie bardzo lotnych, jak np. dla wody, różnica jest nader mała tak, że prężność pary wodnej w przestrzeni napełnionej powietrzem przyjmujemy jako równą prężności jej w próżni [1]).

Atmosfera ziemska, stykająca się na znacznej przestrzeni z wodą, zawiera parę wodną, ilość której jest zależna od czasu i miejsca. Para ta, przenoszona przez wiatry, powoduje takie zjawiska atmosferyczne, jak deszcz, mgłę, śnieg, badanie których wchodzi w zakres meteorologii; w tem miejscu opiszemy jedynie sposoby mierzenia ilości wilgoci w powietrzu, co stanowi cel *hygrometryi*. Powietrze jest mniej lub więcej wilgotne, zależnie od tego, czy jest mniej lub więcej zbliżone do stanu nasycenia parą wodną, a więc od tego, czy prężność jej f jest bliska lub daleka od prężności maximalnej F. Dlatego też zwykle pod *stanem wilgotności* powietrza rozumiemy stosunek $\frac{f}{F}$ prężności pary wodnej, jaką ono zawiera do prężności tej pary, jaką zawierałoby przy tej samej temperaturze, gdyby było nasyconem. Stosunek ten stanowi ułamek tem mniejszy od jedności, im suchsze jest powie-

[1]) Wüllner, l. c.

trze, tembardziej zaś zbliżony do jedności, im ono jest wilgotniejsze. Gdy temperatura się zmienia, to pomimo że powietrze zawiera tę samą co przedtem ilość pary wodnej, stan jego wilgotności również ulega zmianie. Albowiem gdy np. temperatura się podnosi, prężność pary wodnej, jaką zawierałoby powietrze w stanie nasycenia, wzrasta szybciej aniżeli prężność pary, w danej chwili w niem się znajdującej i wtedy stosunek dwóch tych prężności maleje.

Wiadomo, że istnieją substancye, które pochłaniają wilgoć, znajdującą się w powietrzu. Wszystkie prawie materye zwierzęce lub roślinne, będąc wysuszone, posiadają tę własność, obserwacya zaś pokazuje, że objętość ich powiększa się za każdym razem, gdy pochłaniają wodę. I tak drzewo, fiszbin, struny pęczniejają prostopadle do kierunku włókien, włosy zaś wydłużają się lub kurczą, zależnie od tego, czy znajdują się w wilgotnem lub suchem powietrzu. Wymienione ciała nie rozszerzają się w sposób widoczny pod wpływem ciepła tak, że możemy przyjąć, iż zmiany w ich objętości zależą jedynie od wilgoci powietrza; dlatego też ciała owe mogą służyć do mierzenia stanu wilgotności. Poznawszy tę własność de Saussure zbudował pierwszy *hygrometr* czyli przyrząd do mierzenia wilgoci. Najgłówniejszą część jego stanowi włos *c* (Fig. 434) długi, gładki, jedwabisty i oczyszczony z warstwy tłuszczu, pokrywającej go za życia. Jeden jego koniec jest przytwierdzony do górnej części mosiężnej podstawy, drugi zaś przerzucony jest przez blok *o* i zakończony ciężarkiem *p*; ten ostatni powinien być tak dobrany, ażeby naprężał włos, lecz go nie wydłużał. Na bloku osadzona jest strzałka, przesuwająca się wzdłuż cyferblatu; wprawiana w ruch przez ruchy samego włosa, wskazuje stan wilgotności wznosząc się do góry, gdy pada deszcz i spadając ku dołowi, gdy w powietrzu panuje susza.

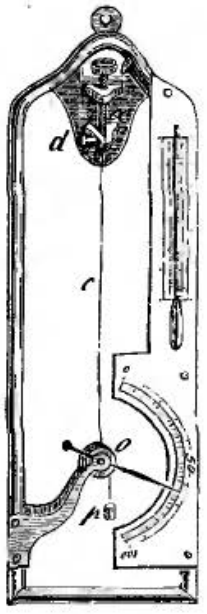


Fig. 434. Hygrometr de Saussure'a.

W celu oznaczenia stopni na hygrometrze pokrywa go się kloszem, napełnionym starannie osuszonem powietrzem; strzałka zatrzymuje się wtedy przed pewnym punktem cyferblatu, w którym stawia się *zero*, oznaczające absolutną suchość. Następnie umieszcza się klosz na talerzu z wodą, powietrze nasyca się parą wodną, włos się wydłuża i strzałka zatrzymuje się w miejscu przeciwnem, odpowiadającem krańcowej wilgotności; w miejscu tem stawia się 100°. Odległość pomiędzy dwoma tak oznaczonemi punktami dzieli się na 100 równych części.

Pozostawiony w powietrzu przyrząd taki wskazuje wilgotność, lecz właściwie jej nie mierzy, innemi słowy jest to hygroskop, a nie hygrometr, albowiem bezpośrednio nie rozwiązuje on żadnego z zadań hygrometryi, gdyż nie pokazuje jaką w danej chwili jest prężność pary wodnej, ani też jaką jest jej waga w oznaczonej objętości powietrza atmosferycznego. De Saussure czuł to dobrze i dlatego rozpoczął doświadczenia nad związkiem pomiędzy stanem wilgotności i każdym oddzielnym stopniem jego empirycznej skali. Po nim badania takie podjęli Dulong, Gay-Lussac i Melloni, lecz dopiero doświadczenia Regnault'a wykazały wszystkie warunki, wpływające na hygrometr. Nie możemy tutaj wdawać się w opis jego doświadczeń, powiemy tylko, że Regnault nakreślił tablicę, która wskazuje stan wilgotności dla każdego stopnia hygrometru. Porównanie takich tablic, sporządzonych dla wielu hygrometrów z włosem pokazało, że nie są one wcale identyczne, jak przypuszczano z początku; wszelkie różnice pomiędzy użytemi włosami zmieniają odpowiednią tablicę. Wogóle przyrząd de Saussure'a jest bardzo niedokładny. Użyty w takiej formie, jaką mu nadał jego wynalazca, daje wskazówki tylko empiryczne, chcąc zaś w sposób racyonalny podzielić go na stopnie, należy dla każdego przyrządu oddzielnie wykonać szereg doświadczeń nużących i delikatnych. Wreszcie nie wiadomo, czy skala oznaczona stosuje się do każdej temperatury.

Brunner obmyślił bezpośredni sposób mierzenia wagi wody, zawartej w danej objętości powietrza. Metoda ta, zwana chemiczną, nie pozostawia nic do życzenia pod względem ścisłości;

polega ona na tem, że znaną objętość powietrza przepuszcza się przez substancyę pochłaniającą wilgoć. Substancyę tę waży się przed i po przejściu przez nią powietrza, a znaleziona różnica daje wagę p pochłoniętej pary wodnej. Mając tę wagę, a także objętość V powietrza, zawierającego ilość p pary wodnej oraz temperaturę t, oblicza się na zasadzie formuły matematycznej szukaną wartość, a mianowicie prężność f. Doświadczenie urządza się w sposób, przedstawiony na figurze 435. Dwa mosiężne

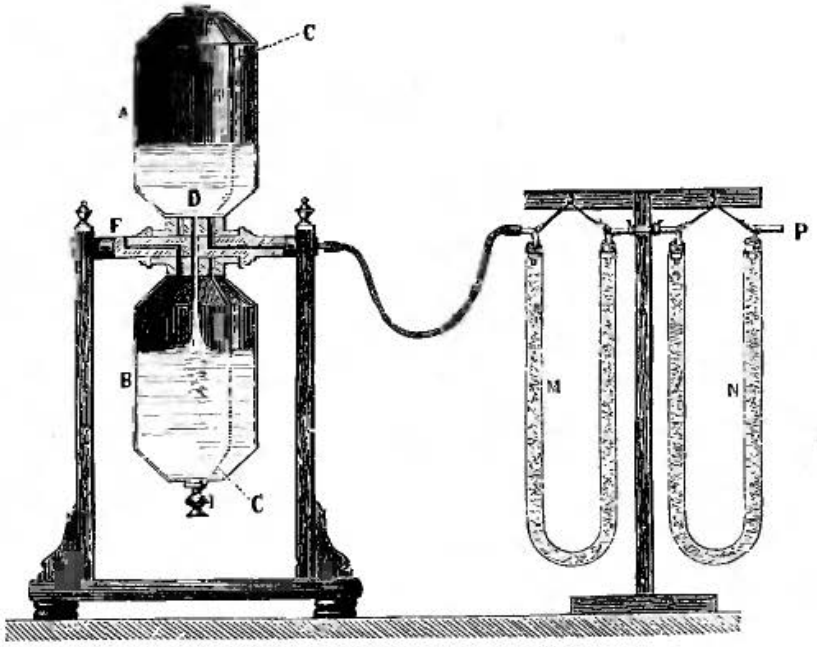


Fig. 435. Hygrometr chemiczny.

rezerwoary A i B, zupełnie jednakowe pod względem budowy i objętości, służą naprzemian do wsysania powietrza. W tym celu umieszcza się je na wspólnej poziomej osi, około której mogą się obracać, komunikują one pomiędzy sobą za pośrednictwem rurki D, oprócz tego dolny rezerwoar przez rurkę C łączy się zawsze z atmosferą, górny zaś przez rurkę kauczukową komunikuje z rurkami M i N napełnionemi substancyą pochłaniającą wilgoć. Pierwsza z nich N pochłania parę wodną, zawartą w wessanem powietrzu, druga zaś M zatrzymuje parę, która mogłaby przejść z rezerwoarów do rurki N.

Gdy dolny rezerwoar jest napełniony wodą, górny zaś powietrzem, odwraca się je w taki sposób, ażeby woda spływała

powoli z *A* do *B*. Wtedy w *A* nad wodą powstaje próżnia, powietrze zewnętrzne wchodzi tam przez rurki *N*, *M* pozostawiając w pierwszej parę wodną. Gdy już cała ilość wody przeszła z *A* do *B*, powietrze zaś z tego ostatniego wyszło przez rurkę *F*, odwraca się rozerwoary, przez co wypływ wody z górnego do dolnego na nowo się rozpoczyna i powietrze zewnętrzne znów ulega wessaniu przez rurkę *N*. Jeżeli np. objętość każdego rezerwoaru jest równa 10 litrom, przyrząd zaś odwracano pięć razy, to 50 litrów powietrza przeszło przez rurkę *N* i tutaj uległo osuszeniu. Ważąc tę rurkę przed i po doświadczeniu, otrzymujemy ilość pary wodnej, zawartej w 50 litrach badanego powietrza. Należy jednak dodać, że w istocie rachunek ten jest nieco bardziej skomplikowany, albowiem objętość tak obliczoną należy jeszcze sprowadzić do objętości, jaką badane powietrze zajmowało w atmosferze.

Opisana metoda hygrometryczna byłaby zupełnie zadawalniającą, gdyby nie to, że wymaga długiej i delikatnej manipulacyi, którą trudno jest rozpoczynać kilka razy w ciągu dnia. Dlatego też nie bardzo się ona nadaje do obserwacyj meteorologicznych. Starano się tedy wymyśleć przyrząd, któryby łączył dokładność metody chemicznej z wygodą hygrometru z włosem; przyrządem takim jest tak zwany psychrometr, o którym niżej wspomnimy.

Hygrometry zgęszczające są zbudowane na zasadzie zupełnie odmiennej od tych, o jakich dotychczas wspominaliśmy; zawdzięczamy ją lekarzowi z Montpellier, nazwiskiem Le Roi. Polega ona na tem, że określa się temperaturę, przy której powietrze byłoby nasycone znajdującą się w niem ilością pary wodne. Rozmaite hygrometry, oparte na tej zasadzie, różnią się pomiędzy sobą mniejszym lub większym stopniem dokładności. Jednym z najbardziej rozpowszechnionych, jakkolwiek najmniej dokładnym, jest *hygrometr Daniella* (fig. 436 str. 748). Składa się on z dwóch szklanych kulek *A* i *B*, połączonych za pomocą szerokiej, dwa razy zgiętej rurki. Kulka *A*, zwykle zrobiona z ciemnego szkła i w jednem miejscu pozłocona, jest do połowy prawie napełniona eterem; zbiornik bardzo czułego termometru,

umieszczonego wewnątrz rurki, dotyka górnych warstw tej cieczy. Przed zalutowaniem kulki B wypędzono starannie powietrze z całego przyrządu. Kulka B pokryta jest jaką delikatną tkaniną np. gazą lub batystem. Chcąc z przyrządem tym rozpocząć doświadczenie, należy go tak ustawić, ażeby przez odbicie od pozłoconej części na kulce A można było widzieć obraz jakiego jasnego przedmiotu, a następnie puszcza się krople eteru na kulkę B. Eter ten ulatnia się nader szybko, wskutek zaś utajania się przytem ciepła kulka B oziębia się bardzo silnie, pary eteru napełniające wnętrze przyrządu, skraplają się w niej i eter z kulki A poczyna dystylować ku kulce B. Parowanie eteru w kulce A również powoduje jej oziębienie i po pewnym czasie temperatura jej spada do tej, przy której powietrze staje się zupełnie nasyconem znajdującą się w niem ilością pary wodnej. Przy dalszem oziębianiu kulki A najmniejsze obniżenie temperatury spowoduje skroplenie pary wodnej w warstwie powietrza, otaczającej kulkę A; para ta pod postacią rosy osiądzie na jej powierzchni i zaciemni obraz, odbity przedtem od błyszczącego pozłoconego miejsca. W chwili gdy rosa poczyna osiadać na kulce, należy zaobserwować temperaturę, jaką wskazuje termometr w niej umieszczony, jest to temperatura, przy której powietrze staje się nasycone zawartą w niem parą wodną. Otóż mając tę danę, dowiadujemy się z tablic prężności jaką jest szukana prężność f pary wodnej, zawartej w badanem przez nas powietrzu.

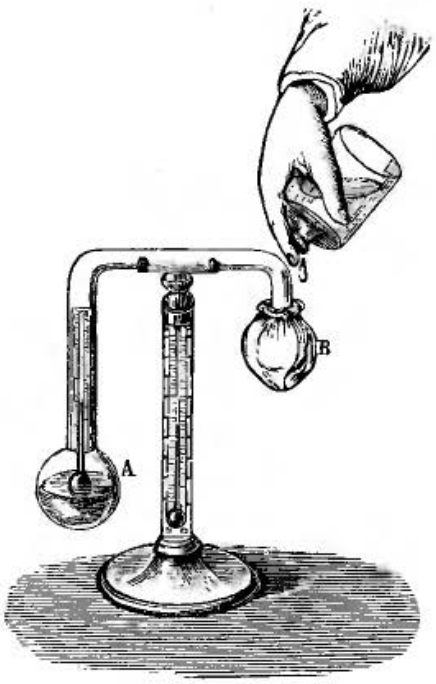


Fig. 436. Hygrometr Daniella.

Hygrometr Daniella z wielu względów nie jest dokładny. Najprzód temperatura, jaką wskazuje termometr zanurzony w górnej warstwie eteru (w kulce A), gdzie głównie odbywa się

parowanie, jest zawsze nieco niższa, aniżeli głębiej i na ściankach kulki dlatego, że jak zobaczymy później, ciecze słabo przewodzą ciepło. Temperatura więc przez nas zaobserwowana jest niższa od tej, przy której powietrze nasyca się parą. Oprócz tego przy oznaczaniu punktu rosy obserwator musi przez dłuższy czas znajdować się w pobliżu przyrządu, a ponieważ przy każdym wydechu wydziela on pewną ilość pary wodnej, nie ulega więc wątpliwości, że stan wilgotności powietrza, otaczającego hygrometr, zostaje przez to zmieniony. Wreszcie stan ten ulega także zmianie wskutek silnego oziębiania się kulki *B*, na której część pary wodnej się skrapla oraz w skutek wydobywania się pary wodnej z samego eteru, który nigdy nie jest zupełnie pozbawiony wody.

Regnault ulepszył ten przyrząd i nadał mu formę, w której wymienione przyczyny błędów są usunięte. W jego hygrometrze cała masa eteru posiada jednakową temperaturę z powodu przepływającego prądu powietrza; oprócz tego obserwacye robi się przy pomocy lunety, a więc na pewnej odległości od przyrządu. Jest on nadzwyczaj dokładny, lecz manipulacya z nim wymaga wielkiej delikatności, w ogóle też jest on mało rozpowszechniony. Alluard uprościł go znacznie, nie odjąwszy mu przytem nic z jego dokładności, przez co użycie tego przyrządu stało się łatwiejszem i powszechniejszem.

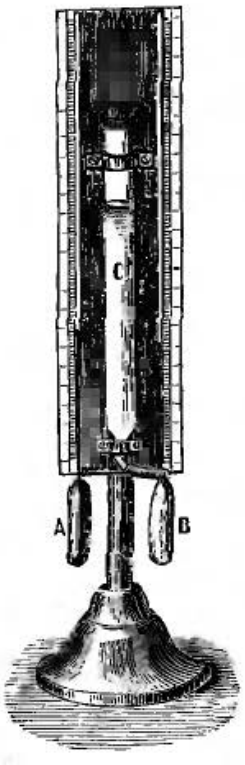


Fig. 437. Psychrometr.

Inna jeszcze metoda oznaczania prężności pary wodnej w atmosferze polega na mniejszem lub większem oziębieniu, jakiemu wskutek parowania w swobodnem powietrzu ulega ciało wilgotne. Zasada ta znalazła zastosowanie we wspomnianym wyżej psychrometrze. Składa się on z dwóch termometrów *A* i *B* (fig. 437), przymocowanych równolegle do płyty miedzianej po obu stronach rurki *C*, zawierającej wodę dystylowaną. *Zbiornik B* jest otoczony muślinem, cią-

gle wilgotnym, albowiem woda z rurki *C* spływa nań ustawicznie wzdłuż bawełnianego knota, łączącego muślin z dolnym otwartym końcem tej rurki.

Jeżeli otaczające powietrze nie jest nasycone parą wodną, wtedy z muślinu ulatnia się woda, przyczem pewna ilość ciepła zostaje utajona i w termometrze wilgotnym temperatura spada poniżej temperatury otoczenia. Z różnicy temperatur obu termometrów można obliczyć prężność pary wodnej, zawartej w powietrzu.

§ 7. Objaśnienie wrzenia. Stan sferoidalny.

Wiemy, że nawet przy zwykłej temperaturze powierzchnia cieczy paruje, jeżeli tylko nie znajdują się nad nią pary w stanie maximalnej prężności, a fakt ten dowodzi, że ciepło zawsze okazuje dążność do zamieniania cieczy w parę. Dążności tej przy danej temperaturze przeciwdziała spójność pomiędzy cząstkami cieczy oraz zewnętrzne ciśnienie. Rozpatrzmy najprzód wpływ tego ostatniego i przypuśćmy, że ciecz znajduje się pod ciśnieniem jednej atmosfery. Powiedzieliśmy już (patrz str. 171), że przestrzeń napełniona gazem zachowuje się względem innego gazu poniekąd jak próżna przestrzeń, ciśnienie więc powietrza na powierzchnię cieczy nie przeszkadza parowaniu w tem miejscu, albowiem pary, podobnie jak gazy, rozchodzą się w powietrzu, jak w próżni. Lecz masa cieczy jest pokryta warstwą powierzchniową jakby tłokiem, na którym spoczywa powietrze zewnętrzne. Gdyby wewnątrz cieczy również tworzyła się para, ulegałaby ona natychmiastowemu skropleniu pod wpływem tego ciśnienia i to dopóty, dopóki temperatura cieczy nie byłaby tak wysoką, że odpowiadająca jej maximalna prężność równałaby się ciśnieniu, wywieranemu na ciecz przez jej warstwę powierzchniową. Widzimy tedy, że dopóki temperatura cieczy jest tak nizka, że maximum prężności pary jest mniejsze od zewnętrznego ciśnienia, działającego na ciecz, ta ostatnia nie może wrzeć, to znaczy, że pęcherzyki pary nie mogą jeszcze wtedy wydobywać się z jej głębi. Lecz gdy temperatura cieczy staje się tak wy-

soką, że maximum prężności pary jest równe zewnętrznemu ciśnieniu, wtedy para, wytworzona wewnątrz cieczy, nie może już być skroploną pod wpływem ciśnienia, wywieranego przez warstwę powierzchniową cieczy. Najmniejszy dopływ ciepła powoduje wtedy pojawienie się pary w całej masie cieczy; para ta pod postacią pęcherzyków podnosi się do góry. Widzimy, że punkt wrzenia musi ulegać zmianie wraz ze zmianą ciśnienia, czyli że musi podnosić się, gdy ono wzrasta, spadać zaś, gdy ono słabnie.

Nie ulega wątpliwości, że przy przejściu cieczy w stan pary musi także być przezwyciężona spójność czyli siła utrzymująca jej cząstki w położeniu, odpowiadającem stanowi ciekłemu. W chwili tworzenia się pary prężność jej powinna zatem być większa od ciśnienia zewnętrznego, albowiem oprócz niego musi ona przezwyciężyć jeszcze spójność miedzycząstkową. Dlatego też temperatura cieczy, w której para się tworzy, musi być zawsze nieco wyższą od tej, przy której maximalna prężność jest równa zewnętrznemu ciśnieniu. Lecz para, powstała przy tej wyższej temperaturze, rozszerza się już wewnątrz cieczy, jeszcze bardziej zaś w chwili wyjścia na zewnątrz, gdzie wreszcie osiąga prężność, równą zewnętrznemu ciśnieniu i gdzie temperatura jej spada do tej, która odpowiada danej prężności. Jak bowiem zobaczymy później, rozszerzaniu się par towarzyszy obniżenie temperatury. Czytelnik rozumie więc obecnie dlaczego temperaturą wrzenia nazwaliśmy tę temperaturę, jaką wskazuje termometr otoczony parami wrzącej cieczy, a nie temperaturę samej cieczy; ta ostatnia, jak tego dowiódł Marcet, jest zawsze wyższa od tamtej.

Dalsze badania pokazały, że w procesie wrzenia bierze udział nietylko sama ciecz ogrzewana, lecz także powietrze, które pod postacią bardzo drobnych pęcherzyków znajduje się w każdej cieczy. Wielu badaczy przyjmuje, że cząstki cieczy wdzierają się w te pęcherzyki powietrzne, przez co te ostatnie się powiększają, wewnątrz nich powstaje para. W ten sposób rozpatrywane wrzenie staje się tylko szczególnym wypadkiem parowania. Teoryę tę podał pierwszy Deluc, ostatecznie zaś została

stwierdzoną na mocy doświadczeń Gernez'a. Figura 438 przedstawia jedno z nich. Maleńki klosz, umieszczony na końcu długiej szklanej pałeczki, zawiera pęcherzyk powietrza; jest on zanurzony w cieczy, którą stopniowo się ogrzewa. Pęcherzyk powiększa wtedy swą objętość i wreszcie całkowicie wypełnia klosz, następnie pęka, mały pęcherzyk zostaje uwolniony, za nim idzie drugi i tak dalej. Pęcherzyk powietrzny, którego pierwotna objętość była równa 1 sześć. milimetrowi, może przez dwadzieścia cztery godziny podtrzymywać wydzielanie pary i wytworzyć więcej jak 500,000 pęcherzyków, chociaż w innem miejscu naczynia, zawierającego ciecz, nie pojawia się żaden pęcherzyk. Doświadczenie to w sposób sztuczny przedstawia zjawisko wrzenia, w zwykłych zaś warunkach odbywa się ono wtedy, gdy ogrzewamy ciecz w naczyniach, których ścianki nie są absolutnie pozbawione gazu. Jak powiedzieliśmy już na początku paragrafu, traktującego o wrzeniu, pęcherzyki pary pojawiają się w pewnych miejscach, powiększają się i wznoszą do góry w masie cieczy, podobnie jak podczas sztucznego wrzenia. Każdy punkt naczynia, w którym znajdował się pęcherzyk powietrzny, stanowi wtedy ośrodek parowania zupełnie podobny do klosza w doświadczeniu Gernez'a. A oto jeszcze inne doświadczenie tego badacza, które dowodzi, że obecność pęcherzyka powietrznego przy wrzeniu jest konieczna. Za pomocą małego pochylonego klosza, starannie oczyszczonego z powietrza (fig. 439), chwytał on pęcherzyk pary w biegu. Pęcherzyk ten zajmował górną część klosza i stawał się natychmiast ośrodkiem parowania i punktem wyjścia nieskończonej ilości nowych pęcherzyków. Gdy przestano ogrzewać wrzenie ró-

Fig. 438. Doświadczenie Gernez'a.

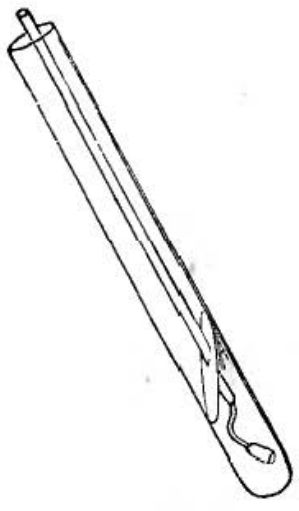


Fig. 439. Inne doświadczenie Gernez'a.

wnież ustawało i wtedy można było skonstatować obecność w kloszu bardzo małego pęcherzyka powietrza.

Z tego, cośmy tutaj powiedzieli, wynika, że ciecz zupełnie pozbawiona pęcherzyków powietrznych nie będzie wrzała przy temperaturze, uważanej za normalną. W istocie widzieliśmy wyżej, że oprócz ciśnienia, inne jeszcze warunki wpływają na temperaturę wrzenia; wiemy np., że podczas gdy wogóle woda wrze przy 100° w naczyniu metalowem, nie wrze ona nigdy przy tej temperaturze w naczyniu szklanem. Również i wszystkie doświadczenia Marcet'a (patrz str. 711) pokazują, że natura naczynia ma istotny wpływ na temperaturę wrzenia. Otóż obecnie wpływ ten objaśniamy nie rozmaitem przyleganiem cieczy do ścian naczynia, lecz rozmaitem przyleganiem powietrza do różnych ciał stałych. Z odnośnych doświadczeń na szczególną uwagę zasługują klasyczne doświadczenia Donny'a i Dufoura. Donny wprowadzał wodę do szklanej, wygiętej rurki, zakończonej kulkami *B* (fig. 440) i wewnątrz bardzo starannie oczyszczo-

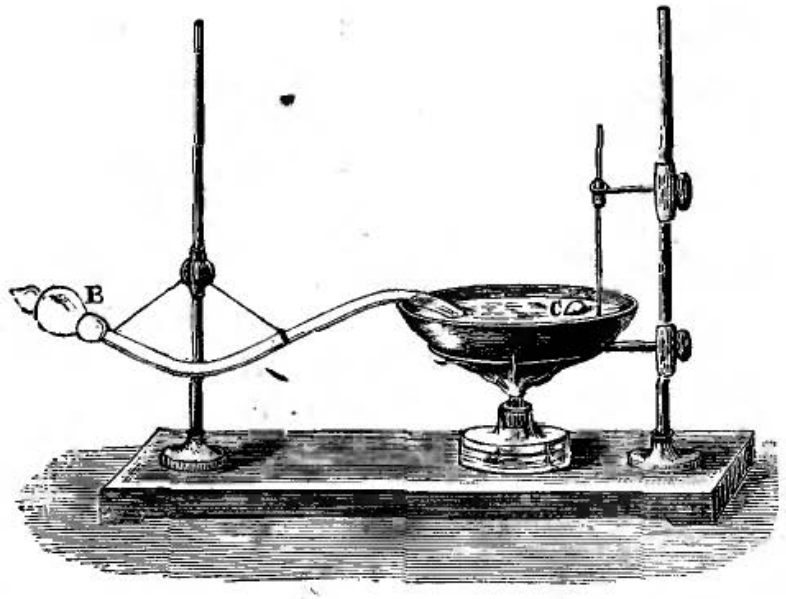


Fig. 440. Doświadczenie Donny'a.

nej za pomocą kwasu siarczanego. Następnie gotował wodę przez długi przeciąg czasu, pozbawiając ją w ten sposób powietrza, które wychodziło na zewnątrz i wreszcie zalutował koniec rurki *B*. Gdy potem ogrzewał drugi jej koniec w kąpieli glice-

rynowej, temperatura jej mogła być podniesiona blisko do 137° i pomimo to woda nie wrzała, lecz tylko silnie parowała. Dopiero przy 137° słup cieczy nagle wybuchał i część jej wpadała do kulek *B*; wybuch taki powodował niekiedy pęknięcie rurki. Albowiem jeżeli ciecz przegrzana, to jest doprowadzona do temperatury wyższej od normalnej temperatury wrzenia, poczyna wreszcie wrzeć, wtedy wywiązuje nagle znaczną ilość pary. Zjawisko to pokazuje, że w naczyniu szklanem, dobrze oczyszczonem, pęcherzyki pary, powodujące wrzenie, tworzą się dopiero przy bardzo wysokiej temperaturze. Deluc'owi udało się przegrzać wodę, umieszczoną wewnątrz oliwy, do temperatury 140° i woda ta nie wrzała. Dufour wykonał podobne doświadczenie, lecz w sposób o wiele dokładniejszy. Ogrzewał on jednostajnie do 120° mieszaninę z oleju lnianego i olejku goździkowego, wziętych w takim stosunku, że średnia gęstość była równa gęstości wody przy 100° i następnie wpuszczał do mieszaniny kroplę wody. Ta ostatnia jako chłodniejsza, a więc cięższa, spadała na dno, gdzie dzieliła się na mniejsze kropelki, które po ogrzaniu wznosiły się do góry. Kropelki te, swobodnie zawieszone w oliwie, nie stykające się z żadnem ciałem stałem, ani gazem, utrzymywały się w stanie równowagi i nie wrzały w temperaturze, dochodzącej do 178°, a nawet do 200°. Wiemy dalej, że temperatura wrzenia cieczy spada, gdy ciśnienie się zmniejsza. Otóż Dufour'owi udało się zmniejszyć ciśnienie do 150 milim. w naczyniu, zawierającem kwaśną wodę, ogrzaną do 75°, a ciecz ta nie wrzała. Ponieważ pod takiem ciśnieniem wrze ona już przy 60°, była więc przegrzaną o 15° poniżej tej temperatury wrzenia. Szczególnie ciekawem w tem doświadczeniu było to, że gdy przez wodę przepuszczano prąd elektryczny, wskutek czego wewnątrz niej pojawiły się nagle gazy (tlen i wodór), powstałe z rozkładu wody, poczynała ona natychmiast silnie wrzeć. W ogóle gdy ciecz jest przegrzana, należy tylko wprowadzić do niej jakiś gaz pod jakąbądź postacią, a pocznie ona zaraz gwałtownie wrzeć. Gaz ten odgrywa tutaj rolę impulsu, podobnie jak mała cząstka substancyi stałej powoduje skrzepnienie ciała jeszcze ciekłego przy temperaturze niższej od jego temperatury krzepnienia. Za pomocą

małego klosza Gernez wprowadził nadzwyczaj drobny pęcherzyk powietrzny do wnętrza cieczy przegrzanej; śledząc oczyma pęcherzyk, który wydobył się z klosza, eksperymentator widział, jak w miarę wznoszenia powiększał się on ogromnie tak, że zanim dotarł do swobodnej powierzchni, posiadał objętość 8,000 razy większą od pierwotnej objętości. Wreszcie można także spowodować wrzenie cieczy przegrzanej, wprowadzając do niej jakieś ciało stałe, nie oczyszczczone z powietrza, jak np. druciki platynowe, opiłki metalowe. Ciała te działają przez to, że wraz z niemi dostaje się do cieczy powietrze niezbędne podczas wrzenia. Według Gernez'a tracą one tę własność po kilkakrotnem wygotowaniu ich w wodzie. Wykonał on pod tym względem bardzo wiele doświadczeń najrozmaiciej urządzanych i usunął wszelkie wątpliwości. W ten sposób obalił on zupełnie dawniejszą teoryę, według której ciała stałe, wprowadzone do cieczy, działają same przez się (patrz str. 712).

Ażeby wrzenie się odbywało, w cieczy powinno znajdować się powietrze *swobodne*, to jest nierozpuszczone. Można np. przegrzać wodę, zawierającą w rozpuszczeniu powietrze, a nie będzie ona wrzała; dopiero gdy roztwór przesycony wydziela gaz, ten ostatni, jako swobodny, powoduje wrzenie. Działanie mechaniczne może również wywołać wrzenie cieczy, jeżeli pod jego wpływem wydzielają się gazy z przesyconego roztworu. Gernez pocierał szklaną pałeczką wnętrze małego klosza, umieszczonego w głębi cieczy, przez co powodował wydzielanie gazu i natychmiastowe wrzenie.

Najciekawszy jednak jest wpływ, jaki na wrzenie cieczy wywiera rozżarzenie ścian naczynia, w którem się ciecz znajduje. Gdy ogrzejemy np. tygielek metalowy do bardzo wysokiej temperatury i następnie wpuścimy doń kilka kropel wody, nie będą one wcale wrzały, lecz połączą się w jedną dużą kroplę kulistą lub spłaszczoną, zależnie od mniejszej lub większej ilości wody. Wygląd i kształt tej wody przypominają krople rtęci lub w ogóle cieczy, umieszczonych w naczyniach, nie zwilżanych przez nie. Wszystkie znane substancye zachowują się podobnie jak woda, niezależnie od stopnia lotności. Ciekły kwas siarkawy

lub węglany nie wrą w tygielku ogrzanym do białej czerwoności. W każdym jednak razie odbywa się wtedy parowanie, o czem przekonywamy się z tego, że w wymienionych warunkach kwasy siarczany i azotny dają białe dymy, jod daje dym fioletowy i że w ogóle kropla cieczy kulista lub spłaszczona zmniejsza się stopniowo i wreszcie znika.

Boutigny, któremu nauka zawdzięcza bardzo liczne poszukiwania nad tym przedmiotem, sądził, że mamy tutaj do czynienia z jakimś osobliwym stanem materyi czyli *stanem sferoidalnym*. Zanurzał on bardzo mały termometr w cieczy, zawartej w tygielku i skonstatował ten nader ciekawy fakt, że ciecze w warunkach, o jakich mowa, posiadają zawsze temperaturę niższą od ich temperatury wrzenia. W kilkadziesiąt lat później Berger otrzymał kulki wody bardzo wielkie; termometr zanurzony w ich wnętrzu wskazywał 96° do 98° w głębi i około 90° na powierzchni kulki. Ciekły kwas siarkawy, wprowadzony do rozżarzonego tygielka platynowego, przechodzi w stan sferoidalny, przy którym temperatura jego jest niższa od temperatury wrzenia, to jest od — 10°. Jeżeli wtedy puścimy nań wodę, takowa zmarznie i będziemy mieli lód w rozżarzonym tyglu platynowym. Faraday użył zamiast kwasu siarkawego stałego kwasu węglanego, zamiast zaś wody wziął rtęć i udało mu się zamrozić ten metal.

We wszystkich tych doświadczeniach ciecz nie styka się z rozżarzoną ścianką, lecz jest od niej oddzielona przez warstwę pary, która bardzo słabo przewodzi ciepło i ochrania ciecz od żaru. Ciepło, które przechodzi, wystarcza jedynie do podtrzymania bardzo umiarkowanego parowania. Pary te wydzielają się przez dolną powierzchnię kulki, pędzą ją i poruszają we wszystkich kierunkach. Poggendorf bezpośrednio skonstatował odległość, dzielącą ciecz od rozżarzonego naczynia, za pomocą następującego doświadczenia. Jeden drut od stosu galwanicznego połączył ze środkiem cieczy, znajdującej się w stanie sferoidalnym (ciecz ta była dobrym przewodnikiem elektryczności), drugi zaś drut dochodził do ścianki naczynia rozżarzonego. Okazało się, że w tych warunkach prąd elektryczny nie przechodził przez war-

stwę pary, będącej złym przewodnikiem, o czem można było przekonać się umieściwszy na drodze prądu galwanometr, w którym zboczenie igielki magnesowej ustało [1]). Prąd przechodził dopiero po oziębieniu naczynia do takiej temperatury, przy której ciecz bezpośrednio z niem się stykała.

Możemy także przekonać się, że w stanie sferoidalnym niema zetknięcia pomiędzy cieczą, a ciałem rozżarzonem, puszczając na poziomo umieszczoną płytę metalową, ogrzaną do czerwoności, nieco wody i patrząc na płomień świecy, stojącej w pewnej odległości na przedłużeniu płyty (fig. 441). Widzimy wtedy wyra-

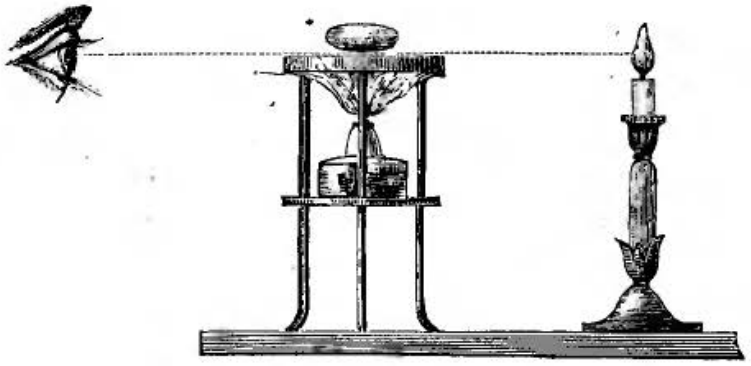


Fig. 441. Doświadczenie z cieczą w stanie sferoidalnym.

źnie płomień pomiędzy kulką wody i płytą. Wreszcie można pod pewnym względem odwrócić powyższe doświadczenia w sposób, wskazany przez Boutigny'ego. Ogrzawszy do czerwoności kawałek miedzi, zawieszony na drucie metalowym, zanurza go się nagle w naczyniu szklanem, zawierającem wodę przy 99° blizko. Niema wtedy wrzenia i widać wyraźnie powłokę gazową pomiędzy metalem a cieczą; trwa to tak długo, dopóki miedź nie oziębi się do 140° i w chwili gdy dochodzi do tego punktu, styka się z cieczą i wrzenie rozpoczyna się z wybuchem tak gwałtownym, że często szklane naczynie pęka.

W końcu należy objaśnić, dlaczego ciecze nie zwilżają rozżarzonych ścian. Otóż mamy tutaj do czynienia ze zjawiskiem włoskowatości. Wolf pokazał, że gdy temperatura stopniowo

[1]) Jak zobaczymy w księdze o elektryczności, wielkość i kierunek zboczenia igiełki magnesowej w galwanometrze daje miarę siły i kierunku prądu elektrycznego.

wzrasta, podnoszenie się wody w rurkach włoskowatych słabnie, z czego wynika, że powinno ono wreszcie ustać i zamienić się w depressyę. Menisk z początku wklęsły, staje się następnie wypukłym, jak w wypadku z rtęcią i ciecze przestają zwilżać naczynia, gdy te są dostatecznie rozgrzane.

Mamy więc obecnie klucz do zrozumienia powyższych zjawisk i czytelnik z łatwością objaśni sobie kilka następujących doświadczeń.

Po zwilżeniu ręki eterem możemy ją zanurzyć w roztopionym ołowiu, a doznamy jedynie wrażenia zimna. Możemy nawet bez narażenia się na niebezpieczeństwo przeprowadzić palec przez strumień stopionego żelaza, albo zanurzyć go w stopionem srebrze, pod warunkiem, że przedtem zmoczyliśmy palec kwasem siarkawym i że zanurzenie nie będzie trwało dłużej, niż wyparowanie tej cieczy.

Gdy kocioł parowy był przez długi czas zasilany wodą zwyczajną albo morską, wskutek czego na wewnętrznej jego ścianie utworzyła się gruba warstwa osadu, źle przewodząca ciepło, wtedy ściany metalowe muszą być ogrzane prawie do czerwoności, ażeby para mogła się wytwarzać. Jeżeli w którem miejscu osad odpada i woda znajduje się w zetknięciu z przegrzanym metalem, wtedy zachodzą zjawiska, o których mówiliśmy wyżej i ilość wytwarzanej pary się zmniejsza. W wypadku takim niebezpieczeństwo eksplozyi jest nader blizkie, albowiem gdy kocioł oziębi się do 140^0, wrzenie nagle się rozpocznie i to z taką gwałtownością, że klapy bezpieczeństwa okażą się niewystarczającemi [1]).

§ 8. Zastosowania praktyczne.

Chcąc oczyścić ciecz z obcych substancyj, rozpuszczonych w niej, albo też chcąc oddzielić dwie ciecze, zmieszane ze sobą, uciekamy się zwykle do sposobu, zwanego *dystylacyą* i w zasadzie polegającego na tem, że przez ogrzanie zamieniamy ciecz w parę,

---

[1]) Jamin, Cours de Physique Tom II.

którą następnie zbieramy w chłodniejszem naczyniu, gdzie ulega skropleniu. Gdy ciecz zawiera np. sole rozpuszczone, jak to ma miejsce ze wszystkiemi prawie wodami, znajdującemi się w naturze, wtedy, jak wiemy, jedynie woda ulatnia się, stałe zaś substancye pozostają na dnie naczynia. Jeżeli mamy mieszaninę kilku cieczy, możemy za pomocą gotowania oddzielić je całkowicie lub przynajmniej częściowo, a to na mocy faktu, że różne ciecze poczynają wrzeć przy rozmaitej temperaturze, wskutek czego jedna ciecz wcześniej zamienia się w parę, aniżeli druga.

Proces dystylacyi jest znany już od dość dawnego czasu, a pomimo że same przyrządy zostały później znacznie ulepszone, zawsze jednak polega on na zastosowaniu jednych i tych samych praw fizycznych. W prostej formie przyrząd taki składa się z kotła *a* (fig. 442), na którym osadzona jest retorta *b c*;

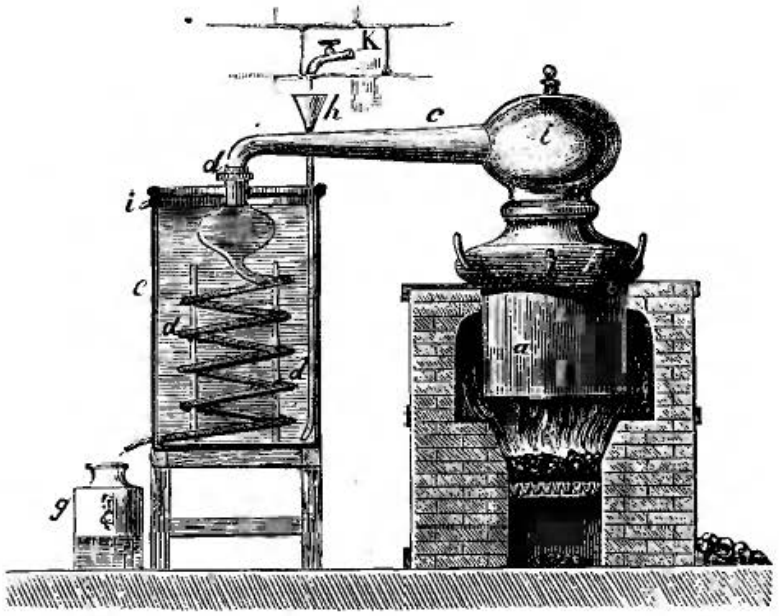


Fig. 442. Dystylator.

ta ostatnia otwiera się przy *d* do skręconej rury czyli wężownicy, zawartej w naczyniu *e*, które napełnione jest zimną wodą i stanowi tak zwany oziębiacz. Ciecz, mającą uledz dystylacyi, wprowadzamy do kotła, który ogrzewamy; para wydobywająca się z retorty skrapla się w wężownicy i spływa następnie do podstawionego naczynia *g*. Ponieważ, jak zobaczymy w następnym paragrafie, pary skraplając się oddają znaczne ilości ciepła,

to woda w oziębiaczu wkrótce ogrzewa się tak silnie, że nie może już powodować dalszego skroplenia pary; dlatego też ogrzaną wodę usuwa się przez boczną rurkę *i*, na jej miejsce zaś wprowadza świeżą zimną wodę, spływającą przez kran *k* i lejek *h* do oziębiacza. W tak prosty sposób urządzone są przyrządy, służące do dystylowania wody; przyrządy zaś, za pomocą których starano się wodę morską uczynić zdatną do picia, nie różnią się w zasadzie od nich. Nieco bardziej złożone są natomiast aparaty, służące do oddzielania cieczy o rozmaitej lotności, a więc szczególniej przyrządy do otrzymywania alkoholu. Gdy chodzi np. o wydobycie alkoholu z zacieru, przygotowanego ze zboża, wtedy używa się przyrządów bardziej skomplikowanych. Wprawdzie można także za pomocą zwyczajnego dystylatora oczyścić do pewnego stopnia daną ciecz, jeżeli dystylacyę powtarza się kilkakrotnie, lecz ciecz, ewentualnie alkohol, posiada wtedy przypalony smak i zapach i dlatego lepiej jest posługiwać się przyrządami bardziej udoskonalonemi, jak naprzykład aparatem dystylacyjnem Laugier'a, przedstawionym na figurze 443.

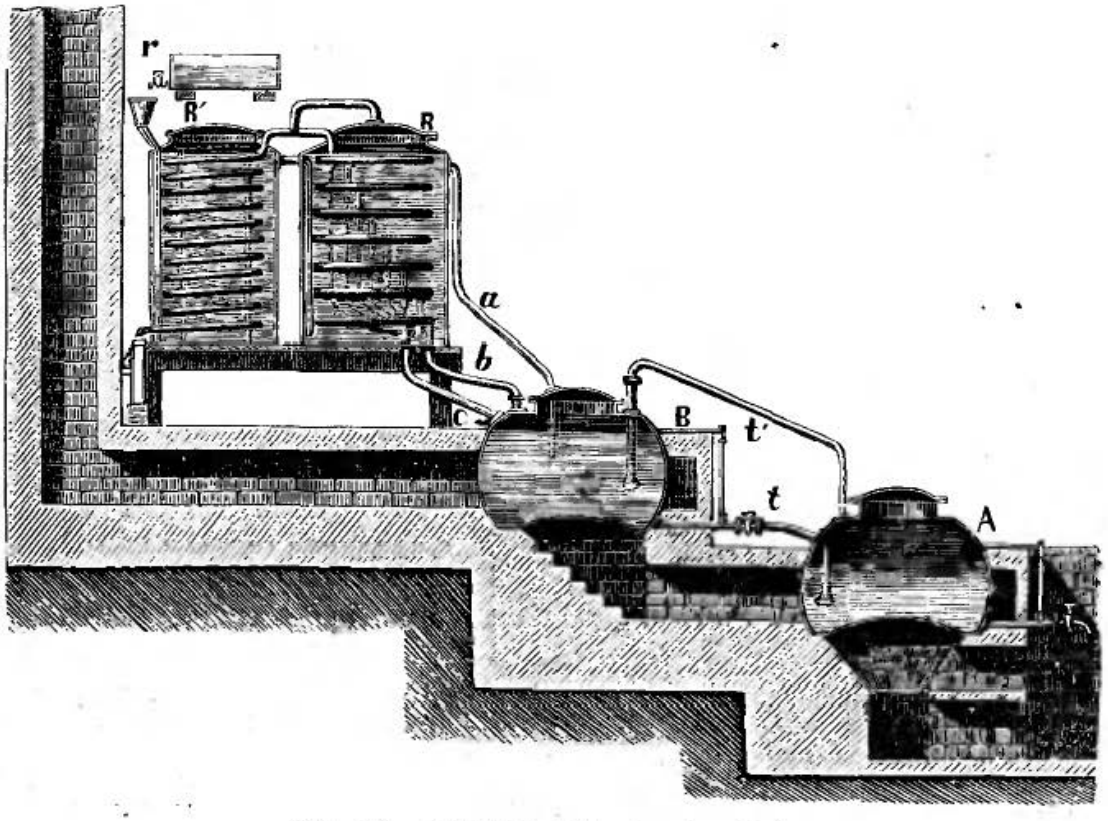


Fig. 443. Aparat dystylacyjny Laugier'a.

Widzimy tutaj kocioł parowy *A*, ogrzewany bezpośrednio przez ognisko, następnie drugi kocioł *B*, ogrzewany przez gazy, które wznoszą się od ogniska tak, że ich ciepło również zostaje spożytkowane. Dalej widzimy dwa oziębiacze *R* i *R'*, zawierające wężownice, w których pary, wydobywające się z dystylowanej cieczy, ulegają skropleniu. Cieczą tą są napełnione wszystkie części przyrządu, to jest kotły, zarówno jak i oziębiacze; wprowadza się ją mianowicie najprzód do oziębiacza *R'*, zkąd przez rurkę przepływa do *R*; z tego ostatniego przez rurkę *a* dostaje się do kotła *B* i wreszcie przez rurkę *t* do kotła A. Para zaś, która tworzy się w kotle *A*, przebywa drogę wprost przeciwną i przez rurkę *t'* wchodzi do kotła *B*, zkąd przez rurkę *b* dostaje się do wężownicy, gdzie ulega po części skropleniu. Ciecz, powstała ze skroplenia, powraca przez rurkę *c*, która łączy pomiędzy sobą wszystkie skręty wężownicy, do kotła *B*, podczas gdy para nieskroplona wchodzi do wężownicy w *R'*, gdzie wreszcie zostaje skroplona i ostatecznie wypływa z niej jako alkohol. W podobny sposób urządzane są wszystkie przyrządy, służące do dystylacyi alkoholu.

Inną własność cieczy, a mianowicie jej zdolność ulatniania się przy zwykłej temperaturze, również spożytkowano w celach praktycznych Jak wiadomo, znaczna ilość soli, używanej do pokarmów, głównie zaś w przemyśle, pochodzi z wody morskiej, w której stanowi ona około 40 lub 37 część całej masy. Otrzymuje się ją w ten sposób, że zawierającą ją wodę wprowadza się do obszernych niegłębokich naczyń, ustawionych na wolnem powietrzu; woda zwolna wtedy paruje, roztwór staje się coraz bardziej stężonym i wreszcie sól osiada w głębi naczyń pod postacią kryształów, albo też jako cienka stała warstwa pokrywa dno zagłębień. Sól w ten sposób otrzymaną układa się warstwami i wystawia przez pewien przeciąg czasu na działanie powietrza, a to w celu ostatecznego oczyszczenia jej z niektórych przymieszek; sól taka znana jest w handlu jako sól morska.

Oprócz tego sól otrzymuje się także z wody źródlanej, zawierającej sole. Ponieważ ilość tych ostatnich jest tutaj zwykle niewielka, to z początku wyparowywa się częściowo wodę na wolnem powietrzu i następnie nieco bardziej stężony roztwór wpro-

wadza do naczyń, gdzie ogrzewa go się tak długo, dopóki sól nie osiądzie pod postacią prawidłowych kryształów. Wyparowywanie słonych wód odbywa się zwykle w sposób następujący: pomiędzy belkami rusztowania, ustawionego ponad zbiornikiem, w którem woda ma się zebrać, układa się wielkie masy chrustu (fig. 444), na które przez boczne rury *a* spływa woda z dwóch

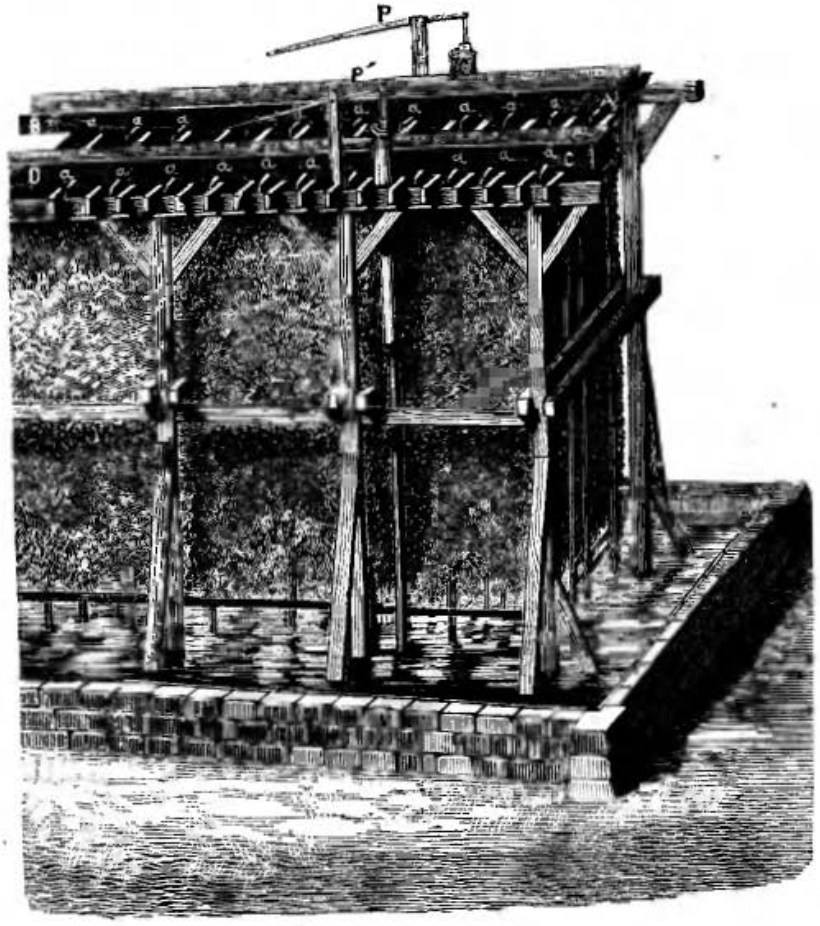


Fig. 444. Tężnia.

długich koryt *AB* i *CD*. Budowle takie, zwane *tężniami*, które można widzieć w blizkości każdej warzelni soli, np. u nas w Ciechocinku, są tak urządzone, że kierunek ich długości jest prostopadły do kierunku, w którym zwykle wieje wiatr tak, że może on swobodnie przewiewać przez wiązki chrustu. Rzecz oczywista bowiem, że wiatr, przynosząc coraz to nowe warstwy powietrz i unosząc te, które są już napełnione parami, sprzyja parowaniu wody na tężni. Podczas gdy woda spływa z jednej gałęzi na drugą, ulega ona dosyć szybkiemu ulatnianiu tak, że wo-

da, która raz jeden przeszła przez chrust, zawiera większą procentową ilość soli, aniżeli woda ze źródła. Pompy P i P' sprowadzają wodę, która spłynęła na dół, po raz drugi i trzeci do koryt AB i CD, zkąd znów dostaje się na powierzchnię chrustu; dopóki nie osiągnie żądanego stopnia stężenia.

W poprzednim wypadku wyparowywanie wody miało na celu otrzymanie w stanie suchym substancyj, w niej rozpuszczonych. Lecz ulatnianiu wody towarzyszy inne jeszcze zjawisko, które również zostało spożytkowane w celach praktycznych. Jak wiemy, woda zamieniając się w parę, potrzebuje do tego ciepła; gdy otrzymuje je od ciał, z któremi się styka, wtedy ciała te oziębiają się. Otóż z tego właśnie korzystają w południowych krajach, szczególniej w Hiszpanii. Mieszkańcy jej używają naczyń ze słabo wypalonej gliny, zwanych alkarazas, w których trzymają wodę, przeznaczoną do picia. Woda ta przesiąka przez pory ścianek i paruje na zewnętrznej ich powierzchni, odejmując przytem ciepło samemu naczyniu, wskutek czego woda w niem zawarta utrzymuje się stale przy dość nizkiej temperaturze. Ponieważ parowanie odbywa się tem szybciej, im wyższa jest otaczająca temperatura oraz im suchsze jest powietrze, to działanie naczynia okazuje się najbardziej skutecznem wtedy, gdy jest najwięcej pożądane. Naczynia takie mogą być przez dłuższy czas używane, pod warunkiem, że woda nie zawiera wiele wapna, w przeciwnym bowiem razie pory w ściankach wkrótce się zatykają i naczynie przestaje odpowiadać swemu celowi. W gorących krajach, gdzie temperatura nigdy nie spada tak nizko, ażeby wody pokryły się warstwą lodu, starają się w inny jeszcze sposób spożytkować fakt oziębiania się ciał wskutek parowania, a mianowicie przygotowują tak cenny w owych okolicach lód. W jaki sposób osiągają to np. w Bengalu, możemy się dowiedzieć z następującego ustępu, wyjętego z dzieła Tyndalla o cieple: „Wells pierwszy objaśnił sposób sztucznego wytwarzania lodu w Bengalu, gdzie substancya ta nigdy nie powstaje w sposób naturalny. W niegłębokich dołach, po części napełnionych słomą, ustawia się płytkie naczynia z wodą; pod jasnem niebem z wody silnie promieniuje ciepło i znaczna jego ilość uchodzi w prze-

strzeń. Ciepła, tak utraconego, ziemia nie może wodzie przywrócić, z powodu znajdującej się pomiędzy niemi słomy, która nie przewodzi ciepła. Przed wschodem słońca tworzy się w każdem naczyniu bryła lodu. Takie jest objaśnienie Wells'a, bezwątpienia słuszne, lecz według mojego zdania wymaga ono jeszcze pewnego uzupełnienia. Z opisu jego możnaby sądzić, że najkonieczniejszym warunkiem powstawania lodu jest nietylko jasne, ale także i suche powietrze. Sir Robert Barker powiada, że noce najjaśniejsze oraz takie, podczas których po północy pada najmniej rosy, najbardziej sprzyjają tworzeniu się lodu. Zwróciłem szczególną uwagę na ostatnie, bardzo ważne zdanie. Ażeby lód tworzył się w obfitości, atmosfera powinna być nietylko jasna, lecz także względnie pozbawiona pary wodnej. Gdy tylko słoma, na której znajdowały się naczynia, stawała się wilgotną, zastępowano ją zaraz słomą suchą. Wells powiada, że musiano tak postępować dlatego, iż słoma wilgotna jest bardziej zbita i lepiej przewodzi ciepło. Może to jest słuszne, oprócz tego jednak jest rzeczą pewną, że para, wydobywająca się z wilgotnej słomy i rozpościerająca się nakształt parasola powyżej naczyń, powstrzymywała oziębienie i tem samem opóźniała powstawanie lodu."

Wiele okoliczności wpłynęło na to, że starano się udoskonalić metodę sztucznego przygotowywania lodu, którą od dawna posługiwano się przy pomocy pompy powietrznej. Metoda polega na tem, że wywołujemy silne obniżenie temperatury przez szybkie ulatnianie bardzo lotnych ciał. Zasada ta znalazła zastosowanie w przyrządach, w których odrazu można przygotować znaczną ilość lodu, a mianowicie w maszynie do wytwarzania lodu. W małej maszynie lodowej Carré (fig. 445, str. 765), najczęściej używanej wtedy, gdy chodzi o otrzymanie lodu w małych ilościach, widzimy stojący w piecu walcowaty kocioł parowy *T*, połączony za pomocą rur z naczyniem *R*, którego zewnętrzna powierzchnia posiada kształt ściętego stożka. Naczynie to jest umieszczone w zimnej wodzie. Wnętrze jego zajmuje dokładnie przystosowany cylinder blaszany *S*, który widzimy po prawej stronie rysunku. Gdy przyrząd ma być użyty po raz pierwszy, napeł-

nia się kocioł wodą, nasyconą gazem amoniakiem, odmyka boczną klapkę, prowadzącą do rury, która otwiera się pod wodą i ogrzewa z początku słabo. Wskutek ogrzewania amoniak gazowy wydobywa się z wody i wypycha powietrze z rury. Gdy już całe powietrze zostało wydalone—co poznaje się potem, że z rury przestają wydobywać się pęcherzyki oraz, że woda do której rura ta dochodzi, otrzymuje wyraźny amoniakalny zapach—zamyka się klapkę, której nie potrzeba już nigdy więcej otwierać, chyba, że z czasem do przyrządu znów dostanie się nieco powietrza. Następnie ogrzewa się silniej, przez co amoniakalne pary wydobywają się obficiej i przenikają do naczynia *R*, gdzie ulegają oziębieniu. Obniżenie temperatury oraz ciśnienie przybywających w dalszym ciągu par powodują skroplenie ich w naczyniu *R*. Gdy temperatura w kotle parowym dochodzi do 130°, wtedy do wspomnianego naczynia wstawia się ów blaszany cylinder *S*, napełniony wodą, która ma być zamieniona w lód, podnosi się cały przyrząd i umieszcza kocioł w zimnej wodzie, naczynie zaś *R* otacza ciałami słabo przewodzącemi ciepło. Gdy potem woda w kotle znów się ochładza, wsysa ona napowrót pary amoniakalne, ciśnienie ich staje się słabszem, wskutek czego amoniak, skroplony poprzednio w naczyniu *R*, znów poczyna ulatniać się. Amoniak pochłania wtedy znaczną ilość ciepła, które odejmuje wodzie, zawartej w cylindrze *S* i woda ta zamienia się w lód; po wyjęciu cylindra zwykle znajdujemy w nim tę substancyę w stanie bardzo czystym. W opisanym małym przyrządzie ulotnienie cieczy, wymaga zwykle 25 minut, zamiana w lód trwa minut 30; gdy cały proces jest ukończony, można go natychmiast rozpocząć na nowo.

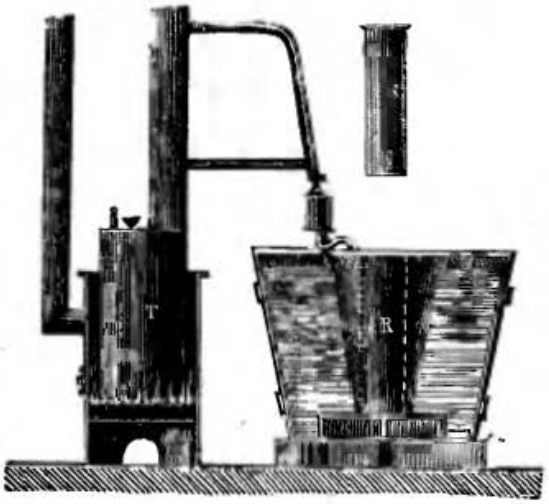


Fig. 445. Mała maszyna Carré do robienia lodu.

Do przygotowywania lodu na wielką skalę służą przyrządy, zbudowane również przez Carré'a; jedną z takich wielkich ma-

szyn lodowych przedstawia figura 446. Widzimy tutaj kocioł parowy *A*, w którym ogrzewa się roztwór amoniakalny; wydobywająca się zeń para przechodzi za pośrednictwem rurki do

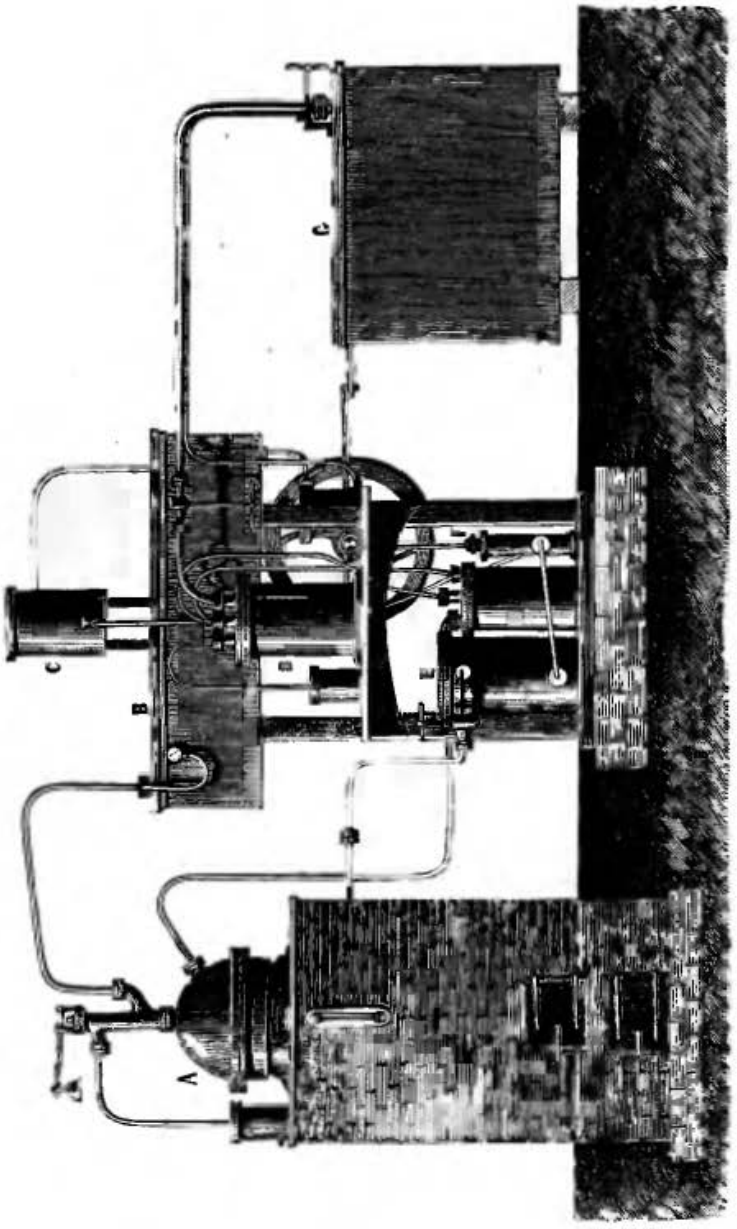


Fig. 446. Wielka maszyna lodowa Carré'a.

rezerwoaru *B*, gdzie oziębia się i ulega skropleniu, albowiem na rozerwoar ten ustawicznie spada z *C* strumień zimnej wody. Ciecz powstała ze skroplenia wypełnia następnie przestrzenie, znajdujące się pomiędzy podwójnemi ścianami naczynia *G*, zawierającego wodę, która ma być w lód zamienioną. Gdy woda w kotle *A* nie zawiera już wcale amoniaku, pozwalamy jej spłynąć do naczynia *E*, połączonego z cylindrem *D* oraz z oziębia-

czem; w miarę jak woda w E oziębia się, pochłania ona znów amoniak tak, że cała ilość cieczy, skroplona poprzednio pomiędzy ścianami naczynia G, znów się ulatnia i powoduje zmarznięcie wody w tem naczyniu. Gdy proces został ukończony, woda nasycona amoniakiem, zostaje przeprowadzona za pomocą pompy F z naczynia E do kotła parowego.

§ 9. Skroplenie gazów.

Widzieliśmy wyżej, że im bardziej para jest oddalona od stanu nasycenia, tem więcej własności jej zbliżają się do własności gazu doskonałego. Rezultat ten osiągamy bądź ogrzewając parę pod stałem ciśnieniem, bądź zmniejszając jej ciśnienie przy stałej temperaturze. Nasuwa się w tem miejscu pytanie, co staje się z gazem, gdy poddajemy go działaniu wprost przeciwnemu, to jest gdy go coraz bardziej oziębiamy i ściskamy. Otóż w miarę jak wynajdywano nowe sposoby obniżania temperatury oraz wymyślano potężne przyrządy do ściskania gazów, można było doprowadzić większą ich część do stanu pary nasyconej, a więc zamienić je w ciecze, własności których nie różnią się zasadniczo od własności cieczy, znanych dotychczas. Po klasycznych doświadczeniach Faraday'a, liczba gazów, uważanych za niedające się skroplić, redukowała się do sześciu, lecz i one musiały uledz wobec potęgi nowych środków działania. Nawet wodór, stawiający największy opór, został najprzód przez Cailletet'a doprowadzony do stanu zgęszczenia, który charakteryzuje się przez pojawienie w jego masie lekkiego obłoczku, niedawno zaś Wróblewski i Olszewski otrzymali gaz ten pod postacią kropel cieczy, pływających po powierzchni szkła. Warunki temperatury i ciśnienia, wymieniane dziś jako konieczne do skroplenia danego gazu, okażą się, być może, z czasem nieco odmiennymi, wskutek dalszych poszukiwań, lecz ogólne rezultaty, osiągnięte w kwestyi nas zajmującej, nie podlegają obecnie żadnej wątpliwości. Znaczenie ich jest nader wielkie i dlatego zatrzymamy się nad niemi nieco dłużej.

Skroplić gaz możemy przez oziębienie albo przez ściskanie, lub też wreszcie przez jednoczesne działanie obu tych czynników.

Samo oziębienie wystarcza do skroplenia takich gazów, jak kwas siarkawy, cyan, a nawet amoniak. Figura 447 przedstawia odnośny przyrząd w chwili, gdy skrapla się w nim pierwszy z wy-

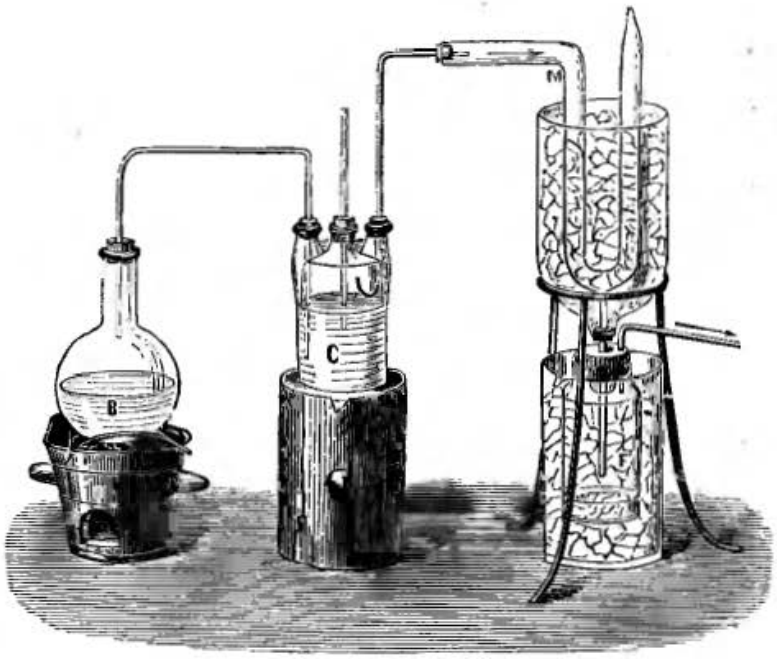


Fig. 447. Przyrząd do skroplenia gazu przez oziębienie.

mienionych gazów. Gaz ten tworzy się w balonie *B*, zkąd przez rurkę dostaje się do flaszki *C*, w której oswobadza się od wody, następnie przechodzi on do rurki, mającej kształt litery *U* i otoczonej mieszaniną oziębiającą. Tutaj gaz się skrapla i spływa do butelki *F*, również otoczonej mieszaniną oziębiającą. Ponieważ ciekły kwas siarkawy poczyna wrzeć przy — 10°, to chcąc go zachować, należy hermetycznie zamknąć naczynie, w którem jest zawarty, albo lepiej zalutować je. Ciecz powstała przez oziębienie gazu może następnie pozostać jako taka i przy zwykłej temperaturze, jeżeli szkło naczynia jest o tyle grube, że może wytrzymać ciśnienie ciała, które stara się powrócić do pierwotnego stanu.

Najczęściej skrapla się gazy przez powiększenie ciśnienia, istnieje też ogólna do tego metoda, przy której nie potrzeba uciekać się do żadnych środków mechanicznych. Metoda ta polega na wprowadzaniu do bardzo mocnych naczyń pewnych chemicznych

odczynników, które reagując na siebie wydzielają gaz, mający uledz skropleniu. Zmuszony do nagromadzania się w ograniczonej przestrzeni, gaz ten osiąga olbrzymią prężność i wtedy mogą zajść trzy wypadki: albo naczynie pęka, co już zdarzało się, albo też reakcya chemiczna ustaje, co również miewało miejsce lub wreszcie gaz skrapla się i ten właśnie ostatni wypadek jest najczęstszy. W podobny sposób Faraday skroplił amoniak. Uczony ten zauważył, że chlorek srebra posiada własność pochłaniania znacznej ilości amoniaku przy zwykłej temperaturze i wydzielania go podczas ogrzewania. Wprowadził on chlorek srebra do zamkniętego ramienia szklanej zgiętej rurki (fig. 448),

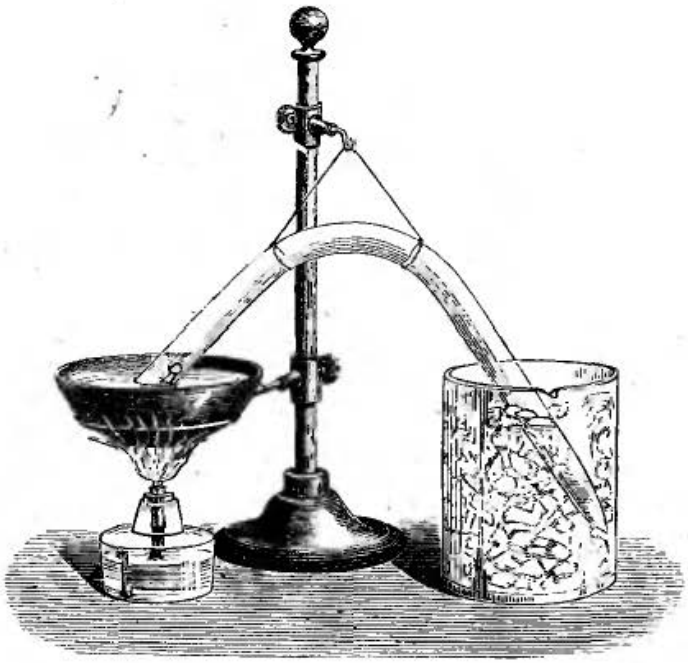


Fig. 448. Doświadczenie Faraday'a.

której drugie ramię było otwarte i ostro zakończone. Następnie wprowadził do rurki amoniak, który ulegał w niej pochłanianiu, zalutował otwarty koniec i zanurzył go w mieszaninie oziębiającej, ogrzewając jednocześnie chlorek srebra, zawarty w zamkniętem ramieniu. Amoniak wydzielał się wtedy z chlorku i zbierał w części zimniejszej, pod postacią przezroczystej cieczy. Przy zwykłej temperaturze chlorek znów pochłania amoniak i przyrząd raz na zawsze przygotowany, może służyć za każdym razem, gdy się chce powtórzyć doświadczenie.

Thilorier posługiwał się taką samą metodą przy skraplaniu kwasu węglanego. Przyrząd jego składa się z cylindra *P* (fig. 449) o bardzo mocnych ścianach. Z początku robiono cylin-

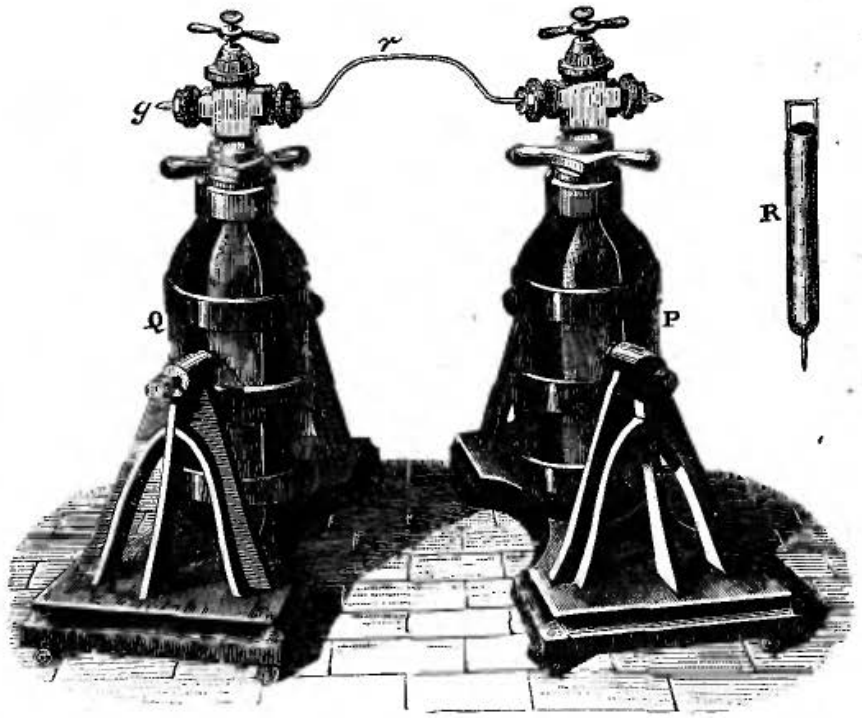


Fig. 449. Przyrząd Thilorier'a.

der ten z żelaza, ponieważ jednak nie można było ręczyć za jego wytrzymałość, przygotowywano go następnie z miedzi i ściskano z zewnętrz żelaznemi obręczami i sztabami. W pokrywie znajduje się otwór, zamknięty korkiem ze szrubą, przez który wprowadza się do wnętrza cylindra substancye, mające wytworzyć gaz, a mianowicie dwuwęglan sodu i kwas siarczany. Dwuwęglan umieszcza się na dnie cylindra, zaś kwas siarczany, wzięty w ilości potrzebnej do rozłożenia dwuwęglanu, wlewa się do wązkiego otwartego u góry naczynia *R*, które widać oddzielnie na rysunku i następnie dopiero wprowadza do cylindra. Po zamknięciu tego ostatniego obraca go się kilkakrotnie około póziomej osi, podtrzymującej go pośrodku, przez co kwas siarczany częściowo wylewa się na dwuwęglan sodu. Reakcya chemiczna się rozpoczyna i wydzielający się wewnątrz przyrządu kwas węglany osiąga prężność, równą 80-ciu atmosferom; wtedy skrapla

się, lecz jest zmieszany z ciałami, z których powstał. Chcąc otrzymać go w czystym stanie, należy go poddać dystylacyi. Proces ten nie jest tak trudny, jak się na pozór wydaje, albowiem dystylacya odbywa się sama przez się, skoro tylko łączy się za pomocą mocnej miedzianej rury r cylinder P, w którym wytworzył się gaz, z drugim cylindrem Q zupełnie jednakowym, lecz napełnionym powietrzem i nieco oziębionym. Ponieważ podczas reakcyi chemicznej wydziela się, jak później zobaczymy, ciepło które ogrzewa cylinder P, różnica w temperaturze wystarcza do wywołania dystylacyi ciekłego kwasu węglanego z P do Q, gdzie znów ulega skropleniu pod wpływem własnego ciśnienia.

Kwas węglany można otrzymać także jako ciało stałe. Kran zamykający cylinder Q, zaopatrzony jest w rurkę, która dochodzi do ciekłego kwasu węglanego. Otóż po odemknięciu otworu g, znajdującego się z boku krana, kwas węglany pod wpływem wielkiego ciśnienia wytryskuje z siłą i przechodzi natychmiast w stan lotny. Lecz tylko część gazu ulatnia się, albowiem ciepło utajone przy tej zmianie stanu jest tak znaczne, że pozostała część cieczy krzepnie i tworzy białe płatki krystaliczne, które zbiera się w specyalnie do tego przygotowanych pudełkach mosiężnych. Stały kwas węglany słabo przewodzi ciepło i zachowuje się bardzo długo na powietrzu; zetknięty z termometrem powoduje jego obniżenie do — 79°. Stanowi więc on doskonałą substancyę oziębiającą, lecz ażeby uczynić go jeszcze bardziej skutecznym, należy go zwilżyć eterem, przez co masa jego staje się lepszym przewodnikiem. Jednakowoż umieszczony na dłoni nie powoduje na niej tak silnego wrażenia zimna, jakby można sądzić, co pochodzi ztąd, że ciało to nie styka się dokładnie ze skórą. Lecz gdy zmieszamy go z eterem, zimno jest tak wielkie, że płatek stałego kwasu węglanego, umieszczony na skórze, niszczy jej tkanki, podobnie jak dotknięcie rozpalonej substancyi. Wspomniana mieszanina powoduje w ciągu kilku sekund zmarźnięcie cztery razy większej masy rtęci. Faraday zanurzył w mieszaninie rurkę, napełnioną ciekłym kwasem węglanym i otrzymał go pod postacią zbitej masy, przezroczystej jak lód.

W przyrządzie Thilorier'a oraz Faraday'a gaz tworzy się w zamkniętej przestrzeni i ulega skropleniu pod wpływem własnego ciśnienia, *w przyrządzie zaś Cailletet'a, odznaczającym się* wielką prostotą, powiększa się ciśnienie za pomocą sposobu mechanicznego, używanego już przez Natterer'a. Przyrząd Cailletet'a jest tylko udoskonalonym przyrządem Colladona ze Szwecyi i Andrews'a z Anglii. Lecz metoda polegająca na oziębieniu gazu wskutek jego rozszerzenia jest o tyle oryginalna o ile nowa. Sam przyrząd (fig. 450) składa się z naczynia *BB'* z kutego że-

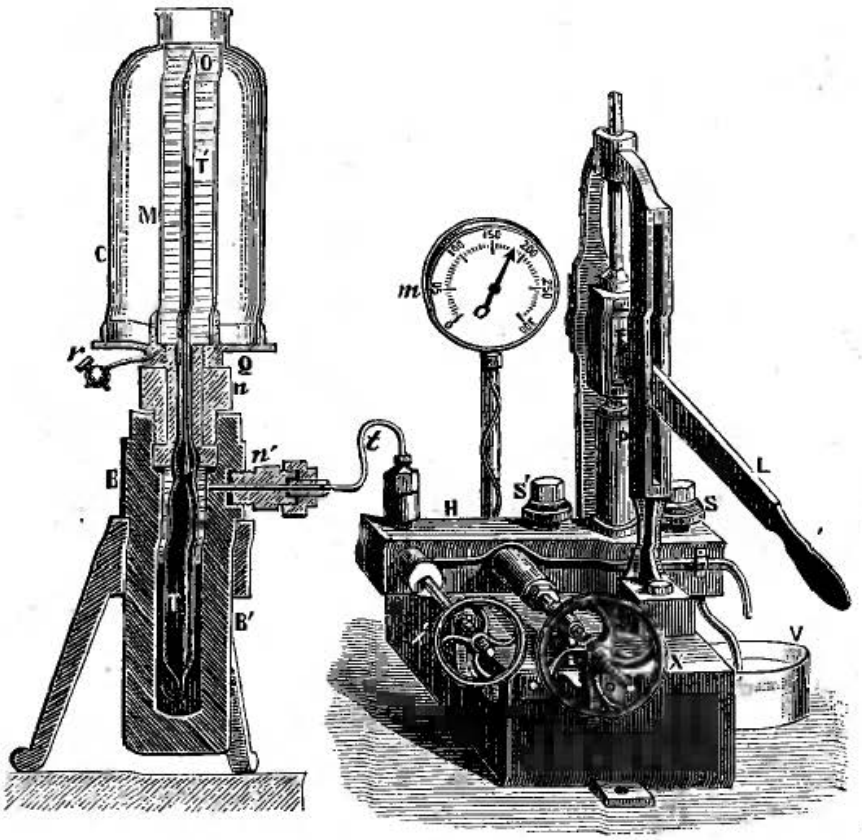


Fig. 450. Przyrząd Cailletet'a.

laza, do połowy napełnionego rtęcią. W tej ostatniej jest zanurzona epruwetka *TO*, której górna połowa, wązka i zamknięta, zawiera gaz, mający uledz skropleniu, dolna zaś połowa jest szersza i u dołu otwarta; epruwetkę tę podtrzymuje osada szrubowa *n*. Z boku naczynia *B* znajduje się druga osada szrubowa *n'* z kanałem pośrodku, do którego dochodzi rura *t*, przeprowadza-

jąca wodę, wtłaczaną do niej przez pompę *P*. Jeden tłok, wprawiany w ruch za pomocą koła *X*, służy do spotęgowania ciśnienia, kran zaś poruszany przez koło *X'*, umożliwia rozszerzenie gazu ściśnionego. Manometr *m*, umieszczony na pudle *H*, pokazuje wielkość ciśnienia. Po wprowadzeniu do naczynia *BB'* epruwetki z gazem, zaciska się silnie szrubę *n* i przyszrubowuje nad nią talerz *Q*, podtrzymujący rękaw *M*, który jest napełniony zimną wodą. Wreszcie dla uniknięcia uderzeń odłamkami szkła, w razie gdyby epruwetka miała pęknąć, otacza się wszystko kryształowym kloszem *C*. Gdy przyrząd jest w ten sposób przygotowany, wprawia się pompę w ruch za pomocą dźwigni *L*; wtedy woda, wsysana z rezerwoaru *V* i wtłaczana przez rurę *t*, ściska rtęć w naczyniu *BB'* tak, że ciecz ta podnosi się w epruwetce. Ciśnienie w przyrządzie może dojść do 200 atmosfer, przy jednoczesnem zaś działaniu tłoka o kole *X* do 500 atmosfer. Z początku nie spostrzega się żadnej zmiany w stanie ściskanego gazu, lecz przy pewnem ciśnieniu, zależnem od gazu i temperatury, warstwa cieczy poczyna spływać wzdłuż wewnętrznej ścianki epruwetki i zbiera się na powierzchni rtęci; od tej chwili manometr wskazuje stałe ciśnienie, równe maximalnéj prężności skroplonego gazu.

W ten sposób Cailletet skroplił acetylen i dwutlenek azotu, lecz tlenek węgla, tlen, azot i wodór, przy temperaturze — 29°, nie skraplały się przy ciśnieniu 300 atmosfer. Należało tedy uciec się jeszcze do wpływu obniżenia temperatury, które towarzyszy nagłemu rozszerzeniu ściśnionego gazu. Gdy otwiera się kran, wprawiany w ruch przez koło *X'*, ciśnienie zostaje odrazu zmniejszone do 1 atmosfery, gaz w epruwetce *TO* rozszerza się momentalnie, co powoduje obniżenie temperatury równe 200° poniżej temperatury pierwotnej. Wtedy w epruwetce pojawia się mgła mniej lub więcej gęsta, co jest oznaką częściowego skroplenia gazu. Cailletet skroplił w ten sposób tlenek węgla oraz tlen, lecz w tych samych warunkach azot i wodór przedstawiały tylko nader słaby obłoczek, który oznaczał jedynie początek skroplenia.

Przyrząd Raula Pictet'a nie jest tak prosty jak przyrząd Cailletet'a, lecz za to jest bez porównania potężniejszy, albowiem łączy w sobie możność wywierania olbrzymiego ciśnienia i wytwarzania bardzo nizkiej temperatury. Podobnie jak w przyrządzie Thilorier'a gaz tworzy się w zamkniętem naczyniu i ulega swemu własnemu ciśnieniu. Co do oziębienia, to z początku osiąga się je za pomocą ciągłego ulatniania ciekłego kwasu siarkawego, następnie przez ulatnianie kwasu węglanego lub tlenku azotu, poprzednio skroplonych i wreszcie przez rozszerzenie ściśnionego gazu, z którym odbywa się doświadczenie. Pictet skroplił w przyrządzie swoim tlen przy temperaturze — 130° i ciśnieniu równem 273 atmosferom. Co do rezultatów odnośnych doświadczeń z wodorem, należy je przyjąć z pewnem zastrzeżeniem, albowiem nie zgadzają się z rezultatami otrzymanemi przez innych eksperymentatorów. Otóż podług Pictet'a wodór skroplił się się przy — 140° i pod ciśnieniem 650 atmosfer, a nawet zamienił się w ciało stałe w następujących warunkach: Gdy już gaz został skroplony i gdy odkręcono szrubę umieszczoną na końcu rury, w której zgęszczenie miało miejsce, ciecz gwałtownie wyrzucona na zewnątrz wskutek ciśnienia tej części, która pozostała gazową, oziębiła się jeszcze bardziej dzięki częściowemu ulatnianiu. Pictet utrzymuje, że wtedy widział prąd nieprzezroczysty, barwy stalowej i słyszał dźwięk, podobny do tego, jaki wydaje śrut rzucony o ziemię; dźwięk ten przypisuje on stałemu wodorowi. Zdaje się, że co do ostatniego punktu, Pictet był ofiarą pewnego złudzenia.

Gazy tlen i tlenek węgla, oziębione tylko do temperatury 0° i ściskane, nie skraplają się nawet pod ciśnieniem 500 atmosfer; zobaczymy wkrótce jaka jest tego przyczyna. Lecz gdy w podobnych warunkach ciepło, powstałe wskutek ściskania gazu, przechodzi do cieczy oziębiającej, która otarza rurkę ze ściskanym gazem i gdy otwiera się nagle odpowiedni kran, wtedy gaz raptownie się rozszerza i w rurce pojawia się mniej lub więcej znaczny obłok, który jednak znika po upływie kilku chwil. Powstawanie obłoku i jego szybkie znikanie tłomaczy się w następujący sposób. Wskutek nagłego rozszerzenia gaz oziębia się

o tyle, że skrapla się pod małem ciśnieniem, pod jakiem jeszcze pozostaje. Ponieważ rozszerzanie trwa dalej, ciśnienie słabnie coraz bardziej i wreszcie nie wystarcza do utrzymania gazu w stanie ciekłym; oprócz tego gaz ogrzewa się wskutek zetknięcia z otoczeniem i dlatego ów obłok (gaz skroplony) szybko znika, szczególniej w doświadczeniu z azotem, a jeszcze bardziej z wodorem.

W roku 1883 Wróblewski i Olszewski posunęli badania o krok dalej, otrzymali oni mianowicie tlen, tlenek węgla i azot w stanie ciekłym długotrwałym. Przyrząd ściskający jest taki sam jak u Cailletet'a. Górny zamknięty koniec rurki, zawierającej gaz, który ma być skroplonym, jest zgięty kolankowato i otoczony ciekłym etylenem, poprzednio oziębionym. Temperaturę jego obniża się jeszcze przez wytworzenie ponad nim próżni za pomocą maszyny pneumatycznej. Do skroplenia tlenu przy temperaturze — 136° wystarczało ciśnienie 20 atmosfer; zresztą gaz ten można także skroplić przy mniej nizkiej temperaturze. Azot i tlenek węgla daleko trudniej skroplić, aniżeli tlen; przy temperaturze — 136° otrzymuje się je w stanie ciekłym jedynie przy pomocy nagłego ich rozszerzenia, przedstawiają się wtedy jako ciecze bezbarwne. Ponieważ tlen względnie łatwo się skrapla, Wróblewski i Olszewski używali go też jako substancyi oziębiającej. Ciekły tlen pod ciśnieniem atmosferycznem wrze przy — 184, gdy zaś ulatnia się w próżni temperatura spada poniżej — 200°. Temperatura ta wystarcza do skroplenia azotu, powietrza atmosferycznego, tlenku węgla, a nawet do zamrożenia azotu. Azot stały otrzymano przez nagłe rozszerzenie azotu ściśnionego i oziębionego w otoczeniu ciekłego tlenu; tworzy on kryształy, mające wygląd śniegu. Co do wodoru skroplono go dopiero pod ciśnieniem 100 atmosfer i przy pomocy nagłego rozszerzenia w obec najniższej temperatury, jaką można było otrzymać. Wróblewski i Olszewski zgadzają się, że jest to ciecz bezbarwna i nader małej gęstości, lecz twierdzą, że nie przypomina w niczem metalu, o jakim wspomina Pictet.

Uczonych zajmowało także pytanie, czy ciało lotne *zawsze* można zamienić w ciało ciekłe, niezależnie od temperatury, jeżeli

tylko ciśnienie jest dostatecznie silne. Pytanie to dało początek badaniom pierwszorzędnej wagi, a rezultaty ich stanowiły przewodnią nić dla wszystkich fizyków, którzy w ostatnich czasach zajmowali się skraplaniem gazów. Rzecz oczywista, że powiększając stopniowo ciśnienie, wywierane na gaz lub na parę, zmniejsza się wreszcie ich objętość do bardzo małego ułamka pierwotnej objętości. Gęstość ich jest wtedy nader znaczna i może być porównana z gęstością zwykłych cieczy. Cailletet ścisnął powietrze do 700 atmosfer *przy temperaturze 15°*, przyczem objętość gazu zmniejszyła się 450 razy, a gęstość jego odnośnie do wody była równa około 0,6. Otóż w tego rodzaju doświadczeniach z gazami, które uważano dawniej za niedające się skroplić, to jest za tak zw. gazy trwałe, nie można było nigdy uwidocznić *przy zwykłej temperaturze*, bez względu na wielkość ciśnienia, takiego nagłego zmniejszenia objętości, jakie towarzyszy skropleniu pary.

Z drugiej strony poszukiwania Driona wykazały, że spółczynnik rozszerzalności cieczy przegrzanych jest równy, a nawet większy od spółczynnika rozszerzalności gazów. W pewnych warunkach ciśnienia gazy mogą stopniową drogą osiągnąć gęstość cieczy, ciecze zaś — rozszerzalność gazów. Cagniard-Latour i Drion starali się dowiedzieć czy pomiędzy cieczą i jej parą istnieje nieprzerwany szereg stanów pośrednich, przez które stopniowo przechodzi ciało, gdy zmienia jeden z tych stanów na drugi, czy też istnieje widoczna przerwa pomiędzy stanami ciekłym i lotnym. Otóż doświadczenia ich wykonane z eterem, alkoholem, siarkiem węgla, wodą, ciekłym kwasem siarkawym, pokazują, że przy dostatecznie wysokiej temperaturze wszelka różnica pomiędzy cieczą i jej parą znika, że w każdym razie nie *różnią się już one wtedy pod względem gęstości i wyglądu;* samo ciśnienie nie wystarcza przy wysokiej temperaturze do wytworzenia takiej widocznej granicy, jaką zwykle otrzymujemy przy skraplaniu pary. Zjawiska te dokładniej jeszcze zbadał Andrews. Oto rezultaty jakie otrzymał z kwasem węglanym. Gdy przy temperaturze 13°,1 powiększano ciśnienie, objętość gazu zmniejszała się, pod ciśnienien 48,89 atmosfer zaczął się skraplać, przy

dalszem zaś powiększaniu ciśnienia objętość cieczy malała. Przy 21°,5 skraplanie rozpoczęło się dopiero pod ciśnieniem 61 atmosfer. W obu tych wypadkach granica pomiędzy cieczą i gazem była zupełnie wyraźna. Lecz gdy podwyższono temperaturę do 31°,1 wtedy w miarę powiększania ciśnienia powierzchnia graniczna stawała się coraz mniej wyraźną, wreszcie znikła zupełnie i wnętrze przyrządu wypełniło się jednostajnym płynem. Otóż temperatura przy której ciecz i jej para nasycona posiadają jednakową gęstość stanowi tak zw. *punkt krytyczny*.

W ogóle chcąc skroplić gaz nie dosyć jest ściskać go przy jakiejkolwiek temperaturze. Kwas węglany przy 100°, poddany najsilniejszemu ciśnieniu, stawiałby taki sam opór przeciwko skropleniu, jak tlen i azot przy zwykłej temperaturze; zaliczonoby go wtedy do trwałych gazów. Znika tedy wszelka istotna granica pomiędzy trwałemi i nietrwałemi gazami, a więc pomiędzy gazami i parami. Powyżej pewnej *temperatury krytycznej*, równej dla kwasu węglanego 31°,1 *i znacznie niższej od* 0° dla gazów do niedawna uważanych za trwałe (tlen, azot, wodór, tlenek węgla, dwutlenek azotu i gaz błotny), skroplenie jest niemożliwe; poniżej tej temperatury odbywa się ono przy ciśnieniu tem słabszem, im niższa jest temperatura. Gdy gaz posiada temperaturę niższą od jego temperatury krytycznej, wtedy można go skroplić przez samo ściskanie, jak np. kwas węglany poniżej 31°,1 podczas gdy powyżej tego punktu samo oziębienie jest skuteczne. Skombinowane działanie ciśnienia, dochodzącego do 100 atmosfer i temperatury, równej — 110° pozwoliły Faraday'owi skroplić wszystkie znane gazy, oprócz tych, które tylko co wymieniliśmy i które uważano za trwałe. Widzieliśmy, że dzięki pracom Cailletet'a, Pictet'a, Wróblewskiego i Olszewskiego, którzy potrafili dostatecznie obniżyć temperaturę, trwałe te jakoby gazy również zostały skroplone. Powiedzieliśmy wyżej, że tlen i tlenek węgla przy 0° nie skraplają się nawet pod ciśnieniem 500 atmosfer; przyczyną tego jest, że temperatura krytyczna tych gazów jest bardzo nizka. Tlen oziębiony do — 136° skrapla się już pod ciśnieniem dwudziestu atmosfer.

Zdefiniowaliśmy punkt krytyczny jako *temperaturę, przy której ciecz i jej para nasycona mają jednakową gęstość.* W chwili takiej nie są one już oddzielone od siebie, to znaczy, że para nie wznosi się ku górze, ciecz nie opada ku dołowi. Lecz ogólne prawo parowania nie jest przezto wcale w danym wypadku naruszone, albowiem ciecz pozostaje wtedy przy swym punkcie parowania oraz posiada swą maximalną prężność, nie widać zaś jej dlatego, że jest zmieszana z gazem, w którym pływa z powodu jednakowej z nim gęstości.

Powyższa definicya punktu krytycznego została najprzód sprawdzona przez Jamin'a na gazach prostych, następnie objaśnił on za jej pomocą pewne zjawisko, zaznaczone przez Andrews'a, a szczególniej przez Cailletet'a i dotyczące ściśliwości oraz punktu krytycznego mieszaniny.

W roku 1880 Cailletet zrobił następujące doświadczenie. Ściskał on w swoim przyrządzie mieszaninę, składającą się z jednej części powietrza i pięciu części kwasu węglanego. Z początku kwas węglany skroplił się pod umiarkowanem ciśnieniem, lecz gdy następnie Cailletet, nie zmieniając temperatury, powiększył ciśnienie do 150 lub 200 atmosfer, utworzona ciecz znikła całkowicie tak, że mogłoby się zdawać iż powiększenie ciśnienia powoduje stan krytyczny, podobnie jak podwyższenie temperatury, co jest zupełnie nieprawdopodobne. Oto jak Jamin objaśnia to ciekawe zjawisko. Pod wpływem umiarkowanego ciśnienia, kwas węglany osiąga swój punkt zgęszczenia i z początku częściowo się skrapla. Gdy nadal zmniejsza się objętość mieszaniny, ciśnienie kwasu węglanego już nie wzrasta, albowiem osiągnęło ono swe maximum, lecz prężność powietrza powiększa się dalej do nieskończoności, a wraz z niem i gęstość atmosfery gazowej. Gęstość ta staje się wreszcie równą gęstości powstałej przedtem cieczy, która już nie pozostaje nadal na dnie naczynia, lecz rozchodzi się po całej atmosferze gazowej, znajdującej się w temże naczyniu, albowiem straciła ona podług zasady Archimedesa cały swój ciężar.

Jeżeli objaśnienie to jest słuszne, wtedy wziąwszy w powyższem doświadczeniu wodór zamiast powietrza, powinniśmy przez

to odsunąć znacznie granicę ciśnienia, przy której gęstości cieczy i gazu stają się równe, a więc przy której ciecz znika dla oczu. Wniosek ten, przewidziany przez Jamin'a, został sprawdzony przez Cailletet'a. Ten ostatni przygotował dwie mieszaniny, z których jedna zawierała 5 objętości kwasu węglanego i 1 obj. powietrza, druga zaś 5 ob. kw. węglanego i 1 ob. wodoru. W obu wypadkach pod wpływem wzrastającego ciśnienia menisk skroplonego kwasu zacierał się z początku: był to moment, w którym gęstość cieczy była równa gęstości gazu; następnie ciecz znikała i—zgodnie z teoryą—znikała przy ciśnieniu daleko większem w mieszaninie kwasu z wodorem, aniżeli w mieszaninie kwasu z powietrzem. [1])

ROZDZIAŁ III.

Kalorymetrya.

§ 1. Ciepło właściwe. Metody mierzenia ciepła właściwego.

W poprzednich rozdziałach, przy rozpatrywaniu wpływu ciepła na rozmaite ciała, staraliśmy się przedstawić zjawiska, jakim one podlegają, gdy są ogrzane do różnej temperatury. Obecnie zjawia się przed nami pytanie, jaka ilość ciepła jest potrzebna do wywołania odnośnych zjawisk z rozmaitemi substancyami, innemi słowy jaka ilość ciepła jest konieczna do tego, ażeby dane ciała ogrzać do określonej temperatury? Gdy np. spalamy w atmosferze tlenu 1, 2, 3... gramy węgla, albo gdy ogrzewamy od zera do t^0 1, 2, 3,.... kilogramy jakiegobądź ciała, to oczywiście, że ilości ciepła, jakie się wtedy wydzielają lub jakie zostają pochłonięte są proporcyonalne do liczb 1, 2, 3... Z przykładów tych wynika, że ilości ciepła, które się tworzą podczas procesów chemicznych (np. spalanie węgla), albo które się nagromadzają w ciele podczas jego ogrzewania, mogą być mierzone za pomocą jakiejś umówionej jednostki.

[1]) Jamin, l. c. Tome II.

Za jednostkę taką można przyjąć ilość ciepła, pochłoniętą przez ciało podczas jakiejkolwiek zachodzącej z niem zmiany, pod warunkiem że ta ostatnia jest ściśle określona i że łatwo jest odtwarzać ją w okolicznościach zawsze jednakowych. Zwykle za jednostkę przyjmujemy ilość ciepła, potrzebną do podwyższenia od 0^0 do 1^0 temperatury 1 grama wody dystylowanej i jednostkę taką nazywamy *ciepłostką* (kalorya) [1]). Posługiwanie się nią jest szczególnie wygodne z tego względu, że przy podwyższaniu temperatury 1 grama wody od t^0 do $t^0 + 1^0$ potrzeba zawsze jednej ciepłostki, bez względu na to jaka jest temperatura t. W istocie gdy do naczynia ogrzanego do 50^0 wprowadzimy jednocześnie dwie równe masy wody, jedną przy temperaturze 0^0, drugą zaś przy 100^0 i gdy następnie, zmieszawszy je szybko, zmierzymy temperaturę, zobaczymy, że będzie ona równa 50^0. A więc samo naczynio nic nie straciło i nic nie zyskało na cieple, lecz woda ogrzana do 100^0 straciła ciepło, potrzebne do podwyższenia jej temperatury od 50^0 do 100^0 i oddała je drugiej masie wody, której temperatura podniosła się od 0^0 do 50^0. W ogóle powtarzając to doświadczenie z dwiema masami wody o temperaturze t^0 i t'^0 otrzymamy zawsze końcową temperaturę równą średniej arytmetycznej pomiędzy niemi czyli równą $\frac{t+t'}{2}$.

Zróbmy teraz inne doświadczenie. Do naczynia, mającego temperaturę $3^0{,}22$ wprowadźmy jednocześnie dwie równe masy wody przy 0^0 i rtęci przy 100^0 i zmieszajmy; znajdziemy, że końcowa temperatura wody i rtęci wynosi $3^0{,}22$; naczynie nic więc nie straciło i nic nie zyskało, rtęć zaś, oziębiwszy się od 100^0 do $3^0{,}22$ to jest o $96^0{,}78$, straciła to, co zyskała woda, czyli 3,22 ciepłostek na każdy gram. Wynika z tego, że gram rtęci, którego temperatura obniża się tylko o 1^0, wydziela średnio $\frac{3{,}22}{96{,}78} = 0{,}03332$ ciepłostek. Ta ostatnia liczba wyraża w ciepłostkach ilość ciepła, potrzebną do ogrzania 1 grama rtęci o 1^0.

---

[1]) Jednostkę tę określają także mianem *małej ciepłostki*. Ciepłostką czyli kaloryą zowią wtedy ilość ciepła potrzebną do podwyższenia od 0^0 do 1^0 temperatury 1 kilograma wody; jednostka ta jest tedy tysiąc razy większa od tamtej, nazywa się ją też niekiedy *dużą ciepłostką*.

Doświadczenia, podobne do tego, jakie opisaliśmy tutaj dla rtęci, pokazały, że *ilość ciepła potrzebna do podwyższenia o 1° temperatury 1 grama ciała, jest różna dla rozmaitych substancyj;* ilość ta jest dla każdej z nich stała i charakterystyczna i nosi nazwę *ciepła właściwego.*

Następujące doświadczenie Tyndalla, dowodzi w sposób wielce przekonywujący, że rozmaite substancye, przy tej samej wadze i temperaturze, zawierają niejednakowe ilości ciepła. Krążek wosku, mający w średnicy 15 do 20 centymetrów i około 12 milimetrów w grubości, osadza się na metalowej obrączce (fig. 451).

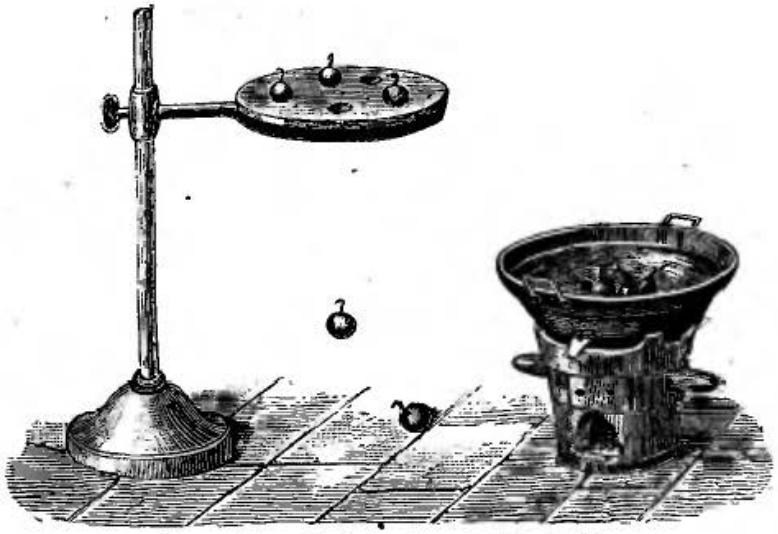


Fig. 451. Doświadczenie Tyndalla.

Naczynie obok stojące zawiera oliwę, której temperatura jest równa 180°. Do tej gorącej oliwy wrzuca się kilka metalowych kulek: żelazną, ołowianą, bizmutową, cynową, miedzianą, a więc każdą z innego metalu. Kulki te, zanurzone w oliwie, mają jednakową temperaturę, a mianowicie temperaturę oliwy. Gdy po wydobyciu ich z tej cieczy umieszcza się je na krążku wosku, topią go one swem ciepłem i grzęzną w nim, lecz każda w innym stopniu. Żelazna i miedziana zanurzają się w wosku daleko szybciej, niż inne, najgłębiej po nich wtapia się cyna, ale ołów i bizmut opóźniają się bardzo. Kulka żelazna przetapia nawet krążek na wskroś, miedziana zdąża za nią, dolną powierzchnię cynowej widać już wtedy od spodu, ołowiana zaś i bizmutowa zaledwie się wtopiły. Doświadczenie to pokazuje, że przy tym sa-

mym ciężarze i temperaturze kulka żelazna zawiera więcej ciepła, aniżeli kulka miedziana, ta ostatnia więcej aniżeli kulka cynowa i tak dalej.

Zobaczmy teraz jakie istnieją metody oznaczania ciepła właściwego rozmaitych ciał.

Metoda mieszanin od czasów Black'a była przedmiotem najliczniejszych studyów i najlepiej też jest udoskonalona. Przyrząd używany w danym razie składa się z mosiężnego naczynia o cienkich i gładkich ścianach, zawieszonego na jedwabnych niciach (fig. 452), słabo przewodzących ciepło. Naczynie jest napełnione wodą, w której zanurza się termometr; mieszadło szklane *a* służy do poruszania wody, a więc do ujednostajnienia jej temperatury we wszystkich punktach.

Fig. 452. Kalorymetr wodny.

Metodę tę można stosować zarówno do ciał stałych, jak ciekłych i gazowych. Przypuśćmy, że chodzi o ciało stałe. Przedewszystkiem waży się je, następnie ogrzewa do określonej temperatury i zanurza w zimnej wodzie, której waga i temperatura są wiadome. Z ilości ciepła, jaką ciało oddaje wodzie, oblicza się jego ciepło właściwe. Niechaj p przedstawia ciężar ciała, T jego temperaturę w chwili zanurzenia i c jego ciepło właściwe, niechaj dalej m wyobraża wagę zimnej wody i t jej pierwotną temperaturę; wreszcie m' jest to waga naczynia, zawierającego wodę, c' jego ciepło właściwe, temperatura zaś jego jest oczywiście równa t. Po zanurzeniu gorącego ciała w wodzie, temperatura jej się podnosi i wreszcie dochodzi do pewnego stałego maximum, które oznaczamy przez t'; taką też jest temperatura ciała w końcu doświadczenia. A więc ciało to oziębiło się o ilość stopni, równą $T—t'$, którą to liczbę należy pomnożyć przez wagę ciała p oraz przez jego ciepło właściwe c, ażeby otrzymać całkowitą ilość ciepła, jaką ono straciło. Przeciwnie woda i naczynie ogrzały się o ilość stopni równą $t' - t$, przyczem waga m wody pochłonęła ilość $m\,(t' - t)$ ciepła, naczynie zaś o ciężarze m' i cieple właściwem c' pochłonęło ilość $m'\,c'\,(t' - t)$ ciepła. Otóż

ilość ciepła, jaką straciło ciało ogrzane jest równa sumie ilości ciepła, pochłoniętych przez wodę i naczynie. Z równania tego łatwo można znaleść szukane ciepło właściwe c badanego ciała, jeżeli ciepło właściwe c' kalorymetru jest znane.

Chcąc opisaną metodę uczynić zupełnie ścisłą, należy także wziąć pod uwagę ciepło pochłonięte przez termometr, mieszadło i inne akcessorya. Gdy badane ciała stałe słabo przewodzą ciepło, należy je podzielić na bardzo małe kawałki i umieścić w koszyczku z siatki metalowej; gdy zaś ciało jest płynne, umieszcza się je w rurce. W obydwóch wypadkach do powyższego równania należy wprowadzać ciężar i ciepło właściwe koszyczka lub rurki. *Oprócz tego należy jeszcze brać w rachubę stratę ciepła*, jaką ponosi kalorymetr w czasie, który upływa pomiędzy zanurzeniem ciała i chwilą, gdy bada się końcową temperaturę. Starano się w rozmaity sposób sprowadzić tę przyczynę błędu do możliwego minimum.

Metodą mieszanin posługiwało się bardzo wielu eksperymentatorów, którzy zajmowali się oznaczaniem ciepła właściwego ciał stałych i ciekłych. Użyta z początku przez Black'a, była następnie stosowaną przez Dulong'a i Petit'a, którzy ogrzewali ciała do 100° lub 300° we wrzącej wodzie albo oliwie i którzy określali najprzód ilość tych cieczy, jaka pozostawała na ciele. Była ona również używana i udoskonalona przez Pouillet'a, Neumann'a i wreszcie Regnault zbudował przyrząd, służący do regulowania obserwacyj.

Favre i Silbermann w szczególny sposób stosowali metodę mieszanin, którą posługiwali się głównie przy badaniu zjawisk cieplnych, wymagających długiego czasu. Przyrząd ich składa się z żelaznej albo szklanej kuli A (fig. 453, str. 784), napełnionej rtęcią; kula ta komunikuje z wązką rurką $a\ b\ o$, oprócz tego do wnętrza jej wchodzi jeden lub więcej wązkich tygielków metalowych, otwartych na zewnątrz i na rysunku oznaczonych linią kropkowaną. Instrument ten stanowi właściwie termometr o bardzo wielkim zbiorniku i o rurce $a\ b\ o$, nader wązkiej. Gdy w jakikolwiek sposób dostanie się doń określona ilość ciepła, rtęć rozszerza się proporcyonalnie do tej ilości, wierzchołek jej prze-

suwa się w rurce podzielonej na części, ruch zaś jego obserwuje się za pomocą lunety *L*. Deseczki otaczające kulę *A* można podnieść do góry; tworzą one wtedy skrzynkę, którą napełnia się

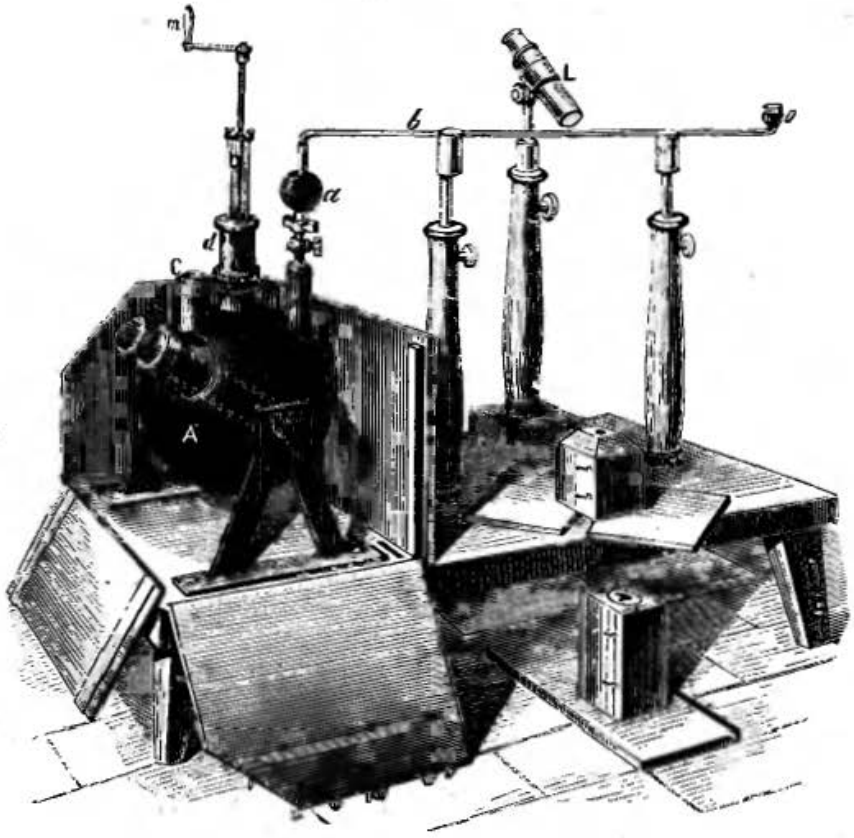


Fig. 453. Kalorymetr Favre'a i Silbermanna.

puchem łabędzim lub watą, ażeby uniknąć wszelkiej utraty ciepła. Przed rozpoczęciem doświadczenia sprowadza się wierzchołek rtęci w rurce do punktu, oznaczonego zerem, co osiąga się za pośrednictwem tłoka, osadzonego w rurze *d* i poruszanego za pomocą rączki *m*. Przy opuszczaniu lub podnoszeniu tłoka rtęć zostaje wpędzona lub wypchnięta tak, że wierzchołek zawsze może być doprowadzony do zera, niezależnie od temperatury. Ilość ciepła, wydzielonego podczas jakiegobądź zjawiska fizycznego lub chemicznego, zachodzącego wewnątrz wspomnianego tygielka metalowego, oblicza się z łatwością, ponieważ wiadomo, że np. *a* ciepłostek odpowiada jednej podziałce na rurce. Znany ciężar *p* cieczy ogrzewa się do temperatury *T* i wprowadza

do tygielka; tutaj oziębia się ona do temporatury t', a więc traci ilość $T - t'$ stopni. Ilość ta pomnożona przez ciężar p cieczy oraz szukane ciepło właściwe x wyraża liczbę straconych przez nię ciepłostek, którą nietrudno znaleść znając ilość n podziałek, na jakie przesunęła się rtęć w rurce przyrządu, oczywiście bowiem że $p \times c \times (T - t') = n \times a$, zkąd oblicza się wartość c.

Inna metoda oznaczania ciepła właściwego ciał polega na następującem: oblicza się wiele lodu przy zerze zamienia się w wodę przy zerze pod wpływem tej ilości ciepła, jaką chcemy zmierzyć; ponieważ zaś wiadomo, że 1 gr. lodu pochłania wtedy 80 ciepłostek, to należy ciężar powstałej wody pomnożyć przez 80, ażeby otrzymać szukaną ilość w ciepłostkach.

Metodę tę obmyślił Wilcke, lecz Black i Irwiue pierwsi umożliwili dokładne jej zastosowanie. Black przygotował kalorymetr z bryły czystego lodu, pozbawionego pęcherzyków; wyżłobił on w niej jamę, w której umieszczał ciała badane i nakrywał pokrywką, również przygotowaną z lodu (fig. 454), przyczem bardzo starannie obcierał z wody wnętrze jamy oraz pokrywkę. W przyrządzie takim lód, stanowiący wewnętrzną ścianę jamy oraz dolną powierzchnię pokrywki nie topił się wcale, albowiem ciepło było zatrzymywane przez zewnętrzne ściany kalorymetru.

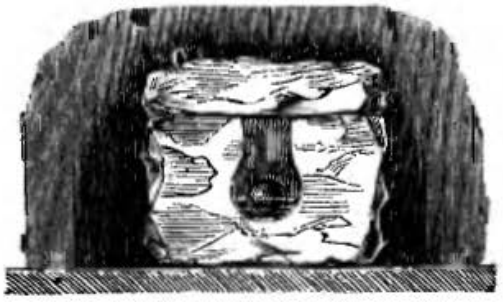


Fig. 454. Kalorymetr lodowy Black'a.

Wtedy ogrzewano do określonej temperatury t ciało badane, uncszono pokrywkę i po wrzuceniu go do jamy, zamykano napowrót przyrząd. Po pewnym czasie, gdy ciało oziębiało się do zera, otwierano znów kalorymetr, zbierano nader starannie całkowitą ilość wody, powstałą ze stopienia lodu i otrzymywano w ten sposób ciężar tego ostatniego. Jeżeli P oznacza wagę ciała badanego, C jego ciepło właściwe i jeżeli oziębiło się ono od temperatury t do zera to oczywiście straciło ilość $P \times C \times t$ ciepłostek; z drugiej zaś strony jeżeli p oznacza wagę stopionego lodu, to pochłonął on ilość $80 \times p$ ciepłostek. Ponieważ przyjmujemy, że to co

straciło ciało, zyskał lód, to $P \times C \times t = 80 \times p$, zkąd łatwo już obliczyć wartość C.

Laplace i Lavoisier przyjęli taką samą metodę, lecz bryłę lodu zastąpili przez kalorymetr o budowie nieco bardzo złożonej, aniżeli poprzedni. Przyrząd ich przedstawiony w całości oraz w pionowem przecięciu na figurze 455, składa się z trzech naczyń metalowych, wstawionych *jedno* w drugie. W środkowem M umieszcza się ciało badane, pozostałe zaś dwa to jest naczynia A i B napełnia się tłuczonym lodem; lód w A ulega stopieniu pod wpływem ogrzanego ciała w M, lód zaś w naczyniu B zatrzymuje *ciepło*, przenikające z zewnątrz do przyrządu. Dwa krany E i D służą do wypuszczania wody, powstałej ze stopienia lodu. Niedokładność tego przyrządu jest widoczna: kawałki lodu zatrzymują wodę, której ilość nie daje się obliczyć Dodajmy wreszcie, że co się tyczy opisywanej w tem miejscu metody, to Bunsen powziął myśl określania ciężaru stopionego lodu na zasadzie *zmniejszenia objętości, jakiemu on ulega przy przejściu ze stanu stałego w ciekły*. Z powodu braku miejsca nie możemy się tutaj wdawać w opis przyrządu Bunsena, powiemy tylko, że jego metoda zdaje się być tak samo dokładną, jak metoda mieszanin.

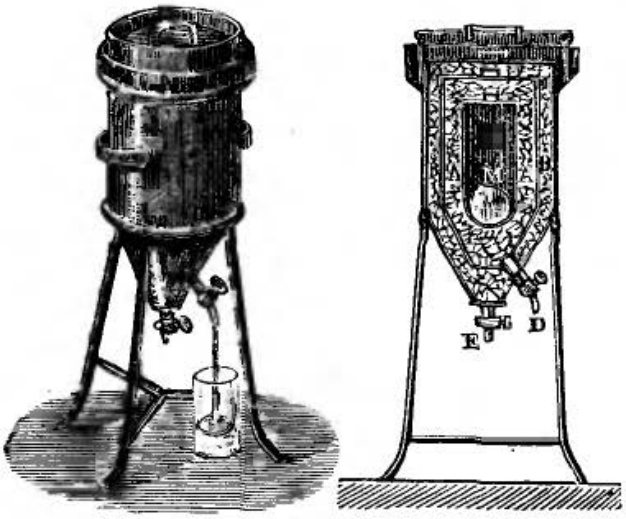


Fig. 455. Kalorymetr Lavoisier'a i Laplace'a.

Przy badaniu ciepła właściwego ciał ciekłych, można także znanej masie danej cieczy dostarczyć lub odjąć wiadomą ilość ciepła, a następnie zmierzyć spowodowaną przez to zmianę w temperaturze. Metoda ta, którą pierwszy użył Black, zowie się porównawczą dlatego, że porównywał on zmiany w temperaturze, wywołane przez jeden i ten sam płomień, palący się przez

czas określony w kalorymetrze, do którego kolejno wprowadzał jednakowe masy różnych cieczy. Ten sposób wytwarzania jednakowych ilości ciepła był oczywiście niedokładny i dlatego Black go porzucił. Następnie Thomsen dokonał mierzeń bardziej dokładnych spalając w kalorymetrze równe masy wodoru, który palił się ze stałą szybkością i ogrzewał przyrząd proporcyonalnie do czasu. Wreszcie wspomnimy tylko o metodzie oziębiania, którą posługiwali się Dulong i Petit oraz Regnault. Polega ona na tem, że dwa różne ciała, mające jednakową powierzchnię i jednakową zdolność oddawania ciepła, ogrzane do temperatury t i umieszczone w otoczeniu, posiadającem temperaturę zera, tracą w tym samym, nader małym czasie, jednakowe ilości ciepła, co powoduje zmiany w temperaturze, będące w stosunku odwrotnym do ciężarów dwóch ciał oraz do ich ciepła właściwego.

§ 2. Ciepło właściwe ciał stałych, ciekłych i gazowych. Ciepło topliwości, ciepło lotności. Niektóre zasady termochemii.

Obecnie zjawia się przed nami pytanie, czy ciepło właściwe danego ciała jest niezmienne, czy też zależy od warunków temperatury, stanu fizycznego i t. p., w jakich ciało się znajduje. Otóż Dulong i Petit pierwsi wypowiedzieli zdanie, stwierdzone także przez doświadczenie, że w ogóle *ciepło właściwe ciała wzrasta, gdy temperatura jego się podnosi.* Innemi słowy chcąc podnieść temperaturę ciała od 200° do 300° potrzeba do tego więcej ciepła, aniżeli przy ogrzaniu od 100° do 200°, w tym ostatnim zaś wypadku więcej, aniżeli przy ogrzaniu od zera do 100°. Doświadczenia Dulong'a i Petit'a nad metalami: żelazem, rtęcią, cynkiem, antymonem, srebrem, miedzią, pokazały to bardzo wyraźnie. Późniejsze badania innych uczonych, obejmujące jeszcze, oprócz wymienionych metali, cynę, stal, ołów i platynę pokazały, że dla wszystkich tych ciał pomiędzy zerem i 300° ciepło właściwe znacznie wzrastało wraz z podwyższaniem temperatury. Podług Violle'a ciepło właściwe złota zaledwie zmienia się do 600° i jest równe wtedy 0.0324 lecz w miarę zbliżania się do temperatury topliwości tego metalu ciepło to wzrasta, przy 900°

wynosi ono 0,0345, przy 1020 jest równe 0,0352. Djament oraz inne odmiany węgla przy zwykłej temperaturze mają dość małe ciepło właściwe, które jednak szybko wzrasta przy podwyższaniu temperatury.

Regnault wykonywał doświadczenia ze znaczną ilością ciał ciekłych, przyczem woda, jako szczególnie ważna, była przedmiotem specyalnych jego eksperymentów. Okazało się również, że jej ciepło właściwe wcale nie jest stałe; jedynie począwszy od temperatury 0^0 ciepło to jest równe 1,0000, gdy tymczasem przy temperaturze 20^0 wynosi już 1,0012, przy 100^0 jest równe 1,0130, przy 230^0 ciepło właściwe wody wynosi 1,0568. Podobny rezultat Regnault otrzymał także dla olejku terpentynowego, alkoholu, siarku węgla, eteru i chloroformu. Zauważmy tutaj, że woda posiada większe ciepło właściwe, aniżeli inne substancye, a szczególniej aniżeli metale. Dzięki znacznemu cieplu właściwemu wody ogrzanie lub oziębienie jej wymaga długiego czasu, przyczem pochłania ona lub oddaje daleko więcej ciepła od każdego innego ciała, wziętego w tej samej masie i przy tej samej temperaturze. Ta własność wody znalazła liczne zastosowania. Musimy jednak dodać, że podług Hirna, ciepło właściwe alkoholu, bardzo szybko wzrastające wraz z temperaturą, jest przy 160^0 większe od ciepła właściwego wody przy 100^0, wynosi mianowicie wtedy 1,11389.

Co do wpływu gęstości oraz stanu fizycznego ciał na ich ciepło właściwe, można powiedzieć, że co się tyczy ciał stałych, to w ogóle ich ciepło właściwe zmniejsza się, gdy gęstość się powiększa. Obok przykładów, gdzie zmiany te są nieznaczne, istnieją i takie, gdzie ciepło właściwe jednej i tej samej substancyi może przedstawiać duże różnice. Różnice te w ogóle są bardzo ważne dla takich ciał, które mogą przybierać rozmaite postacie fizyczne. Tak np. ciepło właściwe węglanu wapnia pod postacią aragonitu jest równe 0,2085, węglanu pod postacią kredy równe 0,2148, i wreszczcie węglanu pod postacią marmuru wynosi 0,2158. Również i ciepło właściwe siarki przedstawia znaczne różnice, zależnie od tego czy jest ona naturalnie krystaliczną, albo też od dawna lub świeżo topiona. Co do węgla to Weber

twierdzi, że wszystkie jego odmiany posiadają jednakowe ciepło właściwe.

Z poprzedniego wynika, że ciepło właściwe ciał powinno ulegać zmianie, gdy przechodzą one ze stanu stałego w ciekły lub gazowy, albowiem przejściu temu towarzyszą wielkie zmiany w gęstości, układzie cząstek i temperaturze. W ogóle ciepło właściwe w stanie stałym jest o wiele mniejsze, aniżeli w stanie ciekłym, gdy zaś ciało staje się lotnem, posiada znów mniejsze ciepło właściwe, niekiedy takie same, jak w stanie stałym. Reasumując te dane należy przyznać, że bardzo mało znamy prawa, podług których zmienia się ciepło właściwe ciała, mogącego przybierać rozmaite postacie. Nic nie wiemy także jaki wpływ wywiera w danym razie ciśnienie.

Ciepło właściwe gazów można oznaczyć odnośnie do ciepła właściwego wody lub powietrza. W pierwszym razie przedstawia ono ilość ciepła, potrzebną do podniesienia o 1^0 temperatury grama gazu, w drugim zaś wypadku jest to stosunek ilości ciepła potrzebnych do podniesienia o 1^0 temperatury określonej objętości gazu i takiej samej objętości powietrza. Wiemy, że objętość gazu może zmieniać się wskutek zmiany jego prężności lub temperatury. Gdy zaś ogrzewamy gaz, wtedy albo on swobodnie się rozszerza, nie zmieniając przytem ciśnienia, albo zachowuje stałą objętość, lecz ciśnienie jego coraz bardziej wzrasta. Należało tedy zbadać, czy dwom tym sposobom ogrzewania odpowiadają jednakowe, czy też różne ilości pochłoniętego ciepła i dlatego określano oddzielnie ciepło właściwe gazów przy stałem ciśnieniu i zmiennej objętości oraz przy stałej objętości i zmiennem ciśnieniu.

Badaniem ciepła właściwego gazów odnośnie do wody zajmowali się Delaroche i Berard. W tym celu mierzyli oni ilość ciepła, udzieloną znanej masie wody przez określoną masę gazu, który krążył w wężownicy, umieszczonej w cieczy i następnie obliczali z tego ciepło właściwe gazu na podstawie rachunku, analogicznego do rachunku używanego przy kalorymetrycznej metodzie mieszanin. Ci sami fizycy oznaczyli ciepło właściwe gazów przy stałem ciśnieniu, odnośnie do powietrza, przez porównanie ilości ciepła, udzielonych określonej masie wody przez

równe objętości gazu i powietrza, przy jednakowych warunkach temperatury i ciśnienia w ciągu całego doświadczenia. Później temu samemu przedmiotowi poświęcali badania swe de la Rive, Marcet, oraz Regnault.

Stosunek ciepła właściwego gazu przy stałem ciśnieniu do jego ciepła właściwego przy stałej objętości posiada bardzo ważne znaczenie teoretyczne i dlatego stanowił przedmiot licznych badań. Po raz pierwszy został on określony przez dwóch uczonych Clément i Desormes; znaleźli oni, że dla powietrza stosunek $\frac{C'}{C}$ jest równy 1,354, gdzie C' oznacza ciepło przy stałem ciśnieniu, C zaś przy stałej objętości. Późniejsi badacze, którzy posługiwali się taką samą, co i poprzedni metodą, znaleźli rozmaite liczby, wahające się pomiędzy 1,354 i 1,405, co dowodziło, że wspomniana metoda nie jest ścisła. Dlatego też najczęściej używa się metody, opartej na obliczaniu prędkości dźwięku w gazach, liczby znalezione za pomocą tej metody wahają się pomiędzy 1,401 i 1,410. Dla par rtęciowych znaleziono, że stosunek $\frac{C'}{C}$ jest równy 1,666. Wreszcie Jamin i Richard uciekli się do nowej bezpośredniej metody i otrzymali liczby zupełnie zgodne z temi, które otrzymano za pomocą poprzedniej metody pośredniej. Wogóle tedy widzimy, że *ciepło właściwe gazów przy stałem ciśnieniu jest większe od ich ciepła właściwego przy stałej objętości.*

Wiemy, że gdy ciała przechodzą ze stanu stałego w ciekły, utajają przytem pewną, mniej lub więcej znaczną, ilość ciepła. *Ciepłem topliwości* ciała stałego nazywamy ilość ciepłostek, potrzebnych do zamiany jednostki masy tego ciała w ciecz, bez podniesienia jego temperatury.

Ciepło topliwości ciał oznacza się za pomocą metody mięszanin, przyczem przyjmuje się, że gdy ciało ciekłe krzepnie, wtedy zwraca dokładnie taką samą ilość ciepła, jaką pochłonęło podczas topienia. Znany ciężar p ciała należy stopić i po zaobserwowaniu jego temperatury topliwości t zanurzyć w wodzie, której ciężar p' oraz temperatura t' również są znane. Niechaj c oznacza ciepło właściwe ciała w stanie stałym, r jego ciepło topliwości i T końcową temperaturę wody, ogrzanej przez ciało. Ciężar

p' wody, której ciepło właściwe jest równe jedności, ogrzawszy się od t'^0 do T^0, pochłonął ilość ciepła równą $p' \times (T - t')$. Ciało zaś, którego ciężar jest p i ciepło właściwe równe c, oziębiwszy się od t^0 do T^0, straciło ilość ciepła równą $p \times c \times (t - T)$, oprócz tego podczas krzepnienia straciło jeszcze $r \times p$, to jest iloczyn z ilości ciepła r potrzebnej do stopienia jednego kilograma ciała i wagi p. Ponieważ to, co zyskała woda, jest równe temu, co ciało w sumie straciło, to ułożywszy odpowiednie równanie, w którem, jak widzimy, wszystkie wartości, oprócz szukanego ciepła topliwości r, są znane, można z łatwością znaleść z niego tę szukaną wartość.

Ciepło topliwości lodu przedstawia szczególny interes ze względu na zastosowania, jakie można pod tym względem zrobić z lodem. Oznacza się je również za pomocą metody mieszanin. Znany ciężar P lodu przy zerze wrzuca się do masy p wody, ogrzanej do temperatury t, wystarczającej do stopienia całego lodu. Natychmiast po jego stopieniu mierzy się końcową temperaturę T mieszaniny, a mając te dane oblicza się, na mocy analogicznego do powyższego rachunku, ciepło topliwości lodu. La Provostaye i Desains posługując się taką właśnie metodą, znaleźli liczbę 79,25 ciepłostek; Person, który wykonał liczne doświadczenia nad ciepłem topliwości wielu ciał prostych i złożonych, otrzymał tę samą liczbę. Dla porównania podajemy tutaj niektóre dane o cieple topliwości innych ciał:

Substancya.	Ciepło topliwości.
Lód	79,25
Cynk	28,13
Srebro	21,07
Cyna	14,25
Kadm	13,66
Bizmut	12,64
Siarka	9,37
Ołów	5,57
Fosfor	5,03
Rtęć	2,83

Powiedzieliśmy już w jednym z poprzednich paragrafów, że powstawaniu pary towarzyszy utajanie się ciepła i dlatego wszelkie parowanie stanowi przyczynę oziębiania. Wiemy dalej, że wrzenie stanowi tylko szczególny wypadek parowania, przy którym również pewna ilość ciepła zostaje pochłoniętą. Można tego z łatwością dowieść za pomocą doświadczenia, gdzie wrzenie odbywa się pod wpływem zmniejszonego ciśnienia. Doświadczenie to pierwszy wykonał Leslie. Pod kloszem pompy powietrznej umieszcza się krystalizator *B* (fig. 456) napełniony stężonym kwasem siarczanym, który pochłania parę wodną, ponad krystalizatorem zaś ustawia się mosiężną miseczkę *A*, bardzo lekką i płytką, w której na dnie znajduje się cienka warstwa wody. Po wytworzeniu pod kloszem możliwej próżni, woda zaczyna szybko wrzeć, ponieważ pary jej natychmiast ulegają pochłonięciu przez kwas siarczany, to wrzenie trwa ciągle, lecz przy przejściu cieczy w stan lotny ciepło zostaje utajone, przez co ciecz wkrótce oziębia się do zera i marznie. Widzieliśmy, że podobne doświadczenia, zmodyfikowane przez Carre'a, pozwoliły mu otrzymywać znaczne ilości lodu.

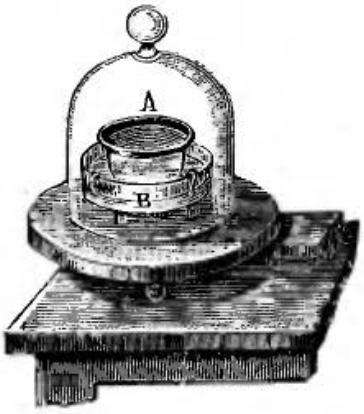


Fig. 456. Doświadczenie Lesli'ego.

Ciepłem lotności nazywamy tę ilość ciepła, jaką należy dostarczyć 1 gramowi cieczy przy jakiejkolwiek temperaturze, ażeby zamienić ją w parę nasyconą przy takiej samej temperaturze. Przy określaniu ciepła lotności przyjmujemy, że para, skraplając się, oddaje ilość ciepła dokładnie równą ilości pochłoniętej przy jej powstawaniu. Figura 457 (str. 793) przedstawia przyrząd używany przez Despretz'a. Para tworzy się w retorcie *C*, gdzie temperaturę jej wskazuje termometr, a z retorty przechodzi do wężownicy, zanurzonej w zimnej wodzie. Tutaj para skrapla się i oddaje poprzednio utajone ciepło wężownicy oraz wodzie w naczyniu *B*. Woda powstała ze skroplenia pary spływa do zbiornika *P*, do którego dochodzi wężownica; wodę tę po ukoń-

czeniu doświadczenia zbiera się i waży, a waga jej jest równa wadze pary, która przeszła przez przyrząd. Mieszadło A, wprawiane w ruch ręką, służy do poruszania wody w naczyniu B tak,

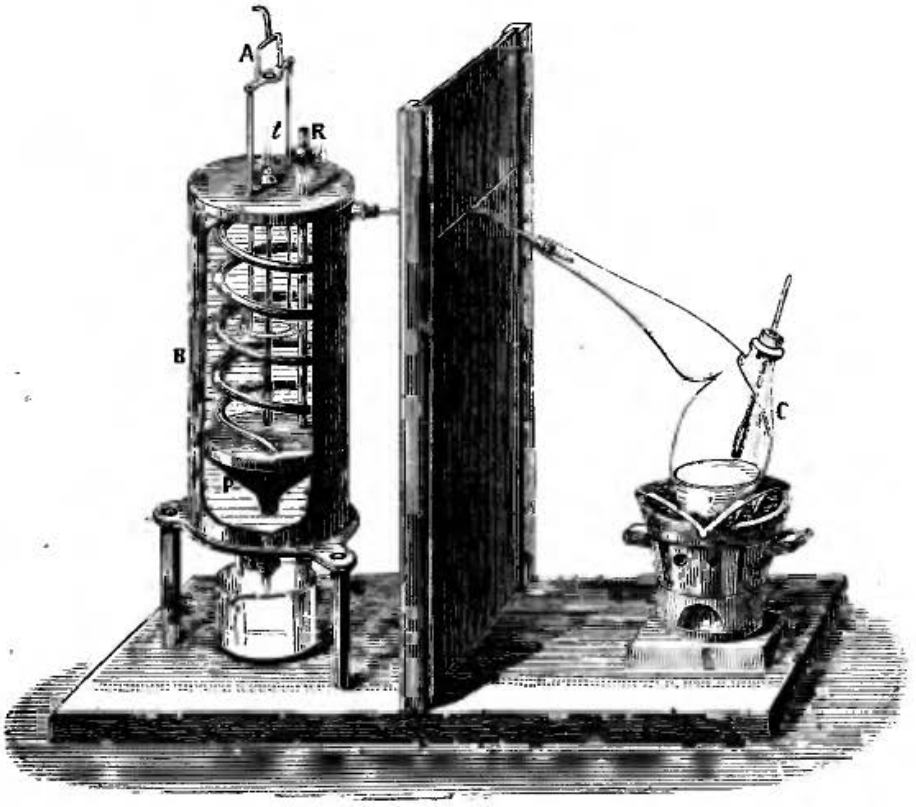


Fig. 457. Przyrząd do oznaczania ciepła lotności.

ażeby cała jej masa miała jednakową temperaturę; tę ostatnią wskazuje termometr t, umieszczony wzdłuż osi wężownicy. Wreszcie od zbiornika P odchodzi rurka, zakończona kranem R. Chcąc zmienić ciśnienie, a więc i temperaturę pary, łączy się kran ten za pomocą rurki kauczukowej z pompą powietrzną, rozrzedzającą lub ściskającą.

Doświadczenie rozpoczyna się od tego, że ciecz w retorcie ogrzewa się najprzód do temperatury wrzenia i następnie dopiero łączy retortę z wężownicą; po przerwaniu komunikacyi zbiera się wodę, skroploną w P i waży. Mając jej wagę i temperaturę w chwili wejścia do wężownicy, a także wagę wody w B, naczynia i pozostałych akcessoryów oraz ich temperaturę w początku i w końcu doświadczenia i przyjąwszy, że to co w sumie straciła

para, to one zyskały, można z łatwością obliczyć ciepło lotności danej cieczy.

Metoda ta nie jest dostatecznie ścisła dlatego, że część pary, przechodząc przez szyjkę retorty oraz przez rurkę prowadzącą do wężownicy, skrapla się i jako ciecz dostaje się do kalorymetru, któremu w ten sposób nie oddaje swego ciepła lotności. Oprócz tego sam kalorymetr otrzymuje zawsze przez przewodnictwo pewną ilość ciepła. To nam objaśnia znaczne różnice w rezultatach, otrzymanych za pomocą opisanej metody przez dawniejszych eksperymentatorów. Podczas gdy Black i Irwine znaleźli, że ciepło lotności wody przy 100° jest równe 430 ciepłostkom, Rumford znalazł liczbę 570 ciepł. Walt 533 ciepł., Despretz 540 ciepł. Niedawno jednak Berthelot pokazał w jaki sposób można uniknąć pomyłek, wpływających na te błędne rezultaty, nie uciekając się do skomplikowanych i kosztownych przyrządów, które Regnault'owi pozwoliły przeprowadzić nadzwyczaj ścisłe tego rodzaju badania. Berthelot znalazł, że ciepło lotności wody wynosi średnio 636,2 ciepł., doświadczenia zaś Regnault'a dały liczbę 636,6 ciepłostek.

Wiemy, że rozpuszczaniu się ciał stałych — o ile nie tworzy się przytem związek chemiczny — towarzyszy zjawisko utajania się ciepła; *jest to analogia do procesu topienia się ciał*. Widzieliśmy, że większość soli, rozpuszczając się w wodzie, powoduje obniżenie temperatury i że tak zwane mieszaniny oziębiające najprostsze nie są właściwie niczem innem, jak rozpuszczaniem. Również i rozpuszczanie gazu w wodzie można porównać do jednego ze znanych nam już zjawisk, a mianowicie do skroplenia pary; towarzyszy mu też wydzielanie ciepła w znacznej ilości; szczególniej w wypadku gdy gazy są bardzo rozpuszczalne, jak np. amoniak. Ilość wydzielonego ciepła zależy jednocześnie od natury rozpuszczonego gazu oraz od ilości rozpuszczalnika.

Zwykłe metody kalorymetryczne nadają się dość dobrze do mierzenia ciepła, wydzielającego się przy rozpuszczaniu gazu. Ten ostatni, ogrzany w wężownicy otoczonej wodą do temperatury kalorymetru, ulega pochłonięciu przez zważoną ilość cieczy; ciecz ta ogrzewa się, należy więc zmierzyć o ile temperatura jej się po-

dniosła, ażeby módz obliczyć szukaną ilość wydzielonego ciepła. Widzieliśmy także w pierwszej księdze niniejszego dzieła (patrz str. 209), że pochłanianie gazów przez ciała stałe połączone jest z ich zgęszczeniem. Otóż temu procesowi towarzyszy wydzielanie ciepła w nader znacznej ilości, która podług Favre'a może być o wiele większa od ilości ciepła, wydzielonego przy zwykłem skropleniu gazów, jak np. w wypadku pochłaniania amoniaku przez węgiel. Prawdopodobnie tworzy się tutaj pewnego rodzaju związek zgęszczonego gazu z ciałem stałem, przyczem wydziela się ciepło. Gazy, uważane dawniej za trwałe, jak tlen i wodór, również powodują podwyższenie temperatury, gdy ulegają pochłonięciu przez węgiel. W prochowniach zdarzało się, że masy sproszkowanego węgla zapalały się same na wilgotnem powietrzu wskutek pochłaniania pary wodnej.

Fizyczną zmianę stanu ciała, jak topienie lub krzepnienie, charakteryzuje zmiana wszystkich własności fizycznych, której towarzyszy pochłanianie lub wydzielanie ciepła; zmiana taka najczęściej odbywa się z jedną substancyą, skład której pozostaje niezmieniony. Charakterystyczne cechy zmian fizycznych odnajdujemy także we wszystkich reakcyach *chemicznych*, z tą jednak różnicą, że tutaj jest konieczny udział kilku substancyj, które łączą się, rozkładają lub też wzajemnie wymieniają swe części składowe.

Ciała złożone, czyli składające się z kilku rodzajów materyi, mogą ulegać tak zwanej *dyssocyacyi;* jest to częściowy rozkład, ograniczony przez wpływ ciśnienia, jakie na ciało złożone wywiera gaz, będący rezultatem rozkładu. Tak np. węglan wapnia, utrzymywany przy temperaturze 960°, rozkłada się częściowo na wapno palone i kwas węglany, dopóki ciśnienie, wywierane przez ten gaz, nie dochodzi do 520 milim. Wtedy rozkład ustaje, lecz rozpoczyna się natychmiast po zmniejszeniu ciśnienia, wywieranego przez kwas węglany. Naodwrót gdy ogrzewa się wapno palone do 960° w obecności kwasu węglanego i pod ciśnieniem np. jednej atmosfery, wtedy kwas węglany ulega pochłanianiu tak długo, dopóki ciśnienie wynosi więcej, niż 520 milim., w chwili zaś gdy ono osiąga tę granicę, pochłanianie ustaje.

Powiadamy tedy, że węglan wapnia przy 960° posiada *prężność dyssocyacyjną* równą 520 milimetrom. H. Sainte-Claire Deville, który odkrył zjawiska dyssocyacyi, zwrócił uwagę na ich ścisłą analogię do zjawisk parowania; prężność dyssocyacyjna odgrywa tutaj taką samą rolę, jak maximalna prężność par przy parowaniu. Jedyna różnica polega na tem, że para, wydzielająca się z ciała, które dyssocyuje, posiada inny skład chemiczny, aniżeli to ciało. Dyssocyacyi, podobnie jak parowaniu, towarzyszy utajanie się ciepła.

Topienie i ulatnianie nie są jedynemi zmianami stanu, jakie ciepło może spowodować w ciele, którego skład chemiczny pozostaje niezmieniony. Niektóre ciała mogą także z odmiany stałej, bezkształtnej lub krystalicznej przejść w inną odmianę stałą, ciekłą albo lotną, różniącą się od tamtej pod względem ciepła właściwego oraz innych własności fizycznych. Obecnie znane są conajmniej cztery odmiany siarki, oraz cztery odmiany fosforu.

O ciałach takich powiadamy, że są wielokształtne albo *allotropiczne*. Do nich należą także ciała proste: selen, węgiel, bor, krzem i wreszcie tlen, którego odmianę allotropiczną widzimy w ozonie. Co do ciał złożonych, szczególniej organicznych, to po między niemi można znaleść jeszcze daleko liczniejsze przykłady allotropii. Niekiedy można dowolnie wytwarzać wyłącznie jedną lub drugą odmianę danego ciała, zmieniając w odpowiedni sposób warunki jej powstawania. Wogóle jedna z odmian ciała allotropicznego pozostaje niezmieniona przy zwykłej temperaturze, wszystkie zaś inne, przechodząc w tę odmianę, wydzielają przytem ciepło. I tak odmiana siarki krystalizująca w pryzmaty, przechodzi powoli w kryształy oktaedryczne; to samo stosuje się do siarki miękiej, w obu zaś razach wydziela się ciepło. Lecz wszystkie odmiany siarki ogrzane do 270° przechodzą w siarkę mięką, a kryształy oktaedryczne zmieniają się przy 100° w małe kryształy pryzmatyczne.

Łączenie się ciał charakteryzuje nietylko to, że stosunek wagowy łączących się substancyj jest stale zachowany, lecz także i to, że przy tworzeniu się związku pewna ilość ciepła zostaje

wydzieloną lub pochłoniętą, czyli innemi słowy, że podczas reakcyi chemicznej ciepłodajność jest dodatnia albo odjemna. Albowiem w wielu razach pojedynczą zmianę można rozłożyć na wiele innych zmian prostszych. Ciepłodajność tej pojedynczej całkowitej zmiany równa się sumie ciepłodajności tych prostszych składowych zmian. Ponieważ każdej z tych ostatnich odpowiada właściwa jej ciepłodajność dodatnia lub odjemna, to i suma algebraiczna ich może wypaść jako dodatnia albo odjemna. Gdy utworzony związek rozkłada się w warunkach zupełnie jednakowych z temi, w jakich powstał, wtedy pochłania on napowrót wydzieloną ilość ciepła. Z tego punktu widzenia skład i rozkład stanowią dwie przeciwne zmiany stanu, podobnie jak zgęszczenie i ulotnienie ciała o niezmiennym składzie.

Ciepłodajność reakcyi chemicznej zależy od warunków w jakich ona się odbywa, a mianowicie od temperatury oraz stanu fizycznego ciał, biorących w niej udział lub będących jej rezultatem. I tak gdy wodór i tlen łączą się ze sobą, tworząc wodę, wydziela się 29100 ciepłostek (na każde 8 gramów tlenu i 1 gram wodoru), jeżeli woda pozostaje jako ciało lotne; gdy ona przechodzi w ciecz, ilość wydzielonych jednostek ciepła równa się 34500 i wreszcie gdy woda zamienia się w ciało stałe wydziela się 35200 ciepłostek. Różnice te odpowiadają ciepłu topliwości i lotności wody. Gdy przez połączenie dwóch gazów: chloru i wodoru tworzy się gazowy kwas solny, wydziela się przytem 22000 ciepłostek (na każde 35,5 gramów chloru i 1 gram wodoru), gdy tworzy się ten sam kwas w roztworze, wydziela się 39300 ciepłostek; różnica ta odpowiada cieplu, wydzielonemu przy rozpuszczaniu gazowego kwasu solnego.

Mierzenie ilości ciepła, wydzielanych podczas reakcyj chemicznych, wymaga pewnych specyalnych sposobów. Niekiedy mierzy się bezpośrednio wydzielone ciepło, a mianowicie wtedy, gdy reakcyę można oddzielnie wytworzyć wewnątrz kalorymetru, w większości jednak wypadków trzeba obliczać ciepłodajność związku z całego szeregu oddzielnych oznaczeń kalorymetrycznych, odnoszących się do rozmaitych reakcyj.

Lavoisier pierwszy starał się zmierzyć ciepło, wydzielane podczas reakcyj chemicznych, a szczególniej przy spalaniu wodoru i węgla. Spalał on określoną wagę tych substancyj wewnątrz swego kalorymetru i mierzył ilość stopionego lodu, lecz wszystkie liczby przez niego otrzymane są zbyt małe. Po nim badania podobne przedsiębrali Rumford, Despretz oraz Dulong, prawdziwie jednak dokładne rezultaty nauka zawdzięcza dwom uczonym Favre i Silberman, których bardzo liczne doświadczenia stanowią, że tak powiemy punkt wyjścia dla termochemii i są zaliczane do najlepszych. Przytaczamy kilka z tych rezultatów, dotyczących ilości ciepłostek, wydzielanych podczas spalania 1 grama niektórych ciał prostych, biorąc za ciepłostkę ilość ciepła, potrzebną do ogrzania 1 grama wody o 1°.

Substancye.	Ilość ciepłostek.
Wodór z tlenem	34462,0
Wodór z chlorem	23783,3
Węgiel drzewny	8080,0
Grafit naturalny	7796,6
Dyament	7770,1
Siarka rodzima	2261,8
Siarka świeżo skrystalizowana	2258,6
Siarka stopiona od siedmiu lat	2116,6
Siarka miękka	2250,0

Ciepłodajność przy spalaniu wodoru, obliczona na zasadzie sześciu bardzo zgodnych doświadczeń, równa się 34462 ciepłostkom, Dulong zaś znalazł liczbę większą, a mianowicie 34601 ciepłostek [1]).

---

[1]) Jamin. l. c.

ROZDZIAŁ IV.

Rozprzestrzenianie się ciepła.

§ 1. Ciepło promieniste.

Gdy ogrzane ciało znajduje się w sąsiedztwie albo styka się z substancyami, których temperatura jest niższa od jego temperatury, wtedy ciało to oziębia się i ogrzewa owe substancye. Wynika z tego, że ciepło się przenosi, co może odbywać się w sposób dwojaki: 1) Szybko i na odległość, to znaczy, że ciepło bezpośrednio przebywa drogę, oddzielającą dwa ciała; wtedy rozchodzi się ono przez *promieniowanie.* 2) Powoli i stopniowo za pośrednictwem materyalnych cząstek czyli drogą *przewodnictwa.* Rozpatrzymy najprzód zjawiska ciepła promienistego.

Własności i prawa ciepła promienistego były badane w początkach bieżącego wieku przez dwóch fizyków angielskich Lesli'ego i Rumford'a; w tym właśnie celu jeden i drugi starali się zbudować swe termometry różnicowe. Badania swe posunęli oni dosyć daleko, a przyrząd Lesli'ego do roku 1830 uchodził za najsubtelniejszy do studyów nad cieplem promienistem. Lecz w owym właśnie czasie pewne odkrycia, dokonane w innej gałęzi fizyki, pozwoliły zbudować daleko czulsze termometry różnicowe, za pomocą których odkryto nowe zjawiska, dawniej zaś znane zbadano z większą dokładnością.

Codzienne doświadczenie przekonywa nas, że ciepło słońca, lamp lub ognisk przenika przez powietrze, szyby okien i wogóle przez wszystkie ciała przezroczyste stałe, ciekłe lub gazowe. Fakt ten, nie podlegający wątpliwości, był z początku objaśniany dwojako. Kilku fizyków twierdziło, że podczas tego przednia powierzchnia ciał pochłania ciepło otrzymane i oddaje je kolejno częściom dalej leżącym, które w ten sposób ogrzewają się. Inni sądzili, że ciepło sunie bezpośrednio przez dany środek nie zmieniając jego temperatury i że przebywa go momentalnie, podobnie jak światło. Ten ostatni pogląd został ostatecznie przyjęty, po dokonaniu następujących doświadczeń. Prévost z Genewy poka-

zał, że prąd cieplny przechodzi w jednakowej ilości przez warstwę wody nieruchomą albo znajdującą się w ruchu tak szybkim, że niema czasu się ogrzać. Pokazał on prócz tego, że wycięta z zamarzniętej wody wypukła soczewka, która topi się, lecz nie ogrzewa pod wpływem pochłoniętego ciepła, niemniej przeto przeprowadza i zbiera w swem ognisku promienie słoneczne w ilości, wystarczającej do zapalenia drzewa. Delaroche zaś dostrzegł, że *przez szklaną tafelkę pokrytą sadzą, ciepło przestaje przechodzić* właśnie dlatego, iż tafelka taka, pochłaniając je, ogrzewa się. Wreszcie fakt, że ciepło przebywa próżne przestrzenie wyłącza wszelką myśl o jego rozchodzeniu się drogą kolejnego ogrzewania; wiadomo wszak, że cieplne promienie słoneczne przybywają na ziemię po przejściu próżnych przestrzeni międzyplanetarnych. Rumford starał się dowieść tego za pomocą doświadczenia. W tym celu przygotował on długi i wązki barometr, zakończony u góry obszernym balonem, w środku którego znajdował się zbiornik termometru. Następnie po zatopieniu rurki barometru powyżej poziomu rtęci i poniżej balonu, odjął górną część, która w ten sposób była zamknięta i próżna. Gdy balon zanurzono w gorącej wodzie, termometr podniósł się natychmiast, to znaczy, że ciepło przechodziło przez próżnię barometryczną.

W jednym i tym samym środku ciepło rozchodzi się po linii prostej. Prawa tego można dowieść umieszczając pomiędzy termometrem i ogniskiem, który go ogrzewa, ekran metalowy, albo jakiekolwiek inne ciało, nie przepuszczające ciepła. Jeżeli ekran znajduje się na prostej linii, łączącej termometr ze źródłem ciepła, *to ostatnie ulega zatrzymaniu.* Co do prędkości, z jaką ciepło się rozchodzi, przyjmujemy, że ona równa się prędkości światła, wkrótce zaś zobaczymy bliżej, na jakich podstawach opiera się to twierdzenie.

Zanim jednak przystąpimy do dalszego opisu zjawisk ciepła promienistego musimy koniecznie poznać przedtem przyrząd, obecnie służący do wszystkich odnośnych doświadczeń, a mianowicie termometr różnicowy, który zbudowali Nobili i Melloni. Składa się on z dwóch części: z tak zwanego stosu termoelektrycznego i galwanometru. Stos (fig. 458 str. 801) jest utworzony

z pewnej ilości sztabek antymonowych (*A*) i bizmutowych (*B*), przylutowanych jedna do drugiej. Są one równoległe pomiędzy sobą, stykają się zaś tylko w miejscach spojenia; całość jest uło-

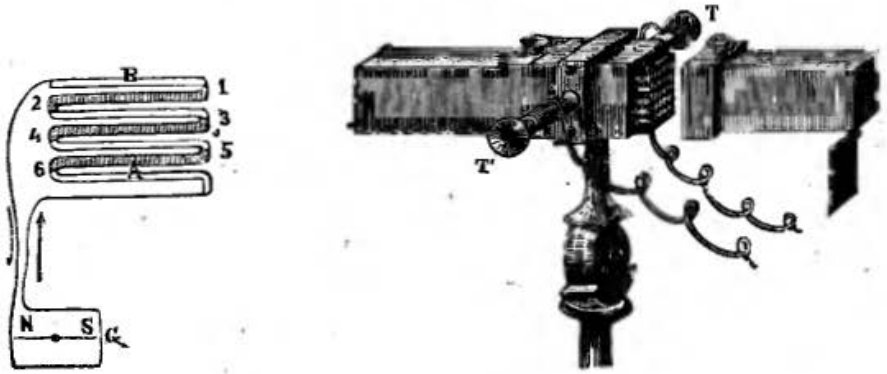


Fig. 458. Stos termoelektryczny.

żona w ten sposób, że spojenia nieparzyste 1, 3, 5 znajdują się po jednéj stronie, parzyste 2, 4, 6 po stronie drugiej. Lewa strona rysunku przedstawia stos szematycznie, prawa zaś — stos prawdziwy. Sztabki tworzą razem pryzmat o kwadratowej podstawie, który umieszcza się w mosiężnym futerale, zaopatrzonym w takież rury; te ostatnie przepuszczają ciepło w pewnym określonym kierunku. Do każdej z dwóch skrajnych sztabek dochodzi koniec miedzianego drutu, nawiniętego na drewnianą ramkę. W środku ramki znajduje się pozioma igiełka magnesowa, ruchoma wokoło poziomej osi, która ją podtrzymuje, sama zaś ramka jest umieszczona w płaszczyźnie pionowej, zawierającej igiełkę. Całość ta, utworzona przez igiełkę oraz drut, stanowi galwanometr *G*. Jeżeli w takich warunkach ogrzewamy parzyste miejsca spojenia, powstaje prąd elektryczny, który przebiega przez drut i powoduje zboczenie igiełki magnesowej; przy ogrzewaniu spojeń nieparzystych, rozwija się prąd o kierunku przeciwnym i igiełka zbacza w drugą stronę. Wreszcie gdy ogrzewamy jednocześnie i jednakowo spojenia parzyste i nieparzyste, igiełka pozostaje nieruchomą.

Gdyby galwanometr był poprostu zbudowany w sposób opisany, igiełka zbaczałaby tylko pod wpływem dość znacznych różnic w temperaturze. W celu nadania przyrządowi większej

czułości, Schweiger nawinął ów drut miedziany na ramkę nie raz jeden, lecz bardzo wielką ilość razy, ażeby zaś oddzielne jego *skręty nie stykały się bezpośrednio, drut okręcono jedwabiem.* Oprócz tego Nobili wprowadził ulepszenie, które najwięcej przyczyniło się do powiększenia czułości przyrządu. Igiełkę pojedyńczą zastąpił przez układ dwóch igiełek NS i $N'S'$ (fig. 459), z których jedna jest umieszczona wewnątrz, druga zaś zewnątrz ramki; obydwie są zawieszone na wspólnej pionowej osi nie giętkiej i podtrzymywanej przez bardzo cienką nitkę F. Układ taki zbacza nawet pod wpływem nader słabych prądów, przebiegających przez skręty drutu.

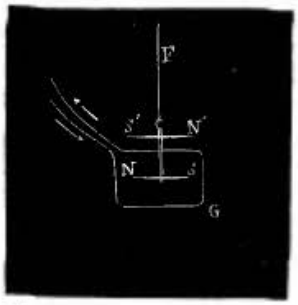


Fig. 459. Układ dwóch igiełek magnesowych.

Przyrząd opisany stanowi istotnie termometr różnicowy, wskazuje bowiem najmniejsze różnice w temperaturze miejsc spojenia, odpowiadające dwom stronom stosu i pozwala je mierzyć. Mianowicie wielkość zboczenia igiełki obserwuje się na cyferblacie, podzielonym na stopnie i umieszczonym poziomo pod górną igiełką galwanometru, przed rozpoczęciem zaś doświadczeń badacze dowiadują się, jakie ilości otrzymanego ciepła odpowiadają rozmaitym jej zboczeniom. *Do samych doświadczeń Melloni używał jeszcze* różnych środków pomocniczych: 1) sześcianu Lesli'ego C (fig. 460)

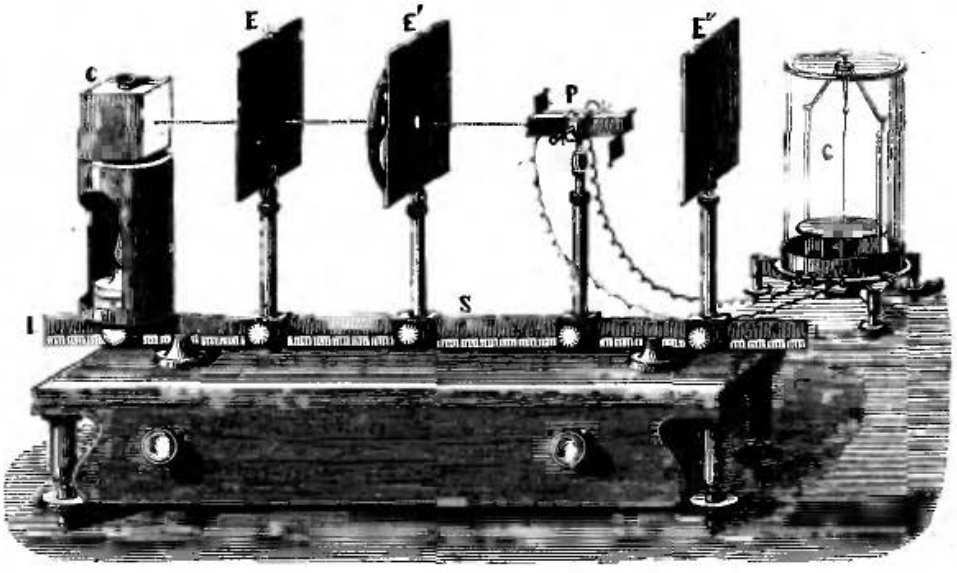


Fig. 460. Różne części przyrządu do doświadczeń nad ciepłem promienistem.

czyli naczynia, napełnionego wodą przy stałej temperaturze i którego ściany są pokryte rozmaitemi substancyami jakoto: sadzą, bielą ołowianą; 2) lampy Lacatelli'ego mogącej przez długi czas zachować stałą temperaturę i t. p. Oprócz tego należało umożliwić regulowanie kierunku promieni cieplnych, padających na jedną lub drugą stronę stosu P, w tym celu umieszcza go się na odpowiedniej wysokości tak, ażeby oś jego zlewała się z kierunkiem tych promieni. Ekrany E i E'', utworzone przez podwójne blaszki metalowe, chronią przyrząd z obu stron od wszelkiego dopływu ciepła pobocznego. Wreszcie ekran E' posiada pośrodku otwór, przez który wiązka promieni cieplnych dochodzi do stosu P; za pomocą przepony czyli diafragmy można otwór ten zwężać lub rozszerzać. Podstawa każdej z wymienionych części obejmuje u dołu podzieloną sztabę LL', wzdłuż której można je przesuwać.

Mając taki przyrząd postarajmy się dowiedzieć, jaki istnieje związek pomiędzy natężeniem ciepła promienistego, padającego na daną powierzchnię i odległością tej ostatniej od źródła ciepła. Umieśćmy przed stosem P na znanej odległości wspomnianą wyżej lampę i usuńmy zupełnie ekran E' tak, ażeby jedna strona stosu otrzymywała swobodnie ciepło, pochodzące z tego źródła. Gdy następnie spuścimy ekran E, który jest ruchomo osadzony na podtrzymującej go nóżce, igiełka galwanometru zboczy; przypuśćmy, że zboczenie to wynosi 12^0. Wtedy odsuwamy źródło ciepła na odległość *dwa* razy większą od poprzedniej i przekonywamy się, że zboczenie igiełki w tem drugiem doświadczeniu jest równe tylko 3^0, czyli, że jest *cztery* razy mniejsze niż wprzódy. Powtarzając podobne doświadczenia dochodzimy do wniosku, że *natężenie ciepła, padającego na daną powierzchnię jest odwrotnie proporcyonalne do kwadratów z odległości tej powierzchni od źródła ciepła.* Widzieliśmy w księdze o świetle (patrz str. 411) że zupełnie takie same prawo istnieje co do natężenia światła. Teoretyczne rozumowania, przytoczone tamże, stosują się także do ciepła promienistego. Dalsze doświadczenia pokazały również, że *natężenie ciepła padającego na daną powierzchnię jest tem mniejsze, im większy jest jego kąt padania* to jest kąt,

jaki tworzy promień cieplny z prostopadłą do tej powierzchni. To co powiedzieliśmy wyżej (porównaj str. 413) o działaniu słonecznych promieni świetlnych, padających na ziemię, stosuje się tedy także i do promieni cieplnych, wysyłanych przez słońce. Wreszcie *natężenie promieni cieplnych, wysyłanych przez daną powierzchnię, jest tem mniejsze, im większy jest jego kąt wyjścia* to jest kąt, jaki tworzy promień z prostopadłą do elementu, promieniującego ciepło. *Fourier uważał ostatnie prawo jako słuszne we wszystkich* wypadkach, lecz Desains sądzi, że jest ono bardzo ograniczone i stosuje się jedynie do ciał pozbawionych zdolności odbijania ciepła, jak np. sadza.

Powietrze, woda, lód, oraz dość znaczna ilość innych ciał stałych, ciekłych i gazowych przepuszcza ciepło. Ciała takie zowią się *przecieplającemi*, te zaś, które własności takiej nie posiadają są *nieprzecieplające*. Jedna i ta sama substancya niejednakowo przepuszcza promienie cieplne, pochodzące z rozmaitych źródeł ciepła. Tafelka szkła przepuszcza obficie ciepło słoneczne, umieszczona zaś przed źródłem o względnie nizkiej temperaturze, naprzykład przed zapalonym piecem, zatrzymuje prawie zupełnie promienie cieplne. Herschell w roku 1803 i Delaroche w roku 1814 wykonali doskonałe doświadczenia nad tym przedmiotem, lecz dopiero przyrząd Melloni'ego pozwolił posunąć dalej odnośne badania. Pokazało się, że sól kamienna przepuszcza prawie zawsze 0,92 padającego na nią ciepła, niezależnie od źródła z którego ono pochodzi (lampa Locatelli'ego, rozżarzona platyna, miedź przy 400°). Spat islandzki przepuszcza 0,39 ciepła *z lampy i 0,28 z rozżarzonej platyny; ałun przepuszcza 0,9 ciepła* z pierwszej i 0,02 drugiej, lód wreszcie 0,6 ciepła z lampy i 0,005 z platyny.

Doświadczenia te pokazują, że istnieją różne rodzaje ciepła, że np. to, które wysyła słońce nie jest identyczne z ciepłem wysyłanem przez metalową powierzchnię ogrzaną do 200° lub 300°. Nie dość na tem, albowiem ciepło z danego źródła nie jest jednorodne, gdyż składa się z promieni rozmaitego gatunku. Można tego dowieść za pomocą doświadczenia, wykonanego na wzór tego, jakie urządził Newton w celu oddzielenia różnobarwnych

promieni słonecznych. Na drodze wiązki ciepła Melloni umieścił pryzmat G z soli kuchennej (fig. 461), która jak wiemy przepuszcza jednakowo wszystkie rodzaje ciepła. To ostatnie przy przejściu przez pryzmat zmienia swój kierunek czyli ulega *załamaniu* i po wyjściu z pryzmatu pada na bardzo wązki stos P (fig. 462). Stos jest przymocowany do linii, którą można obracać w około pionowej osi; umieszczany kolejno w różnych miejscach, analogicznych do tego jakie zajmuje w P, otrzymuje on za każdym razem jedynie część wiązki promieni cieplnych, rozszczepionych po wyjściu z pryzmatu. Zboczenie igiełki galwanometru daje wtedy miarę natężenia ciepła w rozmaitych punktach wiązki. Jeżeli źródło ciepła jest jednocześnie i świetlne, jak np. lampa Locatelli'ego lub też gdy źródłem tem jest słońce, wtedy otrzymuje się także na ekranie, umieszczonym w pewnej odległości od pryzmatu, barwne widmo słoneczne. Stos wystawiony kolejno na działanie różnych barw wskazuje coraz wyższą temperaturę w miarę przesuwania od fioletu do czerwieni. Po za czerwienią, to jest tam gdzie nie ma już wcale światła, temperatura jest jeszcze wyższa, następnie obniża się i wreszcie w pewnej dość znacznej odległości od czerwieni, igiełka galwanometru wskazuje zero. Gdy zaś dane źródło ciepła nie jest świetlne, jak np. sześcian Lesli'ego, wtedy wiązka promieni cieplnych, która przed dojściem do pryzmatu biegnie w kierunku promienia słonecznego, daje po załamaniu same promienie ciemne.

Fig. 461. Pryzmat w doświadczeniu Melloni'ego.

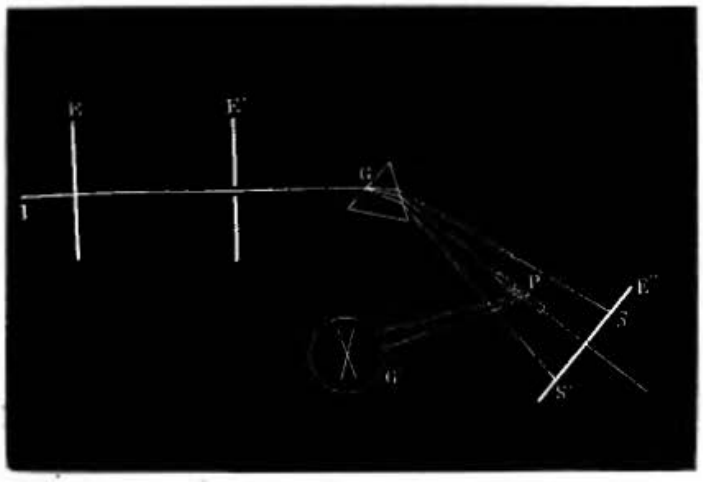


Fig. 462. Doświadczenie Melloni'ego.

Opisane doświadczenie pokazuje, że jak to pierwszy zauważył Herschell, ciepło słoneczne zawiera promienie jasne i promienie ciemne. Różnice pomiędzy niemi polegają jak wiemy na tem, że pierwsze działają na siatkówkę oka i wywołują w niem wrażenie światła, drugie zaś wpływu takiego nie wywierają. Oprócz tego dwa te rodzaje promieni załamują się w tej samej substancyi niejednakowo. Melloni przekonał się, że różne rodzaje promieni cieplnych przechodzą w sposób nader rozmaity przez tę samę tafelkę przeciepłającą, zachowują się one w danym razie jak promienie z różnych źródeł ciepła. Tyndall pokazał, że roztwór jodu wsiarku węgla, który wcale nie przepuszcza ciepła świetlnego, począwszy od fioletu aż do czerwieni, przepuszcza doskonale ciepło ciemne. To doprowadziło go do odkrycia nadzwyczaj ciekawego zjawiska. Gdy naczynie napełnione wspomnianym roztworem ustawimy na drodze promieni słonecznych, zebranych w ognisku parabolicznego zwierciadła, zatrzyma ono całą ilość światła tak, że w ognisku nie będzie go wcale; natomiast ciepło jest tutaj bardzo silne, wystarcza bowiem do zapalenia kawałka drzewa.

Ciemne promienie przechodzą w znacznej ilości przez okopconą tafelkę soli kamiennej, podczas gdy całkowicie zostają zatrzymane przez przezroczystą tafelkę ałunu. Przeciwnie promienie świetlne przechodzą obficie przez tafelkę ałunu i zostają zatrzymane przez okopconą sól kamienną. Ciepło słoneczne, składające się z promieni świetlnych i ciemnych przechodzi z łatwością przez tafelkę soli lub ałunu, lecz gdy złożymy dwie te tafelki w jedną, ciepło zostanie przez nią zatrzymane. Albowiem ałun przepuszcza tylko ciepło świetlne, sól zaś tylko ciepło ciemne i dlatego gdy są złożone razem, nie przepuszczają żadnego z tych dwóch rodzajów promieni.

Opisane zjawiska objaśniają wysoką temperaturę, jaką w zimie osiąga wnętrze cieplarni jedynie pod wpływem promieni słonecznych. Słoneczne promienie świetlne przenikają obficie przez szyby cieplarni i ogrzewają ciała w niej umieszczone; ciała te z kolei promieniują ciepło, lecz wysyłają same promienie ciemne, które z trudnością przenikają przez szkło i dlatego po-

zostają wewnątrz, ciepło więc nagromadza się, uchodzi zaś jedynie dzięki przewodnictwu murów. Również i powietrze zawierające parę wodną zatrzymuje w znacznej części promienie ciemne, jak tego dowiódł Tyndall. Warstwa wilgotnego powietrza, trzy metry gruba, zatrzymuje jedną dziesiątą promieni na nią padających. Atmosfera osłabia tedy wpływ jaki na ziemię wywiera promieniowanie słońca, pochłaniając znaczną część ciemnych promieni przezeń wysyłanych, jednocześnie także przeszkadza ona oziębianiu się kuli ziemskiej, zatrzymując ciemne promienie, które ziemia wysyła.

Doświadczenia powyższe są najzupełniej analogiczne do znanych nam doświadczeń nad pochłanianiem światła (patrz str. 522). Patrząc przez tafelkę czerwonego szkła na otaczające przedmioty, przekonywamy się, że ciała czerwone widać prawie tak samo jasno jak bez tafelki, widok innych ciał zaciemnia się, zielone zaś, jak np. liście drzew, wydają się prawie czarne. Naodwrót przy użyciu tafelki z zielonego szkła przedmioty czerwone wydają się ciemne, zielone zaś jaśnieją pełnym blaskiem. Gdy dwie takie różnobarwne tafelki odpowiednio dobrane złożymy w jedną, nie zobaczymy przez nie żadnego przedmiotu. Przedmiot biały, niewidzialny poprzez taką kombinacyę dwóch tafelek, byłby z łatwością widziany po przez każdą z nich oddzielnie.

Analogie te zwróciły pilną uwagę uczonych, którzy zaczęli badać, czy wszystkim zjawiskom świetlnym odpowiadają podobne zjawiska z ciepłem promienistem i obecnie można twierdzić, że istnieje najzupełniejsza równoległość pomiędzy temi dwoma szeregami zjawisk. Czytelnik przekona się o tem z następujących paragrafów.

§ 2. Odbicie, pochłanianie i wysyłanie ciepła promienistego.

Gdy promienie cieplne padają na powierzchnię ciała, wtedy zwykle część ich przenika do jego wnętrza, część zaś powraca czyli ulega *odbiciu*. Prawa odbijania się ciepła możemy poznać bezpośrednio za pomocą opisanego wyżej termometru różnicowego czyli termomultyplikatoru Melloni'ego, do którego dodaje się

małe zwierciadło *MM'* (fig. 463). Zwierciadło to, ustawione pionowo na poziomym krążku *C*, podzielonym na stopnie, może obracać *się wokoło pionowej osi OO' przechodzącej* przez płaszczy-

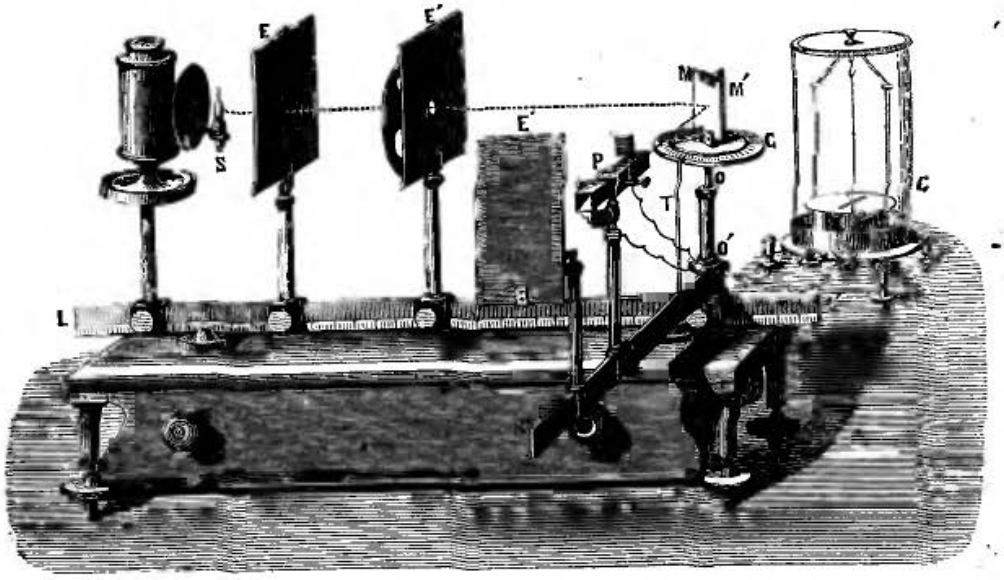


Fig. 463. Odbicie ciepła.

znę zwierciadła oraz przez środek krążka. Ruchoma igiełka wskazuje kierunek prostopadłej do zwierciadła i obraca się wraz z niem; podstawa, na której osadzony jest krążek *C*, podtrzymuje u dołu sztabę *O'R* obracającą się wokoło tej samej osi *O'O co zwierciadło. Sztaba O'R podtrzymuja* stos *P*, wskaźnik zaś umieszczony na górnym końcu słupka *T* i przesuwający się wzdłuż podziałek krążka, umożliwia sprowadzenie sztaby tej do żądanego położenia.

Umieśćmy źródło ciepła w *S* i ustawmy stos tak, ażeby oś jego *była pozioma; jeżeli środek małego otworu w ekranie E'* znajduje się na poziomej linii, przechodzącej przez *S* to — po opuszczeniu ekranu *E* — przekonywamy się, że igiełka galwanometru zbacza tylko wtedy, gdy oś stosu leży w poziomej płaszczyźnie, przechodzącej przez źródło ciepła *S*. Dowodzi to, że promień odbity od zwierciadła i ogrzewający zwróconą ku niemu stronę stosu, znajduje się w tej samej płaszczyźnie poziomej, co i promień padający. Innemi słowy *promienie padający i odbity leżą w jednej płaszczyźnie z prostopadłą w punkcie padania do powierzchni odbijającej.*

Znajdujemy dalej, że w tych warunkach zboczenie galwanometru zależy także od położenia sztaby *O'R*. Obracając ją powoli dochodzimy wreszcie do takiego jej położenia, przy którem galwanometr wskazuje maximum odchylenia, co ma miejsce wtedy, gdy stos otrzymuje w całości odbite ciepło. Można przekonać się, że igiełka wskazująca kierunek prostopadłej do zwierciadła w punkcie padania, dzieli kąt pomiędzy promieniem padającym i odbitym na dwie równe części, czyli że *kąt odbicia jest równy kątowi padania*. Wiemy, (patrz str. 428) że takie same prawa rządzą odbijaniem się światła.

Następujące doświadczenie z dwoma sprzężonemi zwierciadłami wykazuje istnienie ogniska głównego, w którem skupiają się promienie cieplne, odbite od wklęsłego zwierciadła oraz potwierdza wyprowadzone wyżej prawa odbijania się ciepła. Dwa wklęsłe zwierciadła *A* i *B* (fig. 464) są umieszczone na odległości

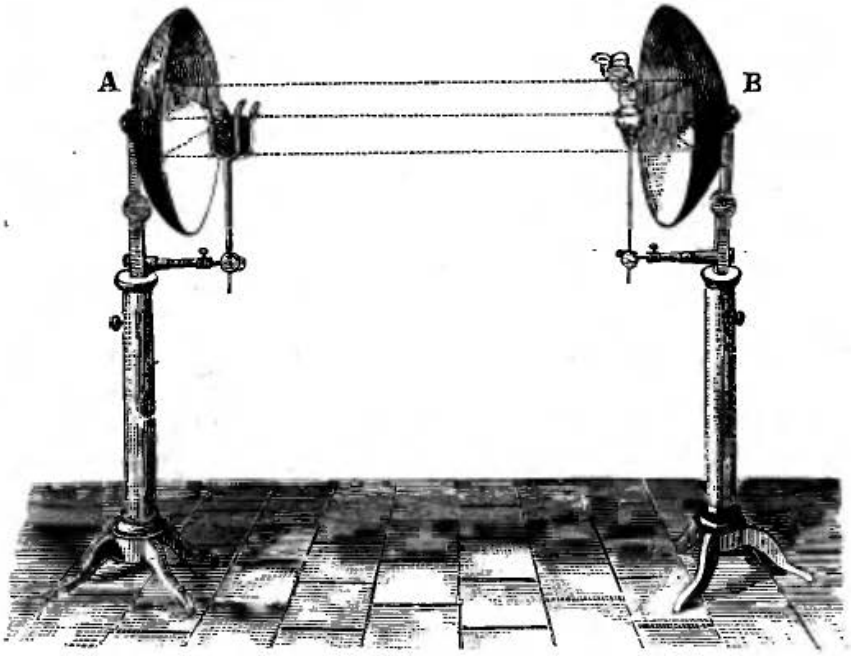


Fig. 464. Odbicie ciepła od wklęsłego zwierciadła.

4 do 5 metrów, w ten sposób, że główne ich osie zlewają się. W głównem ognisku jednego z nich ustawia się druciany koszyczek, napełniony rozpalonemi węglami, w ognisku głównem drugiego — jakieś łatwo palne ciało np. hubkę lub bawełnę strzelniczą. Promienie wysyłane przez węgle odbijają się najprzód od

zwierciadła *A*, po odbiciu zaś—jeżeli powyższe prawa są słuszne—powinny biedz równolegle do jego głównej osi, następnie po powtórnem odbiciu od zwierciadła *B* zebrać się w ognisku tegoż. W istocie tak jest, albowiem znajdująca się w tem ognisku hubka zapala się, podczas gdy w innym punkcie zjawisko takie nie ma miejsca.

Promienie słoneczne zebrane w ognisku wklęsłego zwierciadła (fig. 465) tworzą w tem miejscu tak wysoką temperaturę, że można w niej stopić srebro, miedź lub krzem. W roku 1694 we Florencyi spalono dyament w ognisku takiego zwierciadła palącego. Opowiadają, że Archimedes podpalił rzymskie okręty za pomocą podobnych zwierciadeł. Buffon zbudował zwierciadła palące tak potężne, że dowiodły możliwości czynu, przypisywanego Archimedesowi. Posługując się kombinacyą złożoną ze 128 zwierciadeł, obracających się niezależnie jedno od drugiego w żądanym kierunku, Buffon zapalił drewnianą deskę smolną, oddaloną o 68 metrów.

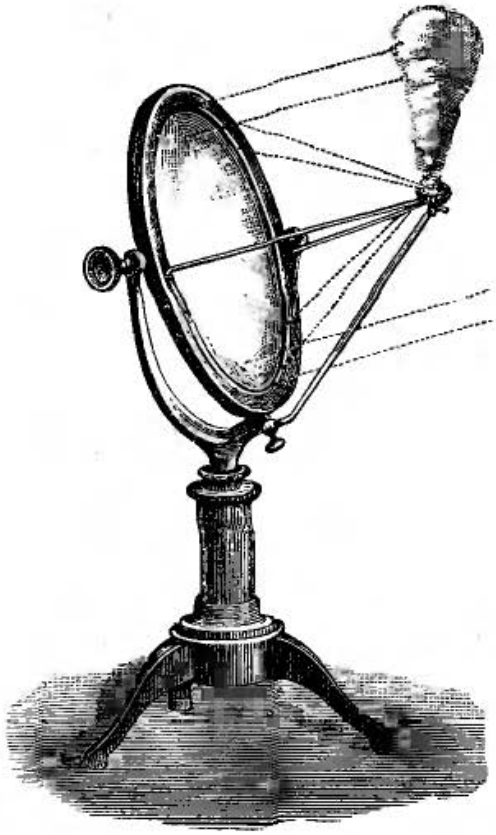


Fig. 465. Zwierciadło palące.

Zwierciadła odbijają rozmaite ilości ciepła, zależnie od natury substancyi, która tworzy powierzchnię odbijającą. Badano tedy te ilości, przyczem *zdolność odbijania* ciepła danego ciała określono jako stosunek ilości ciepła odbitego do ilości ciepła padającego. W tym celu można się posługiwać przyrządem wyżej opisanym (patrz fig. 463). Po ustawieniu źródła ciepła oraz stosu w sposób wymagany przez prawa odbicia, obserwujemy zboczenie igielki galwanometru. Przypuśćmy, że promienie cieplne, odbite od zwierciadła stalowego np. powodują zboczenie

równe 6°. Wtedy badamy jaki jest wpływ bezpośredniego promieniowania, a mianowicie usuwamy zwierciadło i obracamy sztabę $O'R$ tak, ażeby stanowiła przedłużenie linii LO'. Po opuszczeniu ekranu E ciepło dosięga stosu, przyczem przebywa drogę równą sumie dróg, jakie poprzednio przebył promień padający i odbity, nic się więc pod względem drogi nie zmienia, jedynie odbicie niema miejsca. Jeżeli w tym drugim wypadku zboczenie igiełki wynosi 10°, wtedy stosunek $^6/_{10}$ wyraża zdolność odbijania stali.

Odbijanie zmienia się wraz ze stopniem wypolerowania powierzchni, rodzajem ciepła, oraz nachyleniem promienia padającego na zwierciadło. Polerowanie wywiera wpływ nader znaczny; tak np. srebrna tafelka dobrze wypolerowana może dwa razy lepiej odbijać ciepło aniżeli tafelka wypolerowana niedostatecznie. Co do wpływu rodzaju samego ciepła, to w celu zbadania go Provostaye i Desains mierzyli zdolność odbijania jednej i tej samej substancyi, na którą padały promienie z rozmaitych źródeł ciepła: lampy Locatelli'ego, lampy spirytusowej oraz słońca. Srebro naprzykład odbija 0,92 padających nań cieplnych promieni słonecznych i 0,97 promieni z lampy Locatelli'ego; stal 0,60 promieni słonecznych i 0,83 promieni z lampy. Co do wpływu nachylenia promieni, to wspomnieni uczeni znaleźli np. że odbijanie szkła zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem kąta padania, gdy ten ostatni jest równy 80° szkło odbija 0,551 padających nań promieni cieplnych, przy kącie zaś padania równym 20° odbija tylko 0,050. Jamin znalazł cyfry prawie identyczne dla szkła odbijającego promienie świetlne.

Wiemy z poprzedniej księgi, że część światła, padającego na daną powierzchnię, ulega odbiciu we wszystkich kierunkach, czyli zostaje rozproszona (patrz figurę 285, str. 448). W roku 1802 Herschell pokazał, że to samo ma miejsce z ciepłem; następnie Melloni podjął tę kwestyę. Oto doświadczenie, które dowodzi rozpraszania się ciepła przez odbicie: promień słoneczny SI przenika przez otwór w ekranie E' (w przyrządzie Melloniego) i pada prostopadle na tafelkę LL', pokrytą bielą ołowianą (fig. 466, str. 812). Stos P jest zwrócony ku punktowi, na który

pada promień, lecz tworzy z prostopadłą *SI* pewien kąt; pomimo to igiełka galwanometru zbacza, co pokazuje, że promienie cieplne odbijają się nietylko w kierunku prostopadłej lecz także w stronę stosu. Możnaby tutaj zrobić zarzut, że substancya pokrywająca tafelkę ogrzewa się i wysyła ciepło biegnące w kierunku *JP*, czyli, że ciepło to nie jest wcale odbite. Lecz igiełka galwanometru zbacza natychmiast po usunięciu ekranu *E*, to jest zanim jeszcze tafelka zdołała się ogrzać; powtóre gdy przesuwamy stos tak, ażeby był zwrócony ku tylnej powierzchni tafelki, pokrytej sadzą, igiełka stoi prawie nieruchomo naprzeciwko zera, a jednak zdolność wysyłania promieni cieplnych nie jest w sadzy wcale mniejsza, aniżeli w bieli ołowianej.

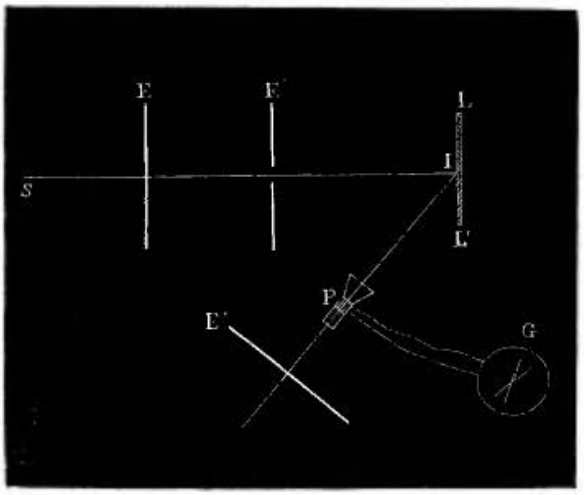


Fig. 466. Rozproszenie ciepła. Doświadczenie Melloni'ego.

Ciała posiadają także własność pochłaniania mniejszej lub większej ilości ciepła. Można mierzyć ich zdolność pochłaniania *absolutną*, to jest stosunek ilości ciepła pochłoniętego do ilości ciepła padającego, albo też zdolność *względną*, to jest stosunek ilości ciepła pochłoniętego przez ciało do ilości, jaką w tych samych warunkach pochłonęłoby inne jakieś ciało, użyte do porównania. Leslie określał względną zdolność pochłanianiania za pomocą termometru różnicowego, którego kulka znajdowała się w ognisku wklęsłego zwierciadła. Kulkę tę pokrywał kolejno sadzą, blaszkami złota, srebra, miedzi i t. p. Temperatura termometru podnosiła się pod wpływem promieni cieplnych, odbitych od zwierciadła i zebranych w ognisku, podwyższenie zaś to było tem znaczniejsze, im więcej ciepła pochłaniała dana substancya, pokrywająca kulkę. W ten sposób Leslie skonstatował, że *pochłanianie jest tem większe, im mniejsze jest odbijanie ciepła.*

Melloni oznaczył zdolność różnych ciał do pochłaniania ciepła względnie do sadzy, używając do tego termomultyplikatoru. Umieszczał on przed stosem cienką blaszkę miedzi; powierzchnia jej zwrócona w stronę stosu była pokryta sadzą, powierzchnia zaś wystawiona na działanie źródła ciepła była powleczona badaną substancyą. Ciepło, które padało na blaszkę, w rozmaitym stopniu ulegało pochłonięciu, zależnie od natury tej substancyi, wskutek czego blaszka niejednakowo promieniowała ciepło w stronę stosu; galwanometr wskazywał wtedy różne zboczenia, zkąd łatwo było porównać pochłanianie rozmaitych ciał. Przyjąwszy, że pochłanianie sadzy jest równe 100, Melloni znalazł, że dla bieli ołowianej wynosi ona również 100, dla kleju rybiego 91, dla metalów 13. W ogóle i Melloni znalazł również, że pochłanianie zmienia się w stosunku odwrotnym do odbijania; innemi słowy, ciało pochłania tem mniej ciepła, im więcej go odbija i naodwrót. Lecz dwie te wartości nie dopełniają się wzajemnie, to znaczy, że suma ciepła odbitego i pochłoniętego nie jest równa ciepłu padającemu, lecz jest od niej mniejsza. Albowiem ciepło padające na daną powierzchnię w istocie dzieli się na trzy części: jedną, która zostaje pochłoniętą i ogrzewa ciało, drugą, która ulega prawidłowemu odbiciu i wreszcie trzecią, która zostaje rozproszoną. Oprócz tego dla niektórych ciał należy jeszcze wziąć pod uwagę pewną ilość ciepła, która przechodzi przez nie, nie ogrzewając ich wcale.

Melloni skonstatował, że pochłanianie zależy także od źródła, z którego ciepło pochodzi. Naprzykład węglan ołowiu pochłania prawie dwa razy więcej ciepła, wysyłanego przez sześcian Lesli'ego ogrzany do 100°, aniżeli ciepła z lampy. Jedynie sadza pochłania zawsze jednakową ilość ciepła, niezależnie od jego źródła. Pochłanianie zależy także od nachylenia promieni; jest ono największe gdy promienie padają prostopadle do powierzchni i zmniejsza się w miarę ich nachylenia. Jestto jedna z przyczyn, dla których dane miejsce na ziemi ogrzewa się bardziej w lecie, aniżeli w zimie, albowiem w lecie promienie słoneczne padają na nią bardziej prostopadle, aniżeli w zimie.

Ciała wysyłają także czyli promieniują większe lub mniejsze ilości ciepła. I tutaj również Leslie badał rozmaite ciała i oznaczył ich względną zdolność promieniowania. W jednem z ognisk sprzężonych wklęsłego zwieciadła umieścił kulkę termometru różnicowego, w drugiem zaś ognisku ustawił sześcian, którego ściany były utworzone z różnych metali, albo też były pokryte rozmaitemi substancyami, jak sadzą, papierem i t. p. Sześcian napełnił wodą przy 100° i obracał go kolejno tak, ażeby coraz inna ściana zwrócona była ku zwierciadłu; promienie wysyłane przez sześcian zbierały się po odbiciu w ognisku, gdzie znajdowała się kulka i podnosiły temperaturę termometru. Podwyższenie było tem znaczniejsze, im silniej promieniowała dana substancya, obrócona ku zwierciadłu; okazało się, że dla sadzy temperatura podnosiła się bardziej, aniżeli dla każdej innej, powierzchnie zaś metalowe dawały najniższą temperaturę. Na mocy pewnego prawa Newtona, o oziębianiu się cial, Leslie obliczył zdolność promieniowania różnych ciał względnie do sadzy. Oznaczywszy zdolność tę dla sadzy przez 100, znalazł, że dla papieru wynosi ona 98, laku 95, zwyczajnego białego szkła 90, kleju rybiego 80, matowego ołowiu 45, rtęci 20, polerowanego żelaza 15, cyny, złota, srebra i miedzi 12. Musimy dodać w tem miejscu, że wymieniony porządek ciał jest odwrotny porządkowi, w jakim są one ułożone pod względem ich zdolności odbijania ciepła.

Melloni oznaczył zdolność promieniowania, używając również jako źródła ciepła sześcianu napełnionego wodą przy 100°, którego jedna ściana była pokryta sadzą, inne zaś rozmaitemi substancyami. Skierowywał on kolejno na stos termoelektryczny promienie wysyłane przez różne ściany i obserwował odnośne zboczenia galwanometru. Znalazł on liczby prawie zupełnie zgodne z temi, które otrzymał Leslie. Ten ostatni wywnioskował ze swych doświadczeń, że zdolność promieniowania ciała względnie do sadzy, jest zawsze równa jego względnej zdolności pochłaniania, innemi słowy jeżeli ciało wysyła dwa lub trzy razy więcej ciepła, aniżeli sadza, to pochłania go także dwa lub trzy razy więcej od niej. Prawo to przez długi czas uważane było

jako ogólne, lecz Kirchoff znalazł, że wysyłanie i pochłanianie danego ciała nie zmieniają się w jednakowym stosunku, gdy temperatura wzrasta lub gdy zmienia się źródło ciepła. Doświadczenie pokazało, że jeżeli przy porównywaniu zdolności promieniowania i pochłaniania ciepła, temperatura w obu razach jest jednakowa i jeżeli ciepło pochłaniane i wysyłane jest jednakowej natury (ciemne albo świetlne), wtedy prawo Lesli'ego sprawdza się.

Grubość promieniującego ciała zdaje się niekiedy wywierać wpływ na zdolność promieniowania. Melloni naprzykład przekonał się, że przy pokrywaniu werniksem sześcianu metalowego, napełnionego wodą o stałej temperaturze, promieniowanie wzmagało się w miarę powiększania ilości warstw werniksu do 16, poczem niezmieniało się już bez względu na dalsze pokrywanie. Co do metalów to znalazł on, że grubość promieniującej warstwy nie wywiera tutaj wpływu, przynajmniej w granicach, w jakich można ją zmieniać ($^{8}/_{1000}$, $^{4}/_{1000}$ i $^{2}/_{1000}$ milimetra). Promieniowanie zależy także od nachylenia promieni do powierzchni wysyłającej; tak np. dla bieli ołowianej wysyłanie jest równe 100 w kierunku normalnym, przy pochyleniu zaś wynoszącem 80^{0} jest równe tylko 66. W tych samym warunkach promieniowanie szkła wynosi 90 i 54. Wreszcie dodajmy, że promieniowanie palących się ciał gazowych jest nader słabe. Pomimo, że temperatura płomienia wodoru jest bardzo wysoka, to jednak powoduje on jedynie słabe zboczenie igiełki w termomultyplikatorze, wystawionym na jego działanie. Lecz gdy w płomieniu takim umieścimy spiralnie skręcony drut platynowy i gdy osiągnie on temperaturę płomienia, wtedy będzie on silnie promieniował. Płomienie lamp i gazu oświetlającego promieniują daleko więcej ciepła, aniżeli płomień wodoru dzięki znajdującym się w nich cząstkom niespalonego węgla, które będąc rozżarzone potęgują promieniowanie ciepła, zarówno jak i światła.

Własność rozmaitych ciał odbijania, pochłaniania i promieniowania większej lub mniejszej ilości ciepła, znalazła liczne zastosowania w życiu codziennem, oraz w sztuce. Wiadomo, że jest korzystnie dla nas, gdy naczynia służące do ogrzewania cieczy, posiadają powierzchnię czarną i matową, albowiem wtedy pochła-

niają one silniej ciepło. Polerowanie powierzchni naczyń zmniejsza pochłanianie i powiększa wydatek na paliwo. Gdy zaś chodzi o podtrzymanie przez długi czas wysokiej temperatury cieczy, wtedy należy ją zawrzeć w naczyniu polerowanem i błyszczącem, jak np. srebrne czajniki, które promieniują słabo i przeszkadzają szybkiemu oziębianiu się cieczy.

Franklin, chcąc się dowiedzieć jaki jest wpływ barwy na pochłanianie, umieścił kilka kawałków sukna, rozmaicie zabarwionych, na śniegu oświeconym przez słońce i obserwował o ile śnieg topił się pod niemi pod wpływem ciepła pochłoniętego. Ponieważ w ogóle ciemne kawałki pogrążały się w śniegu bardziej aniżeli jasne, to Franklin wywnioskował z tego, że ciała jasne pochłaniają mniej ciepła, aniżeli ciemne. Wniosek Franklina, jakkolwiek przetrwał przez długi czas, nie jest jednak słuszny. Tyndall zwraca pod tym względem uwagę, że gdyby świetlne źródła wydawały tylko widzialne promienie, moglibyśmy z barwy danego przedmiotu wnioskować o jego zdolności pochłaniania ich ciepła. Lecz wiemy, że tak nie jest, albowiem większa część promieni ze znanych źródeł na ziemi i dość znaczna część promieni słonecznych jest ciemna, na pochłanianie zaś takich promieni barwa nie wpływa wcale. W celu wyjaśnienia rezultatów głośnego doświadczenia Franklina, które dało powód do wielu błędnych wniosków, Tyndall wykonał kilka doświadczeń. Wziął dwie karty jednakowej wielkości i jednakowego utkania, na jednej rozsypał biały ałunowy proszek, na drugiej ciemny proszek jodowy. Następnie umieścił je przed ogniem i potrzymawszy przez pewien czas przekonał się, że biała karta rozgrzała się, gdy tymczasem czarna pozostała tak zimną jak poprzednio. Kulki dwóch delikatnych rtęciowych termometrów, powleczone jedna ałunem druga jodem wystawił na promieniowanie gazowego płomienia; słup rtęci w termometrze pokrytym ałunem podniósł się dwa razy wyżej, aniżeli w termometrze pokrytym jodem. W niektórych swych doświadczeniach Tyndall rozpuszczał pierwej jod w dwusiarku węgla i roztworem tym powlekał badany przyrząd; roztwór taki po wysuszeniu był czarny jak sadza, a jednak pochłaniał nieskończenie mniej ciepła, aniżeli śnieżno biały proszek ałunu.

Niemożebność tę rozgrzania jodu za pomocą promienistego ciepła Tyndall przypisuje jego nadzwyczajnej przecieplności, która szczególnie uwidocznia się, gdy jod jest rozczyniony w dwusiarku węgla. Ciepło przenika proszek, lecz nie pozostaje między jego cząstkami, gdyż odbija się od ich granicznych powierzchni. Zwykła siarka, nawet pokrajana w cieniutkie plasterki, nie przepuszcza promienistego ciepła, lecz nie należy tego przypisać pochłanianiu, ale powtarzanemu wewnętrznemu odbijaniu. Temperatura, w której siarka płonie, jest równa 244° *C.* pomimo to, jeżeli kawałek siarki umieścimy w ognisku ciemnych promieni, którego temperatura jest tak wysoka, że blaszka platynowa natychmiast rozpala się w niej do białości, siarka długi czas przetrwa zanim stopnieje i spłonie. Cukier nie tak łatwo rozpala się jak siarka, lecz lepiej od niej pochłania; umieszczony w ognisku natychmiast topnieje i płonie. Należy także zauważyć, że ciepło, które wystarcza do stopienia i spalenia cukru, zaledwie może ogrzać sól kuchenną, pomimo, iż ona jest również biała. Punkt topliwości fosforu jest równy 44°, cukru zaś około 160°, niemniej przeto w ciemnem ognisku elektrycznej lampy cukier topi się prędzej, niż fosfor. Zjawisko to należy przypisać wielkiej przecieplności fosforu, cienki bowiem plasterek tego ciała, umieszczony pomiędzy dwiema tafelkami soli kamiennej, przepuszcza znaczną ilość ciemnych promieni.

Ciało tem mniej ogrzewa się od promienistego ciepła, im jest bardziej przecieplne, podobnie jak każde zupełnie przezroczyste ciało nie ogrzewa się od świetlnych promieni. Jeżeli drewniane naczynie powleczemy grubą warstwą szronu i ustawimy w ognisku potężnego zwierciadła, w którem zebrały się promienie elektrycznej lampy, poprzednio przepuszczone przez wodę, to drzewo wprzód się zapali, nim szron stopnieć zdoła, a to dlatego, że woda wywiera potężny pochłaniający wpływ na ciemne promienie. Rezultat tego doświadczenia pozwala twierdzić, że nie świetlne, lecz ciemne promienie słoneczne stapiają śniegi zimowe na stokach gór alpejskich.

W końcu pozwolimy sobie jeszcze przytoczyć następujący

ustęp z dzieła Tyndalla [1]), dotyczący wpływu barw na promieniowanie ciał: „Często zapewne słyszeliście o wpływie kolorów na promieniowanie, przytem nieraz pewno obiły się o wasze uszy i takie twierdzenia, których doświadczenie wcale nie potwierdza. Aby się o tem przekonać wykonam tu parę prób. Znany nam sześcian metalowy napełniam gorącą wodą. Jedną jego ścianę pobielam kredą, drugą powlekam karminem, trzecią kopciem lampy, a czwartą pozostawiam nietkniętą. Zbliżam nieco stos do sześcianu i wystawiam go najprzód na promieniowanie powierzchni czarnej, igła zbacza i zatrzymuje się przy 65°. Obracam sześcian powierzchnią białą do stosu: igła nie rusza się, co dowodzi, że promieniowanie powierzchni białej jest równie obfite, jak i promieniowanie czarnej. Obracam z kolei czerwoną powierzchnię do stosu, a igła nie rusza się wcale. Nakoniec wystawiam stos na promieniowanie ściany nietkniętej: igła wraca i zbliża się do 0°, co pokazuje jak słabo promieniuje powierzchnia metalowa. Powtarzam to samo z drugim sześcianem, którego trzy ściany pokryłem aksamitem czarnym, białym i czerwonym. Rezultat otrzymuję ten sam co poprzednio: trzy powierzchnie aksamitne, chociaż różnobarwne, promieniują jednakowo, gdy tymczasem powierzchnia niepokryta promieniuje znacznie słabiej. Doświadczenia te pokazują, że promieniowanie naszych sukien nie zależy od ich barwy; również żadnego wpływu na promieniowanie nie wywiera barwa uwłosienia zwierząt.“

§ 3. Identyczność światła i ciepła promienistego.

Fakty przytoczone w dwóch poprzednich paragrafach dowodzą tak wielkiego podobieństwa w zachowaniu się promieni ciepła i światła, że z konieczności nasuwa się przypuszczenie, iż ciepło promieniste, podobnie jak światło, polega na falowym ruchu eteru, wypełniającego wszechświat. Jeżeli przypuszczenie to jest słuszne, to promienie cieplne powinny także ulegać zjawiskom, wymaganym przez teoryę falowania i dla światła dowiedzionym na

[1]) Tyndall, Ciepło jako rodzaj ruchu, tłom. L. Masłowski.

drodze doświadczalnej. Promienie cieplne powinny interferować ze sobą, czyli innemi słowy muszą zachodzić wypadki, gdzie ciepło dodane do ciepła nie powoduje działań, właściwych temu czynnikowi. Ciepło powinno również uginać się w tych samych warunkach co światło. Otóż interferencya i uginanie się ciepła zostały stwierdzone na drodze doświadczalnej.

Fizeau i Foucault pierwsi dowiedli interferencyi ciepła za pomocą doświadczenia analogicznego do doświadczenia Fresnel'a z dwoma zwierciadłami. Używany przez nich do tego termoskop był to termometr alkoholowy, którego zbiornik miał w średnicy tylko 1,1 milim., lecz którego rurka była tak cienka, że jeden stopień (skali stustopniowej) posiadał długość 8 milimetrów. Ruch słupa alkoholowego w rurce obserwowano przez mikroskop, który pozwalał dostrzegać zmianę w temperaturze, wynoszącą $^1/_{400}$ stopnia. Za pomocą dwóch zwierciadeł otrzymali oni prążki interferencyjne, które dzięki bardzo lekkiemu nachylaniu zwierciadeł uczynili tak szerokiemi, że zbiornik termometru zajmował tylko ćwierć środkowego, jasnego prążka. Okazało się, że temperatura w środkowym, jasnym prążku była wyższa, aniżeli w bocznych, ciemnych prążkach, leżących po obu jego stronach: w pierwszym mianowicie termometr podczas jednej obserwacyi wskazywał podwyższenie temperatury równe 35,9 (wyrażone w $^1/_{400}$ stopnia), w ostatnich zaś podwyższenie to wynosiło tylko 20.

Uginanie się ciepła pierwszy obserwował Knoblauch. Przepuszczał on promienie słoneczne przez pionową szczelinę, którą można było dowolnie zwężać lub rozszerzać, przez rozpościerającą się zaś poza szczeliną wiązkę promieni przesuwał stos termoelektryczny. Doświadczenia takie pokazały, że wiązka ciepła była zawsze szersza, aniżeli wymaga tego prostolinijne rozchodzenie się ciepła czyli że miało miejsce uginanie się tego ostatniego. Zgodnie z prawem uginania, o którem wspomnieliśmy w optyce, rozszerzenie wiązki promieni było tem znaczniejsze, im węższa była szczelina. Wreszcie Seebeck wykazał, że za pomocą siatki można również otrzymać cieplne widmo dyffrakcyjne.

Interferencya i uginanie się ciepła dowodzą, że ciepło promieniste, podobnie jak światło, polega na ruchu falowym. Zachodzi tedy pytanie, czy drgania cieplne są podłużne, czy też — jak w świetle — poprzeczne. Widzieliśmy w optyce, że jedynie zjawiska polaryzacyi światła zdołały rozwiązać kwestyę jakości drgań świetlnych, pytanie więc o jakości drgań cieplnych wiąże się z innem, a mianowicie czy ciepło może być spolaryzowane lub nie. Wiemy, że istnieją trzy metody polaryzowania światła, a mianowicie odbicie od przezroczystego środka, zwykłe załamanie i podwójne załamanie. Otóż trzy te metody zostały przez rozmaitych fizyków zastosowane do badań nad ciepłem promienistem i wszystkie trzy pozwoliły ciepło to spolaryzować.

Pierwszy Bérard spolaryzował ciepło przez odbicie. W tym celu ustawił on dwa szklane nieamalgamowane zwierciadła tak, jak do polaryzacyi światła, dla wzmocnienia zaś działania promieni cieplnych, powtórnie odbitych, zebrał je za pomocą wklęsłego metalowego zwierciadła, w ognisku którego znajdowała się kulka powietrznego termometru. Natężenie promieni odbitych od drugiego szklanego zwierciadła było niezaprzeczenie większe, gdy płaszczyzny odbicia obu zwierciadeł były równoległe, aniżeli wtedy gdy były skrzyżowane. Następnie Knoblauch, De la Provostaye i Desains wykazali najzupełniejszą zgodność zjawisk polaryzacyi przez odbicie dla światła i ciepła. Widzieliśmy w optyce, że ilość spolaryzowanego światła zależy od kąta padania: przy pewnym kącie (zwanym *kątem polaryzacyi*) jest ona największa i polaryzacya jest wtedy prawie zupełna. Jeżeli od tej granicy kąt padania powiększa się albo zmniejsza, wtedy światło odbite jest tylko częściowo spolaryzowane i to tem mniej, im bardziej kąt padania różni się od kąta polaryzacyi (patrz str. 599). Doświadczenia pokazały, że to samo stosuje się do ciepła promienistego, nawet kąt polaryzacyi przez odbicie od szkła jest prawie jednakowy dla światła i ciepła.

Światło można także spolaryzować przez zwykłe załamanie (patrz str. 602). Drgania w ten sposób spolaryzowanych promieni odbywają się w kierunku prostopadłym do kierunku drgań światła spolaryzowanego przez odbicie. Otóż Melloni i wielu

innych uczonych wykazało, że i ciepło w zwykły sposób załamane, jest spolaryzowane i że jeden i ten sam rachunek pozwala obliczyć ilość spolaryzowanych promieni w załamanem świetle albo cieple.

Jeżeli przypomnimy sobie fizyczną przyczynę podwójnego załamania światła oraz jeżeli zważymy, że ciepło promieniste ulega polaryzacyi przez odbicie i zwykłe załamanie, to z konieczności nasuwa nam się wniosek, że w podwójnie załamujących kryształach wiązka ciepła również powinna załamać się podwójnie, a więc rozpaść się na dwie spolaryzowane wiązki. Że tak jest w istocie dowiódł tego pierwszy Forbes, który pokazał, że tafelka turmalinowa polaryzuje ciepło. Sądził on jednak, że istnieje zasadnicza różnica pomiędzy światłem i ciepłem pod tym względem, że nie wszystkie promienie cieplne mogą być spolaryzowane, albo że turmalin w rozmaitym stopniu polaryzuje promienie cieplne, pochodzące z różnych źródeł. Lecz Melloni po dokładniejszem zbadaniu kwestyi przekonał się, że różnicy takiej niema, że właściwie zależy ona od szczególnych pochłaniających własności turmalinu.

Następnie Knoblauch dowiódł bezpośrednio podwójnego załamania. Przepuścił on słoneczne promienie, odbite od heliostatu, przez romboedr spatu wapiennego i otrzymał dwie oddzielne wiązki promieni. Gdy w tyle poza spatem przesuwał on przez nie stos termoelektryczny, przekonał się o istnieniu dwóch ciepłych przestrzeni, oddzielonych jedna od drugiej przestrzenią zimniejszą. Zboczenia igły galwanometru wskazywały, że obydwie wiązki promieni cieplnych posiadają jednakowe natężenie, podobnie jak wiązki promieni świetlnych. Oprócz tego przy obracaniu kryształu naokoło padających promieni, wiązka nadzwyczajnie załamana z równą szybkością obracała się wokoło wiązki zwyczajnie załamanej. Wreszcie wiązka nadzwyczajna była spolaryzowana prostopadle do wiązki zwyczajnej, ta ostatnia zaś była spolaryzowana w płaszczyźnie głównego przecięcia kryształu. W ogóle tedy podwójne załamanie ciepła okazało się zupełnie analogicznem do podwójnego załamania światła.

Gdy więc doświadczenia nad interferencyą i uginaniem się ciepła promienistego dowiodły, że należy je uważać za ruch falowy, doświadczenia zaś nad polaryzacyą i podwójnem załamaniem pokazały, że i drgania cieplne są poprzeczne, czyli że odbywają się w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku promienia, wtedy stało się jasnem, że *ciepło promieniste i światło są w gruncie rzeczy jednem i tem samem, albowiem oba polegają na poprzecznych drganiach eteru.*

W cieple słonecznem istnieją promienie cieplne o bardzo rozmaitej łamliwości, które po przejściu przez pryzmat również rozszczepiają się i dają widmo. Pomiędzy promieniami cieplnemi znajduje się wiele takich, które odznaczają się zupełnie taką samą łamliwością, jak pewne grupy promieni świetlnych, gdyż słoneczne widmo cieplne, które rozpoczyna się w ciemnej przestrzeni, a mianowicie przed czerwienią, ciągnie się aż do błękitu, a nawet do samej prawie granicy widma świetlnego. Dalej doświadczenia Jamina, Massona, Franza pokazały, że cieplne działania promieni jasnych nie dają się oddzielić od ich działań świetlnych oraz, że jasne promienie cieplne mogą bez znacznego osłabienia przechodzić przez bezbarwne przezroczyste ciała. Wreszcie ciepło, towarzyszące pojedyńczym barwnym grupom promieni słonecznych, ulega w barwnych środkach takiemu samemu osłabieniu, jak światło. Jednem słowem w jasnych promieniach światło i ciepło nie mogą być oddzielone.

Wszystko to pozwala nam wnosić, że światło i ciepło promieniste są w ogóle identyczne, że przy jasnem cieple jedne i te same drgania napotkawszy siatkówkę oka, wywołują wrażenie światła, napotkawszy zaś zakończenia nerwów w skórze powodują wrażenie ciepła. Podobnie jak różnobarwne promienie świetlne różnią się pod względem czasu trwania jednej oscylacyi, albo długości fali, tak też to samo ma miejsce dla rozmaitych cieplnych promieni. Długość fali dla promieni ciemnych najmniej łamliwych jest największa, długość zaś fali dla jasnych promieni cieplnych najbardziej łamliwych, jest najmniejsza. Wiemy także, że natężenie światła zależy od wielkości amplitudy (patrz str. 557); to samo stosuje się do natężenia ciepła.

Powtarzamy tedy raz jeszcze, że światło i ciepło promieniste stanowią tylko różne przejawy jednej i tej samej przyczyny i to jedynie o tyle różne, że gdy napotykają rozmaite zakończenia naszego układu nerwowego, wtedy wywołują w nas niejednakowe wrażenia.

§ 4. Przewodnictwo ciepła.

Rozchodzenie się ciepła drogą przewodnictwa pod tym względem różni się od jego rozprzestrzeniania się drogą promieniowania, że w pierwszym razie ciepło znacznie wolniej przechodzi od cząstki do cząstki wewnątrz ciała, dopóki rozmaite części tego ostatniego posiadają niejednakową temperaturę. Gdy ogrzewamy jeden koniec pręta metalowego, drugi jego koniec osiąga wyższą temperaturę dopiero po upływie pewnego, mniej lub więcej długiego czasu, zależnie od metalu i grubości pręta. Podwyższenie temperatury jest oprócz tego rozmaite w prętach z różnego materyału; gdy jeden koniec pręta metalowego, mającego długość 0,3 metra, jest rozżarzony, drugiego jego końca nie możemy dotykać się bezkarnie, taki sam zaś pręt drewniany lub szklany może być na jednym końcu ogrzewany nader silnie wtedy, gdy drugi koniec swobodnie trzymamy w ręku. Następujące proste doświadczenie pokazuje, że w rozmaitych metalach ciepło rozchodzi się z niejednakową prędkością. Do dwóch prętów jednakowych wymiarów, jednego miedzianego, drugiego żelaznego, przylepiamy za pomocą wosku kulki drewniane w jednakowych odstępach, następnie zawieszamy je obok siebie i ogrzewamy nad lampką spirytusową (fig. 467). Pod wpływem ciepła, rozchodzącego się w prętach, wosk się topi i kulki drewniane odpadają jedna po drugiej, spostrzegamy

Fig. 467. Niejednakowe przewodnictwo ciepła miedzi i żelaza.

jednak po pewnym czasie, że od pręta miedzianego odpadło ich więcej niż od żelaznego, czyli że kulki jednakowo oddalone od ogrzanych miejsc wcześniej odpadają od miedzi niż od żelaza. Jeżeli pręty są dość długie, to ostatnie kulki wcale nie odpadną, albowiem ciepło nie dochodzi do końca w takim stopniu, ażeby wosk na nich stopił się, w każdym jednak razie przekonywamy się, że w miedzi rozchodzi się ono dalej, niż w żelazie. Powiadamy tedy, że miedź jest *lepszym przewodnikiem* ciepła, niż żelazo.

Na pierwszy rzut oka zachowanie się ciepła podczas rozchodzenia się drogą przewodnictwa jest zupełnie inne, aniżeli podczas promieniowania, albowiem gdy promienie cieplne rozchodzą się zawsze z niezmierną prędkością, to ciepło przy przewodnictwie sunie o wiele wolniej i w różnych wypadkach z niejednakową prędkością. Lecz na mocy hypotez o pochłanianiu ciepła możemy sobie wytworzyć pojęcie o jego rozchodzeniu się drogą przewodnictwa, które jaknajściślej łączy się z promieniowaniem.

Wyobraźmy sobie szereg ciał nieprzecieplnych, ułożonych w jednakowych odstępach i otoczonych powłoką nieprzenikliwą dla ciepła. Jeżeli pierwsze z tych ciał zostanie ogrzane, pocznie ono wysyłać ciepło ku drugiemu ciału, to zaś jako nieprzecieplne będzie pochłaniać wszystkie promienie, których nie odbije i pocznie stopniowo się ogrzewać, gdy jego temperatura będzie wyższa od temperatury trzeciego ciała, zacznie ono promieniować ku niemu tak, że i to trzecie ciało stopniowo będzie się ogrzewać i tak dalej, dopóki cały szereg nie osiągnie tej samej temperatury. Ponieważ każde następne ciało poczyna ogrzewać się dopiero wtedy, gdy poprzednie już się ogrzało wskutek pochłoniętego ciepła, to ogrzanie całego szeregu ciał trwa przez pewien mniej lub więcej długi czas, zależnie od ich natury.

Gdy rozważany szereg ciał nie jest otoczony powłoką nieprzenikliwą dla ciepła, wtedy rozmaite jego punkty nigdy nie osiągną jednakowej temperatury. Jeżeli np. pierwsze ciało jest stale utrzymywane przy temperaturze t, to z chwilą gdy drugie ciało osiągnie temperaturę, wyższą od temperatury otoczenia, pocznie ono wysyłać ciepło nietylko ku trzeciemu ciału, lecz tak-

że ku swemu otoczeniu. Maximalną tedy temperaturę drugie ciało osiąga wtedy, gdy ilość ciepła wysyłanego przezeń w ciągu określonego czasu staje się równą ilości ciepła, otrzymanego przezeń w tym samym czasie od pierwszego ciałą, temperatura zaś jego będzie niższa o pewną wartość od temperatury tego ostatniego. Tak samo maximalna temperatura trzeciego ciała będzie niższa niż drugiego i w ogóle musi ona być coraz niższa dla następujących po sobie ciał. Sposób w jaki temperatura całego szeregu ciał zmniejsza się, zależy od prędkości, z jaką pojedyńcze ciała się ogrzewają oraz od tej iłości ciepła, jaką one oddają swemu otoczeniu.

Jeżeli obecnie wyobrazimy sobie nie szereg oddzielnych ciał, lecz jedno ciało, składające się z wielu cząstek, to nie trudno już nam będzie zrozumieć, w jaki sposób ciało to przewodzi ciepło. Możemy np. uprzytomnić sobie pręt, jako szereg równoległych warstw, utworzonych z oddzielnych cząstek. Przy ogrzewaniu jednego końca pręta znajdujące się tutaj cząstki osiągają wyższą temperaturę i promieniują ciepło ku następnym cząstkom. Ponieważ ciało pochłania przeważnie te promienie, które wysyła, to cząstki owe pochłoną otrzymane ciepło, ogrzeją się i będą z kolei wysyłały ciepło ku warstwom dalej leżącym. W taki sposób ciepło będzie się rozchodziło w pręcie szybciej lub wolniej, zależnie od prędkości, z jaką cząsteczki się ogrzewają, a więc zależnie od natury samego pręta. Jeżeli pręt jest otoczony powłoką zupełnie nieprzenikliwą dla ciepła, to w końcu temperatura jego we wszystkich punktach stanie się jednakową i stateczny rozkład ciepła będzie osiągnięty. Lecz gdy pręt na drugim swym końcu albo na całej długości styka się ze środkiem zimniejszym albo przenikliwym dla ciepła, wtedy temperatura nigdy nie będzie jednakowa we wszystkich punktach, lecz będzie się zmniejszała w miarę oddalenia od ogrzanego końca. Stateczny rozkład ciepła nastąpi wtedy, gdy każda warstwa będzie oddawała następnej warstwie oraz otoczeniu tyle ciepła, wiele go w tym samym czasie otrzymuje od warstwy poprzedniej.

Matematyczne badanie przewodnictwa ciepła polega na obliczeniu tej ilości ciepła, jaka przechodzi przez przecięcie ciała

oznaczonej wielkości, jaka ulega w niem pochłonięciu i jaka znów dalej zostaje oddaną. Zadaniem zaś fizyki jest określenie pewnych stałych wartości, które wchodzą w ten rachunek, a mianowicie tak zwanych spółczynników przewodnictwa wewnętrznego i zewnętrznego. Poisson, Fourier, Biot rozwiązali wiele odnośnych zagadnień. Fourier np. wyszedł z założenia, że przewodnictwo ciepła zachowuje się, jak przepływanie cieczy lub gazu z miejsca większej do miejsca mniejszej prężności tak, że rozchodzenie się ciepła w pręcie, na jednym końcu ogrzewanym, można porównać do przepływania gazu przez rurę, do której się gaz ten wtłacza. Większemu ciśnieniu po jednej stronie odpowiada wyższa temperatura pręta na jednym końcu. Stosownie do tego założenia Fourier starał się rozwiązać zagadnienie, przyczem przyjmował, że ilość ciepła, jaką dany element jakiegoś ciała oddaje sąsiednim, jest proporcyonalna do różnicy temperatur elementów. Przypuszczenie to jest słuszne w obec prawa oziębiania się ciał, które brzmi, że dla małych różnic ich temperatur oddawanie ciepła jest proporcyonalne do tychże różnic, albowiem przy przewodnictwie ciepło przechodzi z cząstki na następną cząstkę, a w każdym razie różnica temperatur sąsiednich cząstek może być tylko nader małą.

Wyobraźmy sobie pręt, mający długość l i przecięcie q; jeden jego koniec posiada temperaturę t, drugi zaś temperaturę t'. Jeżeli cały pręt, wyjąwszy na obu końcach, jest otoczony powłoką nieprzenikliwą dla ciepła, to stateczny rozkład ciepła w pręcie następuje wtedy, gdy przez każde jego przecięcie w jednakowym czasie przepływają jednakowe ilości ciepła. Wynika z tego, że różnica temperatur dwóch następujących po sobie warstw pręta, a także i warstw w jednakowych od siebie odległościach położonych, jest stała, czyli że temperatura maleje w postępie arytmetycznym, gdy odległości od ogrzanego końca pręta powiększają się w takim postępie. Jeżeli więc różnicę temperatur dwóch warstw, położonych w odległości równej jedności, oznaczymy przez a, to ponieważ różnica temperatur obu końców pręta wynosi $t - t'$ odległość zaś pomiędzy warstwami początkową i końcową pręta jest równa l, to mamy $t - t' = a \times l$ czyli, że

$a = \frac{t - t'}{l}$. Niechaj k oznacza ilość ciepła, jaka w jednostce czasu przepływa przez jednostkę przecięcia ciała, jeżeli warstwy, położone w odległości równej jedności, mają temperaturę różną o 1^0. W takim razie ilość ciepła, przepływająca w jednostce czasu przez każde przecięcie pręta, jest oczywiście równa $k \times q \times a$. Tak określona ilość k zowie się *spółczynnikiem wewnętrznego przewodnictwa* substancyi pręta. Jeżeli zaś pręt nie jest otoczony powłoką nieprzenikliwą dla ciepła, jeżeli np. znajduje się w powietrzu, to rozkład ciepła inaczej się przedstawia. Niech h oznacza ilość ciepła, jaką jednostka powierzchni ciała w jednostce czasu oddaje na zewnątrz, jeżeli różnica temperatury powierzchni i otoczenia jest równa 1^0. Wynika z tego, że warstwa, której powierzchnia jest równa p, a różnica temperatury względem otoczenia jest równa t, oddaje w jednostce czasu na zewnątrz ilość ciepła $h \times p \times t$. Ilość h nazywa się *spółczynnikiem przewodnictwa zewnętrznego*.

Na podstawie podobnych zasad Biot znalazł, że pomiędzy temperaturą t przecięcia, a odległością jego od miejsca ogrzanego zachodzi związek, który można ująć w formułę matematyczną. Związek ten wskazuje np., iż w pręcie o tyle długim, że stan cieploty na drugim końcu nie różni się od stanu otoczenia, równego dajmy na to 0^0, temperatura maleje w postępie geometrycznym, gdy odległości od źródła ciepła rosną w postępie arytmetycznym. Ten wynik teoryi przewodnictwa ciepła Biot stwierdził kilkakrotnie na drodze doświadczalnej. Brał on długie, bardzo cienkie, pręty metalowe, jeden koniec których ogrzewał nad lampą (fig. 468, str. 828). Ażeby uniknąć promieniowania lampy ku prętom, te ostatnie tuż przed źródłem ciepła przesuwano przez otwór w ekranie. W prętach wyżłobione były w równych odległościach niewielkie zagłębienia, w których mieściły się zbiorniki małych, czułych termometrów, wskazujących temperatury odnośnych przecięć pręta. W zagłębieniach znajdowała się rtęć tak, że zbiorniki termometrów całkowicie w niej były zanurzone, przez co wskazówki ich były dokładniejsze. Podczas obserwacyi starano się ogrzewany koniec pręta utrzymać przy stałej temperaturze, dopóki wszystkie termometry nie

doszły do stanu równowagi, to jest dopóki w pręcie nie nastąpił stateczny rozkład ciepła. Pręty były tak długie, że drugi ich koniec nie wskazywał wcale podwyższenia temperatury.

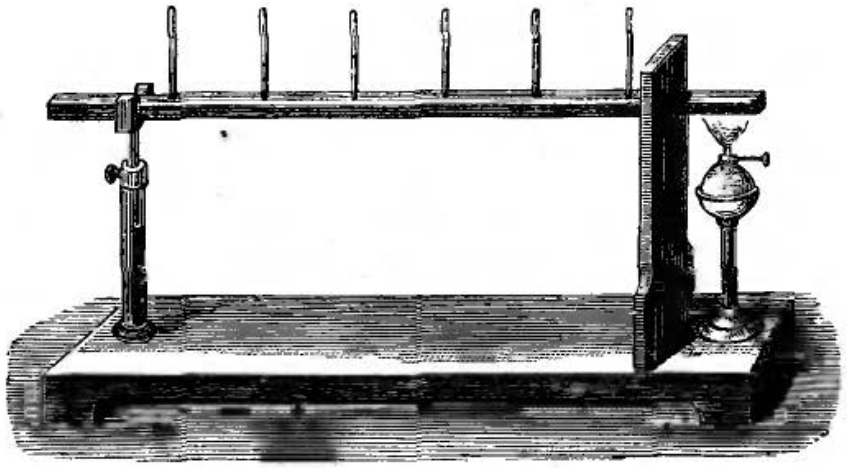


Fig. 468. Doświadczenie Biot'a.

Powiedzieliśmy wyżej, że chcąc określić zdolność przewodnictwa rozmaitych substancyj, należy oznaczyć spółczynniki przewodnictwa wewnętrznego i zewnętrznego, to jest znaleść wartości k i h. Co do ostatniego, to można go oznaczyć na zasadzie szybkości oziębiania się danego ciała, która pokazuje, o wiele stopni obniżyłaby się w jednostce czasu temperatura jego, gdyby oziębienie było proporcyonalne do czasu. Podług tego, ilość ciepła, oddana w jednostce czasu przez ciało przy stałej temperaturze, jest równa iloczynowi z wagi p tego ciała, jego ciepła właściwego c i szybkości oziębiania się v. Chcąc tedy np. oznaczyć zewnętrzne przewodnictwo jakiej substancyi w powietrzu lub w cieczy, należałoby pozwolić ażeby termometr, pokryty tą substancyą, oziębiał się w powietrzu lub w cieczy. Spółczynnik przewodnictwa zewnętrznego nie jest stały, zmienia się bowiem wraz ze zmianą natury środka, otaczającego ciało, czyli że w każdym oddzielnym wypadku wartość jego zależy od warunków doświadczenia.

Co do przewodnictwa wewnętrznego, to Fourier oraz Peclet oznaczali takowe przez obserwowanie ilości ciepła, jaka w danym czasie przechodzi przez taflę metalową oznaczonej grubości,

której ściany boczne utrzymywane są przy określonej temperaturze. Inna metoda porównywania przewodnictwa ciał stałych urzeczywistniona została przez Ingenhousa. W ścianie skrzynki metalowej (fig. 469), napełnionej wrzącą wodą, osadzone są pręty z rozmaitych substancyj, powleczone woskiem. Gdy równowaga ciepła jest osiągnięta, jedne końce tych prętów mają temperaturę 100°, drugie zaś — jeżeli pręty są *dostatecznie* długie — posiadają temperaturę otoczenia. Wosk pokrywający pręty topi się na nich do rozmaitych punktów, położonych w odległościach *l*, *l' l''* od skrzyni; oczywiście że punkty te mają jednakową temperaturę *t*. Przewodnictwo zewnętrzne wszystkich prętów jest jednakowe, gdyż wszystkie powleczone są woskiem, oprócz tego przyjmujemy, że mają jednakowe przecięcia i obwody. W tych warunkach oraz na zasadzie wspomnianego wyżej związku pomiędzy temperaturą danego punktu pręta i jego odległością od miejsca ogrzanego, *zdolności przewodnictwa dwóch prętów są w stosunku odwrotnym do kwadratów z odległości od miejsc ogrzanych tych przecięć, które mają jednakowe temperatury.* Według takiej zasady postępował i Despretz, którego metoda podobna była do wyżej opisanego doświadczenia Biota, a także Langberg, Wiedeman i Franz, którzy temperaturę w różnych miejscach pręta oznaczali za pomocą małego stosu termo-elektrycznego. Z doświadczeń podobnych okazuje się, że jeżeli przewodnictwo srebra oznaczymy przez 1000, to dla miedzi wyraża się ono liczbą 736, złota 532, mosiądzu 236, cynku 190, cyny 145, żelaza 119, stali 116, ołowiu 85, platyny 84, palladiumu 63, bizmutu 18.

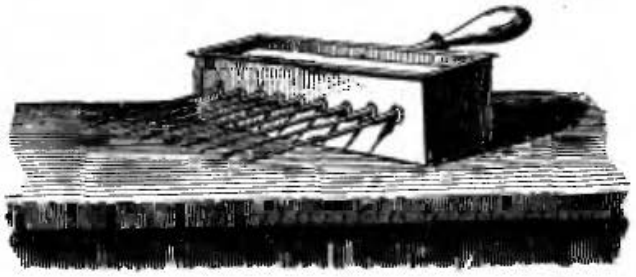


Fig. 469. Przyrząd Ingenhousa do mierzenia przewodnictwa ciał stałych.

Z ciał stałych metale, za wyjątkiem bizmutu, stanowią najlepsze przewodniki ciepła; kamienie, szkło, marmur, przewodzą je gorzej, lecz po nich dopiero następuje drzewo, węgiel drze-

wny, przygotowany przy nizkiej temperaturze i w ogóle substancye organiczne, mięsiste owoce, tłuszczowe tkanki zwierzęce i roślinne. Z powyższego zestawienia cyfr widzimy, jaka istnieje różnica w zdolności przewodnictwa pojedyńczych nawet metali. Różnicę tę, powiada Tyndall, można uwidocznić w bardzo prosty sposób, zanurzając w gorącej wodzie łyżkę srebrną i nowosrebrną; po krótkim czasie znajdziemy, że łyżka srebrna jest o wiele cieplejsza, aniżeli nowosrebrna. Jeżeli na rękojeściach łyżek umieścimy kawałek fosforu, to wkrótce stopi się on i zapali na srebrze, podczas gdy ciepło, rozchodzące się w nowem srebrze, nigdy nie dochodzi do takiego natężenia, ażeby zdołało zapalić fosfor. Zależy to oczywiście od niejednakowej zdolności przewodnictwa obu metali, która dla srebra wynosi 1000, dla nowego srebra tylko 60.

Ciała, mające wszędzie jednakową budowę cząsteczkową, jednakowo przewodzą ciepło we wszystkich kierunkach. Gdy ogrzewamy środek tafelki z takiej substancyi, punkty izotermiczne, to jest takie, które jednocześnie wskazują jedno i to samo podwyższenie temperatury, stanowią koło; gdy ogrzewamy ciała takie od wnętrza, punkty izotermiczne leżą na kuli. Inaczej podług doświadczeń Senarmont'a zachowują się kryształy, w których zdolność przewodnictwa jest w ogóle różna w rozmaitych kierunkach.

W celu zbadania zdolności przewodnictwa róznych kryształów Senarmont wycinał z nich cienkie, po większej części okrągłe tafelki jednakowej wszędzie grubości. Przecięcia te z rozmaitych okazów tego samego kryształu były równoległe do osi głównej lub do osi pobocznych, albo też w kryształach bez osi głównej równoległe do różnych osi krystalograficznych. Pośrodku tafelek znajdował się otwór, przez który przechodziła srebrna rurka, ogrzewana za pomocą lampy. Oprócz tego tafelki powlekano cienką, jednostajną warstwą białego wosku, który topiąc się, wskazywał graficznie rozchodzenie się ciepła i kreślił na tafelce linie izotermiczne. Wosk mianowicie tworzy na granicy topienia małe wzniesienie, które pozostaje nawet po oziębieniu i które pozwala z dostateczną dokładnością mierzyć w ró-

żnych kierunkach odległości od środkowego punktu miejsc jednakowo ogrzanych.

Podobne doświadczenia z tafelkami, wyciętemi ze szkła lub z kryształów, należących do prawidłowego systemu, pokazały, że tutaj linia izotermiczna, jak tego należało oczekiwać, stanowi koło, środek którego znajduje się w punkcie ogrzewanym. Wynika z tego, że dla tych kryształów powierzchnia izotermiczna jest kulą. W kryształach należących do innych systemów zjawiska w ogóle są inne. Wprawdzie w tafelkach wyciętych z kryształów drugiego lub trzeciego systemu, prostopadle do głównej osi krystalograficznej, linie izotermiczne stanowią koła, lecz gdy płaszczyzna przecięcia jest pochylona do osi, linie te stają się elipsoidalnemi i tembardziej zbliżają się do elipsy, im dane przecięcie jest bardziej równoległe do osi. Figura 470 przedstawia dwie tafelki kwarcu: jedną wyciętą równolegle do osi głównej, drugą zaś wyciętą prostopadle do niej. Widzimy, że na tej ostatniej miejsce na którem wosk się stopił przedstawia krążek, podczas gdy na drugiej tafelce ma ono kształt elipsy. Dowodzi to, że w kwarcu ciepło rozchodzi się szybciej w kierunku głównej osi, aniżeli w kierunku do niej prostopadłym.

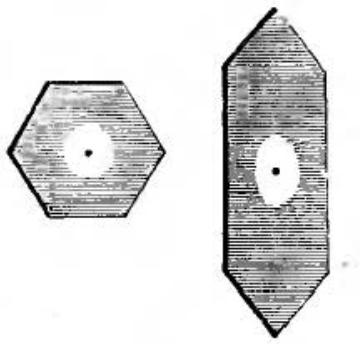


Fig. 470. Niejednąkowe przewodnictwo kwarcu w różnych kierunkach.

Następne liczne doświadczenia Lang'a i Jannetaz'a potwierdziły rezultaty, otrzymane przez Senarmont'a i rozszerzyły oprócz tego zakres naszych wiadomości o przewodnictwie ciepła w kryształach. Pokazały one, że wszystkie optycznie jednoosiowe kryształy są także i termicznie jednoosiowe i że w ogóle powierzchnia izotermiczna w kryształach jest taka sama jak powierzchnia falowa dla promieni nadzwyczajnych tak, że np. tam gdzie promienie te tworzą powierzchnię falową pod postacią wydłużonego elipsoidu, tam też i powierzchnia izotermiczna przedstawia taką samą figurę.

Podobnie przewodnictwo drzewa jest inne w kierunku równoległym do włókien, aniżeli w kierunku do nich prostopadłym,

jak tego dowiedli De la Rive, Decandolle, Tyndall oraz Knoblauch. Drzewa mianowicie najlepiej przewodzą ciepło równolegle do włókien, najgorzej zaś prostopadle do nich; różnica jest często bardzo znaczna, lecz nader rozmaita u odmiennych gatunków drzewa. Wreszcie dodajmy, że Senarmont znalazł podobne różnice w zdolności przewodnictwa szklanych tafelek, które poprzednio ulegały ściskaniu: w kierunku ściskania przewodnictwo jest najsłabsze.

Przewodnictwo cieczy, z wyjątkiem rtęci, jest nader słabe, jak o tem łatwo przekonać się można ogrzewając ciecz z góry. Jeżeli np. do szklanej, cienkiej rurki wprowadzimy kawałek lodu i napełnimy ją wodą przy 0^0, to można w górnej części rurki doprowadzić wodę do wrzenia, a lód nie stopi się. Dlatego też należy zawsze ciecze ogrzewać od dołu, wtedy bowiem ogrzewanie odbywa się za pośrednictwem prądów wewnętrznych: ciecz cieplejsza, rozszerzając się, staje się lżejsza i wznosi się ku zimniejszej, ta ostatnia zaś opada ku dołowi. Prądowanie to staje się widocznem po wsypaniu trocin do szklanej kolby, napełnionej wodą i ogrzewanej nad płomieniem. Widać wtedy, jak trociny, unoszone prądem wody, podnoszą się wzdłuż ścian kolby i opadają pośrodku, albowiem dzięki prądowi ciepłego powietrza, wznoszącego się od płomienia, woda jest cieplejsza przy ściankach, aniżeli w środku kolby. Następuje mieszanie się cieczy ciepłej z zimną, która powoduje ogrzanie całej masy.

Rumford sądził nawet, że w ogóle ciecze w ten jedynie sposób mogą przewodzić ciepło, fakty zaś sprzeczne z tym sądem objaśniał on twierdząc, że do głębi naczynia z cieczą, ogrzewanego z góry, ciepło dostaje się przez przewodnictwo ścian. Inni zaś, jak Murray, Thomson i Parrot twierdzili na zasadzie swych doświadczeń, że ciecze, podobnie jak ciała stałe, mogą przewodzić ciepło, liczne zaś i dokładne doświadczenia Despretz'a nie pozostawiają co do tego wątpliwości. Uczony ten wywnioskował nawet z tych doświadczeń, że prawo o rozmieszczeniu ciepła w cieczach jest takie same, jak odnośne prawo dla ciał stałych. Posługiwał się on cylindrem z drzewa B (fig. 471, str. 833), którego średnica wynosiła 0,4 metra; w ścianie jego na jednej

linii znajdowała się pewna liczba otworów, odległych od siebie o 4.5 centym. W otworach szczelnie osadził termometry; zbiorniki ich znajdowały się na osi cylindra, jeden nad drugim, rur-

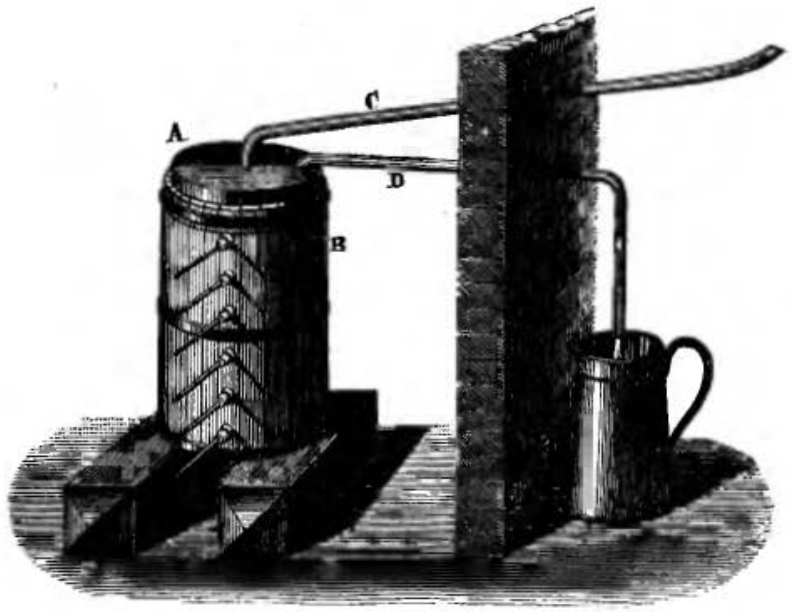


Fig. 471. Doświadczenie Despretz'a.

ki zaś wystawały na zewnątrz. Cylinder napełnił wodą i wstawił weń miedziany kociołek *A* tak, że dno tego ostatniego dotykało powierzchni wody. Kocioł napełniał co pięć minut gorącą wodą, która przybywała przez rurę *C* i za każdym razem odprowadzał zimną wodę przez rurę *D*. Po 36 godzinnem ogrzewaniu nastąpił stateczny rozkład ciepła w całym słupie wody. Termometry z góry na dół wskazywały coraz mniejszy nadmiar temperatury nad temperaturę otaczającego powietrza tak, że np. dla pierwszego od góry termometru wynosił on 29,21, czwartego 10,35, szóstego 5,03. Z rezultatów tych wynika, że jeżeli przewodnictwo miedzi oznaczymy przez 1000, to dla wody wyraża się ono cyfrą 9. Następne doświadczenia pokazały dalej, że w miarę podwyższania temperatury woda coraz lepiej przewodzi ciepło oraz, że wszystkie roztwory solne stanowią lepsze przewodniki od wody.

Co do gazów, to przez długi czas przyjmowano, że i one przewodzą ciepło jedynie przez prądowanie, które powstaje

w nich wskutek rozszerzania się pod wpływem ogrzewania. Różnice w szybkości, z jaką rozmaite gazy ogrzewają się, albo też z jaką ciała oziębiają się w nich, objaśniano niejednakową ruchliwością gazów. Sądzono, że właściwe przewodnictwo gazów albo wcale nie istnieje, albo że jest nadzwyczaj słabe; codzienne wszak doświadczenie pokazuje, że powłoka gazowa nieruchoma najlepiej chroni ciało od oziębienia. Na tem doświadczeniu oparty jest zwyczaj obwijania ciał, które chcemy ustrzedz od oziębienia, warstwą waty, wełny lub puchu, substancye te bowiem wypełnione są powietrzem.

Magnus jednak zwrócił uwagę, że przypuszczenie o niejednakowej ruchliwości gazów nie wystarcza do wytłomaczenia różnic w szybkości oziębiania się ciał w rozmaitych gazach, albowiem w wodorze, w którym oziębienie najszybciej się odbywa, prądy powstające wskutek zmian temperatury, powinny właśnie być najsłabsze. Mianowicie spółczynnik rozszerzalności wodoru jest mniejszy od spółczynnika dla pozostałych gazów i dlatego zmiany gęstości, będące skutkiem zmian temperatury, są w wodorze mniejsze, niż w innych gazach, a więc i prądy muszą tutaj być słabsze. Wynika z tego, że jedyną przyczyną szybszego oziębiania się ciał w wodorze, jest to, iż on lepiej przewodzi ciepło, aniżeli inne gazy. Jakkolwiek ten wniosek Magnusa nie jest zupełnie wolny od zarzutu, albowiem siła prądów zależy także od spółczynnika tarcia, który dla wodoru jest najmniejszy, to jednak był on powodem, że wspomniany uczony przedsięwziął doświadczenia, które w sposób przekonywujący wykazały, że wodór jest lepszym przewodnikiem od innych gazów, a więc że w ogóle gazy mogą przewodzić ciepło. Wielkie jednak trudności tych doświadczeń nie pozwoliły Magnusowi uporządkować gazy w szereg, według ich zdolności przewodnictwa. Pierwszy Narr próbował porównać zdolności przewodnictwa rozmaitych gazów, obserwując termometry, które oziębiały się w przestrzeni próżnej lub napełnianej kolejno rozmaitemi gazami. Przyjąwszy zdolność przewodnictwa powietrza za 1, Narr znalazł, że dla wodoru wynosi ona 5,51, azotu 0,98, kwasu węglanego 0,81. Po nim wielu badaczy, jak Stefan, Kundt, Warburg, Winkelman,

zajmowali się tym przedmiotem, dla braku jednak miejsca nie możemy się wdawać w opis ich doświadczeń, dodamy tylko, że według nich przewodnictwo wodoru odnośnie do przewodnictwa powietrza, przyjętego za jedność, jest większe, wynosi bowiem 6,33.

§ 5. Zastosowania praktyczne.

Temperatura pokoju zależy nietylko od aparatów ogrzewających, które dostarczają mu ciepła bądź przez promieniowanie, bądź przez przewodnictwo, lecz także od stanu powietrza zewnętrznego oraz od zdolności przewodnictwa murów. Mury grube, zbudowane z materyałów, słabo przewodzących ciepło, przedstawiają dla mieszkańca korzyść podwójną, w zimie bowiem chronią go od zimna, w lecie zaś od ciepła, które stara się przeniknąć z zewnątrz. Pod tym względem cegła stanowi lepszy materyał budowlany od granitu, piaskowca, porfiru i marmuru; jeszcze lepszym materyałem jest drzewo, które daleko słabiej od nich przewodzi ciepło. Dlatego też w krajach, gdzie podczas zimy temperatura bardzo się obniża, jak np. w Rosyi, znajdujemy na wsi wielką ilość drewnianych domów; ściany ich składają się z podwójnej warstwy grubych desek, pomiędzy któremi znajduje się wolna przestrzeń, wypełniona wiórami, lub mchem wysuszonym. Substancye te szczególnie nadają się do podobnych celów, gdyż wypełnione są nieruchomem powietrzem, które, jak wiemy, jest bardzo złym przewodnikiem ciepła. Z tej własności powietrza korzystamy także, gdy chcąc uchronić mieszkanie nasze od zimna wstawiamy tak zwane podwójne okna. Działanie ich nie zależy bynajmniej od tego, że przybywa jeszcze jedna cienka warstwa szkła; właściwy wpływ wywiera tutaj powietrze, zawarte pomiędzy zewnętrzną i wewnętrzną szybą. Gdy w zimie okna są pojedyńcze, wtedy powietrze, przylegające z zewnątrz do szyby, ogrzewa się od ciepła pokoju, następnie wznosi się do góry, na jego zaś miejsce przybywa świeża warstwa zimnego powietrza. Przy podwójnych oknach jest to niemożliwe, pod

warunkiem jednak, że one szczelnie się zamykają, w przeciwnym bowiem razie nie przynoszą żadnej korzyści, mogą nawet przyczyniać się do szybszego oziębiania pokoju, gdyż powietrze zawarte pomiędzy niemi swobodnie wtedy krąży. Widzimy tedy, że nieruchoma warstwa powietrza tworzy jakby zaporę, której nie mogą przeniknąć ciemne promienie cieplne.

Piwnice są mniej wystawione na zmiany temperatury, aniżeli mieszkania piętrowe, albowiem w nich ciepło jeszcze mniej może przenosić się z wewnątrz na zewnątrz lub naodwrót; dlatego też temperatura ich w ciągu całego roku jest umiarkowana i tembardziej jednostajna, im głębsza jest piwnica. Podług Quetelet'a, już na głębokości 4 stóp dzienne zmiany temperatury nie dają się zauważyć, przy głębokości zaś 28 stóp i roczne zmiany zaledwie mogą być skonstatowane. Wprawdzie termometr, który Cassini i Legentil umieścili w roku 1783 w piwnicy, głębokiej na 86 stóp, wskazywał według mierzeń, dokonanych przez Arago'a w roku 1817, podwyższenie temperatury równe $^1/_4{}^0$, mogło to jednak zależeć od zmian w samym przyrządzie, tembardziej, że w ciągu pojedyńczych lat wahań podobnych nie zauważono. Piwnice w zimie są cieplejsze, w lecie zaś chłodniejsze od naszych mieszkań i dlatego korzystnie jest przechowywać w nich przedmioty, które podczas zimy mogą być uszkodzone od zimna, podczas lata od zbytniego gorąca. Ze względu zaś na panującą w nich stale wilgoć, oraz na brak świeżego powietrza i światła, piwnice nie powinny wcale służyć za mieszkania ludzkie.

Chcąc lód zebrany w zimie uchronić od stopienia w lecie, należy go przechowywać w głębokich dołach, obmurowanych cegłą; gdy doły są już napełnione bryłami lodu, polewa się je podczas silnego mrozu wodą, która po zamarznięciu tworzy doskonałą, ochronną powłokę, albowiem lód należy do najgorszych przewodników ciepła. Dach zbudowany nad taką lodownią, pokrywa się gęsto słomą, przez co jeszcze bardziej utrudnia się dostęp promieni słonecznych.

Na takich samych, jak powyższa zasadach, opieramy się także, gdy chodzi o zabezpieczenie naszego własnego ciała od gorąca i zimna. Im wyższa jest kultura, tam sztuczniejszy jest

sposób przygotowywania materyałów, służących człowiekowi do pokrycia ciała i tembardziej odpowiadają one jego potrzebom. Na najniższym szczeblu kultury wybiera on poprostu jaką skórę zwierzęcia, zabitego na polowaniu i ona służy mu za odzież bez wszelkiej dalszej przeróbki; pewien postęp znajdujemy tam, gdzie przez garbowanie czynią skórę nieprzemakalną. I nam wiadomo również, że uwłosienie zwierzęce, ze względu na słabą zdolność przewodnictwa ciepła, nadaje się szczególnie dobrze do ochrony naszego ciała, w większości jednak wypadków kontentujemy się tkankami z włókien, które działają w podobny, chociaż nie równie skuteczny sposób.

Temperatura ciała ludzkiego jest we wszystkich strefach i w każdej porze roku stała i wynosi średnio 37° C.; można powiedzieć, że jest ona prawie zupełnie niezależna od zewnętrznych warunków. Krew Laplandczyka nie jest zimniejsza od krwi Indusa, podróżny zaś, jadący od bieguna północnego do południowego, zaledwie może zauważyć podniesienie temperatury swego ciała na równiku. Fakt ten każe nam wnosić, że wyższa temperatura otoczenia nie wpływa na podniesienie stanu ciepłoty naszego ciała, lecz że ciepło doprowadzone doń w większej ilości zużywa się przy innych procesach, jak np. przy parowaniu wydzielającego się wtedy obficie potu. Gdy przeciwnie otoczenie nasze posiada niższą temperaturę tak, że przez promieniowanie musimy wciąż oddawać ciepło, wtedy czynność organizmu, szczególniej w płucach, staje się energiczniejszą, przez co utrata ciepła znów jest powetowana. W obu jednak razach należy chronić ciało od wszelkiej nagłej zmiany temperatury, co osiąga się za pomocą złych przewodników ciepła. Przy wyborze tym należy mieć na uwadze nietylko ich przewodnictwo, lecz także gęstość tkanki oraz jej grubość. Niektóre materyały, służące nam za odzież i pościel ułożono w szereg podług ich zdolności przewodnictwa, który poczyna się od najlepszego przewodnika, a więc od najmniej przydatnego do omawianego tutaj celu i kończy najgorszym: kręcony jedwab, płótno, bawełna, wełna owcza, kitaj, surowy jedwab, futro bobrowe, puch edredonowy. Jedwab nietylko jest daleko lepszym przewodnikiem ciepła od wełny, lecz

tkanka jedwabna jest bardziej zbita i zawiera mniej powietrza, tak, że pod względem istotnego pożytku w znacznym stopniu ustępuje miejsca tkance wełnianej. Oprócz tego wełna, a jeszcze lepiej futro, stanowią najlepszą ochronę nietylko przeciwko zimnu, lecz także przeciwko zbyt silnym promieniom słonecznym i dlatego narody południowej Europy chętnie noszą lekkie materye wełniane, beduini zaś w pustyni nie zdejmują swych owczych futer zimą i latem.

Ponieważ metale są bardzo dobremi przewodnikami, to przy zetknięciu z naszem ciałem nadzwyczaj szybko odejmują jego ciepło tak, że doznajemy wtedy nader silnego wrażenia zimna, drzewo natomiast odprowadza ciepło bardzo powoli i dlatego przy zetknięciu z niem mniej czujemy zimno, gdyż utracone ciepło wkrótce zostaje zastąpione przez nową jego ilość z wnętrza organizmu. Podłoga drewniana jest lepsza od kamiennej, gdyż drzewo daleko gorzej przewodzi ciepło, aniżeli kamień; z tego samego powodu deski z drzewa sosnowego wydają się mniej zimne, niż dębowe, oprócz tego, podłoga zaciągnięta farbą olejną, lepiej przewodzi ciepło od czystej podłogi i dlatego pierwsza wydaje się zimniejszą. Wiadomo także, że posiłkujemy się ustawicznie złemi przewodnikami w celu ustrzeżenia pokarmów i napojów od oziębienia lub ogrzania, zależnie od użytku do jakiego mają służyć. Na wystawie paryskiej w roku 1867 można było oglądać przyrząd, w którym potrawy gotują się przez dłuższy czas bez nowego dopływu ciepła. Składa się on z wielkiej skrzyni drewnianej, której dno, ściany i pokrywa obite są wewnątrz bardzo grubą warstwą filcu; wnętrze jej wypełnia szczelnie metalowy kocioł. Przy posługiwaniu się tym przyrządem wyjmujemy kocioł, napełniamy potrawami, które chcemy ugotować i ogrzewamy do wrzenia, gdy ono już się rozpoczęło, wstawiamy kocioł do skrzyni, pokrywamy go jeszcze kawałkiem grubego filcu i zamykamy hermetycznie. Dzięki słabemu przewodnictwu filcu, skrzynia zatrzymuje ciepło przez długi czas tak, że potrawy zawarte w kotle, dogotowują się bez dalszych z naszej strony starań. Obserwacye pokazały, że w przeciągu

3-ch godzin temperatura w przyrządzie obniżyła się tylko o 12 stopni.

Podobnie jak złe przewodniki pomagają nam do utrzymania ciał przy danej wysokiej temperaturze, tak też naodwrót możemy posługiwać się dobremi przewodnikami w tych razach, gdy chcemy jakiemuś ciału szybko odjąć jego ciepło. Angielski fizyk Humphrey Davy zauważył, że gdy do wnętrza płomienia wprowadzamy delikatną, drucianą siatkę, to powyżej niej palenie ustaje, gdyż gazy wskutek zetknięcia z metalem, tak silnie się oziębiają, że proces palenia zostaje przez to wstrzymany. Gdy przeciwnie zbieramy gaz ponad siatką i tutaj zapalamy go, płomień również nie przechodzi pod siatkę (fig. 472). Obserwacye te doprowadziły Davy'ego do zbudowania przyrządu, który chroni górników od niebezpieczeństwa, na które są narażeni z powodu gazów wybuchowych, zbierających się w kopalniach węgla. Jeżeli gaz taki, zmieszany z powietrzem, zetknie się z ogniem, wtedy wybucha gwałtownie. Przyrząd ten, zwany lampą Davy'ego (fig. 473, str. 840) składa się z lampy, której płomień całkowicie jest otoczony delikatną siatką z drutu platynowego. Gdy górnik z takim przyrządem dostaje się do wnętrza kopalni napełnionej gazem wybuchowym, wtedy gaz ten przechodzi wprawdzie przez oczka siatki do płomienia i tutaj zapala się, lecz palenie odbywa się tylko wewnątrz lampy, niebezpieczeństwo zaś eksplozyi zostaje usunięte. Lampę bezpieczeństwa następnie ulepszono, dolną mianowicie część powłoki otaczającej plomień, przygotowują z mocnego szkła i na niem dopiero osadzają siatkę, a to dlatego, ażeby nie przyćmie-

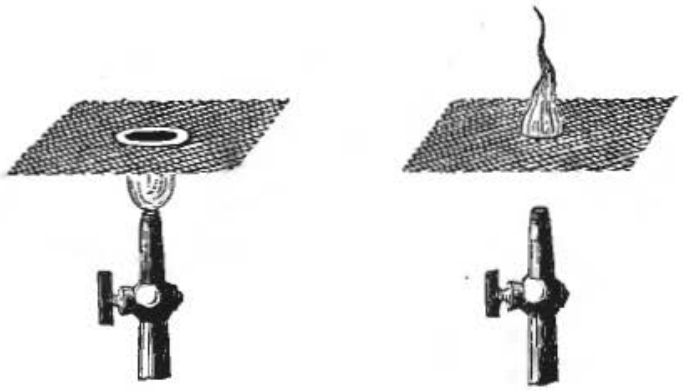


Fig. 472. Delikatna siatka metalowa przeszkadza rozchodzeniu się ciepła.

wała światła płomienia. Oprócz tego starano się uczynić nie-

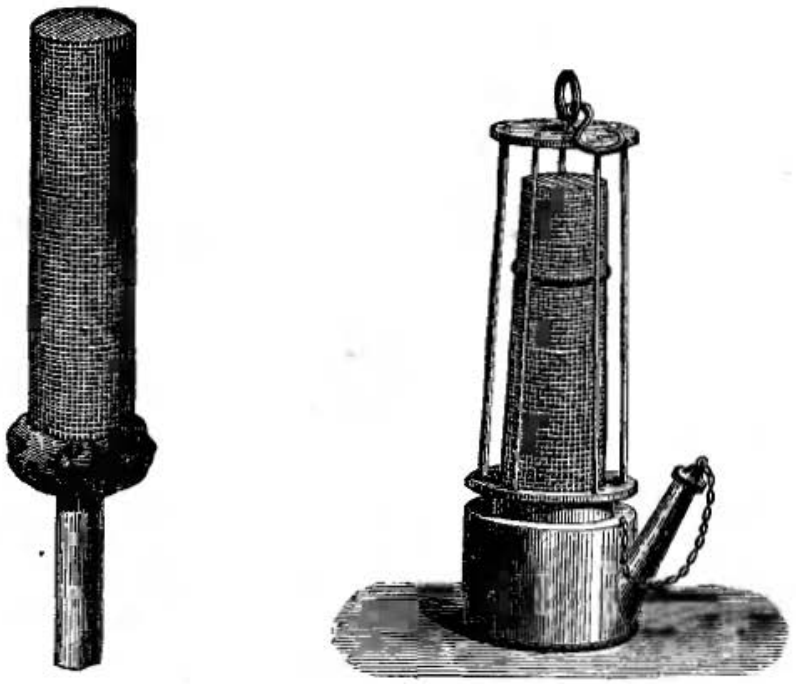


Fig. 473. Lampa Davy'ego.

szkodliwemi skutki nieostrożności górników i zbudowano lampy, których nie można otworzyć przed zgaszeniem płomienia.

ROZDZIAŁ V.

Mechaniczna teorya ciepła.

§ 1. Powstawanie ciepła przez tarcie, ciśnienie i uderzenie.

Kilkadziesiąt przeszło lat temu Rumford rozpoczął cały szereg doświadczeń nad wytwarzaniem się ciepła przez tarcie. Był on wtedy zajęty świdrowaniem dział, wywiązujące się zaś przy tej czynności ciepło tak go zaciekawiło, że wynalazł nawet przyrząd do badania ciepła, powstającego wskutek tarcia. Kazał on ukuć żelazny walec wewnątrz pusty, w którym umieścił szczelnie przystający tłok i całość tę wstawił do skrzyni, zawie-

rającej około 7,5 kilograma wody o temperaturze równej 15,6° C. Pogodzinnem obracaniu tłoka, temperatura wody wskutek tarcia podniosła się do 41,7°, po półtoragodzinnem obracaniu termometr wskazywał 61,1°. Ruch utrzymywano stale tak, że po upływie dwóch godzin temperatura doszła do 81,1°, po upływie dwóch godzin i dwudziestu minut do 93,3° i wreszcie po półtrzeciagodzinnem obracaniu *woda zaczęła wrzeć*. Tyndall powtórzył doświadczenie Rumforda, lecz w sposób daleko prostszy i znacznie mniej wymagający czasu. Przymocował mianowicie rurkę mosiężną, u dołu zamkniętą, do bloku, połączonego sznurem bez końca z kołem, za pomocą którego można ją było nadzwyczaj szybko obracać (fig. 474). Dwie deseczki dębowe, spojo-

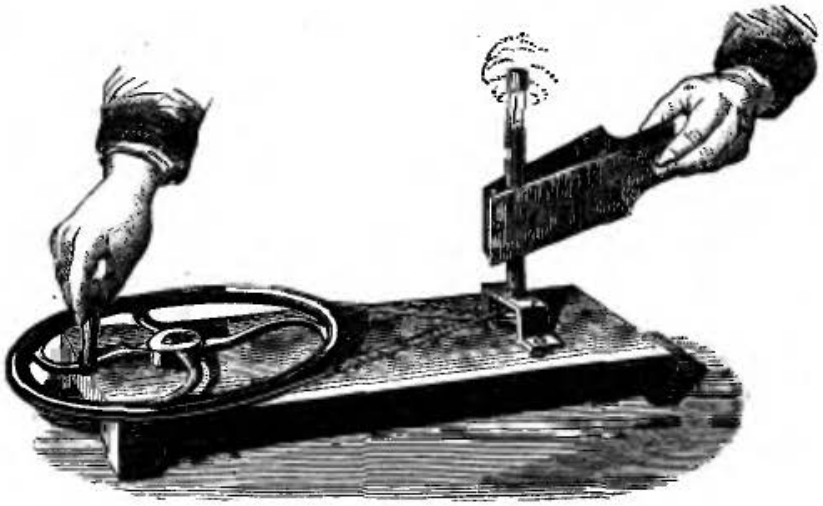


Fig. 474. Doświadczenie Tyndalla nad wytwarzaniem się ciepła przez tarcie.

ne zawiasą i zaopatrzone w półokrągłe wyżłobienia, odpowiednio do grubości rurki, stanowiły rodzaj kleszczów, których ramiona obejmowały rurkę i powodowały tarcie jej o drzewo, skoro tylko w ruch jąwprowadzono. Rurkę napełnił wodą, zatkał korkiem i zaczął obracać korbą; w miarę obracania rurki temperatura wody podnosiła się i jeszcze przed upływem półtrzeciej minuty można było dostrzedz wydobywającą się parę wodną. Nakoniec siła pary wyrzuciła korek na 6 przeszło metrów, co dowodziło wrzenia wody.

Ręce także rozgrzewamy, pocierając jedną o drugą i innym zziębniętym członkom w taki sam sposób dodajemy ciepła. Wiadomo, że dzicy robią sobie ogień, pocierając dwa kawałki drzewa odpowiednio przygotowanego, przez tarcie także zapalamy zapałki. Podkowy końskie uderzając o bruk sypią iskrami, to samo ma miejsce przy krzesaniu ognia, albowiem małe odbite cząsteczki metalu tak się wtedy rozgrzewają, że zapalają się i płoną w powietrzu. Są to zjawiska od dawna znane, już Arystoteles bowiem mówi o rozgrzewaniu się strzał prujących powietrze. Tak samo kula karabinowa rozgrzewa się wskutek tarcia.

Tyndall pokazał za pomocą termomultyplikatora, że ciepło wytwarza się także przez ciśnienie. Kawałkiem jodłowego drzewa, zimniejszym od temperatury pokoju, w którym wykonywał doświadczenie, dotykał on stosu i wywoływał zboczenie, dowodzące zimna. Następnie ściskał drzewo za pomocą małej, hydraulicznej prasy, której płyty były zimniejsze od powietrza pokoju i po ściśnięciu znów dotykał niem stosu, a powtórne zboczenie igły pokazało, że ciśnienie wytworzyło ciepło. To samo nastąpiłoby gdyby był spłaszczył kawałek ołowiu.

Wytwarzanie się ciepła przez ściskanie okazuje się także bardzo dobrze za pomocą krzesiwka pneumatycznego, w którem na spodzie tłoka, posuwającego się w rurze, znajduje się kawałek hubki lub bawełny strzelniczej; przy gwałtownem zepchnięciu tłoka, powietrze w rurze tak się rozgrzewa wskutek ściskania, że hubka się zapala (patrz str. 143).

Tyndall badał także następstwa uderzenia. Zimną ołowianą kulę kładzie na zimnem kowadle i uderza zimnym młotem. Młot upada z pewną mechaniczną siłą, a jego ruch zatrzymuje się raptownie na kuli i na kowadle. Siła młotu pozornie znika, lecz po bliższem badaniu okazuje się, że ołów ogrzał się. Zobaczymy następnie, że gdybyśmy zebrali całkowitą ilość ciepła wytworzoną przez to uderzenie i mogli je znowu zużytkować bez mechanicznej straty, to bylibyśmy w stanie podnieść niem młot do wysokości, z której spadł. Dalej Tyndall zanurza stos termoelektryczny w rtęci, przyczem zboczenie igły wskazuje, że metal jest zimny. Następnie bierze dwie szklanki, owinięte krajką

ażeby ich nie ogrzać ciepłem rąk i przelewa kilkakrotnie rtęć z jednej do drugiej; rtęć spada za każdym razem z pewną mechaniczną siłą, ruch jej ginie, ale pozostaje ciepło. Albowiem gdy po takiem przelewaniu, powtórzonem 10 do 15 razy, zanurza znów przyrząd w rtęci, zboczenie igły wskazuje, że zimny poprzednio metal jest teraz cieplejszy od stosu. Powtarza się to samo na większą skalę w każdym wodospadzie. Gdybyśmy zmierzyli delikatnym termometrem temperaturę wody u góry i u dołu wodospadu Niagary, znaleźlibyśmy, że woda jest cieplejsza u dołu, aniżeli u góry. Mniemanie zatem żeglarzy, że woda morska jest cieplejsza po burzy, niż przed burzą, jest teoretycznie zupełnie słuszne, gdyż w rzeczy samej mechaniczna siła wodnych fal musi ostatecznie zamienić się w ciepło.

Ciepło więc wytwarza się wskutek przezwyciężenia tarcia, a ilość jego jest dokładną miarą czynnika użytego dotego. *Ciepło zatem jest tym pierwotnym czynnikiem, tylko że objawia się w innej formie.* Jeżeli chcemy przeszkodzić tej przemianie, to musimy zniszczyć tarcie i dlatego skrapiamy oliwą kamienie do szlifowania, powlekamy tłuszczem piły, smarujemy osie u wozów. Maszynista kolejowy, wiodący pociąg, usiłuje przeszkodzić, ażeby część siły pary, którą otrzymał pierwotnie za pomocą ciepła, nie przyjęła napowrót tej formy, albowiem każdemu stopniowi ciepła, wytworzonego przez tarcie osi, odpowiada pewna strata w sile pędu maszyny; dlatego też smaruje on starannie osie wagonów. To samo ma miejsce kiedy tracz smaruje tłuszczem piłę. Używa on siły mięśni swych do przerznięcia drzewa, za pomocą zębów piły chce on rozdzielić jego cząstki i przezwyciężyć przyrodzoną ich spójność. Lecz jeżeli na szerokiej powierzchni piły powstaje silne tarcie, wtedy ona porusza się z trudnością i przy tej samej ilości zużytej siły tracz otrzymuje mniejszy rezultat, aniżeli gdyby piła działała bez tarcia. Lecz rezultat jest mniejszy jedynie pod względem samego piłowania, bezwzględnie zaś nie jest on wcale mniejszy, albowiem siła, której piła nie zużywa, nie ginie bynajmniej, gdyż — jak to wykazuje doświadczenie — zmienia się w ciepło. Gdybyśmy mogli zebrać ciepło, wytworzone przez tarcie piły i obrócić je w ruch, moglibyśmy odtworzyć tę ilość

siły, jaką tracz zużył w innej formie, kiedy zapomniał piłę nasmarować.

We wszystkich przytoczonych wyżej zjawiskach ciepło powstało kosztem mechanicznych czynników, a więc pokazują one, że *ciepło powstaje wtedy, gdy znika ruch mechaniczny.* Naodwrót także zużycie ciepła wytwarza mechaniczny ruch, czyli innemi słowy *mechaniczna siła powstaje wtedy, gdy znika ciepło,* jak tego naprzykład dowodzi następujące doświadczenie Tyndalla. Naczynie o mocnych ścianach napełnia on zgęszczonem powietrzem i pozostawia przez kilka godzin, ażeby temperatnra wewnętrzna nie różniła się od temperatury pokoju. Powietrze to ciśnie na ściany naczynia tak, że po otworzeniu krana część jego gwałtownie wychodzi na zewnątrz (fig. 475); wydobywające się po-

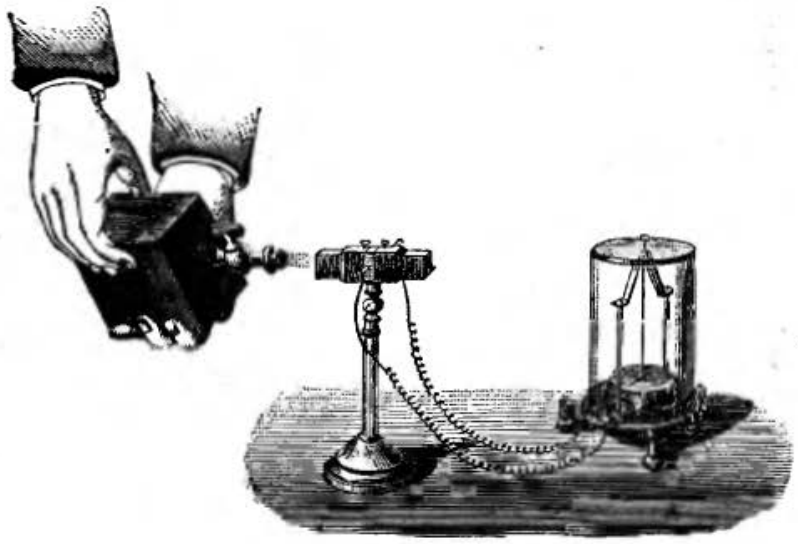


Fig. 475. Doświadczenie Tyndalla. Powietrze zostaje wydalone kosztem ciepła.

wietrze jest wypychane przez to, które się pod niem znajduje. Chcąc przekonać się, w jakim stanie znajduje się powietrze *pracujące* w tym procesie, Tyndall puszcza wydobywający się strumień na powierzchnię stosu, a kierunek zboczenia igły przekonywa go, że stos się oziębił. Powietrze jest zimniejsze dlatego, że wykonywa mechaniczną pracę, a nie ma do pomocy innego czynnika, tylko wewnętrzne swe ciepło. Następnie Tyndall wywołuje wprost przeciwne zboczenie igły skierowując na powierzch-

nię stosu termoelektrycznego strumień powietrza, wydobywającego się ze zwyczajnego miecha (fig. 476). W poprzedniem do-

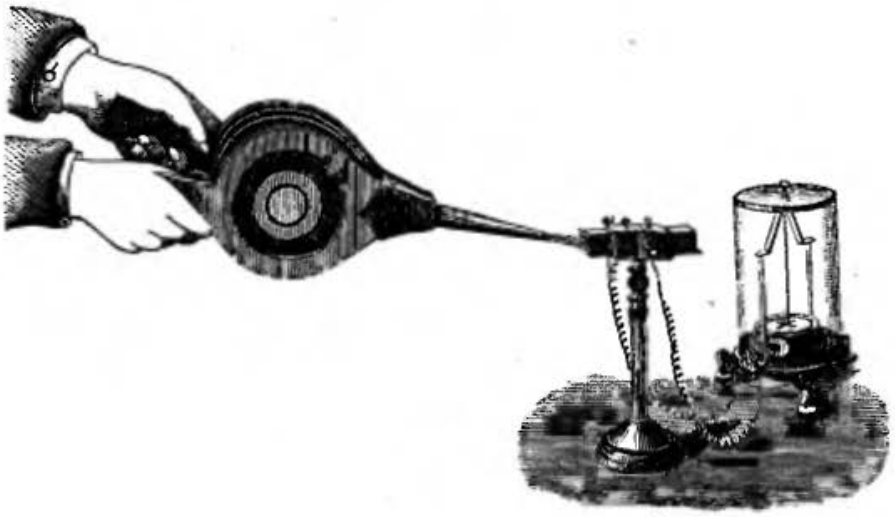


Fig. 476. Inne doświadczenie Tyndalla. Powietrze zostaje wydalone kosztem siły mechanicznej.

świadczeniu całą mechaniczną pracę wydalania powietrza wypełniało samo powietrze, wskutek czego zużywała się część jego ciepła, w doświadczeniu zaś z miechem pracują mięśnie eksperymentatora. Strumień wydalonego z miecha powietrza, uderzając o powierzchnię stosu, znajduje opór, zaraz też powstaje ciepło równoważne zniszczonemu ruchowi, jak tego dowodzi kierunek zboczenia igły.

§ 2. Istota ciepła. Zasada zachowania energii. Mechaniczny równoważnik ciepła.

Obecnie zjawia się przed nami pytanie, dlaczego ciepło powstaje przez pracę mechaniczną i jaka jest właściwa istota jego? Przez długi czas tak zwana *teorya materyalna* ciepła starała się odpowiedzieć na to pytanie, a twierdzenia jej pod pewnym względem były tak proste, że zapewniały jej ogólne uznanie. Teorya ta uważa ciepło jako pewnego rodzaju materyę, coś w rodzaju delikatnego płynu, wypełniającego przestrzenie pomiędzy najdrobniejszemi cząstkami ciał. Chemik Gmelin określa np.

ciepło w następujący sposób: „Jest to substancya, która wchodząc do naszego ciała daje nam poczucie ciepła, wychodząc zaś z niego sprawia poczucie zimna.“ Podług jego mniemania ciepło łączy się z ciałami podobnie jak ważka substancya. Wielu innych pierwszorzędnych chemików pojmowało ciepło z tego samego punktu widzenia.

Wytwarzanie ciepła za pomocą mechanicznej siły wikłało wprawdzie zwolenników teoryi materyalnej, lecz i to zjawisko starali się objaśnić na podstawie swej teoryi. Wiedzieli, że rozmaite ciała posiadają różne ciepło właściwe; że jeżeli np. ogrzejemy kilogram wody i kilogram rtęci od 50^0 do 60^0, to bezwzględna ilość ciepła potrzebna do podniesienia temperatury wody o 10^0 jest trzydzieści razy większa od ilości, jakiej wymaga rtęć. Przyjmowali tedy, że woda posiada zdolność pochłaniania cieplika i może go pochłonąć tyle, że 30 jego jednostek wywołuje w niej ten sam rezultat, co jedna jednostka w rtęci. Otóż takie naprzykład doświadczenie, jak powyżej opisane z ołowianą kulą, ogrzaną przez ciśnienie, zwolennicy teoryi materyalnej wytłomaczyliby w ten sposób: ołów przed ciśnieniem miał większe ciepło właściwe, aniżeli po ciśnieniu, czyli, że wielkość przestrzeni pomiędzy jego cząstkami zmniejszyła się wskutek ciśnienia, przez co część utajonego przedtem ciepła musiała się ujawnić, gdyż ściśnięta substancya nie mogła go już tyle w sobie zawrzeć. W podobny sposób wytłomaczyliby doświadczenia z tarciem i uderzeniem. Zwolennicy teoryi materyalnej przyjmują, że ilość ciepła we wszechświecie jest tak stała, jak ilość materyi; za pomocą sił chemicznych lub mechanicznych można jedynie wywołać to, że ciepło skupi się w jednem miejscu lub też wyjdzie ze swych kryjówek, czyli ujawni się, lecz nowej ilości ciepła wytworzyć nie można.

Teorya dynamiczna albo *mechaniczna* ciepła odrzuca pojęcia, że ciepło jest materyą, lecz uważa je jako pewien stan, mianowicie jako ruch najdrobniejszych cząstek ciała. W istocie bezpośrednie badanie niektórych objawów musi budzić, jak powiada Tyndall, w każdym myślącym umyśle instynktowe przypuszczenie, że ciepło jest rodzajem ruchu. Już Bacon (1665)

był tego mniemania, Locke zaś tak się o przedmiocie tym wyraża: „Ciepło jest to nadzwyczaj ożywiony ruch nieskończenie małych cząstek jakiegokolwiek przedmiotu, ten ruch wytwarza w nas pewne wrażenie, które sprawia, że przedmiot ów nazywamy ciepłym. To więc, co się w naszych wrażeniach objawia jako ciepło, jest w przedmiotach ruchem tylko.“

W podobny sposób wyrażali się najznakomitsi badacze XVII stulecia, jak Boyle oraz Newton; pierwszy uważał ciepło jako drgający ruch najdrobniejszych cząstek czyli atomów, drugi zaś, który ociągał się z przyjęciem teoryi falowania światła, zgadzał się z poglądem, że ciepło polega na drgającym ruchu eteru. W wieku XVIII najwybitniejszymi obrońcami mechanicznej teoryi ciepła byli: Rumford i Davy, którzy pogląd swój opierali głównie na możności wytwarzania ciepła przez tarcie i uderzenie, wnioskując z tego, że znikający przy podobnych zjawiskach ruch całej masy zmienia się w drgający ruch pojedyńczych cząstek. Davy wykonał doświadczenie, którego rezultat może być uważany jako jeden z najpierwszych dowodów niemateryalności ciepła. Wiemy mianowicie, że lód posiada mniejsze ciepło właściwe, aniżeli woda tak, że ta sama ilość ciepła, która ogrzewa kilogram lodu na dziesięć np. stopni, ogrzewa kilogram wody zaledwie na pięć. Wiemy dalej, że aby lód stopić, potrzeba wielkiej ilości ciepła, które zostaje utajone. Otóż Davy stopił dwa kawałki lodu przez wzajemne ich tarcie o siebie, a więc wytworzył substancyę, która posiadała daleko znaczniejszą ilość bezwzględnego ciepła, aniżeli lód; w tym razie nie można było przypuścić, że tarcie ujawniło tylko pewną ilość ukrytego w lodzie ciepła, ponieważ stanowiło ono tylko małą część ciepła, zawartego w wodzie.

W pierwszych dziesiątkach naszego stulecia mechaniczna teorya ciepła znalazła nowych zwolenników, jak Thomasa Young'a i Ampera. A jednak wszyscy wspomnieni uczeni nie zdołali odeprzeć zupełnie materyalnej teoryi ciepła. Dopiero badania Melloni'ego nad ciepłem promienistem, które wykazały najzupełniejszą zgodność pomiędzy zachowaniem się promieni

świetlnych i cieplnych, zmusiły fizyków do przyjęcia poglądu, że ciepło — promieniste przynajmniej — polega na drganiu eteru. Gdy więc z jednej strony drgający ruch przyjęto za przyczynę pewnej grupy zjawisk cieplnych i gdy z drugiej znano zjawiska pochłaniania ciepła, łatwo już było wywnioskować z tego, że ciepło istniejące w ciałach również polega na ruchu bądź eteru, bądź samych cząstek. Lecz nie takie wnioski zapewniły dynamicznej teoryi ciepła ogólne uznanie; zrobiła to zasada nadzwyczaj ważne znaczenie mająca w nauce i znana pod nazwą *zasady zachowania energii.*

Siły mogą być rozmaicie dzielone, w ogóle jednak podziały te są mniej lub więcej tylko dowolne. Godnym uwagi jest podział sił angielskich uczonych na *siłę żywą* czyli *energię czynną, cynetyczną* lub *energię ruchu* i *siłę prężną* czyli *energię możliwą, potencyalną* lub *statyczną.* Siłę żywą np. posiada kula armatnia w biegu, kamień spadający z wysokości i t. p. *Siła prężna* jest jakby nagromadzona w ciele i w odpowiednich warunkach może objawić się czynnie: siła objawiająca się ruchem kuli zawarta już była w prochu; działanie, jakie wywrzeć może spadający kamień, pochodzi od siły, która go przedtem podniosła na pewną wysokość; rezultaty prężności pary w maszynie zależą od ciepła, wytworzonego przy łączeniu się węgla z tlenem. Mechanika uczy, że siła żywa poruszonej masy jest równa iloczynowi z siły poruszającej przez drogę, na jakiej siła ta działała; iloczyn ten nazywa się *pracą siły.* Z równoważności siły żywej i pracy mechanicznej wynika, że każda siła żywa jest równa pracy, przez którą została wytworzoną i nawzajem, gdy siła żywa pewnej, poruszającej się masy zostaje zniszczoną, to jest gdy prędkość tej masy staje się równą zeru, wtedy powstaje równoważny jej zasób pracy. W kamieniu wzniesionym na daną wysokość nagromadzony jest pewien zasób pracy, złożony tam przez siłę, która go na tę wysokość wyniosła, gdy zaś kamień spada, praca przetwarza się w siłę żywą, którą znów możemy zużytkować na wykonanie pewnej pracy. Często bardzo praca tak wytworzona jest bezpośrednio widoczna, jeżeli np. siła żywa zużywa się na

poruszenie całych mas lub ich części; wyraźna jest ona i wtedy, gdy przechodzi w drgający ruch cząstek ciała i objawia się jako ciepło. Lecz chociaż nie zawsze możemy ją odczuć zmysłami naszemi, to jednak nie ulega wątpliwości, że siła żywa zawsze wytwarza albo pracę mechaniczną, albo inną siłę żywą. Gdy serce dzwonu uderza o jego ściany, ruch serca zostaje wstrzymany, lecz siła uderzenia nie niknie, gdyż wprowadza ona dzwon w drgania, które udzielają się powietrzu, to ostatnie z kolei doprowadza je do naszych nerwów słuchowych i powoduje w nas wrażenie dźwięku. To samo ma miejsce, gdy uderzamy młotem w ołowianą kulę: ruch młota zostaje wstrzymany, lecz nie zniszczony, udziela się on atomom ołowiu i ukazuje się jako ciepło. Tyndall upuszczał z sufitu na podłogę ołowianą kulę, uczepioną na sznurku i za pomocą termomultyplikatora udowodnił, że po czterech spadkach metal się ogrzał. Ciepło to zawdzięczać należało zniszczeniu siły pędu, jaką kula posiadała w chwili uderzania o podłogę, innemi słowy ruch mechaniczny całej masy ołowiu stał się ruchem jego atomów.

Zniszczenie ruchu widzialnego wytwarza ciepło oczywiście i wówczas, kiedy ciało nie siłą ciężkości, lecz innym jakim sposobem zostaje w ruch wprawione. Kula karabinowa, uderzając o tarczę, rozgrzewa się także i jeżeli znamy prędkość kuli, to — jak wkrótce zobaczymy — możemy dokładnie obliczyć ilość ciepła wytworzonego przy tem. Ponieważ z prędkości i ciężaru ciała w ruchu można obliczyć ilość ciepła, jaka powstałaby ze zniszczenia siły poruszającej go, to ze znanego ciężaru ziemi oraz ze znanej prędkości, z jaką się ona porusza w przestrzeni, jesteśmy w stanie obliczyć ilość ciepła, jaka by się wytworzyła, gdyby ziemia została zatrzymaną w swym biegu. Mayer i Helmholtz obliczyli, że powstałe przez podobne uderzenie ciepło nietylko stopiłoby ziemię, lecz że większą jej część obróciłoby w parę. Ilość wywiązanego w tym wypadku ciepła równałaby się ilości, jakaby powstała ze spalenia czternastu kul węglowych, równych ziemi. A gdyby ziemia przez podobne wstrzymanie jej ruchu upadła na słońce, co bezwątpienia miałoby miejsce, to uderzenie takie wytworzyłoby tyle ciepła, ileby go się

wywiązało ze spalenia 5600 kul węglowych, wielkich jak ziemia. [1]).

Jeżeli wyobrazimy sobie zamknięty system mas, który z zewnątrz nie otrzymuje żadnej pracy, to wszelkie w nim zmiany mogą powstawać przez to tylko, że nagromadzone w nim siły prężne, czyli potencyalne, przechodzić będą w siły żywe, czyli cynetyczne i naodwrót. W systemacie takim *suma sił żywych i sił prężnych jest ilością stałą.* Ponieważ jednak systematu tak oderwanego od mas poza nim leżących nie ma w naturze, przeto zasada powyższa, ściśle mówiąc, stosować się tylko może do układu wszechświata. Zasada więc zachowania energii znaczy, że zapas energii w przyrodzie jest niezmienny, że żadna energia wytworzoną z niczego, ani też zniszczoną być nie może; gdziekolwiek energia jaka pozornie ginie, tam w rzeczywistości przetwarza się ona tylko w energię innego rodzaju. Zobaczymy w następnej księdze, że elektryczność, wywołana przez działanie mechaniczne w maszynie elektrycznej, powoduje ruchy, rozkłady chemiczne, zjawiska dźwięku, światła, ciepła i magnetyzmu. Zasadę zachowania energii w całej jej ogólności pierwszy wypowiedział niemiecki lekarz z Heilbronu Mayer w roku 1842, on też zastosował ją do zjawisk cieplnych; następnie Helmholtz (1847) rozwinął ją i ugruntował, dowodząc, że sprawdza się ona we wszystkich zjawiskach i prawach fizycznych.

W obec zasady zachowania energii nie mogło w żaden sposób ostać się pojęcie, że ciepło jest materyą. Widzieliśmy wyżej w jaki sposób materyalna teorya ciepła objaśniała wytwarzanie się jego przez tarcie i uderzenie. Otóż objaśnienie to staje się niemożliwe, skoro przyjmujemy, że powstające przy tych zjawiskach ciepło jest tylko przekształconą siłą żywą. Jeżeli ciepło objawia się dzięki zużyciu pewnej ilości pracy, to nie może ono być materyą. W istocie gdy zasada zachowania energii pozyskała ogólne uznanie, pogląd o materyalności ciepła został odrzucony tak, że obecnie dynamiczna teorya panuje powszechnie. Teorya ta stanowi konieczny wynik zasady zachowania energii i posia-

[1]) Tyndall, l. c.

da dla nas tęż samą pewność, co owa zasada. Jedynie co do *rodzaju* ruchu, objawiającego się jako ciepło, nie mamy pewności, pod tym bowiem względem możemy tworzyć tylko mniej lub więcej prawdopodobne hypotezy. Istnieją tutaj dwie możliwości: albo ciepło polega jedynie na ruchu eteru, znajdującego się we wszystkich ciałach, albo też na ruchu eteru i materyalnych cząsteczek. Pierwsze przypuszczenie, wygłoszone jeszcze przez Newtona, zostało w naszych czasach rozwinięte przez Redtenbachera, prostszą jednak jest druga hypoteza, że ciepło, odczuwane przez nas, polega na ruchu samych cząsteczek ciał. Hypotezę tę przyjmowała większość starszych fizyków, ona też obecnie także prawie ogólnie jest przyjęta.

Wypada nam teraz zbadać stosunek między ciepłem, powstałem wskutek mechanicznej pracy i ilością tej ostatniej, jaka się przytem zużyła. Nie w jednym umyśle istniało pojęcie o tym stosunku, zanim jeszcze zdołano go dokładnie zrozumieć i poprzeć ścisłemi dowodami. Już Montgolfier nosił się z myślą o równoważności ciepła i pracy mechanicznej, a w roku 1839 Séguin rozwinął jego poglądy w dziele „o wpływie kolei żelaznych.“ Należy tylko zastanowić się nad procesami organicznemi, nad stosunkiem sił, zawartych w pokarmach, do siły mięśniowej, aby dojść do wniosku, że pomiędzy temi siłami istnieje wzajemna zależność. Nic więc dziwnego, że pierwszy, który wpadł na myśl równoważności ciepła i siły mechanicznej, był to jak powiedzieliśmy, lekarz. Aby jednak domysły zostały potwierdzone, należało się przekonać, czy pomiędzy pracą zużytą, a wytworzonem ciepłem rzeczywiście istnieje równoważność, to jest czy jedna i ta sama ilość pracy wytwarza zawsze jednę i tę samą ilość ciepła. Jednostką do mierzenia pracy jest *kilogrammetr*, czyli praca potrzebna do podniesienia 1 kilograma na wysokość 1 metra, za jednostkę zaś ciepła przyjmujemy tę ilość, która ogrzewa 1 kilogram wody na 1^0 (duża ciepłostka). Zadanie polegało więc na zbadaniu, czy określona ilość *zużytych kilogrammetrów* odpowiada zawsze jednej i tej samej ilości *wytworzonych ciepłostek*. Otóż Mayer pierwszy wykazał, że taki stały stosunek między ciepłem i pracą rzeczywiście istnieje, obliczył mianowicie „mechaniczny

równoważnik ciepła“ i z zasady tej wysnuł najśmielsze wnioski. Najrozleglejsze jednak badania nad tym przedmiotem przeprowadził Joule z Manchesteru (1843), którego pracę można uważać za współczesną z pracą Mayera. Badał on zupełnie niezależnie od niemieckiego uczonego i pracował wytrwale w celu udowodnienia, że między ciepłem i pracą mechaniczną istnieje stały stosunek. Wlewał wodę do odpowiednio przygotowanego naczynia, obracał ją kołem skrzydlatem i oznaczał ilość ciepła, wytworzorzonego ruchem wody oraz ilość pracy na to zużytej. Podobne doświadczenia wykonywał z tranem i rtęcią. Pocierał także jedną o drugą dwie płyty żalazne i obliczał ilość siły zużytej na przezwyciężenie tarcia oraz ilość ciepła, jaka przytem powstawała. Przepuszczał wodę przez rurki włoskowate i obliczał ciepło, wytworzone tarciem cieczy o ściany rurek. We wszystkich tych doświadczeniach pewna ilość siły wytwarzała tę samą ilość ciepła, bez względu na to, czy zużywano ją na tarcie płyt żelaznych, lub na obracanie koła w wodzie, rtęci lub tranie. Oczywiście, że w końcu doświadczenia temperatura była różna w każdym oddzielnym wypadku; temperatura np. wody wynosiła zaledwie $^1/_{30}$ temperatury rtęci. Joule w obliczeniach swoich uwzględniał jednak rozmaite ciepło właściwe dla różnych ciał i odkrył, że pomimo tej różnicy w temperaturze bezwzględna ilość ciepła, przy zużyciu tej samej pracy, była we wszystkich wypadkach jednakowa.

W celu mierzenia ciepła, wytworzonego przez tarcie stałych ciał i porównania go z zużytą pracą, Joule posługiwał się następującym przyrządem. Na żelaznej osi *aa* (fig. 477) osadzony był

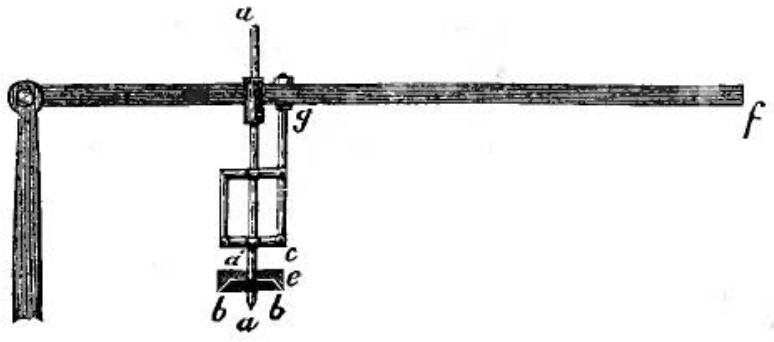


Fig. 477. Część przyrządu Joule'a.

mocno żelazny krążek *bb*, który obracał się wraz z nią, brzeg jego ścięty był stożkowato. Za pomocą dźwigni *f g c d* można było do krążka *b* przyciskać silnie drugi krążek *e*. Całe to urządzenie zamknięte było w żelaznem naczyniu *G* (fig. 478), w po-

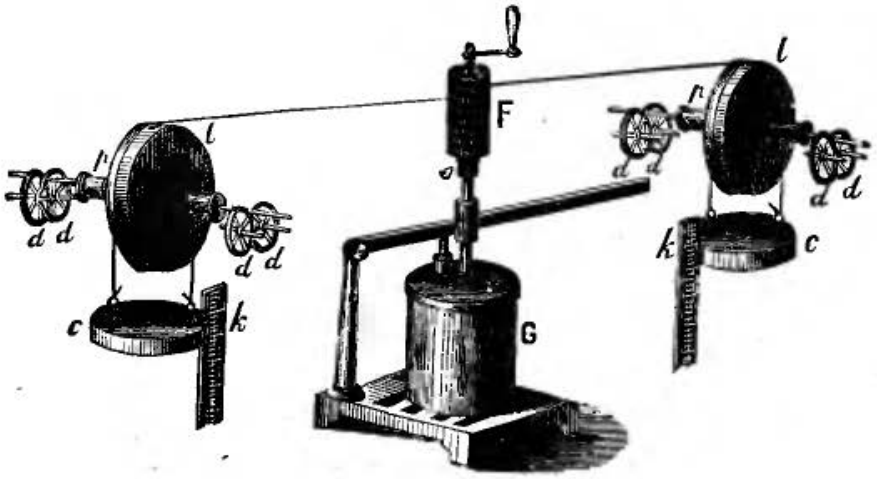


Fig. 478. Przyrząd Joule'a.

krywie którego znajdowały się trzy otwory: przez jeden, środkowy przechodziła oś *a a*, przez drugi — pręt *g c*, trzeci wreszcie pozwalał wprowadzać do wnętrza naczynia termometr. Samo naczynie umieszczone było na drewnianym stole, którego tafla składała się z krat, przez co stykało się ono z drzewem w niewielu punktach. Na osi *a* osadzono drewniany walec *F*, który można było za pomocą sztyfcika *s* silnie do niej przymocować; na walec zaś nawinięto dwa sznury w ten sposób, że przy ich wyciąganiu oś *a* i osadzony na niej krążek *b* obracały się. Sznury dochodziły do dwóch bloków *ll*, mających w średnicy około 30 centym. i 5 centym. szerokości, dla zmniejszenia tarcia osie bloków spoczywały na skrzyżowaniach bloczków *dd*. Na osiach *pp* przechodzących przez bloki zawieszono na sznurach gwichty *c c*; przy spadaniu tych ostatnich sznury się odwijały, przez co osie *pp* i wraz z niemi bloki poczynały się obracać. Ponieważ z kolei bloki połączone były za pomocę sznurów z osią części przyrządu, służącej do tarcia, to przy obracaniu się bloków obra-

cała się również i ta część. Waga gwichtów w pojedyńczych doświadczeniach była rozmaita.

Doświadczenia urządzano w następujący sposób. Po zatrzymaniu osi *aa* przyrządu, obracano walec *F* tak, ażeby gwichty poszły w górę, przymocowywano walec do osi i określano temperaturę rtęci w żelaznem naczyniu *G*. Następnie odczytywano dokładnie na skali *kk* wysokość, na jakiej znajdowały się gwichty po nad ziemią, pozwalano im spadać, a więc powodować tarcie krążka, dopóki po przebyciu około 1,6 metra nie dotknęły podłogi pracowni, podnoszono je napowrót, znów opuszczano i tak dalej ze 20 razy. W końcu mierzono powtórnie temperaturę rtęci w naczyniu *G*. Oprócz tego oznaczono także wpływ, jaki na rezultat doświadczenia mogło mieć promieniowanie przyrządu.

Widzimy tedy, że spadające gwichty wykonywują pewną pracę, która prawie całkowicie zużywa się na wzajemne tarcie krążków. Z ciężaru gwichtów i wysokości spadku oblicza się pracę w kilogrammetrach, jaką potrzebaby zużyć na podniesienie gwichtów do poprzedniej wysokości; przez co otrzymuje się ilość pracy, jaką one wykonały. Porównawszy następnie — po dokonaniu pewnych poprawek — ilość tę z ilością ciepła, wytworzonego przez tarcie, oblicza się ilość pracy, potrzebną do wytworzenia jednej ciepłostki. Zmieniając w rozmaitych doświadczeniach czas trwania spadku, albo wagę gwichtów i obliczając z każdego z nich ilość pracy potrzebnej do wytworzenia jednej ciepłostki, otrzymuje się wartości jednakowe, co dowodzi, że wytworzona ilość ciepła jest proporcyonalna do wykonanej pracy. Jeden szereg doświadczeń dał następujący rezultat: *ażeby ogrzać jeden kilogram wody na 1° C. czyli ażeby wytworzyć jedną ciepłostkę potrzeba zużyć 426,29 kilogrammetrów pracy.* Inny szereg z dziesięciu doświadczeń, w których zmieniono wagę spadających gwichtów i wysokość spadku, wykazał, że mechaniczny równoważnik jednej ciepłostki jest równy 425,12 kilogrammetrom. Ilość ciepła, wytworzonego przez tarcie wody lub rtęci, jeszcze lepiej dowodzi, że jest ona proporcyonalna do ilości zużytej pracy. Zupełnie to samo wynika z licznych i różnorodnych doświadczeń Hirna, który po części według metody Joule'a, po

części zaś według innych metod, obliczał ilość pracy mechanicznej, jaką potrzeba zużyć do wytworzenia jednostki ciepła. Przez tarcie wody w przyrządzie, podobnym do przyrządu Joule'a, otrzymał on liczbę 432 kilogrammetrów, przez tarcie zaś wody w wązkich rurkach, przez które przepychano ją z wielkiem ciśnieniem, otrzymał liczbę 433 kilogrammetrów. Wreszcie z doświadczeń, w których masy ołowiane ulegały wskutek silnego uderzenia przekształceniu, Hirn otrzymał rezultat, prawie identyczny z tym, jaki znalazł Joule.

W nowszych czasach Rowland przedsięwziął nadzwyczaj staranne badania nad mechanicznym równoważnikiem jednej ciepłostki. Rozbiera on krytycznie prace swych poprzedników, specyalnie prace Joule'a i zwraca uwagę, że niepewność rezultatów, podanych przez niego, wynika z niedokładności pomiarów termometrycznych. Dlatego też rozpoczął on nowe pomiary, posługując się przytem metodą, podobną w zasadzie do metody Joule'a, lecz o wiele potężniejszą, tarcie bowiem wody odbywało się za pośrednictwem koła, obracanego przez maszynę parową. Podług mierzeń Rowlanda, mechaniczny równoważnik jednej ciepłostki wynosi 427 kilogrammetrów.

§ 3. Objaśnienie zjawisk ciepła właściwego i utajonego.

Widzieliśmy tedy w poprzednim paragrafie, że obecnie nauka uważa ciepło jako objaw cząsteczkowego ruchu ciał. Przy wytwarzaniu ciepła przez pracę ruch całych mas, czyli ruch widoczny, przeobraża się w niedostrzegalny ruch najdrobniejszych cząstek. Chociaż bowiem potężny, ruch ten jest tak drobny, przestrzenie zaś po których cząstki krążą, są tak małe, że dostrzedz go nie możemy. Im większa jest siła żywa cząstek danego ciała, tem wyższa jest jego *temperatura*, nie całe jednak ciepło ciału dostarczone obraca się na podniesienie jego temperatury, część bowiem ciepła zużywa się na doprowadzenie cząstek do tego wzajemnego ich względem siebie położenia, w jakim przy danej temperaturze się znajdują, innemi słowy zostaje spotrzebowana na przezwycię-

żenie przyciągania międzycząsteczkowego. W ciałach stałych, gdzie spójność pomiędzy cząsteczkami jest znaczna, wyobrażamy sobie, że są one ożywione ruchem, zachodzącym w pewnych granicach, czyli że drgają około określonego dla każdej z nich położenia. Ponieważ im więcej ciepła udzielamy ciału, tem szybszy jest ruch jego cząsteczek i tem pełniejsze ich drgania, wnosimy z tego, że one starają się bezustannie oddalić się od siebie, ażeby powiększyć objętość ciała. Wiemy, że w ogóle taki w istocie jest skutek ciepła, udzielonego ciału, pod wpływem ogrzewania rozszerza się. A więc spójność i ciepło, są to dwa sprzeczne czynniki, od których zależy czasteczkowa budowa ciała.

Gdy ogrzewamy dane ciało, to każdy nowy dopływ ciepła powoduje coraz większe wzajemne oddalanie się jego cząsteczek, poczem spójność słabnie coraz bardziej, w miarę jak przestrzeń pomiędzy niemi powiększa się. Wreszcie wyswobadzają się o tyle z pod wpływu tej siły, że mogą nietylko drgać w pewnej granicy od średniego swego położenia równowagi, lecz mogą także biedz jedne mimo drugich, a nawet jedne po drugich, odbywają więc ruchy częścią drgające, częścią postępowe. Jakkolwiek spójność nie jest tutaj zupełnie zniweczona, to jednak jest tak osłabiona, że ruchliwość cząsteczek w pewnych kierunkach nie znajduje już żadnej przeszkody. Jest to przejście ze stałego stanu materyi w stan ciekły.

Wewnątrz cieczy ruchowi każdej cząsteczki przeszkadzają otaczające ją sąsiadki, lecz jeżeli wywiążemy w tej masie dość znaczne ciepło, wtedy cząsteczki jeszcze bardziej uwolnią się od wpływu spójności i oddalą się pod postasią pęcherzyków pary. To znów stanowi przejście ze stanu ciekłego w lotny.

Chcąc uzmysłowić słuchaczom swoim wypowiedziane tutaj zasady, Tyndall wykonywa doświadczenie z ciężarem uwieszonym na spiralnej sprężynie, który obraca nad sobą. Przy obracaniu ciężar oddala się od niego i sprężyna prostuje się na pewnej długości; przy szybszym ruchu obrotowym sprężyna jeszcze bardziej się prostuje i zwiększa odległość ciężaru od ręki eksperymentatora. Jeżeli wyobrazimy sobie, że ruch zostanie przyśpieszony o tyle, iż spowoduje pęknięcie sprężyny, wtedy ciężar

odleci po linii stycznej do drogi, jaką opisywał. Przedstawiałby on wtedy cząsteczkę uwolnioną przez ciepło z pod wpływu spójności, wyobrażonej w danym przykładzie przez sprężynę.

Co do ruchu cząsteczkowego w gazach istnieje pogląd popierany przez Joule'a, Kröniga, Maxwella i Clausius'a, że cząsteczki gazów przebiegają przestrzeń po linii prostej, czyli że odbywają ruchy postępowe i biegną dopóki nie uderzą o ścianę naczynia lub o inne cząsteczki, od których się odbijają. Na podstawie teoryi ruchu prostolinijnego nietrudno nawet oznaczyć przecięciową prędkość, z jaką poruszają się cząsteczki rozmaitych gazów; Clausius oznaczył ją dla tlenu, azotu i wodoru, Joule zaś jeszcze w roku 1848 znalazł, że prędkość cząsteczek wodoru wynosi około 2000 metrów na sekundę. Według tej teoryi nadymanie się pęcherza, w połowie wypełnionego powietrzem i umieszczonego pod próżnym kloszem maszyny pneumatycznej (patrz str. 142) stanowi rezultat uderzeń cząsteczek o wewnętrzną ścianę pęcherza. Jeżeli wpuścimy powietrze do klosza, pęcherz znów się skurczy wskutek parcia cząsteczek powietrza na jego zewnętrzną powierzchnię, które tak długo zmuszają zamknięte w pęcherzu cząsteczki do skupiania się, dopóki parcie zewnętrzne i wewnętrzne nie zrównoważą się. Jeżeli zamiast położyć pęcherz pod opróżniony klosz maszyny, wystawimy go na działanie ciepła, wzmożemy przez to energię uderzeń cząsteczek zawartego w nim gazu; będą one tak gwałtownie uderzały o wewnątrzną ścianę pęcherza, że ten również nadmie się. Widzimy tedy, że prężność gazu powiększa się w miarę *powiększania siły żywej jego cząsteczek czyli w miarę podwyższania jego temperatury.*

Jeżeli zamkniemy gaz w naczyniu o nieuginających się ścianach, to jest zachowamy stale pierwotną jego objętość i poczniemy go ogrzewać, to każdemu stopniowi przyrostu temperatury będzie odpowiadał pewien określony przyrost prężności. Doświadczenie pokazuje, że począwszy od 0^0 C., każde ogrzanie na jeden stopień powoduje powiększenie prężności równe $^1/_{273}$ prężności, jaką gaz posiadał przy 0^0; ogrzewając tedy gaz na 273^0, podwajamy jego prężność. Przyjąwszy, że to samo prawo rzą-

dzi poniżej zera, czyli że obniżając temperaturę gazu, począwszy od 0^0, zmniejszamy jego prężność albo energię ruchu cząsteczkowego o $^1/_{273}$ pierwotnej prężności na każdy stopień odjętego ciepła, to gdy obniżymy temperaturę gazu o 273^0, nie pozostanie nic z jego prężności. Ruch cząsteczkowy ustanie zupełnie i ciało będzie bezwzględnie zimne, to jest nie będzie wcale posiadało ciepła; otrzymamy to, co nazwano *bezwzględnem* czyli *absolutnem zerem temperatury.*

Widzieliśmy w poprzednim paragrafie, że w miarę znikania energii możliwej czyli potencyalnej ujawnia się energia żywa albo cynetyczna i że suma obu tych energij we wszechświecie jest stała. Jak nie można stworzyć, ani zniszczyć materyi, tak nie można stworzyć ani zniszczyć energii, wszystkie bowiem zjawiska polegają jedynie na przeobrażaniu się jednej postaci energii w drugą. Gdy podnosimy ręką ciężar, wykonywamy mechaniczną pracę, lecz zużywamy w innej formie równoważną ilość energii, a jak zobaczymy następnie, energią tą w danym razie jest ciepło. To samo miałoby miejsce, gdybyśmy ciężar podnieśli za pomocą parowej maszyny; w tej ostatniej zużyłaby się pewna ilość ciepła, równoważna wykonanej pracy. Im większa jest siła ciężkości, przyciągająca ów ciężar ku ziemi, tem więcej zużywa się ciepła przy podnoszeniu go, albowiem im silniejsze jest przyciąganie, tem więcej potrzeba energii, ażeby je przezwyciężyć, podobnie jak im cięższe ciało spada na ziemię, tem większa ilość ciepła powstaje.

Przenieśmy obecnie te pojęcia od wielkich mas do nieskończenie małych, a mianowicie do najdrobniejszych cząsteczek ciał. Wywierają one na siebie wzajemnie olbrzymie przyciąganie i chcąc oddalić je od siebie, to jest chcąc powiększyć przestrzenie międzycząsteczkowe w ciele stałem lub ciekłem tak, ażeby ono znacznie powiększyło swą objętość, potrzebaby zużyć nader wielką mechaniczną siłę. Otóż ciepło jest w stanie wykonać to, czemu nie podoła mechaniczna siła, zastosowana w zwykły sposób. Wiemy, że ciało pod wpływem ogrzewania rozszerza się, rozszerzanie to zaś o tyle tylko ma miejsce, o ile zostało przezwyciężone przyciąganie międzycząsteczkowe. Ponieważ zaś przyciąganie

to, jak powiedzieliśmy, jest olbrzymie, więc i ilość ciepła, potrzebna do jego przezwyciężenia, musi też być nader wielka.

Wspomnieliśmy już wyżej, że nie wszystko ciepło udzielone ciału obraca się na podniesienie jego temperatury, część bowiem zużywa się na nadanie cząsteczkom nowego położenia i ta część ginie jako ciepło. Otóż zbadajmy nieco bliżej to zjawisko. Oddzielanie cząsteczek ciała ma się w danym razie do ich wzajemnego przyciągania zupełnie tak samo, jak podnoszenie ciężaru do siły ciężkości, rezultatem bowiem obu zjawisk jest utrata ciepła. Przypuśćmy, powiada Tyndall, że zużywając pewną ilość siły przy podnoszeniu ciężaru, rozdzieliliśmy ją na dwie części, z których jedną obracamy na podnoszenie go, drugą zaś na to, ażeby podczas wznoszenia wprawiać go w coraz szybszy ruch wahadłowy. Byłoby to zupełnie analogiczne do udzielania ciepła danemu ciału: cząsteczki jego oddalają się od siebie, lecz oddalając się drgają ze wzrastającą prędkością. Ciepło zatem, udzielone ciału, rozpada się na dwie części: jedna przeobraża się w energię możliwą cząsteczek, druga zaś powiększa ich siłę żywą i ta ostatnia jedynie daje się odczuć za pomocą termometru. Ta część ciepła, która zużywa się na nadanie cząstkom nowego położenia wykonywa tak zwaną *pracę wewnętrzną*; gdy zaś ciało oziębia się, odzyskuje siły przezwyciężone przy ogrzewaniu, ciepło zaś zużyte na odsunięcie cząsteczek ujawnia się napowrót przy ich zbliżeniu.

Wiadomo z chemii, że jeżeli wagę jednego atomu wodoru przyjmiemy za 1, to waga jednego atomu tlenu równa 16, jednego atomu azotu 14 i t. d. Inaczej mówiąc na gram wodoru idzie 16 razy więcej atomów, niż na gram tlenu, 14 zaś razy więcej, niż na gram azotu. Otóż doświadczenia Dulong'a i Petit'a oraz badania Regnault'a i Neumann'a, doprowadziły do odkrycia prawa, że *atomy ciał prostych, cięższe lub lżejsze, posiadają przy jednakowej temperaturze jednakową siłę żywą, objawiającą się jako ciepło.* Ponieważ siła żywa poruszającego się ciała zależy od jego masy i jego prędkości, wynika z tego, że atomy lżejsze wynagradzają brak masy większą prędkością ruchu. Przy tej samej więc temperaturze atom wodoru posiada tę samę siłę żywą

co atom tlenu lub atom azotu, ponieważ jednak gram wodoru zawiera np. 16 razy więcej atomów, niż gram tlenu, musi więc przy tej samej temperaturze zawierać także 16 razy więcej ciepła. Wynika z tego, że chcąc podnieść temperaturę grama wodoru o pewną liczbę stopni, potrzeba 16 razy więcej ciepła, niż do podniesienia w jednakowych warunkach temperatury grama tlenu o taką samą ilość stopni. Naodwrót także obniżając temperaturę grama wodoru o pewną liczbę stopni pozbawiamy go 16 razy tyle ciepła, co przy obniżaniu o taką samą liczbę stopni temperatury grama tlenu.

W gazach, jak np. w tlenie i wodorze, gdzie przyciąganie międzycząsteczkowe stawia bardzo słaby opór, praca wewnętrzna jest prawie nieznaczna. Lecz w ciałach stałych i w cieczach, oprócz różnicy w liczbie atomów, zawartych w danej jednostce wagowej, mamy jeszcze różnicę w cieple, zużytem na pracę wewnętrzną.

W obec wyłożonych tutaj zasad stają się zupełnie jasne różnice w cieple właściwem rozmaitych ciał (porównaj str. 781). Czytelnik przypomina sobie, że jeżeli weźmiemy *równe* ciężary rozmaitych ciał, ogrzejemy je na 100° i następnie oznaczymy dokładnie ilość ciepła, jaką każde z nich oddaje przy oziębieniu od 100° do 0°, przekonamy się, że ilość ta dla każdego ciała będzie inna. Zwolennicy materyalnej teoryi ciepła różnicę tych liczb tłomaczyli twierdząc, że jedno ciało posiada większy zapas cieplika, aniżeli drugie. Ze stanowiska zaś dynamicznej teoryi, różnice te objaśniamy niejednakową pracą wewnętrzną, wykonaną przez dostarczone ciału ciepło oraz niejednakową wagę atomową ciał. Ciepło właściwe bowiem jest tem większe, im mniejsza jest waga atomowa i naodwrót tak, że *iloczyn z ciepła właściwego przez wagę atomową jest ilością stałą* dla wszystkich prawie ciał. Zasada ta nosi w nauce nazwę prawa Dulong'a i Petit'a. Objaśnia ono i potwierdza powyższe przypuszczenie, że lżejsze atomy wynagradzają prędkością ruchu to, czego brak im na masie.

Widzieliśmy, że ciało stałe, ogrzane dostatecznie, przechodzi w stan ciekły, ciecz zaś, dostatecznie ogrzana przechodz

w stan lotny. Wiemy dalej, że np. temperatura topniejącego lodu i wrzącej wody jest stała, bez względu na to, czy silniej lub słabiej je ogrzewamy. Lecz przypominamy sobie, że aby stopić daną ilość lodu, zużywamy tyle ciepła, wiele potrzeba go do podniesienia temperatury takiej samej ilości wody o 79,4° C. Tak samo chcąc zamienić kilogram wody o temperaturze 100° w kilogram pary o takiej samej temperaturze, należy zużyć 537,2 razy tyle ciepła, wiele potrzeba go do podniesienia o 1° temperatury kilograma wody. Liczba 79,4° C. przedstawia tak zwane ciepło utajone wody, liczba zaś 537,2° C. ciepło utajone pary wodnej. Nazwa *utajone* pochodzi właściwie ztąd, że zwolennicy materyalnej teoryi widząc, iż ciepło dodane do topniejącego lodu i wrzącej wody nie ujawnia się na termometrze, przypuszczali, iż ono się utaja. Według ich mniemania ów cieplik krył się w jakiś niezrozumiały sposób w międzycząsteczkowych przestrzeniach wody i pary wodnej. Tymczasem dynamiczna teorya twierdzi, że ciepło zużyte do stopienia lodu przeobraża się w energię możliwą cząsteczek, wykonywa ono bowiem pracę, podobną do podnoszenia ciężarów. Przy zamianie wody w parę, ciepło również zużywa się na oddzielenie cząsteczek, nadając im jeszcze większą ilość energii możliwej. Jeżeli odejmiemy parze udzielone poprzednio ciepło, para skropli się, ponieważ jednak przytem cząsteczki jej uderzają jedne o drugie z pewną siłą żywą, równą tej, jaką zużyto do ich oddzielenia, ujawnia się napowrót cała ilość ciepła utajonego przy przejściu wody w parę. Przejście ze stanu stałego w ciekły jest rodzajem pracy wewnętrznej, która polega na odpowiedniem ułożeniu cząsteczek ciała, różnem od poprzedniego; przejście ze stanu ciekłego w lotny także przeważnie zasadza się na wewnętrznej pracy, należy jednak dodać tutaj pracę zewnętrzną, zużytą na odpychanie cząsteczek powietrza w chwili, gdy ciecz staje się parą.

Staraliśmy się tedy objaśnić czytelnikowi objawy ciepła właściwego i ciepła utajonego tak, jak je obecnie nauka pojmuje. Zatrzymamy się jeszcze chwilkę nad promieniowaniem i pochłanianiem ciepła. Początkiem promieniowania są drgania naj-

drobniejszych cząsteczek materyi, które przejmuje eter i rozprzestrzenia w kształcie fal. Oczywiście, że drgania wywołane w eterze zależą od własności drgających cząsteczek: jedne np. mogą być bardziej ruchliwe, aniżeli drugie tak, że możemy przyjąć, iż cząsteczki rozmaitych ogrzanych ciał powodują niejednakowe drgania eteru. Niektóre z nich udzielają mu więcej ruchu, aniżeli inne, to znaczy, że jedne ciała promieniują silniej od drugich, albowiem jak powiedzieliśmy *promieniowanie jest to udzielanie ruchu pojedyńczych cząsteczek ogrzanego ciała eterowi, w którym one są pogrążone i w którym ten ruch się rozchodzi.* Jeżeli dodamy, że z tego samego punktu rozpatrywane *pochłanianie ciepła jest udzielaniem ruchu eteru cząsteczkom ciała*, to nie trudno nam już będzie zrozumieć opisany w jednym z poprzednich rozdziałów stosunek pomiędzy własnością ciał pochłaniania i promieniowania ciepła, polegający na tem, że ciała silnie promieniujące, silnie także pochłaniają, te zaś, które słabo promieniują, pochłaniają też mało. Jeżeli bowiem dane ciało posiada w wysokim stopniu własność pochłaniania przenikających przez nie fal eteru, czyli innemi słowy, jeżeli cząsteczki tego ciała są tak nastrojone, że mogą przejmować ruch ten w znacznej mierze, to naodwrót także, gdy są one już w ruch ten wprawione, mogą go obficie udzielać eterowi.

Widzieliśmy w księdze o świetle, że niektóre ciała są przezroczyste, to znaczy, że fale świetlne przenikają przez nie, nie udzielając im ruchu, który je ożywia. Wiemy dalej, że w ciałach zabarwionych pewne fale ulegają pochłonięciu, te zaś, które nadają barwę ciału, przechodzą swobodnie. Lecz własność przepuszczania fal pewnej długości nie pociąga za sobą koniecznie własności przepuszczania fal o innej długości, czyli inaczej przezroczystość dla światła nie zawsze chodzi w parze z przezroczystością dla ciepła, albo z przecieplnością. W istocie doświadczenia, jak widzieliśmy, w zupełności potwierdzają ten wniosek.

§ 4. Słońce jako źródło ciepła. Palenie.

Najważniejszem źródłem ciepła dla ziemi jest słońce. John Herschell na przylądku Dobrej Nadziei i Pouillet w Paryżu oznaczali natężenie promieni słonecznych, padających na ziemię. Pouillet posługiwał się do tego przyrządem, nazwanym przez niego *pyrheliometrem* (fig. 479). Promienie słoneczne padają najprzód

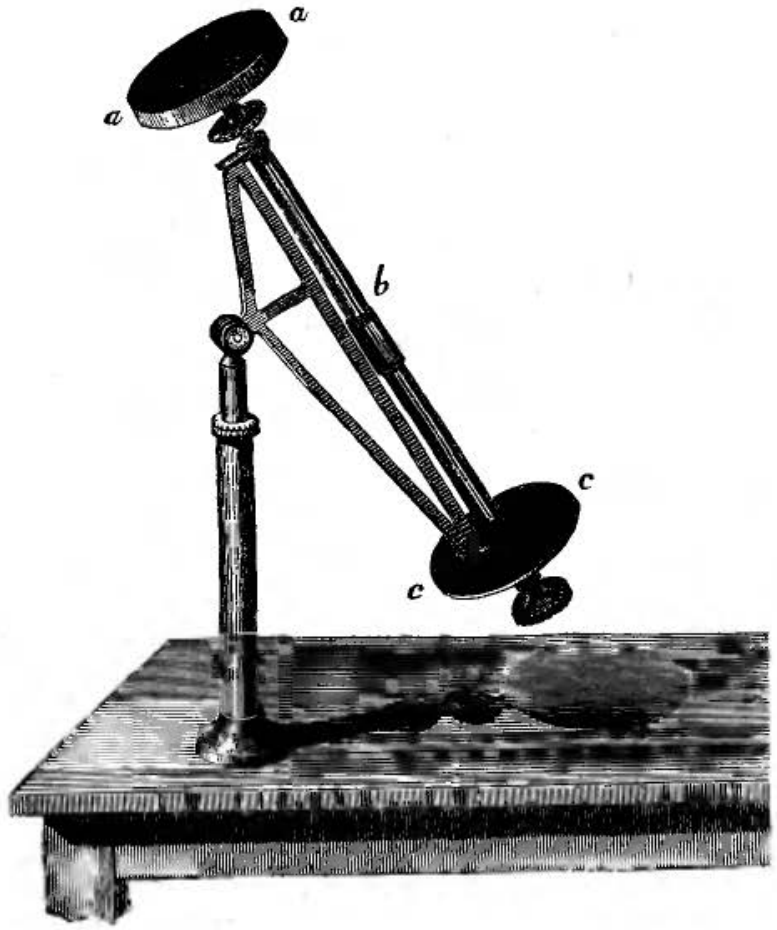


Fig. 479. Pyrheliometr Pouillet'a.

na poczernioną pokrywę bardzo płaskiego naczynia walcowatego *aa* z cienkiej blachy srebrnej, napełnionego wodą. W wodzie zanurzony jest zbiornik termometru *b*, którego rurka, przechodząca przez korek w dnie naczynia, otoczona jest mosiężnym rękawem ze szczeliną, pozwalającą odczytywać wskazówki termometru. Na drugim końcu rękawa znajduje się tarcza *cc*, któ-

rej średnica jest dokładnie równa średnicy walcowatego naczynia; tarcza ta pozwala wiedzieć, kiedy mianowicie promienie słoneczne padają akurat prostopadle na poczernioną powierzchnię naczynia *aa*, wtedy bowiem cień od tego ostatniego pokrywa dokładnie tarczę. Rozpoczynając spostrzeżenia, nie wystawia się przyrządu odrazu na działanie słońca, ale obraca go na pięć minut w przeciwną stronę horyzontu, niezasłoniętą obłokami, a to dlatego, ażeby wypromieniował swoje własne ciepło i oznacza następnie spowodowane przez to obniżenie słupa rtęci w termometrze. Dopiero wtedy zwraca się poczernioną powierzchnię walca ku słońcu i nastawia tak, ażeby promienie słoneczne padały na nią prostopadle. W tym stanie utrzymuje się przyrząd przez pięć minut i oznacza podwyższenie temperatury. Wreszcie odwraca się powtórnie przyrząd od słońca, pozwala mu promieniować przez pięć minut i oznacza znów obniżenie słupa rtęci w termometrze. Ponieważ przez cały czas kiedy przyrząd otrzymuje promienie słoneczne, poczerniona jego powierzchnia również promieniuje w przestrzeń, to podniesienie słupa termometrycznego nie odpowiada właściwie całkowitej ilości ciepła, jaką walec otrzymuje od słońca. Dla określenia więc istotnej siły ogrzewającej słońca, należy do liczby wskazanej podniesieniem temperatury przyrządu, dodać ilość straconą wskutek promieniowania, którą to ilość oblicza się osobno. Ponieważ wielkość powierzchni, na którą padają promienie słoneczne, również jak i ilość wody, zawartej w naczyniu, są znane, to na mocy podwyższenia temperatury tej cieczy, można oznaczyć działanie ciepła słonecznego na pewnej powierzchni.

Podobne obserwacye robiono w różnych porach dnia, poczynając od południa, kiedy promienie słoneczne przebywały najmniej grubą warstwę atmosfery ziemskiej i kończąc o szóstej wieczorem, kiedy przebywały najgrubszą warstwę. Z doświadczeń tych okazało się, że natężenie ciepła słonecznego zmniejsza się w miarę jak wzrasta grubość atmosfery, przez którą przechodzą promienie słoneczne. Głównym czynnikiem pochłaniania jest para wodna w atmosferze, a nie samo powietrze. Jeżeli uwzględnimy całą półkulę ziemską, obróconą ku słońcu, to ilość

ciepła, zatrzymanego przez powłokę atmosferyczną, wynosi $^4/_{10}$ całkowitego promieniowania. Gdyby atmosfera ziemska znikła, oświecona półkula ziemi otrzymywałaby prawie dwa razy tyle ciepła, co obecnie. Gdyby cała ilość słonecznego ciepła, ogrzewającego ziemię w przeciągu roku, była równomiernie rozdzielona na całej jej powierzchni, mogłaby stopić okrywającą ją wokoło warstwę lodu, trzydzieści kilka metrów grubą, lub też podnieść temperaturę oceanu słodkiej wody, mającego piętnaście mil geograficznych głębokości, od zera aż do punktu wrzenia. Oprócz tego obliczono, że ilość ciepła, jaką ziemia otrzymuje, jest zaledwie $^1/_{2300000000}$ całkowitego promieniowania słońca. Ilość ciepła, jaką słońce promieniuje w przeciągu godziny, jest równa ilości jaka powstałaby ze spalenia warstwy węgla przeszło trzy metry grubej, otaczającej wokoło powierzchnię słońca.

Ilość więc ciepła, jaką słońce traci od czasów nieskończenie dalekich, jest olbrzymia, a jednak nie zdołano w ciągu historycznego istnienia ludzkości odkryć najmniejszej zmiany w jego promieniowaniu, świeci ono i ogrzewa jak niegdyś świeciło i ogrzewało. W jaki sposób wyrównywa się ta coroczna strata? Wiemy, jakie istnieje pokrewieństwo pod względem składu chemicznego ziemi i słońca, lecz gdybyśmy chcieli uważać słońce jako ognisko, różniące się od ziemskich ognisk tylko wielkością i natężeniem, to jakiż byłby tem materyał palny, któryby był w stanie podtrzymywać takie ognisko? Żadna ze znanych nam substancyj ziemskich nie mogłaby odpowiadać temu zadaniu, gdyż chemiczne działanie ich byłoby za słabe, a zużycie zbyt prędkie. Gdyby słońce było masą palącego się węgla i gdyby otrzymywało tlen w ilości potrzebnej do wytwarzania olbrzymiego ciepła, jakie obecnie wysyła, to i wówczas spaliłoby się w przeciągu 5000 lat.

Ponieważ słońce obraca się wokoło swej osi, przypuszczano, że tarcie powierzchni słonecznej o cokolwiekbądź mogłoby wytwarzać ciepło i światło. Jest to nieprawdopodobne, gdyż przypuszczając nawet istnienie jakiegoś hamulca, który tworzy to tarcie, to z obliczenia wynika, że gdyby nawet cała siła obrotowa zamieniała się w ciepło, otrzymalibyśmy mniej-

szą jego ilość, niż ta jaką słońce wysyła w przeciągu dwóch stuleci.

Mayer, Waterston, Thomson głosili inną teoryę, a mianowicie tak zwaną meteoryczną teoryę słońca. Oprócz komet, planet i księżyców istnieje jeszcze nieskończona ilość małych ciał niebieskich czyli asteroidów, które również krążą po eliptycznych drogach wokoło słońca. Gdy zaś znajdą się w pobliżu ziemi i wskutek zetknięcia z naszą atmosferą rozpalają od tarcia, wtedy ukazują się nam pod postacią meteorów i gwiazd spadających. Można przypuścić, że w przeciągu roku spadają na ziemię w setkach i tysiącach milionów, ilość ta jednak stanowi jedynie nieskończenie małą część całej masy meteorów, krążących wokoło słońca.

Łatwo obliczyć największą i najmniejszą prędkość, jaką przyciąganie słoneczne udziela masie asteroidu, krążącego wokoło. Otóż krańcowa prędkość w pierwszym razie, w chwili gdy ciało uderzałoby o słońce, wynosiłaby 390 mil na sekundę, w drugim zaś razie 260 mil. Asteroid, uderzający o słońce z maximalną prędkością, rozwinąłby 9000 razy tyle ciepła, co spalenie równoważnej masy węgla, uderzenie zaś z minimalną prędkością, wytworzyłoby tyle ciepła, co spalenie około 4000 odpowiednich mas węgla. Kwestya zaś, czy substancye te, uderzające o słońce, są palne lub nie, małe ma znaczenie, gdyż ich spalenie nie o wiele powiększyłoby tę niezmierną ilość ciepła, jaka wywiązałaby się wskutek mechanicznego starcia.

Meteoryczna teorya objaśnia zatem czynnik, wynagradzający ciągłą utratę siły żywej słońca i utrzymujący temperaturę jego powierzchni w stopniu nieskończenie wyższym od temperatury ziemskich ognisk. Uderzanie asteroidów stanowi według tej teoryi przyczynę ciepła i światła słonecznego. Jak powiedzieliśmy, teoryę tę ogłosił Mayer (1848) w pracy o mechanice nieba; w pięć lat później Waterston wystąpił z podobną teoryą, którą naszkicował niezależnie od niemieckiego uczonego. Wreszcie w roku 1854 W. Thomson rozwinął dalej te poglądy. Wkrótce jednak potem (1862) Thomson przyszedł ostatecznie do przekonania, że chociaż słońce powstało być może wskutek nagroma-

dzenia się owych meteorów, co prawdopodobnie zaopatrzyło je w dostateczną ilość ciepła na 20000000 lat przy obecnem promieniowaniu, to jednak owo ciepło nie jest już teraz podtrzymywane przez podobne mechaniczne nagromadzanie się meteorycznej masy, powolne zaś oziębianie się słońca i stałość w jego promieniowaniu należy przypisać wysokiemu ciepłu właściwemu materyi słonecznej.

Helmholtz, znakomity niemiecki fizyolog, fizyk i matematyk wypowiedział inną hypotezę powstawania i istnienia ciepła słonecznego. Opierając się na hypotezie Laplace'a i przyjmując, że mgławа materya kosmiczna znajdowała się pierwotnie w stanie nadzwyczajnego rozrzedzenia, wylicza on ilość ciepła, jaka powstała przez zgęszczenie się tej materyi w określone ciała układu słonecznego. Jeżeli przyjmiemy, że ciepło właściwe zgęszczającej się masy było takie same, jak dla wody, to ciepło wytworzone przy owem zgęszczeniu mogło podnieść temperaturę tej masy o 28000000° C. Większa część tego ciepła rozeszła się drogą promieniowania po przestrzeni wszechświata.

Gdyby cały nasz uklad słoneczny składał się z czystego węgla i gdyby się zapalił, to ciepło wytworzone przytem wynosiłobyzaledwie $^1/_{3500}$ część ciepła, wyzwolonego wskutek zgęszczenia się mgławej materyi, z której powstały ciała niebieskie tego układu. Helmholtz sądzi, że to zgęszczanie się trwa ustawicznie i że cząstki materyi, znajdujące się na powierzchni słońca, zbliżają się bezustannie do środka, wywiązując tym sposobem ciepło. Według jego obliczeń każde zmniejszenie się średnicy słońca o $^1/_{10000}$ jej obecnej długości wywiązałoby tyle ciepła, że byłoby w stanie wynagrodzić stratę z powodu promieniowania w przeciągu 2000 lat. Stopniowe zaś zgęszczanie się materyi słonecznej od gęstości jej obecnej do gęstości ziemi wytworzyłoby ilość ciepła, która mogłaby wynagrodzić promieniowanie słońca w przeciągu 17000000 lat.

„Chociaż, powiada Helmholtz, nie zdołalibyśmy nigdy wymierzyć tych nieskończonych okresów czasu, jakie upłynąć muszą, zanim zajdzie jakakolwiek zmiana w obecnych warunkach, to jednak na zasadzie niespożytych praw mechaniki, musimy

wywnioskować, że zasoby te mogą się tylko zmniejszać i że w końcu wyczerpią się ostatecznie. Niezmienność jednak przyrody nieorganicznej zdaje się być zapewniona na długie wieki tak, że nie mamy potrzeby obawiać się ani o nasz los, ani o los naszych najdalszych potomków."

Jakkolwiek słońce stanowi najpotężniejsze źródło ciepła dla ziemi, nie jest ono jednak dla nas dosyć wygodne, gdyż nie możemy zeń korzystać podług woli naszej i właśnie wtedy, gdy ono się chowa lub gdy działanie jego słabnie, czujemy najbardziej potrzebę ciepła. Oprócz tego, jedynie za pomocą kosztownych przyrządów można ciepło słoneczne zebrać czyli skoncentrować tak, ażeby wywołało bardzo znaczne podwyższenie temperatury, bezpośredni zaś wpływ jego na ziemię jest — względnie do potrzeb jej mieszkańców — dosyć słaby. Z tego powodu człowiek starał się wynaleść inne, sztuczne środki, za pomocą których wytwarza sobie sam ciepło, pozwalające mu zaspokoić najważniejsze wymagania jego życia. Takiem źródłem ciepła jest głównie palenie, to jest proces, przy ktorym ciała łączą się z tlenem i któremu towarzyszy wydzielanie się światła i ciepła. Ażeby ciało paliło się w swobodnem powietrzu lub w atmosferze tlenu, należy koniecznie jeden z jego punktów doprowadzić przedtem do wyższej temperatury, innemi słowy należy ciało zapalić. Gdy proces palenia raz się rozpoczął, ciepło wytworzone przytem rozchodzi się dalej i podtrzymuje go, dopóki gaz, pomagający spaleniu, nie zużyje się całkowicie, albo dopóki ciało palące się nie zniknie. W podobny sposób otrzymujemy ogień w piecach, oraz płomienie świec i lamp, wiemy zaś dobrze z codziennego doświadczenia, że te źródła ciepła płyną dla nas tylko tak długo, dopóki dostarczamy im dwóch niezbędnych do palenia elementów.

Jeżeli palenie odbywa się w atmosferze czystego tlenu, wtedy jest daleko energiczniejsze, aniżeli w czystem powietrzu. Osadźmy brylant, będący jak wiadomo czystym węglem, w pętlicy platynowego drutu, rozpalmy go do czerwoności i zanurzmy w kloszu, napełnionym tlenem. Zobaczymy, że brylant bę-

dzie płonął i błyszczał w tlenie białem, jasnem światłem (fig. 480).

Fig. 480. Spalenie brylantu w atmosferze tlenu.

Zjawisko to należy objaśnić zupełnie w taki sam sposób, w jaki pojmujemy spadanie meteorów na powierzchnię słońca. Należy, powiada Tyndall, wyobrazić sobie, że atomy tlenu uderzają ze wszystkich stron o brylant. Przyciąga on je siłą chemicznego powinowactwa, która w istocie nie jest niczem innem, jak tylko siłą przyciągania; atom tlenu, uderzając o powierzchnię brylantu, traci swój ruch postępowy i przybiera inny rodzaj ruchu, zwany ciepłem. Ciepło to jest tak potężne, przyciąganie zaś w odległościach międzycząsteczkowych tak wielkie, że brylant rozpala się do białości, powstały zaś przy tem związek z atomów węgla i atomów tlenu unosi się pod postacią gazu, zwanego kwasem węglanym.

Zwykły nasz gaz oświetlający należy do grupy węglowodorów, składa się bowiem z węgla i wodoru, połączonych ze sobą w pewnym określonym stosunku. Jeżeli spalenie tego gazu nie jest zupełne, wtedy widzimy wydobywające się z niego sadze, które nie są niczem innem jak drobno sproszkowanym węglem. Jeżeli tylko powierzchnia gazu styka się z tlenem powietrza, to gdy ogrzejemy to miejsce, przyciąganie pomiędzy atomami tlenu i atomami węgla i wodoru wzmoże się do tego stopnia, że gaz wybuchnie płomieniem. Najprzód tlen łączy się z wodorem i oswobadza węgiel, którego cząstki, rozproszone w palącym się wodorze, żarzą się i rozpalają do białości; wiemy, że tym właśnie cząstkom zawdzięczamy światło płomienia. Po pewnym czasie węgiel również łączy się z tlenem i wytwarza kwas węglany.

Płomień świecy jest w zasadzie tem samem co i płomień palącego się gazu. Od rozpalonego knota tłuszcz u dołu płomienia topi się, powstała zaś ciecz, dzięki włoskowatości, podnosi się wzdłuż knota, gdzie zamienia się w gazowy węglowodór, który pali się tak samo, jak zwykły gaz. Płomień przedstawia trzy różne warstwy (fig. 481), a mianowicie: część ciemną, która otacza knot i zawiera drobniutkie cząstki nie rozżarzonego węgla; temperatura nie jest tutaj bardzo wysoka. Część ciemną otacza z kolei warstwa jasna, będąca siedliskiem światła i wreszcie na zewnątrz widzimy cienką warstwę, słabo zabarwioną, o żółtym wierzchołku i niebieskawej podstawie; ta ostatnia właśnie część stanowi siedlisko ciepła.

Fig. 481. Płomień świecy.

Obecność wolnych cząsteczek węgla w płomieniu przypuszcza brak dostatecznej ilości tlenu, albowiem gdyby w chwili, kiedy się wyswobadzają ze związku z wodorem, było tlenu podostatkiem, nie pozostawałyby wolne ani minuty. Ponieważ zaś światło lamp naszych i świec zawdzięczamy jedynie cząsteczkom węgla, to przy znacznym dopływie tlenu traci ono na blasku. Możemy nawet zniszczyć światło płomienia gazowego, jeżeli do rurki, z której wydobywa się gaz, wprowadzimy tyle powietrza, że tlen będzie dochodził aż do wnętrza płomienia. Bunsen wynalazł lampkę gazową, za pomocą której można przeszkodzić wytwarzaniu się światła przez gwałtowne spalenie stałych cząsteczek węgla; taki bezświetlny płomień posiada za to daleko wyższą temperaturę, aniżeli płomień zwykły. Natężenie więc światła gazu mierzy się ilością powietrza, jakiej potrzeba, ażeby przeszkodzić osiadaniu stałych cząsteczek węgla; im gaz jest bogatszy w te cząsteczki, tem więcej potrzeba tlenu do ich spalenia i osłabienia światła. W wietrzny wieczór można się o tem przekonać na ulicach miasta, oświetlonych gazem; dzięki silnemu prądowi powietrza tlen dostaje się do środka płomieni latarni i białe ich światło zmienia w blado niebieskie. Ró-

wnież daje się to widzieć podczas illuminacyj, kiedy najczęściej płomienie nie są osłonięte.

W roku 1859 Tyndall, podróżując w Alpach, przedsięwziął wspólnie z Franklandem badania nad wpływem wysokości na prędkość spalania. W dolinie Chamounix zapalili oni na godzinę starannie przedtem zważone świece, następnie po zgaszeniu zważyli je powtórnie, ażeby się dowiedzieć, wiele straciły na wadze i wyruszyli na Mont Blanc. Na szczycie góry zapalili je znów na godzinę, pod namiotem, który je chronił od zbyt silnych prądów powietrza; tutaj płomienie były tak blade i słabe, że zdawały się tylko słabem odbiciem płomieni, jakie te same świece dawały w dolinie. Lecz gdy wrócili na dół i zważyli świece, przekonali się, że godzinne palenie na górze zniszczyło taką samą ilość stearyny, co i godzinne palenie na dole, czyli że było ono równie silne na szczycie, jak i u podnóża góry, pomimo, że na szczycie światło płomieni było znacznie słabsze. Dziwne to na pozór zjawisko należy przypisać większej ruchliwości powietrza w miejscu górzystem, tam bowiem tlen może łatwiej przenikać do wnętrza płomieni i niszczyć ich światło.

Każdy człowiek i zwierzę, stanowi źródło ciepła, jak tego dowodzi fakt, że większość istot żyjących posiada temperaturę ciała prawie zupełnie niezależną od temperatury otoczenia i że wszystkie posiadają temperaturę wyższą, aniżeli środek, w którym żyją. Ciało zwierzęce na całej swej powierzchni styka się ze środkiem zimniejszym, któremu częścią przez promieniowanie, częścią przez przewodnictwo, oddaje swe ciepło. Oprócz tego, powierzchnia skóry jest zawsze pokryta mniejszą lub większą ilością wilgoci, którą paruje i pochłania ciepło. Trudno ściśle określić jak wielką jest ilość tego ciepła, musi ona jednak być bardzo znaczna, skoro np. ciało ludzkie, którego powierzchnia wynosi średnio półtora kwadratowych metrów, styka się z otoczeniem o średniej temperaturze 20°, a więc o 17° niższej od jego własnej temperatury.

Dalej w organizmie zwierzęcym ciepło jego zużywa się na ogrzanie przyjętych pokarmów i napojów oraz wdychanego powietrza do temperatury ciała. Wreszcie względnie znaczna ilość

ciepła zostaje pochłonięta przy wytwarzaniu pary wodnej, wydalanej przez zwierzę przy wydychaniu. Helmholtz obliczył, że człowiek, ważący 82 kilogramy, oddaje w przeciągu 24 godzin średnio 2700000 jednostek ciepła.

Źródłem tego ciepła są bezwątpienia najrozmaitsze procesy chemiczne, odbywające się wewnątrz ludzkiego i zwierzęcego organizmu. Pokarmy doń wprowadzane składają się po większej części ze związków węgla, wodoru, tlenu i azotu oraz z niewielkich ilości substancyj nieorganicznych, po wydaleniu zaś z organizmu przedstawiają się pod postacią zupełnie inną. Większa część przetwarza się wewnątrz ciała w mocznik, węglan amonu i t. p., które wydzielają się z moczem, część wydziela się jako kwas węglany, albo jako woda, wreszcie część tylko wychodzi z organizmu nierozłożona lub też nieznacznie zmieniona. Nie możemy tutaj wdawać się w obszerniejszy wykład różnych procesów, jakim ulegają pokarmy i których ostatecznym rezultatem są wymienione tylko co substancye, należy to bowiem do chemii fizyologicznej, nadmienimy jedynie, że wszystkie te procesy stanowią prawdziwe zjawiska spalenia, odbywające sią przy udziale tlenu, wprowadzonego do organizmu przez oddychanie. Są one dosyć skomplikowane, pomimo to ogólna ilość ciepła przez nie wytworzonego daje się z łatwością obliczyć na zasadzie pewnego prawa termochemii. Mianowicie ciepło wytworzone przez proces chemiczny zależy tylko od stanu początkowego i od stanu końcowego, obojętną zaś jest rzeczą, jakiemi były stany pośrednie. Czy spalimy węgiel na kwas węglany bezpośrednio, czy też zamienimy go na tlenek węgla i ten ostatni dopiero spalimy, w obu wypadkach na każdy gram swobodnego węgla wydzieli się 80 jednostek ciepła. Gdy spalamy cynk bezpośrednio na tlenek cynku, otrzymujemy taką samą ilość ciepła, jak przy rozpuszczaniu go w kwasie i strącaniu (za pomocą zasady) pod postacią tlenku cynku. Z prawa tego wynika, że ciepło zwierzęce musi być dokładnie równe ciepłu, wyswobodzonemu przy bezpośredniem spaleniu pokarmów na końcowe produkty procesów fizyologicznych, odbywających się w organizmie. Jak po-

wiedzieliśmy produktami temi, oprócz części nierozłożonych, są głównie: kwas węglany, woda, węglan amonu i mocznik. Uważając ten ostatni jako przekształcony węglan amonu i przyjąwszy, że ilość ciepła wyswobodzonego przy tej przemianie jest nieznaczną, dochodzimy do wniosku, iż ciepło wytworzone w organizmie musi być równe ciepłu, otrzymanemu ze spalenia odpowiedniej ilości pokarmów na kwas węglany, wodę i amoniak.

Słuszności tej teoryi ciepła zwierzęcego można dowieść na drodze doświadczalnej, należy mianowicie oznaczyć najprzód w kalorymetrze ilość ciepła, wytworzoną przez zwierzę i następnie porównać ją z ilością obliczoną w powyższy sposób. Podobne doświadczenia wykonywał Dulong oraz Despretz. Wprowadzali oni różne zwierzęta ciepłokrwiste do miedzianej skrzynki otoczonej wodą, wysłanej wewnątrz plecionką z gałązek wierzby i obserwowali ilość ciepła, wydaloną przez zwierzę w ciągu określonego czasu. Przez skrzynkę przepływał prawidłowy prąd, który doprowadzał niezbędną ilość świeżego powietrza i zabierał lotne produkty oddychania. Produkty te, w danym razie kwas węglany i wodę, zbierano i oznaczano ilościowo. Obliczano następnie ilość ciepła, jaką otrzymanoby przy wytworzeniu takiej samej ilości kwasu węglanego ze swobodnego węgla oraz takiej samej ilości wody ze swobodnego wodoru. Dulong i Despretz sądzili, że ilość ta powinna być równa ilości ciepła, oddanego przez zwierzę, przypuszczenie to jednak jest oczywiście niesłuszne, albowiem ciepło spalenia danego związku nie jest równe sumie ciepła spalenia pierwiastków, w skład jego wchodzących. Stosownie do tego Dulong i Despretrz znaleźli, że obliczona ilość ciepła była różna od ilości zaobserwowanej, pierwszy mianowicie otrzymał liczbę 0,752, drugi zaś 0,811 ciepła zaobserwowanego.

Dla porównania teoryi z doświadczeniem, należy przedewszystkiem oznaczyć eksperymentalnie ilości ciepła, wytworzonego przy spaleniu pokarmów, czego dotychczas jeszcze dostatecznie nie uskuteczniono. [1]).

---

[1]) Wüllner, Physik III.

§ 5. Ogrzewanie mieszkań.

Gdziekolwiek znajdujemy sposobność obserwowania człowieka, stojącego na najniższym szczeblu cywilizacyi, to jest, czy badamy ślady jego działalności przed tysiącami lat, zachowane w głębokościach ziemi, czy też zapoznajemy się z opisów podróżników z obyczajami i sposobem życia narodów, pędzących żywot zdala od wszelkiej kultury, w każdym razie widzimy, że sztuka zdobywania ognia powoduje stanowczy zwrot w jego bycie. Przedtem może on chronić się przed wpływem zmian pogody do swej jaskini, którą dała mu natura albo którą sam z trudem wykopał w ziemi paznogciami lub ostremi kamieniami i może okrywać się surową skórą zwierząt, które zabił najbardziej pierwotną bronią. Również i pożywienia swego, składającego się z owoców, korzonków lub mięsa, złowionych ryb, albo upolowanych zwierząt, nie może on zmienić, lecz zjada je w stanie surowym. Dopiero z wybuchem płomienia, który według greckiego podania pochodzi z dziedziny bogów, otwiera się przed człowiekiem droga, na której wznosi się coraz wyżej. Od tej chwili może on śmiało stawić czoło okrutnej zimie, może w sposób dla siebie odpowiedniejszy przygotowywać swe pożywienie, wyrabiać lepszą broń do walki ze zwierzętami oraz lepsze narzędzia do uprawy roli.

Mało jest miejsc na ziemi, gdzie różnice w temperaturze są tak nieznaczne, że nie przeszkadzają człowiekowi w rozwoju i ujawnianiu jego władz fizycznych i duchowych. Miejsca takie cieszące się wieczną wiosną, są słabo zaludnione, gdyż ciągła jednostajność klimatu nie wywiera, zdaje się, dobroczynnego wpływu na rozwój ludzkości. Z małemi tedy wyjątkami różnica w temperaturze dziennej i nocnej oraz letniej i zimowej daje się dotkliwie we znaki; nawet w pustyni po gwałtownym upale temperatura wraz z zachodem słońca tak się obniża, że woda marźnie. Jeszcze bardziej, aniżeli w gorących krajach, należy w strefie umiarkowanej pamiętać o zimie i korzystać ze sztucznych źródeł ciepła, wreszcie dostęp do okolic zimnych, do których

przenikamy coraz głębiej w miarę postępu cywilizacyi, byłby niemożliwy, gdyby ogień, jak wierny wspólnik, nie towarzyszył człowiekowi.

Wiemy już, że co się tyczy sposobów wytwarzania ognia, *tarcie* stanowi jedyny fizykalny środek pomocniczy, od wieków używany i obecnie jeszcze wyłącznie będący w użyciu. Dzicy do dziś dnia przygotowują sobie ogień przez tarcie dwóch kawałków drzewa, nasi dziadowie uderzali gwałtownie kawałkiem stali o kamień i pod sypiące się przytem iskry podsuwali łatwo zapalne substancye, wreszcie my także pocieramy o chropawą powierzchnię zapałki, specyalnie na drodze chemicznej przygotowane.

Gdy ogień został już rozniecony, pytamy dalej, w jaki sposób należy spalać podtrzymujące go materyały, ażeby wyciągnąć z nich jaknajwiększą korzyść. Najprościej jest umieścić paliwo na ziemi, na swobodnem powietrzu, grzać się przy roznieconem ogniskui gotować przy niem potrawy, sposób taki jednak jest jednocześnie także zbytkownym, gdy dużo ciepła ginie wtedy bez korzyści dla człowieka. Istotny postęp widzimy tam, gdzie ognisko rozkładają w zamkniętej przestrzeni, chroniącej je od wiatru i niepogody i gdzie nie może ono tak silnie promieniować ciepło na wszystkie strony. Tak powstały ogniska w chatach u wpółdzikich narodów; do dziś dnia jeszcze widzimy je u wielu ludów północy i wschodu. Wokoło płomieni, których dym, nie mając wyjścia, napełnia całą izbę, gromadzą się jej mieszkańcy, tutaj grzeją swe skostniałe członki i przygotowują swe pożywienie. Nawet w naszych chatach wieśniaczych spotykamy jeszcze często otwarte kominy, w których, z wielką stratą paliwa, wieśniacy gotują swą strawę.

W wiekach średnich, w całej Europie ogień rozniecano tylko w kominkach, w nowszych zaś czasach użycie ich ogranicza się tylko do krajów południowych, do Francyi i Anglii, która pomimo swego bardziej północnego położenia odznacza się jednostajnością klimatu. W Niemczech zaś oraz w krajach północy kominki całkowicie zastąpione zostały przez piece; spotykamy je

tylko w zamkach i pałacach, gdzie służą bardziej do ozdoby pokoju, niż do ogrzewania.

W gruncie rzeczy piece stanowią tylko zmieniony i ulepszony komin; ognisko jest w nim wysunięte na pokój i otoczone ze wszystkich stron ścianami pieca tak, że jego ciepło udziela się wokoło powietrzu pokoju i może być o wiele lepiej spożytkowane. Piece różnią się bardzo tak pod względem formy, jak i materyału, z którego są zbudowane. Co do ostatniego, to piece z blachy żelaznej lub z żelaza kutego cieszą się jeszcze wielkiem uznaniem, szczególniej u biedniejszej ludności, która sądzi, że wydatek na paliwo jest w tym razie znacznie mniejszy, aniżeli przy innych piecach. W istocie, dzięki wielkiej zdolności przewodnictwa, jaką się odznaczają metale, ciepło przenika bardzo szybko przez ścianę żelaznego pieca i prędko napełnia pokój, z drugiej jednak strony nie należy zapominać, że i oziębienie następuje równie szybko po zgaśnięciu ostatniej iskry w piecu. Żelazne piece tedy przedstawiają korzyść pod względem finansowym, gdy chodzi o szybkie, lecz krótkotrwale ogrzanie przestrzeni. Natomiast połączone są z wielkiemi przykrościami, a nawet z niebezpieczeństwem. Najprzód osuszają one zbyt silnie powietrze, pozbawiając go koniecznej wilgotności, powtóre zaś temperatura w różnych odstępach od pieca przedstawia bardzo znaczne różnice. Doświadczenia wykonane w roku 1868 pod kierunkiem Morin'a pokazały, że na odległości połowy metra od pieca temperatura powietrza wahała się między 50° i 60°, podczas gdy na odległości dwóch metrów dochodziła tylko do 36° lub 39°. Właściwym jednak celem tych doświadczeń było gruntowne zbadanie pewnego zjawiska, którem poprzednio jeszcze zajmowali się Graham, St. Claire-Deville i Troost, a mianowicie występowania tlenku węgla w powietrzu, otaczającem żelazny piec. Wiadomo, że tlenek węgla jest to gaz, który nawet w małych ilościach jest trujący. Na zjawisko to zwrócono uwagę z powodu następującego faktu: W okresie czasu, pomiędzy rokiem 1850 i 1860 Dr. Carret zauważył w niektórych okolicach Francyi szczególną epidemię u dzieci, uczęszczających do szkoły, przyczem zrobił zadziwiające odkrycie, że tylko te dzie-

ci dotknięte były chorobą, które uczyły się w pokojach, ogrzewanych za pomocą żelaznych pieców. Jakkolwiek nie stwierdzono wtedy z pewnością, że sposób ogrzewania stanowił przyczynę choroby, to jednak zjawisko owo dało impuls do analizy powietrza w blizkości żelaznego pieca; analiza ta dała wspomniany rezultat. Według wszelkiego prawdopodobieństwa trujący gaz pochodzi od substancyj, palących się w piecu, oprócz tego przyjmujemy, że żelazo rozgrzane do czerwoności przepuszcza tenże gaz, a nawet być może przyczynia się do jego powstawania. Podług innego poglądu, mniej prawdopodobnego, delikatne pyłki ustawicznie zawieszone w powietrzu, zetknąwszy się z gorącą ścianą pieca, spalają się niedostatecznie i dają początek tlenkowi węgla. Bez względu jednak na przyczynę wspomnianego zjawiska, w istnienie którego wątpić już nie można, należy być bardzo ostrożnym przy użyciu żelaznych pieców.

Wszystkich tych niewygód unika się przy użyciu pieców, zbudowanych z kafli lub z gliny ogniotrwałej i z wierzchu pokrytych porcelaną albo fajansem, wreszcie i pieców żelaznych, lecz wyłożonych wewnątrz kamieniem. Wprawdzie ciepło o wiele wolniej przenika na zewnątrz przez ich ściany, które są gorszemi przewodnikami, z tego samego jednak powodu zachowują one wyższą temperaturę przez czas znacznie dłuższy i nie stanowią przytem przyczyny zjawisk niebezpiecznych dla zdrowia. Jeżeli porównamy piece ze zwykłemi kominkami, przekonamy się, że podczas gdy te ostatnie dają nam zaledwie 12 do 14 proc. całkowitego ciepła, wytworzonego przez spalanie, piece dają nam 85 do 90 proc. Natomiast ustępują one kominkowi pod względem wentylacyi, albowiem w pokoju ogrzewanym przez piec powietrze odnawia się najwyżej co 10 godzin, kominek zaś umożliwia wentylacyę, więcej niż wystarczającą dla zdrowia.

Nie możemy oczywiście wdawać się tutaj w obszerny opis budowy różnych pieców, zatrzymamy się tylko nad jednym ich rodzajem, gdzie ognisko znajduje się na względnie znacznej odległości od mieszkań, które mają być ogrzane. Jedno i to samo ognisko ogrzewa przytem jednocześnie wielką liczbę pokojów,

z niego bowiem, jak ze środkowego punktu, ciepło przez rury rozchodzi się na wszystkie strony i dlatego taki sposób ogrzewania zowie się *centralnym*. Jest on szczególnie korzystny dla gmachów publicznych, jak kościoły, szkoły, sądy i t. p. Rozmaite systemy centralnego ogrzewania różnią się głównie pod względem środka, przeprowadzającego ciepło od ogniska. Niekiedy ogrzane powietrze bezpośrednio bywa wprowadzane do pokojów gmachu albo też przenoszenie ciepła odbywa się za pośrednictwem gorącej wody lub pary wodnej, krążących w rurach.

Przy ogrzewaniu gorącem powietrzem piec znajduje się zwykle w piwnicy gmachu, w miejscu, do którego ciągle przybywa zewnętrzne powietrze, lecz które nie łączy się bezpośrednio z ogniskiem tak, że dym i gazowe produkty spalenia nie mogą doń przenikać. Rura, odprowadzająca gazy te i dym jest w tem miejscu kilkakrotnie zgięta, albo też dzieli się na oddzielne rury, które poczęści leżą poziomo (fig. 482), poczęści zaś biegną pionowo. Urządzenie takie przedstawia tę korzyść, że powiększa powierzchnię ogrzewającą, wskutek czego ciepło otrzymane ze spalenia może być znacznie lepiej wyzyskane.

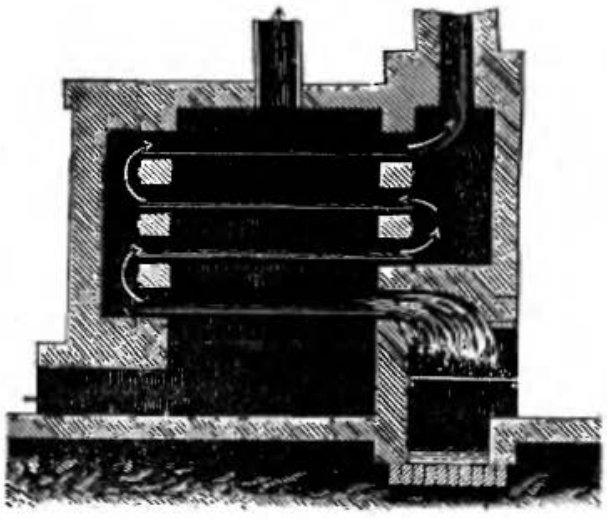


Fig. 482. Piec do ogrzewania powietrzem.

Podczas gdy dym i gazy powstałe ze spalenia uchodzą przez komin, po uprzedniem oddaniu większej części swego ciepła powietrzu kamery ogrzewającej, powietrze to również wznosi się najprzód w rurze głównej, następnie w rurach bocznych, stanowiących jej rozgałęzienia i dostaje się do pokojów przez otwory, które za pomocą klap można zamykać częściowo lub zupełnie. Zależnie od mniejszej lub większej dokładności w urządzeniu, można w ten sposób wyzyskać 60 do 80 proc. cie-

pła, wytworzonego przez spalenie. Powietrze, które przybywa ztamtąd, gdzie znajduje się piec, posiada często temperaturę zbyt wysoką dla naszych mieszkań; w celu obniżenia tej temperatury, a także ułatwienia lepszej wentylacyi, dodaje się jeszcze rury, przez które może przenikać swobodne powietrze.

Za pomocą odpowiednich klap zamykających rury i wentylatory, można utrzymać temperaturę stale na żądanej wysokości oraz wpuszczać do mieszkania potrzebną ilość świeżego powietrza. Co do wydatku na paliwo, to opisany sposób ogrzewania jest również korzystny. Lecz za to przedstawia on pewne złe strony, a mianowicie powietrze w pokoju staje się nadzwyczajnie suchem tak, że należałoby ustawicznie wyparowywać duże ilości wody; oprócz tego prąd powietrzny, przychodzący z piwnic do mieszkania, przynosi ze sobą wiele kurzu i wreszcie nie mamy zupełnej pewności, że prąd ten nie zawiera trującego tlenku węgla, który, podobnie jak przy żelaznych piecach, przenika przez rozpalone rury ogrzewające.

Wszystkich tych niewygód unikamy przy systemie ogrzewania za pomocą gorącej wody. Tutaj powietrze ogrzewa się jednostajnie i umiarkowanie, nigdy nie jest wysuszone, ze strony zaś trujących gazów nie ma żadnego niebezpieczeństwa. Ognisko również znajduje się zwykle w suterynie domu (fig. 483, str. 880); dym i gazy uchodzą przez kanał *A* i komin *B*. Nad ogniskiem widzimy kocioł *C* napełniony wodą; wskutek ogrzania woda rozszerza się, jej ciężar właściwy staje się mniejszy i dlatego wznosi się ona w rurze do zbiornika *D*, ustawionego na jednem z górnych piętr i odgrywającego rolę pieca, który promieniuje ciepło. Ze zbiornika *D* odchodzi rura, prowadząca do podobnego zbiornika *F*, leżącego o piętro niżej i tak dalej. Wreszcie rura, wychodząca z ostatniego najniższego zbiornika *E*, łączy go z dolną połową kotła *C*, przez co woda, która z kotła wypłynęła, ciągle do niego powraca. Prądowanie wody rozpoczyna się natychmiast po ogrzaniu kotła, stopniowo staje się ono coraz żywsze i dochodzi do największego natężenia wtedy, gdy różnica w temperaturze kotła i najwyższego zbiornika jest największa. W zbiorniku tym znajduje się otwór, przez który można cały

aparat napełnić wodą i przez który także powietrze oraz para może ujść, w razie gdy prężność jej wskutek ogrzania staje się zbyt wielka. Do ogrzewania pokojów przyczyniają się nie tylko zbiorniki, lecz także i rury, które je łączą.

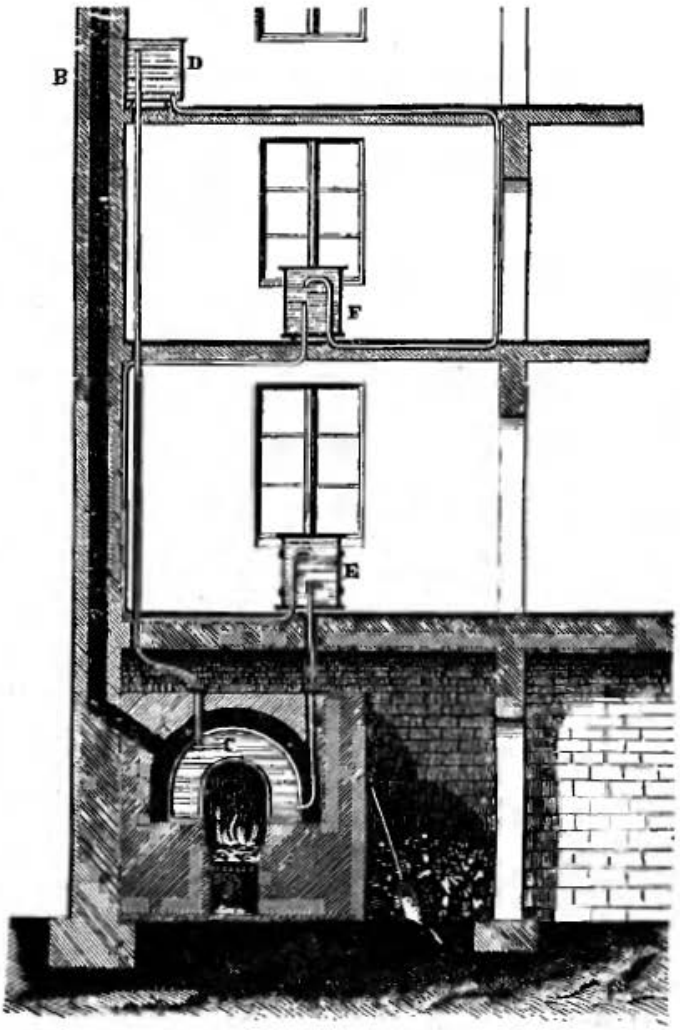


Fig. 483. Ogrzewanie za pomocą gorącej wody.

Opisany system ogrzewania został wynaleziony w ośmnastym wieku przez architekta Bonnemain'a i od tego czasu uległ w ogóle nieznacznym zmianom. Ponieważ przy systemie tym górny zbiornik jest zawsze otwarty, to prężność pary nie może być w nim większa nad ciśnienie jednej atmosfery, a więc temperatura nie może być wyższa nad 100°; dlatego też system ten nosi nazwę systemu o nizkiem ciśnieniu. Istnieje jeszcze drugi podobny, lecz o wysokiem ciśnieniu, przy którem można osiągnąć daleko wyższą temperaturę.

Inżynier Grouvelle wymyślił bardzo korzystny system mieszany. Tutaj para wodna biegnie z kotła przez rury, dochodzące do otwartych naczyń, napełnionych wodą i ustawionych w mieszkaniach, podobnie jak zbiorniki przy systemie ogrzewania za pomocą gorącej wody. W naczyniach tych para ulega skropleniu i oddaje wodzie swe ciepło, która w ten sposób ogrzewa się i stanowi następnie źródło ciepła dla pokoju. Niebezpieczeń-

stwa eksplozyi nie ma tutaj, albowiem prężność pary nigdy nie może znacznie przewyższyć ciśnienia jednej atmosfery.

Wspomnimy jeszcze krótko o jednym systemie ogrzewania, bardzo czystym i wygodnym, lecz który daje się zastosować jedynie w większych miastach i który oprócz tego nie należy do najtańszych. Jest to system ogrzewania za pomocą gazu. Ściśle mówiąc nie należy on do systemów centralnego ogrzewania, albowiem tutaj gaz zastępuje tylko inne palne materyały. Wypływa on z szeregu palników i spala się przy silnym dopływie powietrza. Powietrze powinno dochodzić do środka samego płomienia, wtedy bowiem spalenie odbywa się możliwie szybko i dokładnie, co poznaje się potem, że płomień świeci nader słabo. Taki sposób ogrzewania przedstawia tę złą stronę, że w wysokim stopniu osusza powietrze i dlatego został głównie zastosowany do potrzeb kuchennych i przemysłowych.

Wreszcie poświęcimy jeszcze słów parę samym materyałom palnym, to jest rozpatrzymy je pod względem różnej wartości, jaką one przedstawiają dla nas, co do wydajności ciepła przy spaleniu.

Ze wszystkich palnych substancyj drzewo niewątpliwie najwcześniej było używane; obecnie jeszcze stanowi ono w wielu krajach jedyny materyał palny. Jest on z pewnością najprzyjemniejszy, lecz jednocześnie i najdroższy, wyjąwszy w krajach, pokrytych gęstym lasem i leżących daleko od kopalni węgla. W miarę znikania lasów i powiększania się ludności oraz w miarę wzrastającej potrzeby paliwa do celów przemysłowych, człowiek musiał obejrzeć się za innemi materyałami, które mogłyby odpowiedzieć jego wymaganiom. Dla większości państw, najtańszem paliwem okazał się węgiel, którego bogate pokłady ukryte są w ziemi; dziś najważniejszemi materyałami palnemi są: węgiel kamienny, antracyt, drzewny węgiel ziemny, oraz produkt dystylacyi węgla kamiennego — koks. Do nich można także dodać torf, pod względem swych własności najbardziej zbliżony do drzewa. Wszystkie wymienione substancye pochodzą ze świata roślinnego i urosły bądź w naszych czasach, bądź powstały w odległych, geologicznych epokach. Wiemy, że wy-

dzielanie węgla w roślinach odbywa się tylko pod wpływem promieni słonecznych, z czego wynika, że ostatecznie słońcu zawdzięczamy całe ciepło przez nas otrzymywane.

Podajemy tutaj kilka cyfr, wykazujących względną wartość ogrzewającą najważniejszych palnych materyałów oraz ilość ciepłostek (dużych), jaką kilogram każdego z nich wytwarza przy spaleniu:

Substancya.	Ilość ciepłostek.	Wartość ogrzewająca.
Węgiel	8000	1,00
Antracyt	7500	0,94
Koks	7000	0,88
Drzewny węgiel ziemny	6500	0,81
Węgiel drzewny	6000	0,75
Torf	5000	0,63
Suche drzewo	4000	0,50
Świeże drzewo (z 20% wody)	3000	0,38
Gaz oświetlający	10000	1,25

Widzimy, że gaz oświetlający posiada największą wartość ogrzewającą, po nim dopiero idą: węgiel kamienny, antracyt i koks, najniżej zaś stoi drzewo, szczególniej gdy nie jest dobrze wysuszone. Należy dodać jeszcze, że przy dotychczasowych sposobach ogrzewania, nawet możliwie najlepiej zastosowanych, znaczna ilość ciepła, wytworzonego przez spalenie, ginie dla nas bez najmniejszej korzyści. Na zasadzie statystycznych danych, dostarczonych przez Bureau des longitudes, obliczono że sam Paryż traci tą drogą conajniej 40 milionów franków rocznie. To daje wyobrażenie, jak wielką byłaby ta suma, gdyby ją obliczono dla wszystkich bardziej ucywilizowanych krajów Europy. Widzimy, że tutaj teorya i praktyka mają dla siebie szerokie jeszcze pole; przez użycie racyonalnych metod mogłyby na niem być dokonane ważne ulepszenia, korzystne zarówno dla zdrowia ludzkości, jak i dla jej stanu materyalnego.

ROZDZIAŁ VI.

Maszyny parowe.

§ 1. Najpierwsze obserwacye nad prężnością pary. Maszyna Papin'a, Savery'ego i Newcomen'a. Odkrycia Watt'a.

W starożytnych już czasach znano zjawiska zależne od prężności powietrza; wszak Heron z Aleksandryi wynalazł przyrząd, w którym ścieśnione powietrze, rozszerzając się, wypycha strumień wody. Zdaje się, że tenże fizyk zajmował się także rozszerzalnością pary wodnej, on bowiem prawdopodobnie jest wynalazcą najdawniejszego przyrządu, w którym ruch otrzymuje się za pomocą pary. Przyrząd ten czyli eolipila działa wprawdzie w inny sposób, aniżeli obecne nasze maszyny parowe, nigdy także nie można go było zastosować do celów praktycznych, pomimo to zasługuje na wzmiankę z tego względu, iż jest najstarszym z aparatów, poruszających się pod wpływem prężności pary. Ta ostatnia wytwarza się w kotle, zkąd przechodzi do kuli, zaopatrzonej w dwie rury, z jednej strony otwarte, przez te otwory w rurach para uchodzi w powietrze (fig. 484). Dzięki ciśnieniu pary na przeciwległe zamknięte ścianki rur, kula poczyna się obracać w kierunku przeciwnym kierunkowi wytryskującego prądu pary. Widzimy tutaj zupełnie takie same działanie, jak w wodnem kole Segner'a (patrz str. 89), z tą różnicą, że tam, zamiast pary wodnej, wypływa z rur strumień wody.

Fig. 484. Eolipila.

Nieco dokładniejsze, jakkolwiek jeszcze dość niejasne, pojęcie o istocie siły pary posiadał Salomo de Caus, który w początkach XVII stulecia wydał manuskrypt p. t. „O przyczynach sił poruszających." Nie można go jednak

nazwać pierwszym wynalazcą maszyny parowej, odkrycie jego bowiem polega jedynie na tem, że w wodotrysku Herona użył prężności pary wodnej zamiast prężności ścieśnionego powietrza. Przez rurę *D* (fig. 485) napełnia on wodą balon *A*, w którym rura *BC* dochodzi do samego dna prawie, zamyka krany *D* i *B* i ogrzewa. W balonie tworzy się para, której prężność wzrasta w miarę podwyższania temperatury tak, że po otworzeniu krana *B* woda wytryskuje z dość znaczną siłą.

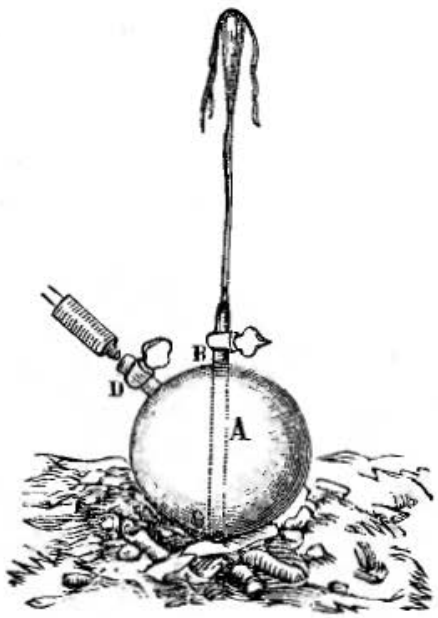


Fig. 485. Przyrząd Saloma de Caus'a.

Wiek, w którym żył Salomo de Caus, był wogóle okresem stopniowego rozwoju odkrycia parowej maszyny, w ostatnich też latach tego stulecia weszła ona w użycie. Wtedy poznano dokładniej własności powietrza, gdyż w owym właśnie czasie Galileusz i Torricelli we Włoszech wykonywali swe doświadczenia nad ciśnieniem powietrza, ostatni zaś uczony zbudował ważny przyrząd do dokładnego mierzenia tego ciśnienia, mianowicie barometr. Otto Guericke w Niemczech badał własności powietrza, rozrzedzonego za pomocą wynalezionej przez niego pompy powietrznej. Niedługo potem Boyle w Anglii i Marriotte we Erancyi znaleźli prawa ciśnienia gazów w zamkniętej przestrzeni. Jednocześnie z temi badaniami nad własnościami ciał lotnych, do których należy także para, zajmowano się czynnikiem, biorącym udział w wytwarzaniu pary, a mianowicie ciepłem; wtedy właśnie Drebbel w Holandyi wynalazł termometr.

Wszystkie te usiłowania przygotowały pole do odkrycia pierwszej, prawdziwej maszyny parowej, dokonanego kolejno przez Papin'a, Savery'go i Newcomen'a.

W roku 1680 Huyghens wypowiedział myśl, że możnaby może korzystać z siły, objawiającej się przy wybuchu prochu

strzelniczego, gdyby go zapalono wewnątrz cylindra, w którym mógłby się poruszać tłok. Sądził on, że gdyby powietrze, wskutek gwałtownego wybuchu, było wypędzane przez otwory, któreby się natychmiast zamykały, dzięki czemu pod tłokiem powstawałaby próżnia, wtedy zewnętrzne powietrze wpychałoby tłok napowrót z siłą proporcyonalną do jego powierzchni. Za pomocą tak otrzymanej siły możnaby, podług niego, nie tylko podnosić najrozmaitsze ciężary, szczególniej wodę z kopalń, lecz także wyrzucać z wielką gwałtownością kule i strzały. Myśl Huyghens'a podjął Samuel Moreland, który sądził jednak, że takie same działanie można osiągnąć przez zamianę wody w parę, ta ostatnia bowiem zajmuje 2000 razy więcej miejsca, aniżeli woda. Dane te dowodzą, jak dokładnie Moreland był obeznany z naturą pary wodnej, późniejsze bowiem badania wykazały, że wartość powyższa mało różni się od istotnej, wynoszącej 1696, że zatem Moreland był dość blizkim prawdy.

Jednocześnie podobnemi badaniami zajmował się lekarz Papin, który wskutek odwołania edyktu Nantejskiego został wygnany ze swej ojczyzny Francyi i znalazł przytułek w uniwersyteckiem mieście Marburgu. Obserwacye jego nad parą doprowadziły go najprzód do odkrycia kociołka, noszącego jego nazwisko i opisanego w jednym z poprzednich rozdziałów. W roku zaś 1690 udało mu się zbudować małą maszynę, opartą na zasadzie, wygłoszonej przez Huyghens'a i Morelanda. Do żelaznego, zamkniętego u dołu cylindra *A* (fig. 486) wprowadzał on nieco wody, a następnie wsuwał tłok *B*, szczelnie dopasowany, lecz mający otwór *L*; tłok spychał tak długo, dopóki woda nie przechodziła przez tenże otwór. Poczem zamykał ten ostatni za pomocą pręta *M* i ogrzewał wodę; tworząca się para podnosiła tłok, oraz przymocowany do niego pręt *D*, w jednem miejscu nacięty. Gdy tłok osiągał najwyż-

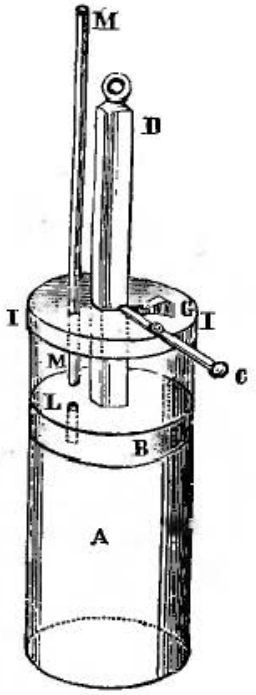


Fig. 486. Parowa maszyna Papin'a.

sze swe położenie, wtedy mały pręcik *C*, przytwierdzony do pokrywy *J* i naciskany za pomocą sprężyny *G*, wchodził w nacięcie pręta *D* i zatrzymywał tłok. Po oddaleniu cylindra od ognia, para pod tłokiem skraplała się i w tem miejscu powstawała próżnia. Gdy do pręta *D* przymocowywano sznur, przerzucony przez blok i odsuwano pręcik *C*, spadający pod wpływem zewnętrznego ciśnienia tłok pociągał za sobą dość znaczne ciężary, uczepione u sznura. Widzimy tedy, że tłok podnosił się wprawdzie pod wpływem prężności pary, właściwą jednak pracę wykonywała nie para, lecz powietrze zewnętrzne, które spychało tłok napowrót ku dołowi. Dlatego też maszyna Papin'a, zarówno jak i wkrótce po tem wynaleziona maszyna Newcomen'a, noszą nazwę *atmosferycznych*. Pomimo, że Papin mógł uchodzić za istotnego wynalazcę parowej maszyny i że udało mu się nawet za jej pomocą wprawić w ruch mały statek, to jednak porzucił on swe odnośne doświadczenia, gdy w roku 1705 dowiedział się od Leibnitza o urządzeniu parowej maszyny, dokonanem w tym czasie przez Savery'ego.

Angielski urzędnik górniczy Savery (1698) wpadł na szczęśliwy pomysł, ażeby parę wytwarzać w kotle i następnie skraplać ją w oddzielnem naczyniu. Pod tym względem maszyna jego stanowiła wielki postęp w porównaniu z maszyną Papin'a, ustępowała jej jednak pod innym, mianowicie pod tym, że służyła jedynie do podnoszenia wody w rurze, podczas, gdy u Papin'a ruch tłoka był tego rodzaju, że przy użyciu innych, czysto mechanicznych maszyn, mógł być zamieniony w jakibądź odmienny ruch. Innemi słowy, maszyna Papin'a mogła służyć do rozmaitych celów, podczas gdy przyrząd Savery'ego tylko tam dawał się zastosować, gdzie chodziło o podniesienie wody na określoną wysokość. Składał się on z kotła parowego *B* (fig. 487, str. 887), z którego para wychodziła przez rurę do naczynia *S*; gdy zamykano kran w *C* i puszczano na to naczynie strumień zimnej wody, wypływającej z rezerwoaru *E* przez kran *e*, para skraplała się i w *S* tworzyła się próżnia. Wtedy zewnętrzne powietrze wpychało wodę z *R* do ssącej rury i wreszcie do naczynia *S*. Gdy następnie znów otwierano kran *C*, para wycieśniała wodę

z *S*, ponieważ zaś odpowiednia klapa nie pozwalała wodzie spływać napowrót do rury ssącej, podnosiła się ona w rurze *A*, zaopatrzonej w klapę, która również jak i tamta otwierała się tylko do góry. Przez kolejne otwieranie krana *C* i wypuszczanie zimnej wody ze zbiornika *E* wypompowywano wodę z danego miejsca *R*.

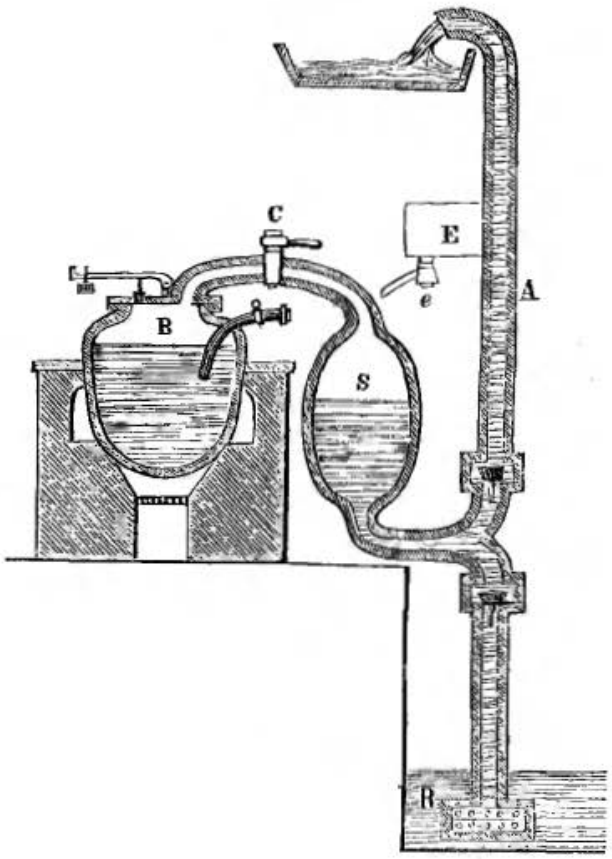


Fig. 487. Parowa maszyna Savery'ego.

Ponieważ Savery nie mógł osiągnąć ze swą maszyną tych korzyści, jakich się spodziewał, to w pierwszych latach następnego, to jest ośmnastego stulecia, połączył się on z dwoma mieszkańcami miasta Darmouth, Newcomen'em i Cawley'em i trzem tym mężom udało się zbudować przyrząd, który dawał lepsze od poprzednich rezultaty, lecz który w gruncie polegał na zasadzie, stosowanej już przez Papin'a. W maszynie tej, noszącej nazwisko Newcomen'a, gdyż on był głównym jej wynalazcą, para wytwarzała się w oddzielnym kotle *B* (fig. 488, str. 888); ztąd przechodziła do cylindra *C*, w którym przesuwał się szczelnie dopasowany tłok *P*, połączony łańcuchem z dwuramienną dźwignią. Gdy para wycieśniła już powietrze z cylindra przez boczną rurkę *V*, zamykano tę rurkę; nowoprzybywająca para napełniała znów cylinder, tłok zaś *P*, pociągany także przez przeciwwagę *J*, zawieszoną na drugim końcu dźwigni, osiągał najwyższe swe położenie. Wtedy zamykano kran, przez który para wychodziła z kotła i otwierano kran *O* w rurze, łączącej cylinder ze zbiornikiem zimnej wody *L*; pod wpływem zimnego strumienia para w cylin-

drze skraplała się, pod tłokiem zaś wytwarzała się próżnia i powietrze zewnętrzne spychało tłok napowrót. Opadający tłok ciągnął w górę ciężar *J*, oraz pręt *K*, należący do pompy. Po zamknięciu krana *O* wypuszczano wodę, zebraną w cylindrze i otwierano kran w kotle parowym, przez co ruch tłoka na nowo się rozpoczynał.

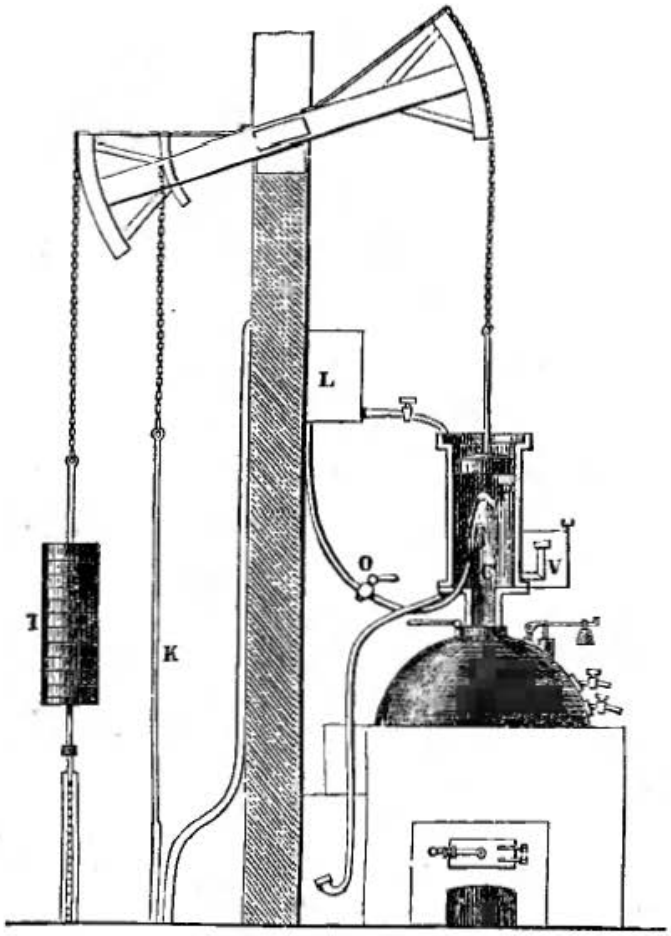


Fig. 488. Maszyna atmosferyczna Newcomen'a.

Atmosferyczna maszyna Newcomen'a znalazła prędkie zastosowanie w kopalniach, gdzie służyła do podnoszenia wody; również i ruch wody w wodociągach Londynu osiągano za pośrednictwem podobnego przyrządu. Pomimo olbrzymich ulepszeń, jakim maszyny parowe uległy szczególniej w ostatnim dziesiątku lat zeszłego stulecia, ów prosty przyrząd przez długi czas pozostawał w użyciu w wielu miejscowościach i być może, że obecnie nawet istnieje jeszcze w niektórych okolicach, gdzie węgiel kamienny jest bardzo tani. Oprócz kilku nieznacznych ulepszeń w pojedyńczych częściach, maszyna parowa pozostała do roku 1769 na tej samej stopie, na jakiej postawili ją Savery, Newcomen i Cawley. W ciągu zatem sześćdziesięciu czterech lat wynalazek, o którym mowa, nie posunął się prawie wcale naprzód, dopiero znakomite odkrycia, dokonane w roku wymienionym przez Jamesa Watt'a oraz ogromne postępy wszystkich nauk przyrodniczych owego czasu, uczyniły z maszyny parowej potężne narzędzie, za pomocą którego człowiek zdobył więcej, aniżeli za pośrednictwem każego innego wynalazku.

W roku 1763 przysłano do mechanika Jamesa Watt'a — zajmującego wtedy skromne stanowisko inspektora zbioru modeli w uniwersytecie w Glasgowie — maszynę Newcomen'a do naprawy i okoliczność ta pobudziła go do zajęcia się przyrządem, który wówczas powszechnie był używany w kopalniach. Watt wymyślił szereg ulepszeń, które gruntownie zmieniły maszynę parową i w zadziwiający sposób spotęgowały jej działanie. Przedewszystkiem uderzyła go znaczna utrata ciepła, jaką ponoszono wskutek wpuszczania zimnej wody do cylindra; za każdym razem para musiała najprzód ogrzać jego ścianki, zanim mogła podnieść tłok do góry. Kilka doświadczeń, wykonanych na małą skalę, doprowadziły Watt'a do wniosku, że para nie koniecznie musi skraplać się w tej samej przestrzeni, w której porusza się tłok, lecz może równie dobrze zgęszczać się w oddzielnem naczyniu czyli kondensatorze, połączonym za pomocą rury z cylindrem. W związku z odkryciem kondensatora znajduje się wynalazek pompy, wstrzykującej do niego zimną wodę, oraz pompy, która wydala zeń powietrze i wodę powstałą ze skroplenia pary. Dalej Watt, na miejsce atmosferycznej maszyny, wprowadził maszynę podwójnie działającą, w której ciśnienie powietrza zupełnie jest wykluczone i zastąpione całkowicie przez ciśnienie pary o wysokiej prężności, przez co właściwie dopiero została wynaleziona prawdziwa maszyna parowa. Ponieważ w maszynie tej tłok nie tylko ciągnie wahadlnik, lecz także przesuwa go podczas swego powrotu, to nie dość było połączyć po prostu pręt tłoka z wahadlnikiem za pomocą łańcucha, jak w maszynie Newcomen'a, lecz należało połączenie to uskutecznić za pośrednictwem stałych prętów. Ażeby jednak pręt tłoka podczas ruchu wahadlnika nie wyginał się kolejno w jedną i w drugą stronę, Watt wsunął pomiędzy ten pręt i wahadlnik równoległobok, złożony z żelaznych prętów, który później bliżej poznamy. Również i koło rozpędowe oraz korba, służąca do wprawiania go w ruch i regulator, czyli wahadło stożkowate, znane jeszcze przed Wattem, zostały przez niego po raz pierwszy zastosowane do maszyn parowych. Watt obmyślił także sposób przerwania dopływu pary, zanim jeszcze tłok osiągnął najwyższe położenie

w cylindrze, przez co nie tylko umożliwił oszczędność na paliwie, lecz także uniknął twardych uderzeń maszyny, ulepszenie zaś to doszło do pewnej doskonałości wówczas, gdy Woolff wynalazł maszyny o podwójnym cylindrze. Widzimy tedy, jak wiele zawdzięczamy Watt'owi, którego słusznie nazwać możemy także wynalazcą maszyny parowej, chociaż nie należy zapominać o zasługach innych mężów. W roku 1758 Keane Fitzgerald wprowadził skrzydła wiatrakowe, mające regulować bieg maszyny, w roku zaś 1778 pierwszy Washborough zamienił prostolinijny, drgający ruch tłoka w ruch obrotowy.

Po tym krótkim rysie historycznym przystąpmy do opisu oddzielnych części maszyny parowej, obecnie będącej w użyciu.

§ 2. Budowa maszyny parowej i praca przez nią wykonana.

W maszynie tej, odróżniamy trzy główne części: 1) kocioł parowy, 2) mechanizm ruchu, składający się z cylindra z tłokiem oraz z urządzenia, ułatwiającego rozmieszczanie pary i 3) mechanizm do przenoszenia ruchu.

W celu poznania budowy kotła parowego wybieramy formę bardzo szeroko rozpowszechnioną, najczęściej używaną w warsztatach i fabrykach. Składa się on z wielkiego, żelaznego naczynia, czyli trzonu, umieszczonego w górnej części obmurowania, zbudowanego z kamieni. Trzon ten na całej długości ma kształt walcowaty, na obu zaś końcach jest zamknięty przez półokrągłe pokrywy; stanowi on główną część kotła i zawiera większą część wody, która ma być zamieniona w parę. Figura 489 (str. 891) *C* przedstawia go w podłużnem przecięciu. Pod trzonem znajdują się dwie lub trzy długie rury *B*, połączone z nim za pomocą rur pobocznych; muszą one zawsze być całkowicie napełnione wodą, a ponieważ leżą tuż nad ogniskiem, to wrzenie najprzód w nich się rozpoczyna, z nich też pierwsze pęcherzyki pary wznoszą się do góry. Zadaniem tych rur dodatkowych jest powiększyć ogrzewaną powierzchnię kotła w stosunku do ilości wody, która ma przejść w stan pary. Jako materya-

łu do budowy kotła używa się zwykle mocnych płyt żelaznych najlepszego gatunku, spojonych ze sobą nadzwyczaj mocno i starannie. Dawniej istniały urzędowe przepisy co do grubości

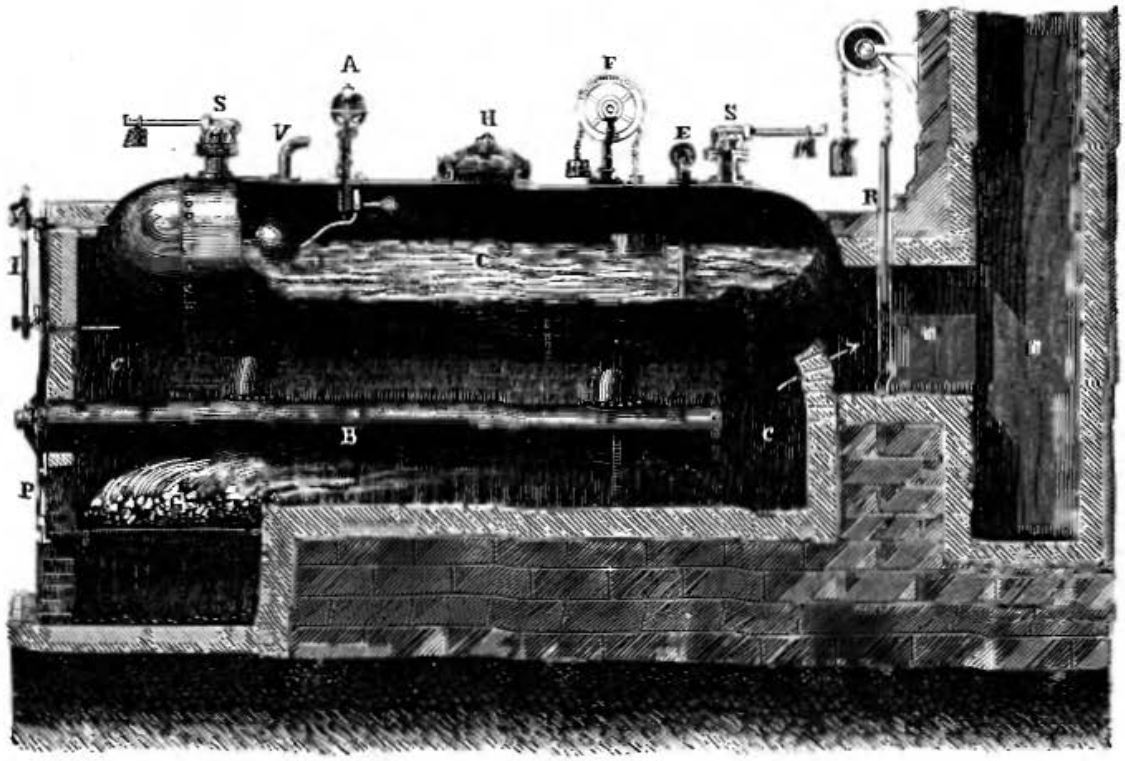


Fig. 489. Podłużne przecięcie kotła parowego.

ścian kotła, które miały stawić opór ciśnieniu określonej liczby atmosfer, obecnie zaś w większości państw istnieje prawo, że każdy kocioł przed użyciem powinien być, za pomocą prasy hydraulicznej, poddany ciśnieniu, większemu w pewnym stosunku od maximalnego ciśnienia, jakie ma wytrzymywać.

Przed puszczeniem maszyny w ruch napełnia się rury *B* całkowicie wodą, trzon zaś tylko do pewnej wysokości tak, ażeby wewnątrz niego ponad wodą pozostała wolna przestrzeń; w tej ostatniej zbiera się para zanim wchodzi do tych części maszyny, *które ma wprawić w ruch. Otóż jest rzeczą* nadzwyczaj ważną, ażeby poziom wody w kotle parowym nie obniżył się zbytecznie, ani też podniósł powyżej pewnej granicy, w obu bowiem razach może to sprowadzić pęknięcie kotła. Dlatego też wymyślono różne przyrządy, za pomocą których można poznać do jakiej wysokości dochodzi woda w kotle; *można je wszystkie zali-*

czyć do tak zwanych przyrządów bezpieczeństwa. Często bardzo przy jednym kotle znajduje się kilka takich aparatów. Na fig. 489 widzimy w *I* rurkę z kryształowego szkła, umieszczoną obok kotła w położeniu pionowem, która łączy się z dwiema metalowemi, kolankowato zgiętemi rurkami w taki sposób, że obadwa jej końce komunikują z kotłem. Do rurki tej przenika woda z kotła i podnosi się w niej—na zasadzie prawa naczyń połączonych — do tej samej wysokości, na jakiej znajduje się w kotle. Przytem może się jednak zdarzyć, że wskutek przypadkowej okoliczności wywiąże się w danym czasie więcej pary, niż zwykle, albo że pompa dzięki jakiemuś uszkodzeniu nie dostarczy dostatecznej ilości wody; w obu wypadkach poziom wody w kotle nagle się obniży, a może to nastąpić w chwili, gdy maszynista, zajęty gdzieindziej, nie obserwuje opisanego przyrządu. Z tego powodu dodano do kotła jeszcze inne przyrządy, które w sposób odmienny wskazują poziom wody; wybrano do nich ciała pływające po jej powierzchni, a więc podnoszące się i opuszczające wraz z nią i połączono je z aparatem sygnałowym. *Pływak* (fig. 489, *A*) składa się zwykle z metalowej kuli, wewnątrz pustej, przymocowanej do końca dźwigni, która na drugim swym końcu jest zaopatrzona w ciężarek. Dopóki poziom wody nie przekracza zakreślonych mu granic, dźwignia ciśnie na klapę, znajdującą się w pokrywie kotła i zamyka ją, gdy woda obniża się, klapka ta się otwiera, wychodząca zaś przytem para spotyka na swej drodze ostre brzegi małego dzwonka i powoduje ów dobrze znany, przeraźliwy dźwięk, trwający tak długo, dopóki nie przybędzie wody do kotła, a więc dopóki klapka napowrót się nie zamknie.

Ponieważ każdy kocioł parowy może wytrzymać ciśnienie określonej liczby atmosfer, to urządza się w nim klapki bezpieczeństwa, podobne do tych, jakie widzimy w *SS* (fig. 489), które otwierają się w chwili, gdy prężność przekracza przepisaną granicę i wypuszczają parę. Tutaj dźwignia, obciążona gwichtem, wciska żelazny korek do otworu rury, wznoszącej się od kotła; gwicht tak jest dobrany, że ciśnienie na każdy centymetr kwadratowy powierzchni korka i na każdą atmosferę najwyższe-

go ciśnienia pary wynosi 1,033 kilogr. Jeżeli np. powierzchnia korka jest równa 4 kw. centym., ciśnienie zaś pary ma dojść do 6 atmosfer, na korek powinna cisnąć siła 24,8 kilogr. Gdy więc ramię dźwigni, na którem wisi gwicht, jest 8 razy dłuższe, aniżeli odległość korka od punktu oparcia, to gwicht powinien być równy 3,1 kilogr. Oprócz klapek bezpieczeństwa, które jak widzimy, nie pozwalają, ażeby prężność pary przekroczyła pewną maximalną wysokość, umieszcza się przy kotle manometry (patrz str. 171), wskazujące w każdej chwili, jakie właściwie ciśnienie istnieje w kotle.

Zwróćmy się obecnie do opisu głównej części mechanizmu ruchu, a mianowicie do cylindra. Zwykle jest on zbudowany z lanego żelaza, posiada wszędzie dokładnie jednakową średnicę i wewnętrzną powierzchnię bardzo starannie wygładzoną. Obadwa jego końce są zamknięte przez pokrywy silnie przyśrubowane (fig. 490); przez otwór w górnej pokrywie przechodzi pręt *t* tłoka. Sam tłok po większej części składa się z dwóch płyt metalowych o średnicy nieco mniejszej od średnicy cylindra, mocno połączonych ze sobą oraz z prętem, który przez nie przechodzi. Do cylindra otwierają się dwa kanały *a a* i *a' a'*, któremi para wchodzi naprzemian z jednej lub drugiej strony i powoduje ruch tłoka do góry, albo na dół. Bardziej na zewnątrz kanały te otwierają się do przestrzeni *BB*, w której najprzód zbiera się para, przychodząca z kotła; tutaj widzimy także otwór kanału *E*, przez który uchodzi ona do rury *C*, a następnie w powietrze, albo do kondensatora, gdzie traci swoją prężność.

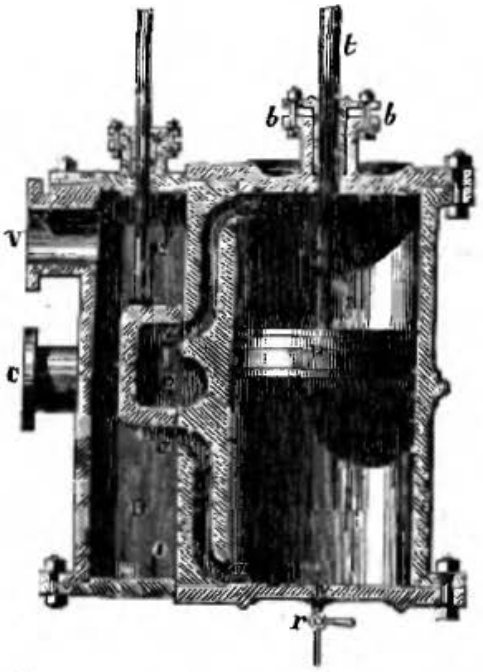


Fig. 490. Podłużne przecięcie cylindra.

Zewnętrzna ściana cylindra, w której znajdują się trzy wymienione otwory, jest nader starannie wygładzona. Przed

otworami przesuwa się pryzmatyczna skrzynka czyli zasuwka, stale zamknięta od strony zwróconej ku przestrzeni BB, do której para przybywa przez rurę V, zawsze zaś otwarta od strony otworu E.

Względem kanałów, któremi para wchodzi do cylindra, zasuwka kolejno przyjmuje rozmaite położenia, szematycznie przedstawione na fig. 491. Gdy zachodzi ona poza dolny kanał, wte-

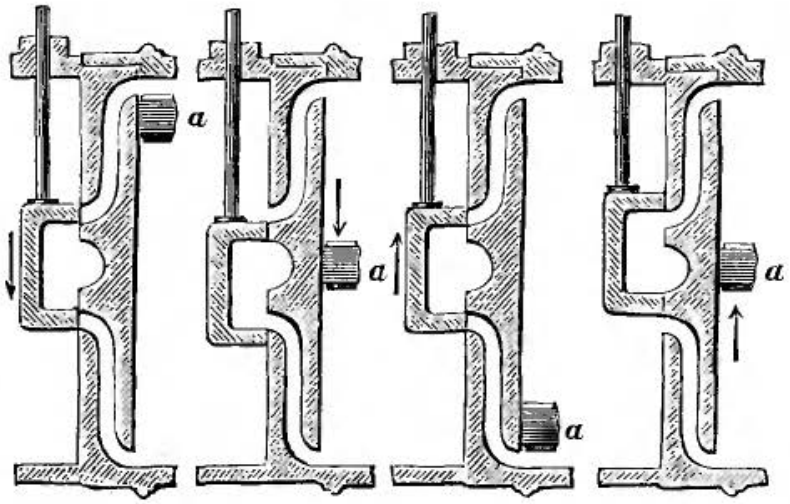


Fig 491. Szematycznie przedstawiony ruch zasuwki tłoka.

dy komunikuje on *jedynie* z otworem E, jednocześnie zaś przez otwarty górny kanał para wchodzi do cylindra i pcha tłok a ku dołowi (2). Przeciwnie, gdy dolny kanał łączy się swobodnie z kotłem parowym, górny jest od niego odcięty i komunikuje tylko z otworem E (4). Figury (1) i (3) odpowiadają najwyższemu i najniższemu położeniu tłoka, strzałki zaś pokazują kierunek ruchu zasuwki. Dodajmy, że jest ona przymocowana do pręta, który szczelnie przechodzi przez otwór w pokrywie tłoka i łączy się z pierścieniem metalowym; ten ostatni z kolei otacza krążek, mocno osadzony na osi koła rozpędowego, a więc poruszany przez samą maszynę.

Z figury 491 widać, że każda z dwóch części cylindra tak długo komunikuje swobodnie z kotłem parowym, dopóki tłok nie dochodzi do przeciwnego końca cylindra, czyli że przez cały ten czas para, poruszająca tłok, posiada tę samą prężność, jaką miała przy wyjściu z kotła. Dawniéj nie znano innego sposobu urzą-

dzenia maszyny i pracowano ciągle całą siłą pary, lecz już Watt zrobił uwagę, że byłoby daleko korzystniej, gdyby para miała dostęp do cylindra jedynie w ciągu ułamku czasu, jakiego potrzebuje tłok do przebycia drogi w danym kierunku. Przez to maszyna porusza się daleko prawidłowiej i przy jednakowej pracy zużywa się mniej pary, a więc i mniej paliwa. Jeżeli np. puszcza się parę tylko tak długo, dopóki tłok nie odbędzie trzeciej części swej drogi, to po zamknięciu otworu kanałowego, para, znajdująca się w cylindrze, bynajmniej nie przestaje działać, lecz pcha tłok daléj. Ponieważ jednak przestrzeń, zajęta przez nią, powiększa się przytem ciągle, to prężność jej w tym samym stosunku maleje tak, że w chwili gdy tłok dochodzi do końca swej drogi, prężność ta jest trzy razy mniejsza od pierwotnéj. O maszynie w ten sposób urządzonej powiadamy, że pracuje ekspansywnie. Istnieją rozmaite do tego środki, lecz wspomnimy tylko o jednym, a mianowicie o zasuwce Clapeyron'a (fig. 492), nieco odmiennej od poprzednio opisanej. Odmiana polega na tem, że brzegi zasuwki, dzięki częściom dodatkowym, są o wiele szersze od otworów kanałowych LL'; części te ab, $a'b'$ cd i $c'd'$, wystają z zewnątrz i z wewnątrz i nie pozwalają, ażeby jeden z kanałów oworzył się natychmiast po zamknięciu drugiego.

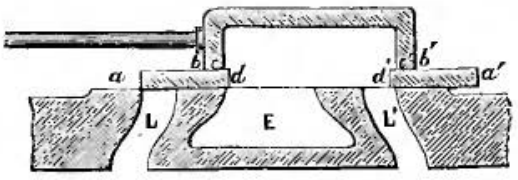


Fig. 492. Zasuwka Clapeyron'a.

Widzieliśmy, że wskutek działania pary w maszynie parowej, tłok porusza się tam i napowrót po prostej linii. Ponieważ jednak w praktyce ruch prostolinijny daje się spożytkować tylko w nielicznych wypadkach, przeto starano się zamienić go w inny, obrotowy, bardziej dla nas odpowiedni i z łatwością dający się znów przeobrazić w odmienną formę ruchu. Chodziło głównie o to, ażeby poruszający się tłok mógł obracać oś, na której osadzone są koła. Najdawniejszy sposób urzeczywistnienia tego polega na przeniesieniu ruchu tłoka na dźwignię dwuramienną czyli na wahadlnik; obecnie jeszcze większość stojących maszyn parowych jest tak urządzona. Figura 493, str. 896, przed-

stawia to szematycznie. Pręt t, przymocowany do tłoka P, łączy się ruchomo z końcem A dźwigni AB, która obraca się wokoło punktu l; drugi koniec B dźwigni połączony jest również rucho-

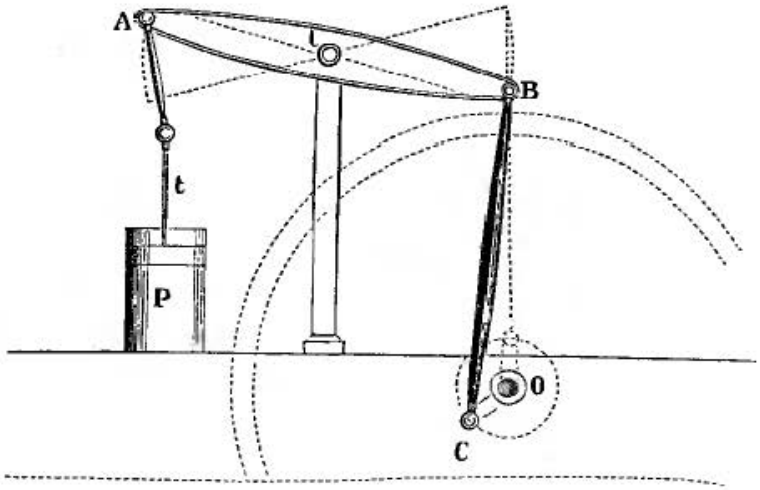


Fig. 493. Przenoszenie ruchu tłoka za pomocą wahadlnika.

mo z korbą CO, przymocowaną do osi O. Z rysunku łatwo zrozumieć, dlaczego przy poruszaniu się pręta BC do góry i na dół korba i oś obracają się, wraz z osią obraca się także osadzone na niej wielkie żelazne koło rozpędowe. W taki sposób ruch prostolinijny przekształca się w ruch obrotowy; oprócz tego rozpęd nadany kołu przyczynia się do większej prawidłowości ruchu.

Gdy wahadlnik porusza się w jedną i w drugą stronę, koniec jego A, do którego jest przymocowany pręt tłoka, opisuje łuk, pręt zaś i tłok poruszają się po linii prostej, co możliwe jest jedynie przy ruchomem połączeniu. Lecz nawet wtedy, gdy ono jest tak urządzone, jak je przedstawia fig. 493, pręt tłoka ciśnie przy poruszaniu się na brzegi otworu, przez który przechodzi, co wkrótce powoduje rozszerzenie się otworu, a więc narusza szczelne zamknięcie cylindra. Ażeby temu zapobiedz Watt wprowądził ulepszenie równie proste, jak pomysłowe, które łatwo zrozumiemy z fig. 494, str. 897. Zamiast przymocować pręt tłoka bezpośrednio do wahadlnika, Watt łączy ten ostatni w dwóch miejscach C i E z dwiema jednakowemi sztabkami CB i ED, które z kolei są połączone za pomocą sztabki poprzecznej BD, równej CE tak, że figura $CEDB$ w każdem położeniu tworzy

równoległobok. Punkt D jest połączony z prętem tłoka, zaś punkt B jest posuwany przez sztabkę OB, która obraca się wokoło punktu O, leżącego na rusztowaniu samej maszyny.

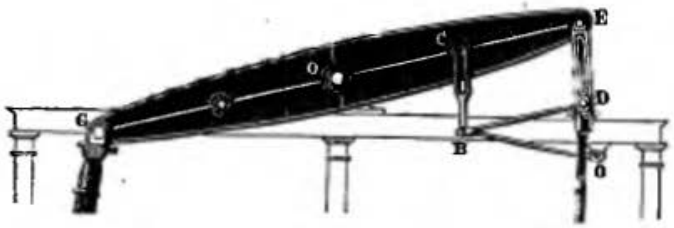


Fig. 494. Wahadlnik z równoległobokiem Watt'a.

Całe to urządzenie nosi nazwę *równoległoboku Watt'a*. Podczas gdy punkt E opisuje łuk wokoło punktu oparcia dźwigni i zbacza na prawo, punkt B również porusza się po łuku o promieniu OB i zbacza na lewo. Należy tedy tak dobrać długość sztabek, ażeby obadwa zboczenia były jednakowo wielkie, czyli ażeby punkt D poruszał się zawsze po tej samej prostej linii; wahadlnik nie powinien przytem zbaczać od poziomego położenia więcej jak na 20^0.

Z całego urządzenia maszyny parowej wynika, że szybkość jej ruchu, zależna od wielu przyczyn. zmieniałaby się często, gdyby nie istniały różne dodatkowe części, odgrywające rolę tak zwanych *regulatorów*. Podczas ruchu tłoka para ciśnie nań z niejednakową prężnością, gdyż zajmuje coraz większą przestrzeń; oprócz tego prężność pary w samym kotle może ulegać zmianom, gdy np. ognisko nie jest jednostajnie podtrzymywane, albo gdy dolewa się większą ilość zimnej wody, lub wreszcie gdy zapotrzebowanie pary jest niezwykle duże albo małe. Dalej prędkość ruchu zależy także od wielkości pracy, jaką maszyna ma wykonać: przy tem samem ciśnieniu pary maszyna porusza się tem wolniej, im większą jest ta praca i naodwrót. Gdybyśmy w fabryce wycofali z biegu kilka warsztatów, poruszanych przez jedną ogólną maszynę parową, to ruch jej natychmiast zostałby przyśpieszony, gdyby nie pomoc regulatorów. Krótkotrwałe nieprawidłowości usuwamy przez dodanie do ma-

szyny dużego koła rozpędowego o wielkim ciężarze, które osadza się na osi, obracanej przez korbę. Jeżeli z jakiegokolwiek powodu szybkość maszyny wzrasta, wtedy nadmiar siły nagromadza się jednostajnie, jako siła żywa, w kole rozpędowem; gdy zaś prężność pary znów słabnie, koło zwraca pojedyńczym częściom maszyny pochłoniętą poprzednio siłę żywą. Wielkość i ciężar koła powinny być zastosowane do siły maszyny oraz do spodziewanych mniejszych lub większych nieprawidłowości jej biegu.

Nietrudno zrozumieć, że koło rozpędowe tylko wtedy przyczynia się do ujednostajnienia ruchu maszyny, gdy szybkość jego naprzemian powiększa się i zmniejsza tak, że bez koła wahałaby *się około pewnej średniej prędkości.* Innemi słowy, koło rozpędowe wyrównywa tylko te wahania około średniej wartości, wielkości jednak ruchu regulować nie może. Jeżeli prędkość wzrasta poza pewną granicę, to dzięki sile odśrodkowej — która jak wiemy powiększa się w stosunku do kwadratów z szybkości obrotu — koło może nawet uledz rozerwaniu na części. *Lecz* siła odśrodkowa znalazła zastosowanie przy innych jeszcze regulatorach, dokładniej odpowiadających tej nazwie; opiszemy najprostszy z nich i najczęściej używany, a mianowicie *wahadło odśrodkowe.* Składa się ono z osi, do której przymocowane jest koło P (fig. 495), obracane przez samą maszynę. Na górnym końcu O osi zawieszone są ruchomo dwie sztabki OA i OA', do których przyczepione są ciężkie kule metalowe B. Z punktów A i A' wychodzą z kolei dwie sztabki, połączone w C z rękawem M, luźno osadzonym na osi i zaopatrzonym u dołu w koliste nacięcie, w które wchodzi koniec dźwigni IL, obracającej *się w około punktu* I. Cały przyrząd jest tak urządzony, że przy normalnym ruchu maszyny, a więc przy określonej szybkości ruchu obrotowego osi OP, kule B oddalają się od niej na pewną odległość HB i podnoszą rękaw M tak wysoko, że dźwignia IL zajmuje położenie pozio-

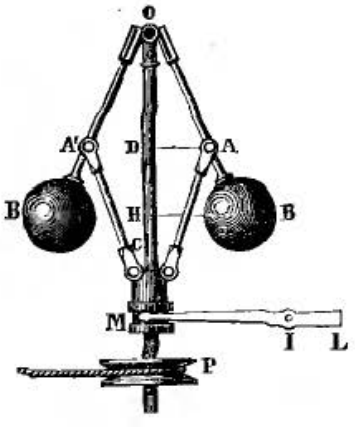


Fig. 495. Wahadło odśrodkowe.

me. Jeżeli szybkość wzrasta, kule jeszcze bardziej oddalają się od osi i podnoszą rękaw M tak, że koniec L dźwigni opuszcza się; przeciwnie przy zmniejszonej prędkości koniec ten w odpowiedni sposób się podnosi. Dźwignia IL jest połączona z klapką, znajdującą się w rurze, przez którą para przechodzi z kotła do cylindra; klapka ta może być mniej lub więcej otwarta albo zamknięta i dźwignia sama, przy opuszczaniu się końca L, zamyka ją częściowo, a nawet zupełnie, jeżeli szybkość zbyt się powiększa. Przez to dopływ pary do cylindra zostaje zwolniony, niekiedy nawet zatrzymany i prędkość ruchu maszyny znów spada do właściwej normy. Przy podnoszeniu się natomiast końca L dźwigni, klapka owa otwiera się szerzej, para napływa oficiej i przyśpiesza zwolniony bieg maszyny.

Zobaczmy teraz, w jaki sposób są połączone opisane wyżej części oraz jakie przyrządy dodatkowe zastosowano do nich. W tym celu wybierzmy stojącą maszynę parową, zwaną tak dlatego, że bywa używaną w fabrykach, gdzie jest stale umieszczona w jednem miejscu. Figura 496 przedstawia taką maszynę.

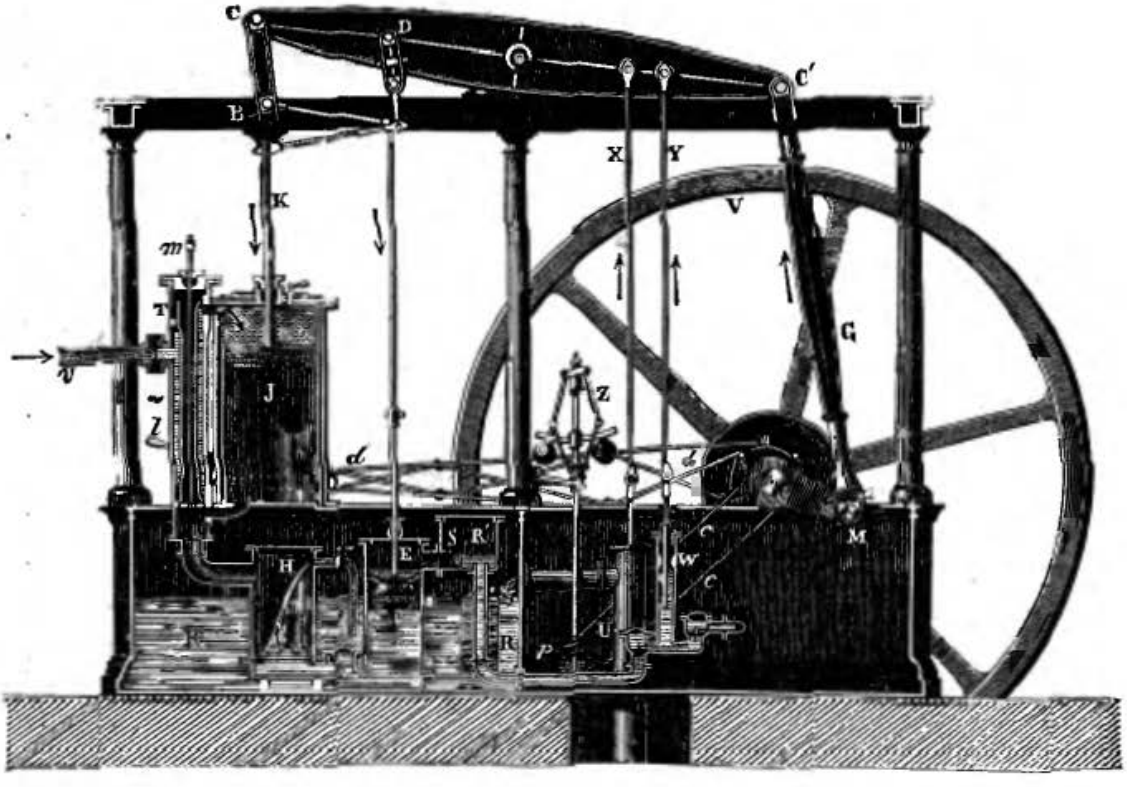


Fig. 496. Maszyna parowa Watt'a.

Widzimy tutaj rurę *v*, przez którą para przybywa z kotła (na rysunku opuszczony), cylinder *J* z zasuwką *T*, wahadlnik *C C'* z równoległobokiem *A B C D*, pręt *K* od tłoka i pręt *G* od korby, koło rozpędowe *V* z korbą *M* i wreszcie regulator czyli wahadło odśrodkowe *Z*, połączone z maszyną i wprawiane przez nią w ruch za pośrednictwem dwóch zębatych kół *p*. Z cylindra zużyta para przechodzi do kondensatora *H*, w którym znajduje się zimna woda, często wprowadzana przez rurę *t*; pompa *PE* wypompowuje powietrze, które dostało się do kondensatora wraz z wodą. Ponieważ para przy skropleniu oddaje dużo ciepła, to woda zebrana w kondensatorze jest dość gorąca i dlatego odprowadza się ją napowrót do kotła za pomocą pompy *Y W*, zapasowej zaś cysternie *R* dostarcza wody z poblizkiej studni lub rzeki pompa *U X*.

Wypada nam obecnie zastanowić się, od jakich przyczyn zależy siła maszyny parowej. Otóż pierwszym warunkiem, wpływającym na jej wydajność, jest prężność pary; jeżeli ta jest równa tylko $1^1/_2$—2 atmosferom, to maszyna nosi nazwę przyrządu o nizkiem ciśnieniu i zawsze jest zaopatrzona w kondensator. Gdy prężność wzrasta do 3—5 atmosfer, mamy maszynę o średniem ciśnieniu, która tak samo zwykle pracuje z kondensatorem, chociaż mogłaby obejść się bez niego; wreszcie w maszynach o wysokiem ciśnieniu, po większej części pracujących bez kondensatora, prężność pary przewyższa 5 atmosfer. Jak widzieliśmy zadanie kondensatora polega na tem, ażeby w przestrzeni, w kierunku której porusza się tłok, tworzyła się próżnia, przez co ciśnienie zewnętrznego powietrza, równe średnio jednej atmosferze, zostaje zniesione. Gdy więc brak kondensatora, ruchowi tłoka przeciwdziała ciśnienie jednej atmosfery, które zmniejsza o tyleż wpływ prężności pary. Jeżeli ta ostatnia wynosi np. 3 atmosfery, to przy braku kondensatora ginęłaby trzecia część siły, gdy zaś ona jest równa 10 atmosferom, strata wynosi tylko dziesiątą część i nie jest tak wielką, jak siła potrzebna do poruszania dwóch wspomnianych wyżej pomp, w tym więc razie korzystniej jest obejść się bez kondensatora.

Siła maszyny zależy także od wielkości tłoka: im większa jest powierzchnia, na którą ciśnie para, tem większe w ogóle jest ciśnienie. Ciśnienie jednej atmosfery na kwadratowy centymetr jest równe 1,033 kilogr.; liczbę tę więc należy pomnożyć przez ilość atmosfer oraz ilość kwadratowych centymetrów, mieszczących się na uciskanej powierzchni tłoka, ażeby otrzymać wielkość tego ogólnego ciśnienia. Wreszcie siła maszyny zależy od drogi, jaką tłok przebywa w określonym czasie, innemi słowy od długości cylindra i ilości uderzeń tłoka w ciągu minuty lub godziny, co znów pozostaje w bezpośrednim związku z ilością pary, dostarczonej przy prawidłowym biegu maszyny przez kocioł. Należy przytem pamiętać, że znaczna część pracy zużywa się na przezwyciężenie tarcia oraz innych przeszkód, gdy więc chcemy wiedzieć, jaka jest wydajność maszyny, musimy od pracy obliczonej z powyższych danych odjąć tę część, wartość której znajdujemy przez doświadczenie.

Wiemy, że wykonaną pracę porównywa się z ciężarem podniesionym na pewną wysokość i że za jednostkę przyjęto *kilogrametr*, czyli pracę zużytą przy podniesieniu 1 kilograma na wysokość 1 metra. Przy tem obliczeniu nie bierzemy pod uwagę czasu, gdy zaś powiadamy, że dana ilość pracy została wykonana w ciągu np. jednej sekundy, wtedy ilość ta wyraża tak zwany *efekt* siły. Lecz przy obliczaniu efektu maszyny wybieramy daleko większą jednostkę, a mianowicie siłę jednego konia, którą przyjmujemy jako równą 75 kilogrametrom.

Ponieważ źródłem siły, ujawnianej przez maszynę, jest prężność pary, wytwarzanej w kotle, to praca maszyny zależy bezpośrednio od ilości pary, dostarczonej w ciągu określonej jednostki czasu; ponieważ dalej ilość ta zależy od wielkości ogrzewanej powierzchni, to możemy przyjąć, że przy innych warunkach jednakowych, maszyna o kotle parowym najlepiej wystawionym na działanie ogniska i ulatujących gazów, daje największą pracę. Również i ilość zużytego węgla znajduje się oczywiście w bezpośrednim związku z wielkością ogrzewanej powierzchni, lecz oprócz tego całe urządzenie maszyny wywiera pod tym względem nader wielki wpływ tak, że ilość paliwa, potrzebna do wytworzenia okre-

słonej siły, jest bardzo rozmaita, zależnie od tego, czy maszyna pracuje przy nizkiem, średniem lub wysokiem ciśnieniu oraz czy jest zaopatrzona w kondensator lub nie. Doświadczenie pokazało, że na siłę jednego konia powinna wypadać $1-1\frac{1}{2}$ kwadr. metr. powierzchni ogrzewanej; maszyna więc o sile 10 koni musi posiadać powierzchnię ogrzewaną równą 10—15 kwadratowym metrom. *Dalej obliczono, że na siłę jednego konia* w ciągu godziny 20 litrów wody powinno zamienić się w parę. Co do paliwa, to jak już wspomnieliśmy, zużycie jego nie jest jednakowe dla wszystkich maszyn; naprzykład maszyna Watt'a, pracująca przy nizkiem ciśnieniu, potrzebuje na siłę jednego konia 5—6 kilogramów węgla w ciągu godziny.

W końcu wskażemy jeszcze w jaki sposób oblicza się efekt maszyny z prężności pary, rozmiarów cylindra i prędkości z jaką tłok porusza się tam i napowrót, to jest z ilości jego uderzeń w ciągu jednostki czasu. Jeżeli manometr wskazuje w maszynie z kondensatorem ciśnienie 4 atmosfer albo w maszynie bez kondensatora ciśnienie 5 atmosfer, to ponieważ w ostatnim wypadku należy odjąć jedną atmosferę (przeciwciśnienie zewnętrznego powietrza), ciśnienie na tłok w obu maszynach wynosi 4 atmosfery. Jeżeli dalej powierzchnia tłoka jest równa np. 1256 kwadrat. centymetrom, to ciśnienie na nią wynosi $1256 \times 1{,}033 \times 4 = 5190$ kilogr. Gdy tłok porusza się w cylindrze i przezwycięża tarcie oraz wykonywa różnego rodzaju pracę, to możemy przyjąć, że suma tych czynności jest równa ciśnieniu, które je wywołało; *w danym więc wypadku rzecz się ma tak, jak gdyby* w każdej chwili tłok posuwał ciężar 5190 kilogramów. Jeżeli długość cylindra jest równa 40 centym., to przy odbyciu tej drogi tłok wykonywa pracę $5190 \times 0{,}4 = 2076$ kilogrametrów, przy każdem więc uderzeniu (dwa razy przebyta droga) praca jego wynosi 4152 kilogrametry. *Jeżeli wiadomo dalej wiele uderzeń wykonywa* tłok w ciągu określonego czasu, to można obliczyć wydajność pracy w ciągu tego czasu, a więc i efekt maszyny czyli pracę w ciągu jednej sekundy. Gdy np. tłok odbywa swą drogę tam i napowrót w sekundę, to efekt wynosi 4152 kilogrametry, czyli więcej niż siła 55 koni. Większa część tej pracy zużywa

się na przezwyciężenie tarcia w różnych częściach maszyny i tylko mała część, zwana pracą pożyteczną, daje się zastosować mechanicznie.

§ 3. Statki parowe.

Bardzo długo przed tem, zanim powzięto myśl zastosowania prężności pary do poruszania jakiejkolwiek maszyny, próbowano w łodziach zastąpić wiosła przez koła, obracane przez ludzi lub zwierzęta. Prawdopodobnie rzymianie już od czasu wojen punickich posługiwali się taką łodzią; również i chińczycy od niepamiętnych podobno czasów znają czółna o czterech kołach, obracanych za pomocą dość sztucznego ręcznego mechanizmu. Dalej Rudini opisuje w roku 1472 koło, którego szufle zastępowały wiosła i które wprawiane było w ruch za pomocą korby; w roku zaś 1699 du Quet przedstawił Akademii nauk w Paryżu projekt podobnego przyrządu. Wreszcie gdy w kilka lat po tem Papin zaproponował użycie pary jako motoru przy żegludze, wspomina również o kole skrzydlatem, obracanem przez konie, które jeszcze w roku 1678 widział w Anglii.

Lecz wszystkie te urządzenia, mające służyć do poruszania statków, znalazły szersze zastosowanie dopiero z chwilą wynalezienia maszyny parowej tak, że dopiero od czasu odkryć Fultona, a więc od początku bieżącego stulecia spotykamy na rzekach, jeziorach i morzach statki parowe, zaopatrzone w koła skrzydlate. Za wzór do budowy takich kół posłużyło zapewne koło młyńskie. Gdy mianowicie zauważono, że to ostatnie obraca się wskutek uderzeń bieżącej wody, przypuszczano, że jeżeli ono samo będzie wprawione w ruch przez jakąbądź inną siłę i będzie uderzało o wodę, to wywoła ruch statku, do którego je przymocują. Skrzydła albo szufle koła, osadzone na osi w kierunku jego promieni, są połączone ze sobą oraz z osią za pomocą żelaznych prętów i obręczy; składają się one z szerokich desek, które podczas obracania się osi zanurzają się jedna po drugiej w wodzie i opierając się o nią posuwają statek naprzód w kierunku przeciwnym ich własnemu ruchowi. Ażeby ruch ten nie odbywał się tylko

z jednej strony—co mogłoby spowodować obracanie się statku — i ażeby jednocześnie zachować symetryę oraz podtrzymać równowagę, statek zaopatruje się zawsze w dwa koła szuflowe, umieszczone z obu stron jego na wspólnej osi.

Gdy szufle koła posuwają statek po powierzchni wody, występuje to samo zjawisko, co przy użyciu zwyczajnych wioseł, mianowicie ruch w pożądanym przez nas kierunku nie miałby miejsca, gdyby jednocześnie szufle nie pchały wody w kierunku przeciwnym; w wodzie przeto powstaje silny ruch odpychający, na który zużywa się dość znaczna część siły. Przy obliczaniu pożytecznego efektu maszyny, należy odjąć tę część od ogólnego efektu; podobnie jak w stojącej maszynie parowej odejmujemy od niego część, zużytą na przezwyciężenie tarcia. Podług rachunku, ogłoszonego w Dictionnaire des mathématiques appliquées, na siłę maszyny równą sile 100 koni, 33,9 zużywa się na przezwyciężenie oporu, jaki woda stawia przodowi statku i to właśnie stanowi efekt pożyteczny; 58,2 zużywa się na wywołanie ruchu odpychającego w wodzie, reszta to jest 7,9 idzie na przezwyciężenie tarcia.

Tam gdzie powierzchnia wód ulega nieznacznym ruchom, to jest gdzie statki mogą ciągle pozostawać w poziomem położeniu równowagi, koła szuflowe oddają nieocenione usługi. Inaczej ma się rzecz na morzu, gdzie bałwany kołyszą statkiem na wszystkie strony i nie pozwalają osi kół pozostawać w poziomem położeniu; to jedno koło, to drugie zanurza się głębiej, siła poruszająca statek działa w danej chwili energiczniej z jednej strony, i ruch jego staje się nieprawidłowym. Powoduje to częste zboczenia z drogi oraz stratę na sile i prędkości. Z tego np. powodu upłynęło bardzo dużo czasu, zanim w marynarce wojennej zastąpiono żaglowce przez parowce; być może nawet, że zmiana ta nie nastąpiłaby nigdy w tak wysokim stopniu, gdyby nie wynaleziono innego mechanizmu ruchu, który pozwolił usunąć powyższe złe strony. Nowym tym mechanizmem jest szruba okrętowa, która w parowcach przeznaczonych do ruchu na morzu coraz częściej zastępuje koło szuflowe.

Podobnie jak wodne koło posłużyło za wzór do budowy kół szuflowych, tak też na wzór skrzydeł wiatraka można było zbudować mechanizm, który będąc w danym środku wprawiony w obrót przez siłę mechaniczną, porusza się przez to w tym środku ruchem postępowym. Często spotkać można zabawkę dziecinną, zwaną szrubą powietrzną, która wprowadzona w dość szybki obrót wszrubowuje się, że tak powiemy, silnie w powietrze i wznosi się niekiedy na znaczną wysokość. Zupełnie tak samo działa szruba okrętowa, która przy obracaniu odpycha wodę na bok i dzięki ukośnemu położeniu swych skrzydeł posuwa wtedy okręt naprzód. To cośmy powiedzieli o kole szuflowem stosuje się również do szruby, i tutaj bowiem znaczna część siły żużywa się na wprawienie wody w ruch, a więc względnie ginie bez korzyści. Szruba okrętowa znajduje się w tylnej części statku, w prostokątnej ramie, umocowanej pomiędzy ścianą i sterem (fig. 497). Oś, na której jest ona osadzona, biegnie równolegle do pokładu, zaś maszyna parowa wprawia je obydwie w ruch obrotowy. Szruba znajduje się zawsze tak głęboko pod powierzchnią morza, że ruchy bałwanów niewywierają na nią żadnego wpływu; przez to działanie jej na statek nie ulega tak silnym zmianom, jak działanie koła.

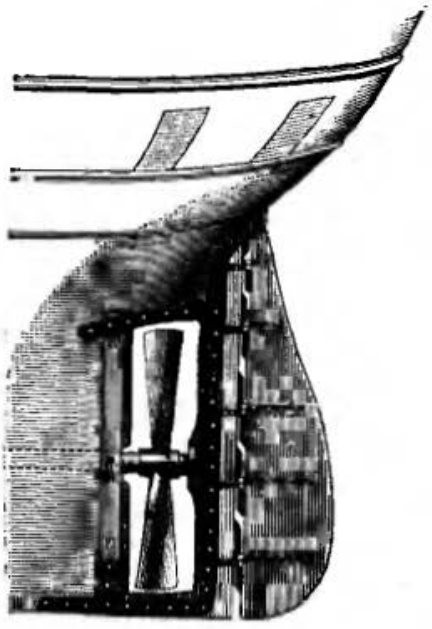


Fig. 497. Szruba okrętowa.

Co do maszyny poruszającej statki parowe, to jest ona zbudowana na zasadach, o jakich mówiliśmy wyżej; widzimy tutaj to samo w gruncie urządzenie kotła i mechanizmu ruchu; nieznaczne zewnętrzne zmiany dotyczą jedynie kształtu oddzielnych części, zależnego od formy i wielkości przestrzeni, którą można rozporządzać na statku.

§ 4. Lokomotywy.

Pierwsze próby wprowadzenia wozów w ruch za pomocą pary wykonał w roku 1769 w Paryżu francuzki inżynier Eugnot. Zbudował on powóz, który miał być poruszany przez małą maszynę parową, lecz skutek osiągnięty przez niego był tak mały, że skłonił go do porzucenia dalszych prób. Dopiero w początku bieżącego wieku podjęto znów to zadanie; mianowicie w 1804 Oliwer Ewans zbudował podobny powóz, lecz z lepszym nieco skutkiem; jednocześnie zaś angielscy inżynierowie Trewitik i Vivian przygotowali parowóz, służący do przewożenia węgli z kopalni. Prawdziwy jednak postęp rozpoczął się dopiero z chwilą gdy poczęto układać szyny, po których biegły parowozy, przez to bowiem zmniejszono tarcie do minimum. Lecz postęp ten spowodował nowe trudności. Ponieważ wagony były z początku dość lekkie, to koła przy szybkim obrocie ślizgały się po gładkich szynach, nie wywierając na nie parcia, a więc nie poruszając naprzód parowozu. W celu usunięcia tej trudności, próbowano rozmaitych środków; najprzód zamiast zwyczajnego koła użyto koła zębatego, które wchodziło pomiędzy zęby pręta, leżącego wzdłuż całej drogi pomiędzy szynami, następnie za pomocą maszyny wprawiano w ruch silne sztaby, które opierały się o ziemię i później znów były podnoszone. Wreszcie angielski inżynier Blaket w roku 1813 wpadł na pomysł nader prosty i skuteczny. Za jego poradą mianowicie powiększono wagę parowozu czyli *lokomotywy* i rozdzielono go tak, ażeby główny ciężar cisnął na osie kół; przez to powiększono tarcie, koła nie mogły już ślizgać się, lecz parły przy obracaniu się na szyny i posuwały powóz naprzód. W owym także czasie Stephenson zbudował swoją pierwszą lokomotywę, w której osie pojedyńczych kół są połączone łańcuchami bez końca tak, że ruch koła poruszającego przenosi się na pozostałe koła. Pomimo że kwestya urządzenia kolei żelaznej, poruszanej siłą pary, została wtedy praktycznie rozwiązaną, to jednak rezultaty tych pierwszych prób nie były jeszcze zupełnie zadawalniającemi. Względnie mała ilość pary,

dostarczanej przez dany kocioł, nie mogła poruszać większych ciężarów z dostateczną prędkością. Przyczyną tego było urządzenie samego kotła, w którym powierzchnia ogrzewana była zbyt ograniczoną.

W roku 1829 Seguin wprowadził ulepszenie, które odrazu znakomicie powiększyło działanie lokomotywy, mianowicie zamiast zwyczajnego dodano do maszyny taki kocioł, w którym płomienie ogniska biegną przez liczne rury. Oprócz tego w tym samym czasie udało się wzmocnić prąd powietrza za pomocą wychodzącej pary wodnej. Dzięki pierwszemu z tych ulepszeń powierzchnia ogrzewana została o tyle powiększona, że para wytwarzała się daleko szybciej, bez powiększenia tedy rozmiarów kotła spotęgowano siłę maszyny. Ponieważ to wymagało energiczniejszego palenia w ognisku, przy nizkim zaś z konieczności kominie prąd powietrza był zbyt słaby, to Hakworth, Pelletier i Stephenson wpadli na szczęśliwą myśl, ażeby parę, która pracowała w cylindrze, przeprowadzić przez rurę do komina. Przy każdem uderzeniu tłoka para ta wywołuje żywy wstępujący ruch powietrza w kominie, przez co dym i gazowe produkty spalenia gwałtownie zostają wyciągnięte z rur ogrzewających i wyrzucone w powietrze.

Od owego czasu lokomotywy uległy jeszcze dalszym udoskonaleniom; figura 498, str. 908 przedstawia właśnie jedną z takich maszyn w podłużnem przecięciu. Kocioł parowy składa się z dwóch głównych oddziałów, z których tylny, ograniczony prostokątnemi ścianami, obejmuje ognisko, otoczone wodą ze wszech stron, z wyjątkiem dolnej, którędy spada popiół. Drugi oddział kotła parowego, mający kształ długiego walca, tworzy większą część lokomotywy; dolną jego połowę zajmują nader liczne rury, które zawsze muszą być całkowicie otoczone wodą i przez które dym oraz gazy uchodzą do komina.

Para zbiera się w górnej połowie walcowatego oddziału, zkąd przez rurę *p.ssu*, podzieloną z przodu na dwie odnogi, przenika do dwóch cylindrów maszyny. Maszynista może za pomocą rączki *r* dowolnie zamykać lub otwierać klapki zasuwki *q*, a więc może wpuszczać do cylindrów większe lub mniejsze ilości pary, kla-

py te odgrywają tedy rolę regulatorów. Rzecz oczywista, że taki kocioł parowy, jak każdy inny, jest zaopatrzony w przyrzą-

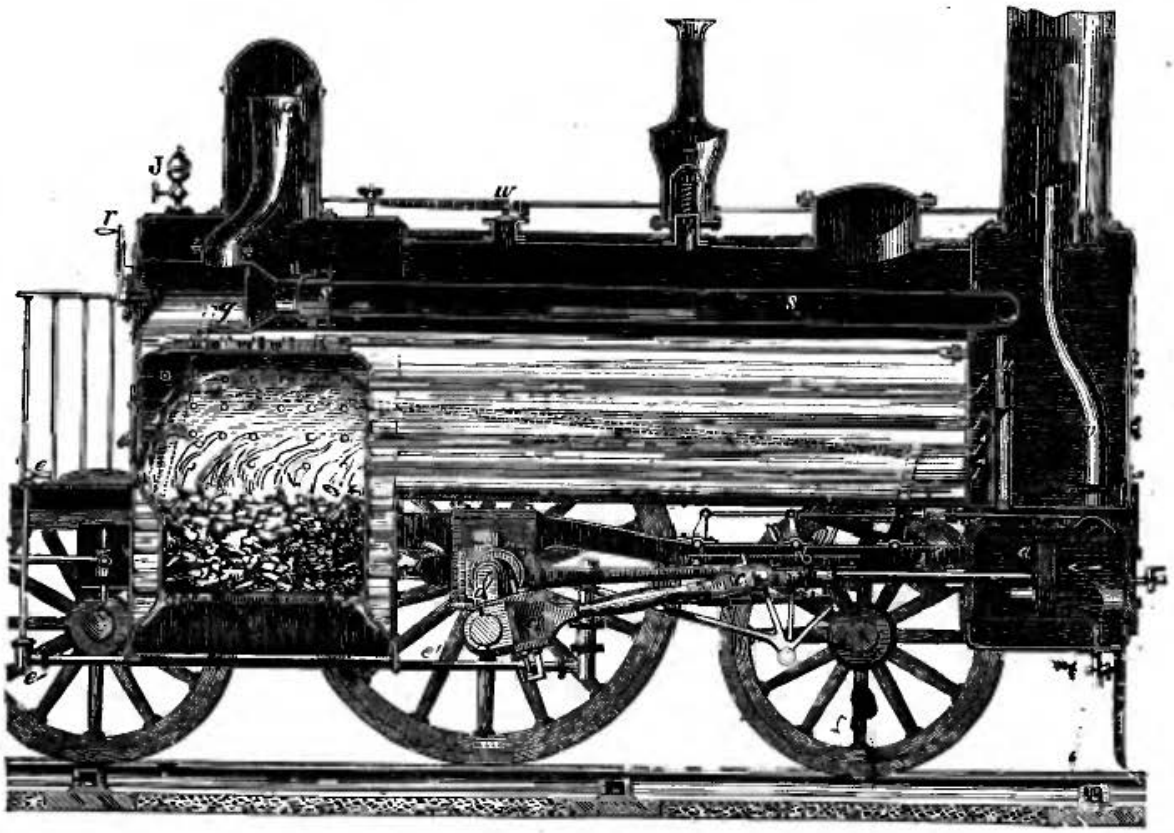


Fig. 498. Podłużne przecięcie lokomotywy.

dy dodatkowe: klapę bezpieczeństwa, manometr, wodomierz i świstawkę parową.

Różnica pomiędzy kotłem parowym w lokomotywie i w innych maszynach polega głównie na tem, że w pierwszej powierzchnia ogrzewana jest bez porównania większa. W pośpiesznej lokomotywie Cramptona powierzchnia ściany, na którą pada ciepło ogniska, wynosi tylko 8,65 kwadr. metr., podczas gdy powierzchnia rur ogrzewanych przez gazowe produkty spalenia, które w nich krążą, wynosi niemniej jak 88,92 kwadr. metr., a więc dziesięć razy więcej. W innej znów lokomotywie wielkości te były równe 9,70 i 180,70 kw, metr. czyli, że powierzchnia rur była ośmaście razy większa. W lokomotywach, powiada Perdonnet, jeden kwadratowy metr powierzchni ogrzewającej

wytwarza około 2—3 razy tyle pary, co w kotłach maszyn stojących.

Ponieważ w lokomotywach para uchodzi przez komin, w którym, jak powiedzieliśmy wywołuje silny prąd powietrza, to niema w niej kondensatora i dlatego musi ona stanowić maszynę o wysokiem ciśnieniu. Zwykle para posiada prężność równą 8—9 atmosferom i maszyna zawsze pracuje ekspansywnie.

Ściśle biorąc, lokomotywa składa się z dwóch maszyn parowych, połączonych ze sobą: Mamy tutaj dwa cylindry, z których każdy posiada swój oddzielny tłok i zasuwkę oraz dwa pręty tłokowe, działające na dwie korby połączone z osią, na której osadzone są koła poruszające. W niektórych lokomotywach znajdują się nawet cztery cylindry, a więc składają się one z czterech maszyn, obracających po dwie jedną oś. Co do urządzenia cylindra oraz sposobów przenoszenia ruchu, są one takie same, jak w innych maszynach parowych.

Po wykonaniu pracy w cylindrach para uchodzi przez wspólną rurę V u góry otwartą i znajdującą się w dolnej części komina, co powoduje ów urywany szum, słyszany zawsze podczas biegu lokomotywy. Z prędkości z jaką następują po sobie uderzenia, wywołane przez uchodzącą parę, można wnioskować o szybkości, z jaką tłok porusza się tam i napowrót podczas pełnego biegu pociągu. Również i z prędkości ruchu pociągu można obliczyć liczbę uderzeń tłoka; jeżeli np. pośpieszna lokomotywa Cramptona, której koło poruszające ma w obwodzie 7,20 metr., przebiega w ciągu godziny 80 kilometrów, to koło musiało w tym czasie zrobić 11111 obrotów. Ponieważ każdemu obrotowi koła odpowiada całkowity ruch tłoka tam i napowrót, to w ciągu jednej sekundy tłok trzy razy przebywa podwójną tę drogę.

W miarę przybywania coraz nowych sieci kolei żelaznych, zaczęto budować różnego rodzaju lokomotywy, albowiem pokazało się, że jedna i ta sama konstrukcya nie zawsze odpowiada najrozmaitszym celom. Maszyny te dzielą się na dwie główne grupy: *lokomotywy pośpieszne*, poruszające z wielką prędkością względnie nieznaczne ciężary oraz *lokomotywy towarowe*, służące

do poruszania największych ciężarów z dość małą prędkością. Istnieją także lokomotywy, zajmujące środek pomiędzy temi dwoma rodzajami; używa się ich do poruszania bądź pociągów osobowych z nieco większą szybkością, bądź pociągów towarowych nie bardzo naładowanych. Spotykamy je szczególniej na mniejszych kolejach miejscowych, tam bowiem system mieszanych pociągów najczęściej bywa stosowany.

W końcu powiemy jeszcze słów parę o lokomotywach miejskich. W roku 1862 pojawiła się w Londynie pierwsza miejska lokomotywa, zbudowana podług systemu inżyniera Bray'a, która ciągnęła naładowane powozy, zbyt ciężkie dla koni, po gładkich lub wybrukowanych kamieniem ulicach. W dwa lata później powtórzono takie same próby w Paryżu i w Nantes z lokomotywą, zbudowaną przez Lotz'a. Na dobrze utrzymanych drogach lokomotywa miejska może poruszać ciężar 5—6 tonn z prędkością 16 kilometrów na godzinę, ciężar zaś 12—15 tonn ciągnie z prędkością 6 kilometrów i to po ulicach, przedstawiających miejscami dość znaczne wzniesienia. Omawiany tutaj środek lokomocyi przedstawia jednak tę złą stronę, że przy niezmiennej w gruncie sile poruszającej, trudności, jakie ona ma do przezwyciężenia są nader rozmaite, zależnie od budowy ulicy. Jeżeli np. lokomotywa tak urządzona, że na dobrej drodze porusza się ze znaczną względnie prędkością, znajdzie się odrazu na gorszej drodze, to nie będzie ona wtedy w stanie przezwyciężyć odnośnych przeszkód. Larmanjat usunął te trudność w ten sposób, że do wynalezionej przez siebie lokomotywy, zaopatrzonej już w dwa koła o wielkiej średnicy i poruszające się na dobrej drodze z prędkością 16 kilometrów, dodał dwa mniejsze koła, które, będąc w danym wypadku z łatwością spuszczone, przejmują ruch lokomotywy. Wprawdzie prędkość natychmiast się zmniejsza, lecz za to siła pociągowa wzrasta w tym samym stosunku i maszyna może przezwyciężyć przeszkodę, przedstawiającą się bądź pod postacią zbyt dużego wzniesienia, bądź pod postacią źle wybrukowanej ulicy. Na wystawie paryskiej w roku 1867 można było widzieć taką lokomotywę o sile trzech koni; ciągnęła ona za sobą ciężar 3000 kilogramów po drodze znacznie wzniesionej, ze

średnią prędkością 8 kilometrów na godzinę. Figura 499 przedstawia właśnie miejską lokomotywę Larmanjat'a.

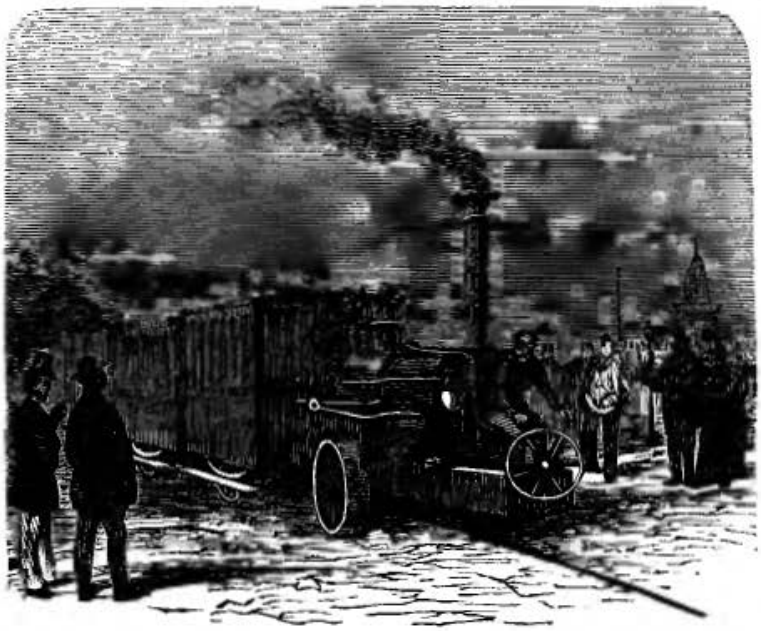


Fig. 499. Miejska lokomotywa Larmanjat'a.

Anglicy i Amerykanie również pokusili się o praktyczne rozwiązanie omawianej tutaj kwestyi. I oni także urządzali liczne próby w celu znalezienia sposobu poruszania parowozów na zwyczajnych ulicach. Podobnie jak przy próbach francuzkich inżynierów główna trudność polegała tutaj na tem, że koła lokomotywy pozostawiały na drodze swej głębokie ślady, które tamowały ruch i psuły ulice. Pomiędzy innemi Boydell starał się usunąć tę trudność. Ulepszona przez niego maszyna sama ustawicznie kładła przed koła kawały szyn, przymocowane do łańcucha bez końca i zaopatrzone w bardzo szerokie nogi; po przejściu kół przez szyny, maszyna znów je podnosiła do góry. Lecz mechanizm ten był tak skomplikowany, ruch zaś maszyny tak ciężki i powolny, że wkrótce porzucono ten system. Istotny postęp stanowiły ulepszenia, wprowadzone przez mechanika edynburskiego Thomsona; pokrył on mianowicie koła poruszające warstwą wulkanizowanego kauczuku, której grubość wynosiła 12½ centym., szerokość zaś 30 centym. Koła takie biegną wzdłuż zwyczajnej ulicy bez naruszenia kamieni znajdujących

się na niej. Dzięki elastyczności kauczuku koło styka się z ziemią na szerokiej powierzchni, po której ciśnienie rozchodzi się jednostajnie. Koła nie wrzynają się w ziemię i nawet gdy lokomotywa jedzie po nowo usypanej ulicy, prześliźgują się bez uszkodzenia ponad świeżo ułożonemi kamieniami. Dlatego też siła potrzebna do poruszania takiej lokomotywy jest o wiele mniejsza, aniżeli wtedy, gdy gładka żelazna obręcz koła miażdży kamienie. Podobną lokomotywę puszczono nawet na łąkę, na której nie pozostawiła silniejszych śladów. Na poziomej ulicy ciągnęła ciężar 30 tonn z prędkością 4—10 kilometrów na godzinę; siła jej była równa sile 16—18 koni. W Anglii wprowadzono lokomotywę Thomsona do wielu kopalń, gdzie służy do przewożenia węgla; w Edynburgu zaś sam wynalazca zastosował ją do poruszania omnibusów. Wreszcie w Indyach zarząd poczty użył lokomotywy Thomsona do przewożenia posyłek na linii pomiędzy miastami Lahorą i Ludianą w Pięciorzeczu (Pendżab).

§ 5. Zastosowanie pary w przemyśle. Inne motory.

Zwróćmy się obecnie do opisu zastosowań prężności pary w przemyśle oraz innych sił, zależnych od działania ciepła. Zaczniemy od przyrządu, który wprowadził cały przemysł metaliczny na nowe zupełnie tory i w ogóle umożliwił przygotowanie olbrzymich maszyn, narzędzi i broni. Przyrządem tym jest *młot parowy*. W dawnych hamerniach ruch wytwarzano za pośrednictwem koła młyńskiego, zaopatrzonego w wystające zęby, które podczas obrotu koła naprzemian podnosiły i opuszczały młot. Później koła te, obracane przez wodę, zastąpiono innemi, poruszanemi przez parę, lecz i na tej drodze osiągnięty rezultat nie był jeszcze zupełnie zadawalniającym. Dopiero gdy technicy wpadli na szczęśliwą myśl, ażeby działanie pary przenieść bezpośrednio na ciężar, odgrywający rolę młota, otrzymano świetne rezultaty, nie znane dotychczas. Młot parowy wynaleziony w roku 1841 jednocześnie przez dwóch mechaników Nasmyth'a

i Bourdona, składa się z olbrzymiego kawała lanego żelaza, którego waga dochodzi do 15000 kilogramów. Jest on połączony z prętem *t* tłoka, poruszającego się wzdłuż ścian cylindra *G*, u góry otwartego (fig. 500). Gdy para o nader wielkiej prężności dostaje się przez rurę *V* i kamerę parową *O* pod tłok, wtedy podnosi go do góry; wraz z tłokiem podnosi się i młot. Gdy ten ostatni dochodzi do żądanej wysokości, opuszcza się dźwignię *L*, przez co pręt *T* i zasuwka w kamerze parowej zostają podniesione; wtedy para przybywająca z kotła ma drogę zamkniętą, ta zaś która znajduje się pod tłokiem oraz w kamerze *O* uchodzi w powietrze przez rurę *E*. W tej właśnie chwili młot spada z całą gwałtownością.

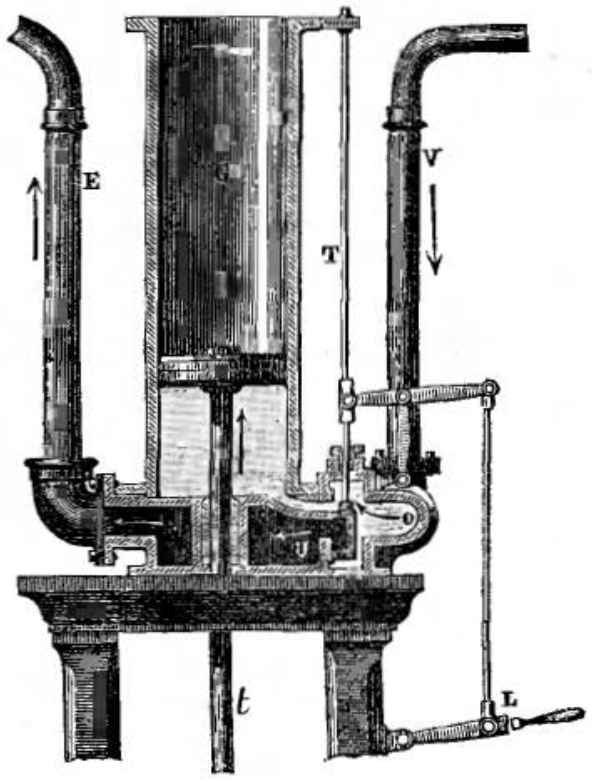


Fig. 500. Młot parowy. Przecięcie cylindra.

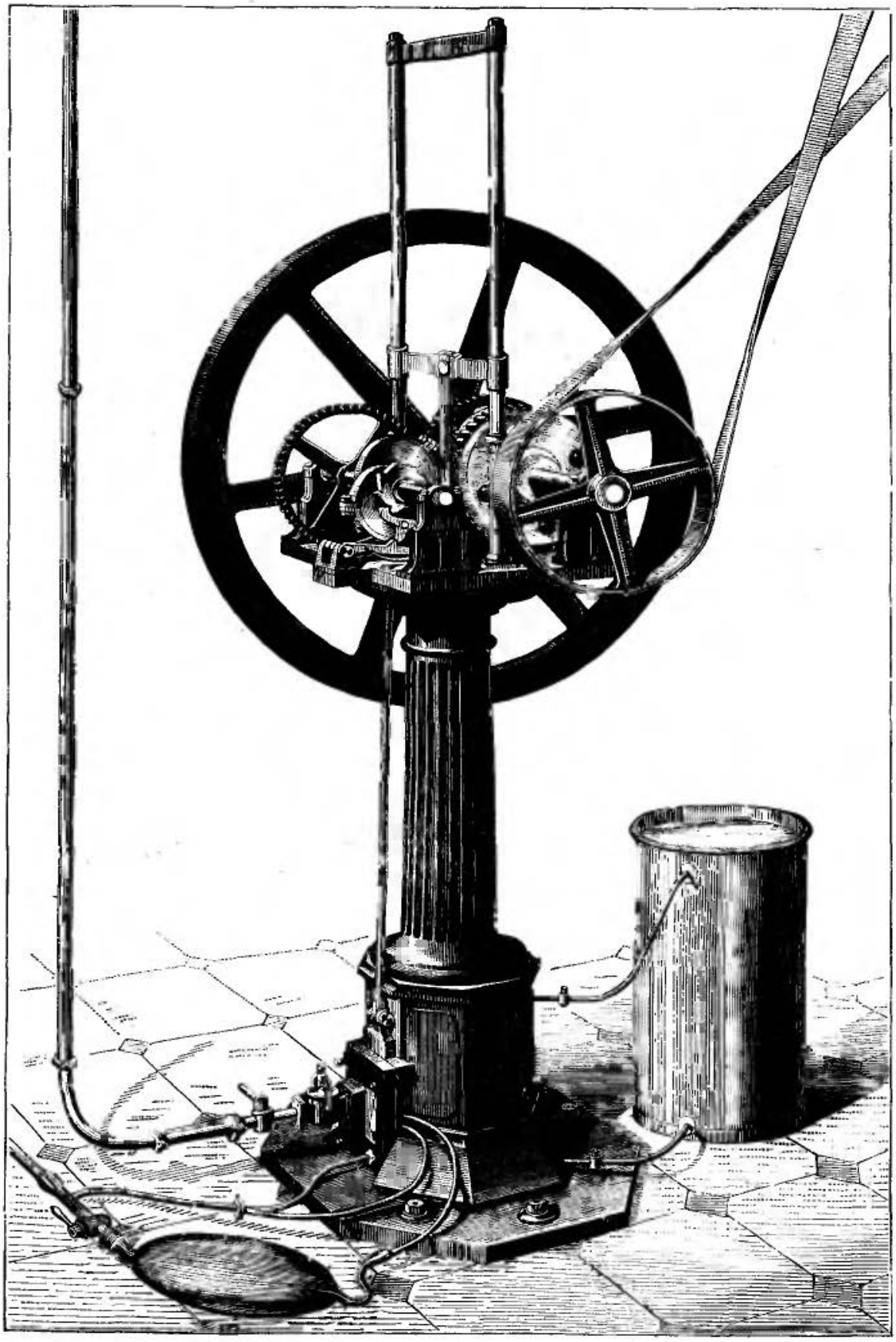
W opisanym przyrządzie para działa zawsze tylko z jednej strony, lecz zbudowano także młoty parowe, gdzie cylinder jest u góry zamknięty tak, że para może i z góry działać na tłok. Potęguje to siłę spadku, powiększa liczbę uderzeń w ciągu określonego czasu i pozwala wykuwać ogromne kawały metalu po jednorazowem ich rozgrzaniu, co z kolei pociąga za sobą oszczędność na czasie i paliwie. Jeżeli młot spada jedynie pod wpływem siły ciężkości, to praca przezeń wykonana jest równa iloczynowi z jego wagi przez wysokość spadku, czyli że im większa jest ta wysokość, tem silniej działa młot przy każdem uderzeniu; za to uderzenia następują po sobie w dłuższych odstępach czasu. Przeciwnie gdy para działa na tłok z obu stron, można z łatwością spotęgować siłę uderzeń i jednocześnie powiększyć ich szyb-

kość. Jedno i to samo ognisko służy do wytwarzania pary i do ogrzewania metalów.

Chcąc pobieżnie chociażby opisać wszystkie zastosowania maszyny parowej w obecnym przemyśle, należałoby poświęcić temu całe tomy, co znacznie przekroczyłoby zakres niniejszego dzieła. Powiemy więc tylko, że znajduje się ona w cegielniach, gdzie dostarcza ognisku potrzebnej ilości powietrza, w szlifierniach dyamentów, gdzie para obraca tarczę szlifującą 2500 razy na minutę; w fabrykach papieru, gdzie wprawia w ruch maszyny do prania, bielenia i suszenia; w mennicach, gdzie bije 2400 sztuk w ciągu godziny, w przędzalniach różnego rodzaju, w drukarniach pisma i rysunku, jednem słowem widzimy ją we wszystkich przemysłowych operacyach, wymagających potężnego motoru, działającego w sposób szybki, prawidłowy i nieprzerwany.

W motorze tym siłą działającą jest prężność pary wodnej. Próbowano wiele razy zastąpić ją przez inną prężną siłę, ogrzewając np. powietrze atmosferyczne lub zapalając jaką wybuchową mięszaninę gazową. W ten sposób zbudowano dwa nowe rodzaje maszyn, które w gruncie są podobne do maszyny parowej, albowiem tutaj, jak i tam ciepło jest tym czynnikiem, który przetwarza się w ruch mechaniczny. Z powodu braku miejsca nie możemy wdawać się w opis obu rodzajów maszyn, powiemy tylko, że dla mniejszego przemysłu, wymagającego nieznacznej siły, maszyny o ogrzewanem powietrzu są bardzo korzystne; przytem bieg ich z łatwością i bez straty może być przerwany. Dla wielkiego przemysłu są nieodpowiednie dlatego, że chcąc powietrzu atmosferycznemu nadać taką samą prężność, co nasyconej parze wodnej, należy je doprowadzić do temperatury znacznie wyższej. Para wodna już przy 120° wywiera ciśnienie 2 atmosfer, powietrze zaś dopiero przy 273°; różnice są jeszcze znaczniejsze przy większej prężności tak, że ostatecznie pod wpływem wysokiej temperatury maszyna o ogrzewanem powietrzu mogłaby stopić się częściowo.

Jeszcze korzystniejszym dla małego przemysłu jest motor gazowy, który coraz częściej znajdujemy w tych miastach, gdzie znajdują się fabryki gazu. I tutaj także siłę stanowi prężność



Tabl. V. **Motor gazowy ~~Lenoir'a.~~**

Biblioteka Główna
Politechniki Śląskiej

ogrzanego powietrza, z tą jedynie różnicą, że ogrzewanie odbywa się nie za pośrednictwem zwykłego źródła ciepła, lecz przez zapalanie wybuchowej mieszaniny gazów, np. powietrza atmosferycznego i gazu oświetlającego. Dziwnym tedy zbiegiem okoliczności powzięto myśl podobną do tej, jaką przed dwoma wiekami wypowiedział znakomity uczony Huyghens, tylko że zamiast proponowanego przezeń prochu, użyto ciał lotnych, wywierających podobne działanie. Motory gazowe rozmaitych systemów różnią się głównie pod tym względem, że w niektórych wybuch gazu odbywa się tylko z jednej strony tłoka, który powraca pod wpływem ciśnienia atmosferycznego, w innych zaś wybuch ma miejsce naprzemian z jednej lub z drugiej strony i efekt jest dwa razy większy.

Motor gazowy, zbudowany przez Otto'na i Langen'a, znajduje coraz większe poparcie. Mechanizm do przenoszenia ruchu wraz z kołem rozpędowem jest umieszczony na pionowej podstawie (patrz tablica p. t. „Motor gazowy“) [1]), wewnątrz której znajduje się cylinder u góry otwarty; wybuch więc gazów odbywa się tutaj tylko po jednej stronie tłoka. U dołu podstawy widzimy płomień gazowy, służący do zapalania mieszaniny gazów. Gdy tłok znajduje się u spodu cylindra, zbiera się pod nim nieco gazu oświetlającego i powietrza atmosferycznego, które przybywają przez dwie rury, jednocześnie także otwiera się zasuwka obok płomienia i mieszanina zapala się. Zasuwka ta wprawdzie zamyka się natychmiast, lecz ponieważ zapalenie miało miejsce, to napływający wciąż gaz oświetlający pali się dalej przy nieprzerwanym dostępie powietrza. Powietrze pod tłokiem ogrzewa się i rozszerza, wskutek czego podnosi się on do góry. W opisywanej maszynie wstępujący ruch tłoka nie przyczynia się do wykonania właściwej pracy, albowiem koło zębate, w które wchodzi zębaty również pręt tłoka, obraca się wtedy luźno, podobnie jak w ściennym zegarze koło, przez które przerzucony jest sznur od gwichtów obraca się, lecz nie zaczepia o mechanizm

---

[1]) Przez pomyłkę wydrukowano na wymienionej tablicy nazwisko Lenoir'a zamiast Otto'na i Langen'a.

kół podczas nakręcania zegara. Gdy tłok osiąga najwyższe swe położenie, maszyna przerywa dopływ gazów, powietrze w cylindrze traci swą prężność i tłok spada pod wpływem ciśnienia atmosferycznego. Podczas zstępującego ruchu tłoka koło zębate jest czynne i przenosi ruch na koło transmissyjne. Ściśle mówiąc maszyna ta jest atmosferyczną, podobnie jak parowy motor Newcomen'a.

Motory gazowe są bardzo korzystne dla małego przemysłu, szczególniej tam gdzie często wypada przerywać robotę. W tych warunkach wydatek jest mniejszy, aniżeli przy maszynie parowej o takiej samej sile, dlatego, że ruch motoru gazowego może być w każdej chwili wstrzymany bez obawy o stratę ciepła. Przeciwnie podczas ciągłej roboty wydatek jest znacznie większy, niż przy użyciu pary, gdyż na siłę jednego konia należy liczyć 2500 do 3000 litrów gazu na godzinę, co kosztuje około sześciu razy więcej, niż wytworzenie odpowiedniej ilości pary. Lecz za to brak kotła usuwa wszelkie niebezpieczeństwo eksplozyi, przynajmniej nie jest ono tutaj większe, jak przy każdem innem urządzeniu gazowem.

KSIĘGA PIĄTA.

ELEKTRYCZNOŚĆ I MAGNETYZM.

ROZDZIAŁ I.

Elektrostatyka, czyli nauka o elektryczności w stanie równowagi.

§ 1. Zjawiska zasadnicze.

Przechodzimy obecnie do dziedziny zjawisk, różniących się wielce, na pierwszy rzut oka, od tych, które stanowią treść ksiąg poprzednich. Odkrycie zjawisk, któremi obecnie zająć się mamy, ich ugrupowanie systematyczne i zestawienie praw, jakim one ulegają, są świeżej względnie daty, w porównaniu z innemi działami fizyki. Historyę tego przedmiotu w krótkim zarysie podamy w końcowych paragrafach każdego rozdziału, obecnie zaś zajmiemy się opisem zjawisk wzmiankowanych, aby je następnie ugrupować w sposób odpowiedni i zbadać związek ich ze zjawiskami, które na pozór zupełnie się od nich różnią.

Potrzyjmy suchą tafelkę szklaną takąż tafelką żywiczną i następnie oddalmy je od siebie, a zauważymy, że obie nabrały szczególnych własności, których przed potarciem nie objawiały: jeżeli zbliżymy do siebie tafelki stronami potartemi, zauważymy, że przyciągają się wzajemnie z pewną siłą, sposób mierzenia której podamy niżej; każda z nich będzie także przyciągała drobne skrawki papieru, lekkie słomki, niewielkie kawałki rdzenia

bzowego i t. d. Zdawałoby się tedy, że pomiędzy własnościami szkła i żywicy, nabytemi właśnie wskutek tarcia, nie zachodzi żadna różnica. Rzecz ma się jednak inaczej. Zawieśmy małą kulkę z rdzenia bzowego na długiej i cienkiej nici jedwabnej i zbliżmy do niej tafelkę żywiczną, potartą poprzednio tafelką szklaną; kulka zbliży się szybko do tafelki, przylgnie do niej na chwilę, następnie zaś odskoczy; po oddaleniu tafelki kulka wykona kilka wahnięć, poczem wróci do stanu równowagi, nić zaś przyjmie kierunek pionowy. Otóż jeżeli obecnie zbliżymy do kulki tafelkę szklaną, kulka zostanie przyciągniętą; jeżeli zaś nie pozwalając jej, aby zetknęła się z tafelką szklaną, wprowadzimy zamiast szkła znowu żywicę, użytą w naszem doświadczeniu, wówczas żywica kulkę odepchnie, jak pierwotnie. Doświadczenie to można powtórzyć kilkakrotnie: za każdym razem tafelka szklana przyciągnie, żywiczna zaś odepchnie kulkę z rdzenia bzowego, która pierwotnie była w zetknięciu z tafelką żywiczną. Widzimy tedy, że nabyte własności tafelek nietylko różnią się, lecz ze względu na kierunek ruchu zbliżanej do nich kulki są sobie przeciwne. Każda z tafelek przez tarcie wzajemne nabywa dopiero co opisanych nowych własności, posiada bowiem *ładunek elektryczny*, czyli jest *naelektryzowaną*: żywiczna *elektrycznością żywiczną*, szklana zaś — *elektrycznością szklaną*.

Kulka z rdzenia bzowego po zetknięciu z żywicą posiada też własność przyciągania lekkich ciał; inaczej mówiąc: kulka elektryzuje się przez *zetknięcie* z tafelką żywiczną. Należy więc zbadać jeszcze, czy elektryczność kulki jest żywiczna czy też szklana. W tym celu zawieśmy drugą kulkę z rdzenia bzowego również na nici jedwabnej i zetknijmy ją na chwilę z naelektryzowaną tafelką żywiczną; wskutek tego kulka ta otrzyma pewien ładunek elektryczny, tego samego rodzaju, co ładunek pierwszej kulki. Otóż zobaczymy, że zarówno tafelka żywiczna jak i pierwsza kulka odpychają drugą kulkę, tafelka zaś szklana ją przyciąga. Ponieważ przyciąganie lub odpychanie jest *jedyną* cechą, jaką dotychczas wprowadziliśmy dla odróżnienia dwóch rodzajów elektryczności, powiemy, że kulka z rdzenia bzowego po zetknięciu z tafelką żywiczną, uprzednio potartą szkłem, po-

siada pewien ładunek elektryczności *żywicznej*. Gdybyśmy kulkę, zamiast z żywicą, zetknęli ze szkłem, użytem w naszem doświadczeniu, przekonalibyśmy się, że kulka naładowała się elektrycznością *szklaną*; tafelka szklana będzie ją odpychała, żywiczna zaś będzie ją przyciągała.

Zobaczymy wkrótce, że oprócz żywicy i szkła istnieje jeszcze mnóstwo innych ciał, które przez wzajemne tarcie elektryzują się. Lecz badając w sposób powyższy stany elektryczne tych ciał po potarciu, przekonamy się, że niektóre posiadają ładunek szklanej elektryczności, inne zaś elektryczności żywicznej. Jakikolwiek ładunek pierwszego rodzaju będziemy odtąd krócej nazywali *dodatnim*, ładunek zaś drugiego rodzaju — *ujemnym;* w tem samem znaczeniu będziemy też mówili o *elektryczności dodatniej i ujemnej*.

Mówiąc o elektryczności szkła potartego, należy zawsze dodać, czem je potarto. Elektryczność szkła, potartego żywicą, nazwaliśmy dodatnią i wiemy obecnie, jak to należy rozumieć. Otóż gdybyśmy szkło (Flintglas) potarli kością słoniową albo flanelą, przekonalibyśmy się, że elektryczność jego jest tego samego rodzaju, co elektryczność żywicy potartej szkłem, czyli że jest ona ujemną.

W każdym więc wypadku należy wymienić oba ciała wzajemnie pocierane. Podajemy tutaj według Faraday'a, szereg ciał ugrupowanych w takim porządku, że każde z nich elektryzuje się ujemnie lub dodatnio, zależnie od tego, czy pocieramy je ciałem, przed niem lub po niem wymienionem.

Pomiędzy szeregiem Faraday'a i szeregami, ułożonymi przez innych fizyków, zachodzą pewne nieznaczne różnice, co pochodzi ztąd, że rodzaj wywołanej przez tarcie elektryczności zależy od budowy powierzchni przedmiotów pocieranych; tak np. szkło matowe różni się pod tym względem bardzo od szkła polerowanego. W ogóle jednak szeregi ułożone przez różnych fizyków są dosyć zgodne tak, że można z nich korzystać w praktyce. Szereg Faraday'a jest następujący:

Futro kocie i niedźwiedzie
Flanela
Kość słoniowa
Stosiny pióra

Kryształ górny
Flintglas
Bawełna
Płótno
Biały jedwab'
Ręka
Drzewo
Lak
Żelazo
Miedź
Mosiądz
Cyna
Srebro
Platyna
Siarka.

Lak np. potarty flanelą elektryzuje się ujemnie, a flanela jednocześnie dodatnio; lak potarty siarką elekryzuje się dodatnio, siarka zaś ujemnie. Innemi słowy *jeżeli jakiekolwiek dwa ciała naelektryzujemy, trąc jedno o drugie, to elektryczności ich zawsze będą przeciwne: elektryczność jednego z nich będzie dodatnią, drugiego — ujemną.*

Zobaczymy, że sprawdza się to w każdym wypadku, że jest to zjawisko zasadnicze, które posłużyło niektórym fizykom za punkt wyjścia do teoryi zjawisk elekrycznych.

Czytelnik wie już, że kulka z rdzenia bzowego, zawieszona na nici jedwabnej i zetknięta z ciałem naelektryzowanem nabiera najprzód elektryczności tego samego rodzaju, co elektryczność tego ciała; następnie zostaje przezeń odepchniętą; inne zaś ciało, naładowane elektrycznością innego rodzaju, przyciąga tę samą kulkę. Uogólniając te rezultaty, możemy je tak wyrazić:

Dwa ciała naładowane elektrycznością jednego i tego samego rodzaju (oba dodatnią lub oba ujemną) *odpychają się wzajemnie.*

Dwa ciała naładowane elektrycznością przeciwnych rodzajów przyciągają się wzajemnie.

Pierwsze prawo można także w sposób bardzo wygodny sprawdzić, zawieszając dwie kulki z rdzenia bzowego na końcach długiej i suchej nici jedwabnej (fig. 501, str. 923). Jeżeli obie kulki zetkniemy z naelektryzowaną tafelką szkłaną lub żywiczną, to w obydwóch wypadkach odepchną się one wzajemne. Każdą z kulek, w podobny sposób naelektryzowaną dodatnio lub ujemnie, można użyć do sprawdzenia drugiego tylko co wypowiedzianego prawa.

Przy wykonywaniu opisanych doświadczeń należy starać się, ażeby tafelki i nić jedwabna były możliwie suche. Chcąc naelektryzować przez tarcie niektóre z ciał, umieszczonych w sze-

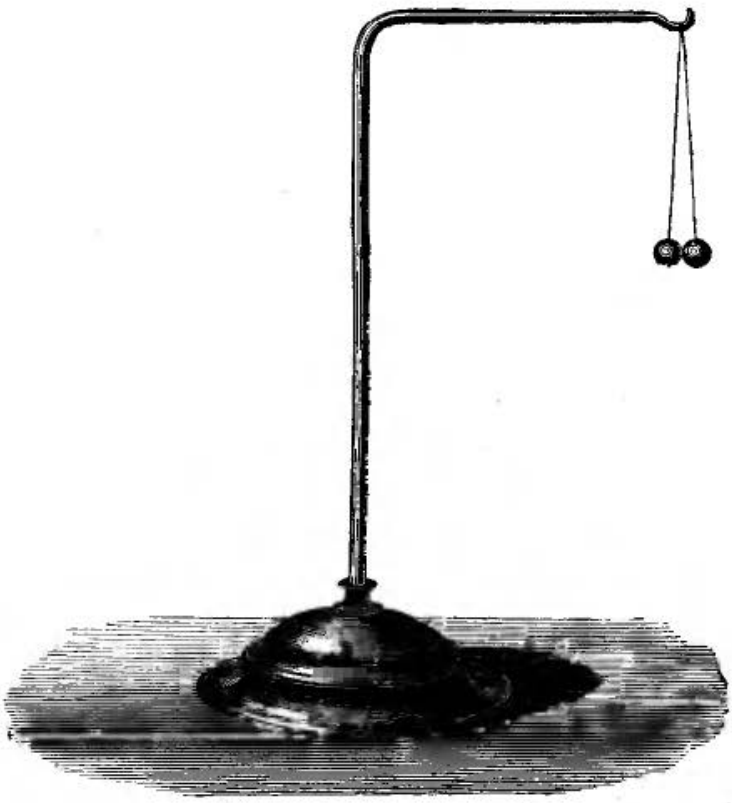


Fig. 501. Kulki z rdzenia bzowego.

regu Faraday'a, jak np. mosiądz lub żelazo, nie należy ich trzymać wprost w ręku, lecz przymocować do laski laku lub do szklanego pręta, następnie ująć za lak lub szkło i pocierać np. flanelą lub futrem kociem, inaczej bowiem nie dostrzeżemy na nich po potarciu żadnego ładunku elektrycznego. W dalszym ciągu niniejszego rozdziału czytelnik znajdzie obszerniejsze wyjaśnienie tych wskazówek.

Zobaczymy, że przytoczone zjawiska, opisane dotychczas tylko jakościowo, należą do najbardziej zasadniczych przejawów tego, co nazwano *elektrycznością*. W miarę, jak będziemy postępowali naprzód, wyjaśni się też nam coraz lepiej znaczenie tego wyrazu, tymczasem zaś niech nam wystarczą terminy wprowadzone, będziemy ich używali jedynie w tem znaczeniu, jakie nadaliśmy im w niniejszym paragrafie.

§ 2. Przewodniki i nieprzewodniki, czyli izolatory. Elektroskop.

Weźmy suchy żywiczny krążek o średnicy, równej kilkunastu centymetrom i pocierajmy małą tylko część jego powierzchni futrem kociem lub flanelą, następnie zbliżajmy kolejno różne części krążka do kulki z rdzenia bzowego, a przekonamy się, że tylko potarta część krążka jest naelektryzowaną, w danym wypadku ujemnie. Podobnie pocierając jeden koniec suchej rurki szklanej suchym jedwabiem, a następnie zbliżając różne części rurki do kulki z rdzenia bzowego albo do lekkich słomek, przekonamy się, że tylko potarty koniec rurki posiada pewien ładunek elektryczny, który w tym wypadku jest dodatni. Badając w ten sam sposób laskę laku, krążek ulany ze smoły, pałeczkę bursztynu i t. p., poznamy cały szereg ciał tego rodzaju, że ładunek elektryczny, wywołany przez tarcie na pewnej części ich powierzchni, nie rozprzestrzenia się po całej powierzchni, lecz pozostaje jedynie tam, gdzie miało miejsce tarcie. Takie ciała nazywają się *nieprzewodnikami* albo *izolatorami* elektryczności.

Nie wszystkie ciała zachowują się w podobny sposób. Znamy wiele innych o własnościach wprost przeciwnych. Umieśćmy mosiężny cylinder *a b* (fig, 502) na nóżce szklanej i dotknijmy jeden jego koniec naelektryzowaną rurką szklaną, a przekonamy się, że w oka mgnieniu cała powierzchnia cylindra została naelektryzowaną: podwójne kulki rdzenia bzowego, zawieszone w tym razie na wilgotnych niciach w różnych miejscach powierzchni cylindra, odpychają się wzajemnie. W sposób podany wyżej przekonamy się, że *cała* powierzchnia cylindra posiada ładunek elektryczny tego samego rodzaju, co rurka szklana; nabył on ją przez *zetknięcie* z innem ciałem naelektryzowanem. Elektryczność jego jest zawsze tego samego rodzaju, co elektryczność

Fig. 502. Przewodnik odosobniony.

ciała z nim zetkniętego. Dotknijmy teraz powierzchni cylindra dłonią lub też sztabką żelazną, a przekonamy się, że wskutek tego dotknięcia stracił on na całej swej powierzchni ładunek elektryczny; czyli, że został, jak zwykliśmy mówić, *wyładowany*.

Po wyładowaniu cylindra potrzyjmy jeden jego koniec flanelą, starając się nie dotykać go ręką; znowu *cała* powierzchnia cylindra okaże się naelektryzowaną i ładunek jego będzie, według szeregu Faraday'a, ujemnym. Widzimy tedy, że cylinder mosiężny naelektryzowaliśmy na całej powierzchni przez tarcie pewnej tylko jej części. Podobnie jak w poprzedniem doświadczeniu, elektryczność wytworzona w jednem miejscu przeniosła się na inne w bardzo krótkim okresie czasu, którego nawet nie zdołaliśmy ocenić. Wyrażamy to krócej, mówiąc, że mosiądz jest *dobrym przewodnikiem* elektryczności.

Wybraliśmy tu dwa skrajne wypadki, badając z jednej strony żywicę, z drugiej mosiądz. Badając większą liczbę ciał, dochodzimy do wniosku, że jedne przewodzą elektryczność z bardzo wielką prędkością, inne z mniejszą, jeszcze inne bardzo powolnie, że jednemsłowem od przewodników do izolatorów istnieje przejście mniej lub więcej stopniowe. Oto szereg ciał, ułożonych według malejącej zdolności przewodnictwa elektryczności:

Przewodniki.

Metale	Rozczyn soli	Żywe organizmy roślinne
Węgiel drzewny	Woda morska	Części żyjących organizmów zwierzęcych
Grafit	Woda źródlana	Sole rozpuszczalne
Kwasy	Woda deszczowa	Len
	Śnieg	Bawełna.

Półprzewodniki.

Alkohol	Kwiat siarkowy	Papier
Eter	Drzewo suche	Słoma
Szkło sproszkowane	Marmur	Lód przy 0^0 C.

Izolatory.

Suche tlenki metali	Oleje eteryczne	Jedwab
Oleje tłuste	Porcelana	Kamienie drogocenne
Popiół	Rośliny wysuszone	Mika

Lód przy—25° C.	Skóra	Szkło
Fosfór	Pergamin	Agat
Wapno	Papier suchy	Wosk
Kreda	Pióra	Siarka
Zarodniki widłaków	Włosy	Żywice
Kauczuk	Wełna	Bursztyn
Kamfora	Jedwab farbowany	Szellak.

Prędkość przewodnictwa w ciałach, które tu nazwano *przewodnikami*, jest olbrzymią i nie daje się nawet bezpośrednio zmierzyć; w *półprzewodnikach elektryczność potrzebuje kilku sekund* czasu do rozprzestrzenienia się w dosyć cienkich warstwach, w *nieprzewodnikach* zaś, czyli izolatorach, więcej niż minutę. *Szereg powyższy nie jest zupełnie ścisły*, a to przeważnie z tej przyczyny, że jedno i to samo ciało jest lepszym lub gorszym przewodnikiem, zależnie od budowy jego powierzchni oraz od tego, czy jest ona mniej lub więcej suchą; para wodna bowiem, jako dobry przewodnik, odbiera izolatorom zdolność *izolacyi*, czyli zabezpieczania elektryczności od rozprzestrzeniania się. Jako przykład Riess podaje, że podczas gdy świeżo odłupana blaszka miki należy do półprzewodników, mika o powierzchni wystawionej przez pewien czas na działanie powietrza, jest jednym z najlepszych izolatorów. Na zdolność przewodnictwa elektryczności wpływa także bezpośrednio i pośrednio zmiana temperatury, wiemy bowiem, że stopień wilgotności ciał zależy od temperatury. Jako przykład bezpośredniego wpływu można przytoczyć, że szkło, które przy zwykłej temperaturze jest bardzo dobrym izolatorem, ogrzane do 300° staje się dobrym przewodnikiem elektryczności, podobnie jak roztopiona żywica. *Gazy są w ogóle złemi przewodnikami elektryczności*, pod warunkiem, że nie zawierają większych ilości pary wodnej. Ich zdolność przewodnictwa zależy w wysokim stopniu od ich stanu rozrzedzenia; gazy bardzo rozrzedzone są lepszemi izolatorami niż gazy (przy zwykłej temperaturze) pod ciśnieniem jednej atmosfery. O gazach powiemy więcej w dalszym ciągu, gdzie uwzględnimy wpływ ciśnienia i innych czynników na ich zdolność przewodnictwa elektryczności.

Własności izolatorów są dla nas bardzo ważne; za pomocą nich możemy, jak powiedzieliśmy, przeszkodzić rozprzestrzenianiu się elektryczności i wyznaczyć miejsce, na którem powinna pozostać w ciągu określonego czasu. Możemy za pomocą izolatorów oddzielić powierzchnię jednego przewodnika od innych i naelektryzować go przez tarcie. Chcąc zaś naelektryzowany przewodnik wyładować, wystarczy dotknąć go w któremkolwiek miejscu ręką; później zobaczymy jak należy rozumieć sam proces wyładowania elektrycznego.

Przewodniki izoluje się zazwyczaj tak, jak wskazano na figurze 502, przyczem dobrze jest powlec szkło warstwą werniksu lub szellaku. Również dobrą, a w niektórych wypadkach dogodniejszą izolacyę osiągamy przez zawieszenie przewodników na suchych niciach lub wstążeczkach jedwabnych.

Z opisanych własności przewodników i izolatorów skorzystano przy budowie czułego i wygodnego przyrządu, t. zw. *elektroskopu*, za pomocą którego można zbadać, czy dane ciało posiada ładunek elektryczny lub nie. Przyrząd ten, przedstawiony na figurze 503, str. 928, składa się z walcowatej pałeczki metalowej ab, zakończonej kulką d i osadzonej w naczyniu szklanem za pomocą kauczukowego korka c, który odgrywa rolę izolatora. Do dolnego końca pałeczki są przymocowane dwa długie listki złota malarskiego, które nigdy nie powinny dotykać ścian naczynia; to ostatnie opiera się na metalowej podstawie w taki sposób, że pałeczka ab i listki złota w stanie równowagi mają kierunek pionowy. Całość, złożona z kulki d, pałeczki ab i listków złota, tworzy przewodnik izolowany. Jeżeli kulkę d zetkniemy z ciałem naelektryzowanem, to w tej samej chwili przewodnik ów na całej swej powierzchni zostanie naładowany elektrycznością tego samego rodzaju, co elektryczność zetkniętego z kulką ciała: listki złota, naelektryzowane *jednoimiennie* (oba dodatnio, albo oba ujemnie), odepchną się i zawisną w położeniu pochyłem, które zachowają nawet po oddaleniu ciała naelektryzowanego, tak długo, dopóki przewodnik złożony z kulki, pałeczki i listków, nie straci wskutek złej izolacyi swego ładunku elektrycznego.

Jeżeli zetkniemy z kulką wyładowanego elektroskopu ciało A o elektryczności dodatniej tak, że listki odepchną się, a następnie oddaliwszy ciało A, zetkniemy kulkę z innem ciałem B

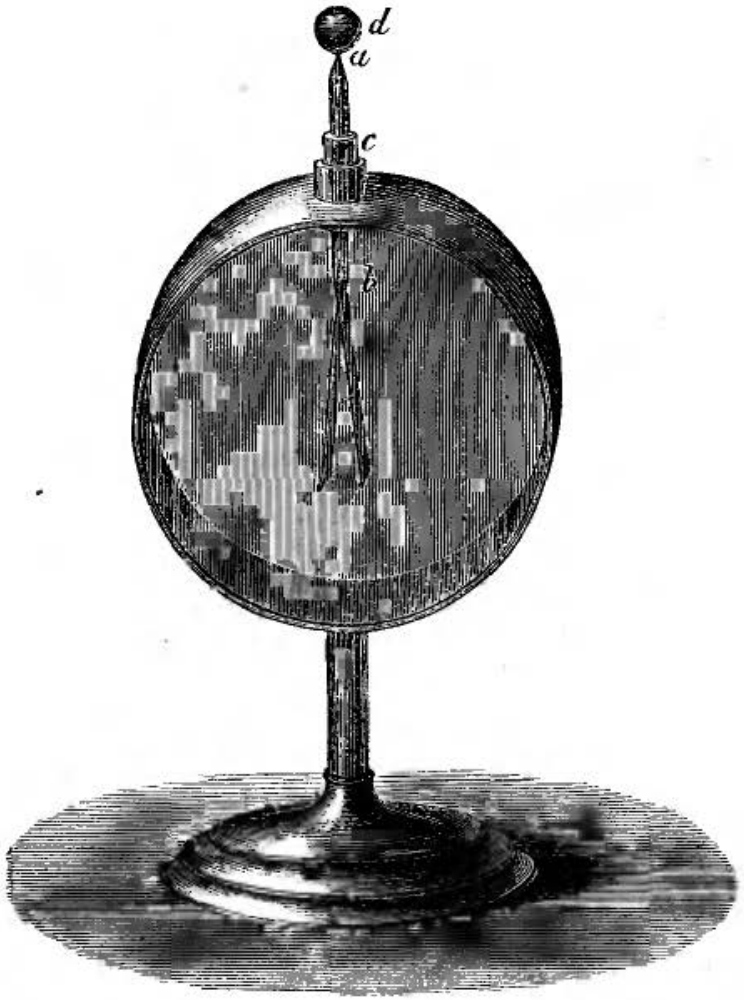


Fig. 503. Elektroskop.

naelektryzowanem również dodatnio, to listki elektroskopu jeszcze bardziej się odepchną; gdy zaś elektryczność ciała B będzie ujemną, wtedy listki zbliżą się do siebie albo nawet zupełnie wrócą do pionowego położenia. Powtarzając podobne doświadczenia z różnemi ciałami, naładowanemi bądź elektrycznością dodatnią, bądź ujemną, dochodzimy do wniosku, że *dwa ciała o elektrycznościach jednoimiennych wywierają na listki elektroskopu działania zgodne, dwa zaś ciała o elektrycznościach różnoimiennych — działania sprzeczne*; innemi słowy: ciała jednakowo naelektry-

zowane wzajemnie wzmacniają swój wpływ na listki elektroskopu, ciała zaś naładowane różnoimiennie osłabiają wzajemny swój wpływ.

Ze względu na rodzaj elektryczności poznaliśmy tedy prawa, na podstawie których możemy porównywać ładunki różnych ciał z elektrycznością szkła potartego żywicą i orzec, jakiego one są rodzaju dla każdego z nich. Mając jedno przynajmniej ciało o elektryczności znanej, dodatniej lub ujemnej (+ lub —), możemy za pomocą elektroskopu wykryć, czy elektryczność jakiego bądź innego ciała jest dodatnia lub ujemna.

Dotychczas widzieliśmy, że dwa rodzaje elektryczności różnią się wzajemnie, a nawet są sobie wprost przeciwne, każdy jednak z nich, wzięty oddzielnie, nie wyróżnia się żadnemi szczególnemi cechami. Lecz następnie zobaczymy, że elektryczność dodatnia, czyli szklana, posiada niektóre cechy odmienne od cech elektryczności ujemnej, czyli żywicznej. Zresztą jest to rzeczą czystej umowy, że elektryczność szkła, potartego żywicą, nazywamy dodatnią, elektryczność zaś drugiego rodzaju ujemną.

§ 3. Prawo Coulomba. Maszyna elektryczna. Potencyał. Gęstość elektryczności.

Wiemy już, że przewodnik odosobniony można naelektryzować przez zetknięcie z ciałem naelektryzowanem, np. ze szkłem potartem i że przewodnik otrzymuje wówczas ładunek tego samego rodzaju, co ładunek ciała. Ładunek elektryczny nie pozostaje bynajmniej w miejscu, które zetknięto z ciałem naelekryzowanem, lecz *rozprzestrzenia się* w oka mgnieniu *po całym przewodniku*. Jeżeli teraz znów dotkniemy się przewodnika naelektryzowaną pałeczką szklaną, udzielimy mu przez to nowego ładunku elektrycznego, który również rozejdzie się po całej powierzchni przewodnika; w taki sposób możemy mu udzielić wiele ładunków elektrycznych, dzięki czemu przewodnik odosobniony będzie coraz silniéj naładowanym. Im bardziej naladowanem jest ciało, z tem większą siłą odpycha

ono zawieszoną na nici kulkę korkową, jeżeli oczywiście inne warunki się nie zmieniają. To samo można w następujący sposób wyrazić: Ciało elektryczne, które przy innych warunkach niezmienionych wywiera większą siłę na naelektryzowaną kulkę korkową, zawiera większą *ilość elektryczności*. Nie należy przez to rozumieć ilości pewnej substancyi, gdyż wyrazów powyższych używamy jedynie w celu zaznaczenia faktu, że ciała elektryczne mogą wywierać mniejsze, lub większe działanie. Mówimy wszak o ilościach światła lub ciepła, nie uważając ich jednak za substancye, czyli pewnego rodzaju materye. Odróżniamy oczywiście ilości elektryczne dodatnie i ujemne. Z siły, jaką objawia ciało elektryczne, wnioskujemy tedy o zawartej w niem ilości elekryczności. Jeżeli dwa ciała naładowane wywierają równe działania na jednę i tę samą kulkę korkową, umieszczoną w obu wypadkach w jednakowej od ciał tych odległości, wówczas powiadamy, że dwa te ciała zawierają równe ilości elekryczności. Natomiast, jeżeli jedno z ciał wywiera działanie dwa razy większe, niż drugie, wówczas powiadamy, że zawiera ono dwa razy większą ilość elektryczności. Mierzymy tedy całkowitą ilość elektryczności, zawartą w ciele, przez działanie jakie ono wywiera na małą naelektryzowaną kulkę korkową, umieszczoną w pewnej, oznaczonej odległości.

Otóż siła, jaką jedno ciało naelektryzowane wywiera na drugie, zmienia się wraz z odległością pomiędzy niemi. Powstaje tedy pytanie, jak mianowicie zmienia się wielkość tej siły pod wpływem zmiany odległości. Ażeby odpowiedzieć na to pytanie, musiano uciec się do doświadczenia i badać pod tym względem bardzo małe ciała naelektryzowane; wtedy bowiem można było w rachunku pominąć wpływ ich kształtu na wielkość siły. Otóż wyobrażając sobie coraz to mniejsze ciała naelektryzowane, dotarto stopniowo do pojęcia *punktu elektrycznego*, rozumiejąc przezeń możliwie drobne ciałko, naładowane pewną ilością elektryczności. Otóż prawo zasadnicze, które zawdzięczamy mozolnym badaniom Coulomba, brzmi tak:

Siła, jaką wywierają na siebie dwa punkty elektryczne, równa się iloczynowi z ich ładunków elektrycznych, podzielonemu przez

kwadrat z ich odległości; siła ta jest odpychającą lub przyciągającą zależnie od tego, czy ładunki elektryczne punktów są jedno — lub różnoimienne.

Chcąc przeto oznaczyć siłę, z jaką działają na siebie dwa ciała o skończonych wymiarach, o pewnej rozciągłości, należy w myśli podzielić sobie każde z nich na bardzo wielką liczbę drobnych ciałek, czyli punktów elektrycznych i znaleść wielkość siły dla każdej pary tych punktów. Suma wszystkich tych sił jest wtedy rzeczywistą siłą, jaką wywierają na siebie te dwa naładowane ciała. Prawo powyższe nosi miano swego autora, nazywamy je mianowicie *prawem Coulomba.*

Dzięki temu prawu możemy przedewszystkiem bez trudności utrwalić jednostkę elektryczną. Wnioskujemy bowiem o wielkości pewnej ilości elektryczności ze siły, jaką ona wywiera. Mając przeto jednostkę dla sił, możemy też dla mierzenia ilości elektryczności przyjąć jednostkę, zależną od jednostki siły. Otóż jednostka siły jest już oddawna ustaloną w mechanice; jest nią mianowicie 1 dyna. Dyna jest to siła, która w ciągu jednej sekundy udziela masie jednego grama przyśpieszenie jednego centymetra. Według tego np. siła, z jaką ziemia przyciąga jeden kilogram, równa się 1000×981 dynom dlatego, że ciało spadające pod wpływem przyciągania ziemskiego doznaje w ciągu jednej sekundy przyśpieszenia 981 centymetrów. Ponieważ tedy jednostka siły jest znana, możemy określić jednostkę elektryczności. Jest to ilość elektryczności, która na taką samą ilość elektryczności, znajdującą się w odległości 1 centymetra, wywiera siłę, równą 1 dynie. Zamiast tej t. zw. elektrostatycznej jednostki, używamy zwykle innej, ustalonej na odmiennej podstawie; jest ona około trzy tysiące milionów razy większą od dopiero co określonej. Tę nową jednostkę nazywamy 1 kulombem; mówimy np., że pewne ciało zawiera 10 kulombów lub 0,5 kulombów i t. d. W dalszym ciągu dopiero poznamy powód wprowadzenia tej nowej jednostki; tymczasem wszystkie ładunki elektryczne będziemy mierzyli kulombami.

Opiszemy teraz z kolei maszynę, za pomocą której można przez tarcie wytwarzać większe ilości elektryczności, ładując

jednocześnie przewodnik odosobniony; przyrządy tego rodzaju nazywamy maszynami elektrycznemi. Zamiast nacierać rurę szklaną kawałkiem skóry, osadzamy okrągłą taflę szklaną *S* (fig. 504) na osi, którą można obracać za pomocą korby; podczas obracania tafla trze się ustawicznie o dwa kawałki skóry *R*, pokryte amalgamatem cyny, które cisną na taflę z obu stron. Wskutek tego wytwarza się na tafli elektryczność dodatnia, na *pocieraczu* zaś *R* elektryczność ujemna Jeżeli w bliskości tafli ustawimy przewodnik odosobniony *C*, zaopatrzony w dwa drewniane pierścienie z szeregiem ostrych kolców, np. igieł do szycia, zwróconych ku powierzchni tafli, wtedy (wkrótce to wyjaśnimy) będą one ustawicznie przyswajały sobie elektryczność dodatnią tafli. Ponieważ kolce te są metalicznie połączone z przewodnikiem *C*, przeto ładunki ich rozchodzą się po tym przewodniku. Przewodnik odosobniony będzie tedy naelektryzowany dodatnio i to tem silniej, im dłużej będziemy obracali taflę szklaną. *Pocieracz R jest połączony z innym przewodnikiem M*, odosobnionym lub połączonym z ziemią; po tym przewodniku może rozchodzić się elektryczność ujemna pocieracza. Do pocieracza jest przymocowany pręt z ebonitu, wygięty ku górze, na którym wiszą dwa kawałki jedwabnej materyi, zakrywające taflę szklaną, od pocieracza prawie do kolców. Zobaczymy w dalszym ciągu, w jakim celu zawieszono tę materyą jedwabną. Na tej samej zasadzie jest zbudowana maszyna, przedstawiona na tablicy p. t. „Maszyna elektryczna.“ Za pomocą tego prostego przyrządu możemy udzielić przewodnikowi *C* dowolną ilość elektryczności dodatniej, zaś przewodnikowi *M* dowolną ilość elektryczności ujemnej.

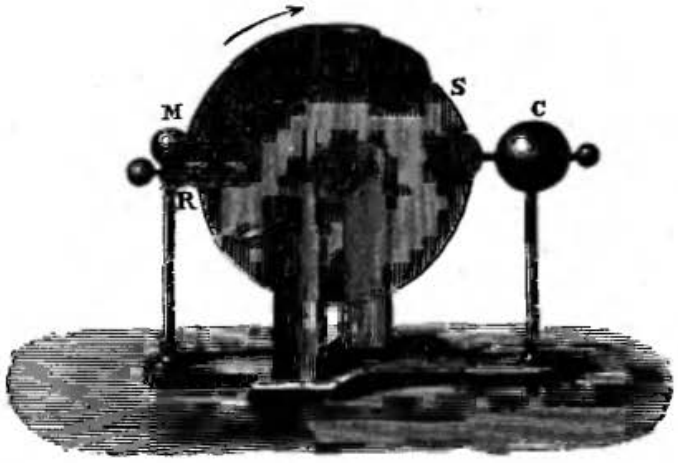
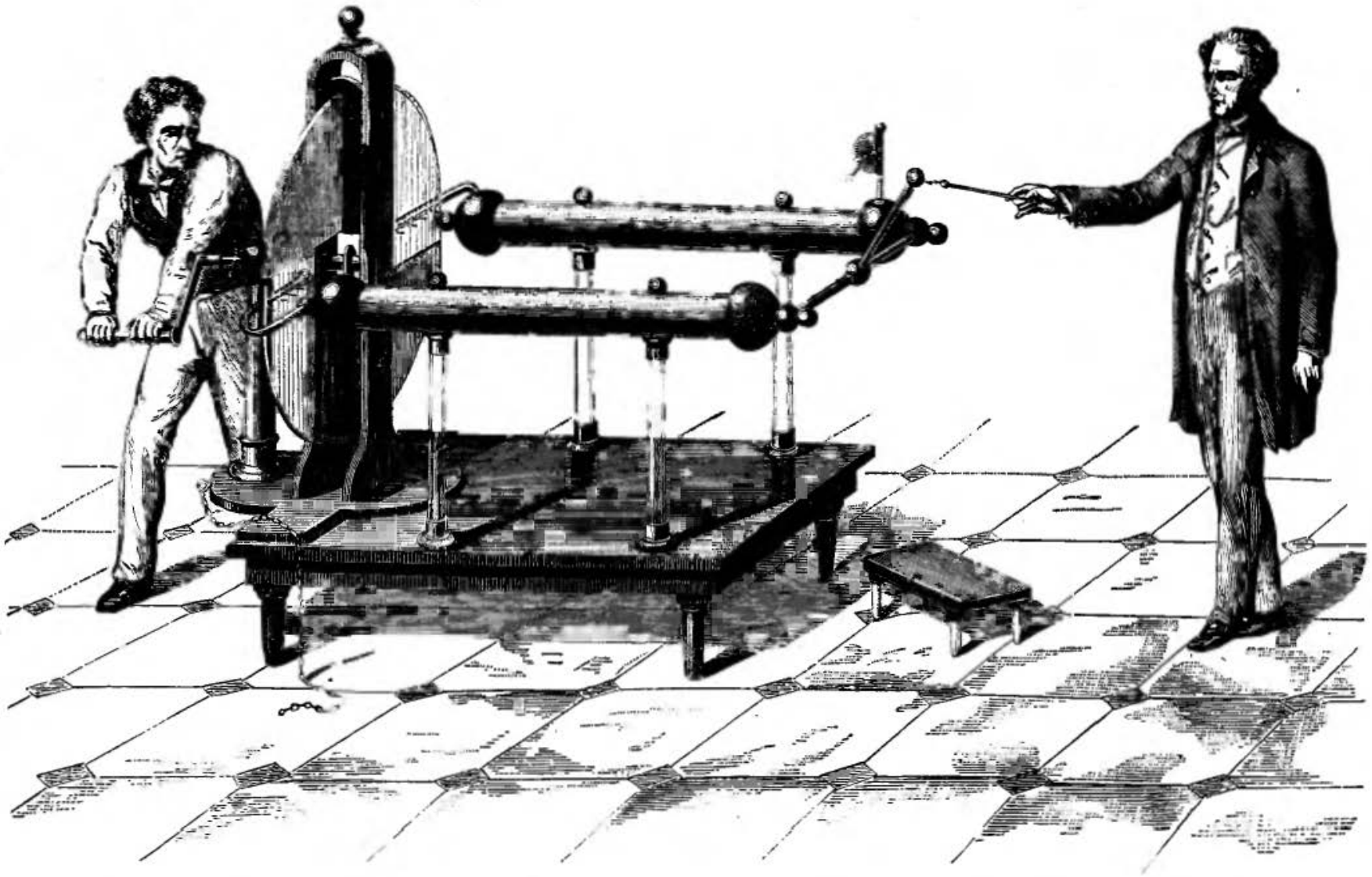


Fig. 504. *Maszyna elektryczna.*



Tabl. VIII. **Maszyna elektryczna.**

Zanim pójdziemy dalej, musimy wytworzyć sobie pewne pojęcie, mające bardzo wielką wagę w nauce o elektryczności. Każda siła, jak wiemy, posiada własność wykonywania pracy. Jeżeli siła, jakiegokolwiek pochodzenia, działa na pewne cialo i ono pod jej wpływem porusza się, wówczas siła wykonywa pracę, którą mierzymy iloczynem z wielkości siły i długości drogi, przebytej w kierunku jej działania. Chcąc natomiast poruszyć ciało w kierunku przeciwnym działającej nań sile, musimy wykonać pracę, ażeby przezwyciężyć tę siłę; wielkość tej pracy wykonanej równa się także iloczynowi z siły i drogi, przebytej w kierunku jej działania. Jeżeli np. usuniemy deskę z pod kamienia, leżącego na niej na wysokości, dajmy na to, 10 metrów nad powierzchnią ziemi, wtedy kamień zacznie swobodnie spadać pod wpływem siły ciężkości, która wykonywa pracę na kamieniu. Wielkość tej pracy równa się iloczynowi z siły ciężkości i wysokości spadku (10 metrów). Naodwrót chcąc podnieść ten sam kamień z powierzchni ziemi na wysokość 10 metrów, musimy wbrew sile ciężkości wykonać pewną pracę; wielkość tej ostatniej jest dokładnie równą wielkości pracy, jaką poprzednio wykonała siła ciężkości. Otóż to właśnie pojęcie pracy chcemy obecnie zastosować do sił elektrycznych.

Wyobraźmy sobie jakiekolwiek ciało naelektryzowane A (fig. 505) i przypuśćmy, że jest ono zupełnie samotne w całym wszechświecie. Z ciała tego, o ładunku np. dodatnim, wychodzą siły we wszystkich kierunkach. Jeżeli teraz w jakimkolwiek punkcie, np. w B, umieścimy małą dodatnio - elektryczną cząstkę (np. 1 kulomb), która może zupełnie swobodnie się poruszać, wtedy pod wpływem sił elektrycznych zostanie ona odepchniętą od A, będzie się od niego oddalała coraz bardziej, aż zgubi się w nie-

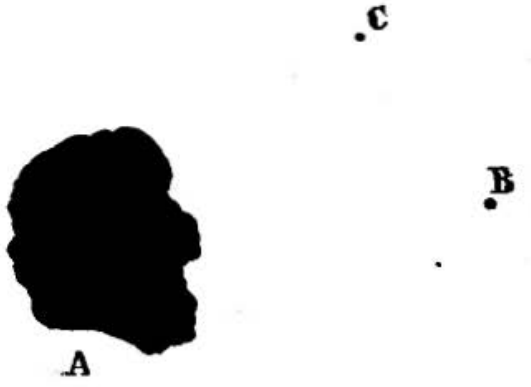


Fig. 505. Objaśnienie potencyału.

skończoności. Siły więc elektryczne, wychodzące z ciała *A*, wykonywają wtedy pracę na cząstce *B*. Chcąc natomiast zbliżyć cząstkę tę z nieskończoności do ciała *A* tak, ażeby odległość pomiędzy niemi się zmniejszyła, musimy wykonać pracę wbrew siłom elektrycznym tego ciała. Na pozór zdaje się, że musimy wykonywać różne ilości pracy, chcąc cząstkę elektryczną sprowadzić z nieskończoności do punktu *B*, a to zależnie od drogi, po której ją przenosimy; niezbędna ilość pracy jest zapewne mniejsza lub większa, zależnie od tego, czy cząstkę sprowadzamy do punktu *B* drogą najkrótszą, czy też inną dowolną, dłuższą drogą. Matematyka uczy nas jednak, że tak nie jest, że chcąc sprowadzić cząstkę ową z nieskończoności do punktu *B*, musimy zawsze wykonać, wbrew siłom elektrycznym ciała *A*, pewną oznaczoną ilość pracy, zupełnie niezależną od drogi. Lecz chcąc tę samą cząstkę sprowadzić z nieskończoności nie do punktu *B*, lecz do innego punktu, *C* lub *D*, musimy wykonać ilość pracy, w ogóle różną od tamtej. Dla każdego jednak punktu w przestrzeni praca wspomniana posiada zupełnie oznaczoną wartość, niezależnie od dróg przebytych, jeżeli tylko cząstka ruchoma i ciało *A* nie ulegają żadnej zmianie. Wielkość pracy, w ten sposób oznaczonej, nazywamy *potencyałem sił*, wychodzących z *A*, w danym punkcie przestrzeni. *W każdym więc punkcie przestrzeni, otaczającej ciało A, panuje pewien oznaczony potencyał.*

Wielkość potencyału mierzymy pewną jednostką, którą nazwano *woltem*. Wprowadzenie tej jednostki uzasadnimy w dalszym ciągu.

Jeżeli zamiast jednego ciała elektrycznego *A* mamy cały szereg takich ciał, dowolnie ugrupowanych, wtedy w każdym punkcie przestrzeni, otaczającej te ciała, czyli, jak mówimy zwykle, w każdym punkcie *pola elektrycznego* panuje pewna siła wypadkowa, a więc też pewien oznaczony potencyał. Im bliżej ciała naelektryzowanego leży dany punkt pola, tem większy jest jego potencyał; w miarę jego oddalenia od ciała naelektryzowanego potencyał ten staje się mniejszy. Wokoło ciała *A* znajdziemy wiele punktów, mających jeden i ten sam potencyał, które

połączone w myśli tworzą pewną powierzchnię, otaczającą ciało naelekryzowane. Możemy sobie wyobrazić dowolny szereg takich powierzchni, otaczających ciało naelektryzowane. Wszystkie zatem punkty pola elektrycznego, znajdujące się na jakiejkolwiek powierzchni tego rodzaju, mają wspólny potencyał, który zmienia się przeto tylko w miarę, jak przechodzimy z jednej powierzchni na drugą: im mniejszą jest odległość danej powierzchni od ciała naelektryzowanego, tem większy jest odpowiadający jej potencyał. Każdą taką powierzchnię nazywamy *powierzchnią stałego potencyału*. Wyobraźmy sobie na jednej z nich cząstkę elektryczną, mogącą się swobodnie poruszać; dzięki siłom odpychającym ciała A będzie ona zdążała ku nieskończoności, przebijając kolejno następujące po sobie powierzchnie stałego potencyału. *Swobodna cząstka o ładunku dodatnim porusza się ustawicznie od miejsc wyższego potencyału ku miejscom niższego potencyału, o ile mianowicie poruszać się może.*

Podobnie, jak każdy punkt zewnątrz ciała elektrycznego A posiada pewien potencyał, tak też każdemu punktowi samego ciała A odpowiada pewna oznaczona wartość potencyału. Albowiem na każdy punkt ciała działają wszystkie siły, pochodzące od jego własnego ładunku elektrycznego, jakoteż od ładunków wszystkich innych punktów elektrycznych. Z tego wynika, że w samem ciele naelektryzowanem każda cząstka *stara się* przenieść z miejsca wyższego potencyału do miejsca niższego potencyału. Pod tym jednak względem zachodzi istotna różnica pomiędzy izolatorami, a przewodnikami.

Wiemy już, że elektryczność (zupełnie niezależnie od tego, czy jest ona pewnego rodzaju materyą, czy też formą ruchu, czy też pewnym stanem) przenosi się w przewodnikach z miejsca na miejsce z nadzwyczajną łatwością, podczas gdy w izolatorach pozostaje w miejscu, w którem ją pierwotnie wytworzono. Z tego, co wyżej powiedziano, wynika więc, że elektryczność porusza się swobodnie w przewodniku, przenosząc się z miejsc wyższego potencyału do miejsc niższego potencyału. Jeżeli tedy elektryczność osiąga równowagę w przewodniku, wtedy w każdym jego punkcie musi panować jeden i ten sam potencyał, w przeciwnym

bowiem razie elektryczność przenosiłaby się i nadal. Mamy tedy następujące twierdzenie:

Jeżeli elektryczność przewodnika znajduje się w stanie równowagi, wtedy każdemu punktowi jego wnętrza i powierzchni odpowiada jeden i ten sam potencyał. A więc powierzchnia przewodnika jest powierzchnią stałego potencyału. Jeżeli np. połączymy jakikolwiek przewodnik z ziemią, będzie on musiał mieć ten sam potencyał, co i ona, lecz potencyał ziemi oznaczamy przez zero, przeto *przewodnik połączony z ziemią ma potencyał równy zeru.*

Z powyższego twierdzenia wynika dalej, że *elektryczność nie może pozostawać wewnątrz przewodnika*; musi ona bowiem poruszać się sama przez się, dopóki droga swobodna nie zostanie dla niej zamkniętą, to jest dopóki cała elektryczność nie znajdzie się na powierzchni przewodnika: A więc *w stanie równowagi elektryczność znajduje się li tylko na powierzchni przewodnika.*

Faraday sprawdził ten wniosek za pomocą doświadczenia, urządzonego na wielką skalę. Zbudował on z miedzianego drntu wielki sześcian, o boku mającym przeszło 3 metry długości, w którym człowiek mógł się wygodnie usadowić. Ściany jego okleił cynfolią, która jest dobrym przewodnikiem elektryczności. Następnie zamknął się on w tym dość obszernym izolowanym pokoju, uzbrojony w bardzo czułe elektroskopy; poczem nader silnie naładowano sześcian z zewnątrz za pomocą maszyny elektrycznej. Otóż pomimo, że na powierzchni sześcianu znajdowały się nadzwyczaj wielkie ilości elektryczności, Faraday nie mógł odkryć wewnątrz samego sześcianu, ani też na jego powierzchni wewnętrznej, najmniejszego nawet śladu elektryczności. Wniosek powyższy, wyprowadzony z istoty ciał przewodzących, został tedy sprawdzony doświadczalnie w sposób niewątpliwy. Można także dowieść słuszności tego twierdzenia za pomocą innego, bardzo prostego doświadczenia. Naładowawszy silnie metalową kulę izolowaną A (fig. 506, str. 937), zakrywamy ją zupełnie dwiema metalowemi półkulami B i C, zaopatrzonemi w rączki izolacyjne. Wówczas kula A tworzy z półkulami temi jeden przewodnik i według naszego twierdzenia elektryczność nie może pozo-

stać na powierzchni A, lecz musi przenieść się na powierzchnię B i C. W rzeczy samej łatwo możemy przekonać się, że po oddaleniu półkul, przewodnik A nie posiada zgoła żadnego ładunku i że natomiast półkule B i C naelektryzowały się.

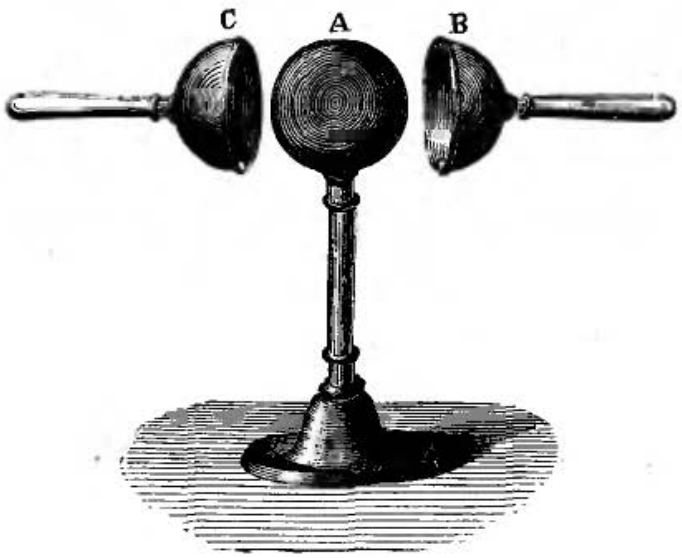


Fig. 506. Doświadczenie z przewodnikiem.

Każdy więc przewodnik naelektryzowany, w stanie równowagi elektrycznej, posiada w całej swej rozciągłości jeden i ten sam potencyał. Im większy jest ładunek elektryczny przewodnika, tem większy jest potencyał. W każdym więc przewodniku zachodzi pewien związek pomiędzy jego ładunkiem elektrycznym E, a potencyałem P. Obydwie te ilości powiększają się lub zmniejszają jednocześnie, i stosunek C ładunku elektrycznego do potencyału przewodnika zależy jedynie od kształtu i wielkości tego ostatniego, lecz bynajmniej nie od jego ładunku i potencyału. Stosunek ten nazywa się *pojemnością* przewodnika, czyli że pojemność $C = \frac{E}{P}$. W wielu wypadkach możemy obliczyć pojemność przewodnika, znając jego wymiary; w innych wypadkach daje się to łatwo uskutecznić za pomocą doświadczeń, jak to zobaczymy w dalszym ciągu. Otóż znając pojemność ciała i wielkość ładunku elektrycznego, jaki ono w danej chwili zawiera, możemy z łatwością obliczyć potencyał jego, mianowicie za pomocą wzoru $P = \frac{E}{C}$. Podobnie też, znając pojemność i potencyał, możemy obliczyć wielkość ładunku ciała z równania: $E = P.\ C$.

Ponieważ potencyał ciała wyrażamy w woltach, zaś ilość elektryczności w kulombach, przeto możemy łatwo ustalić jednostkę pojemności. Mówimy mianowicie, że pojemność równą 1 ma ciało, które przez udzielenie ładunku elektrycznego równe-

go 1 kulombowi osiąga potencyał równy 1 woltowi. Tę jednostkę pojemności nazwano 1 *faradem*. Lecz dla zwykłych celów jeden farad jest za wielką ilością i dla tego używamy często jednej milionowej części jego, która nosi miano 1 *mikrofarada*. Dla celów praktycznych sporządza się przewodniki, których pojemność równa się pewnej oznaczonej liczbie mikrofaradów; następnie można porównać z nimi pojemność innych przewodników. Tak np. na fig. 507 widzimy przewodnik, którego pojemność równa się $^1/_3$ mikrofarada. Składa się on z bardzo wielkiego złożonego arkusza papieru parafinowanego, którego obydwie strony są pokryte cynfolią. Pudełko, w którem znajduje się papier, jest zamknięte pokrywką ebonitową, zaopatrzoną w dwa metalowe guziki wzajemnie odosobnione; każdy z nich jest połączony z jedną ze stron powierzchni cynfolii. Jeżeli połączymy jeden z guzików metalowych z ziemią, drugi zaś z przewodnikiem, którego potencyał równa się 1 woltowi, natenczas przeniesie się na cynfolią ładunek elektryczny, równy 1 woltowi $\times$ $^1/_3$ mikrofar. $=$ $^1/_{3000000}$ kulomba.

Fig. 507. Przyrząd o znanej pojemności.

Całkowity ładunek elektryczny, udzielony przewodnikowi, musi, według tego cośmy wyżej powiedzieli, rozejść się po jego powierzchni; wszystkie siły w każdym punkcie równoważą się wzajemnie tak, że potencyał ma wszędzie jednakową wartość na powierzchni i wewnątrz przewodnika. Jeżeli stan taki ma rzeczywiście nastąpić, niemożliwem jest w ogóle ażeby w różnych miejscach, na jednakowych częściach powierzchni przewodnika, np. na 1 kw. centym., znajdowały się ładunki równe. Ładunek elektryczny, obliczony na jednostkę powierzchni, będzie raczej różny w rozmaitych miejscach powierzchni przewodnika, a różnice te będą zależały od jej kształtu. Ilość elektryczności, przypadającą na jednostkę powierzchni, np. na 1 kw. centym., nazywamy *gęstością elektryczności*. Możemy więc powiedzieć, że potencyał naelektryzowanego przewodnika jest wprawdzie wszędzie jeden i ten sam, lecz że gęstość elektryczności w ogóle zmienia

się od punktu do punktu. Jeżeli na izolowanej kuli metalowej wytworzymy pewną ilość elektryczności, rozejdzie się ona po całej jej powierzchni; ponieważ kula jest jedyną doskonale regularną bryłą i wszystkie części jej powierzchni są sobie równoważne, to w danym wypadku elektryczność rozejdzie się jednostajnie, t. j. gęstość będzie jednakową dla wszystkich punktów, leżących na powierzchni kuli. To jednak stanowi wypadek wyjątkowy; na powierzchni cylindra np. lub półkuli gęstość w ogóle zmienia się od punktu do punktu. Oznaczenie gęstości dla każdego punktu powierzchni przewodnika dowolnych kształtów (wtedy gdy elektryczność znajduje się w spoczynku, t. j. gdy potencyał jest wszędzie jeden i ten sam) jest zadaniem czysto matematycznem. Zadanie to rozwiązano dla pewnej liczby przewodników, mianowicie dla tych, które przedstawiają szczególną wartość dla celów praktycznych, doświadczalnych.

Otóż zarówno rozwiązanie matematyczne, jakoteż i doświadczenie pokazują, że jeżeli przewodnik jest uzbrojony w ostry kolec, to gęstość elektryczności jest na nim nadzwyczaj wielka, znacznie większa, niż w jakimkolwiek innym punkcie przewodnika. Nawet wtedy, gdy całkowity ładunek przewodnika jest bardzo mały, gęstość elektryczności na przewodzącym kolcu jest bardzo wielka. Ta własność ostrych końców pociąga za sobą szereg ważnych następstw.

Wiemy już, że w każdym przewodniku siły elektryczne pędzą cały ładunek na powierzchnię. Siły te dążą nawet do zupełnego zepchnięcia ładunku elektrycznego z przewodnika. W każdym punkcie jego powierzchni działa na elektryczność pewna siła, która stara się zepchnąć ją z przewodnika w kierunku prostopadłym do powierzchni. W rzeczy samej, elektryczność uległaby tej sile, gdyby z powierzchnią przewodnika nie graniczyły izolatory: szkło, lak, powietrze i t. p., które stawiają nadzwyczaj wielki opór przenikaniu elektryczności. W każdym razie jednak elektryczność stara się ujść z powierzchni przewodników; od ucieczki tej zaś wstrzymuje ją jedynie opór izolatorów. Wielkość siły, działającej na elektryczność powierzchni przewodni-

ka, nie jest bynajmniej jednakowa we wszystkich jej punktach, zależy ona bowiem od gęstości elektryczności w danym punkcie; im większa jest gęstość w tym ostatnim, tem większa jest owa siła. Otóż, jak wiemy, gęstość elektryczności na ostrym końcu przewodnika jest nadzwyczaj wielka, a więc i siła, starająca się zepchnąć z niego elektryczność, jest bardzo znaczna. Gdyby graniczący z przewodnikiem izolator (np. powietrze) był rzeczywiście doskonałym izolatorem wtedy, pomimo niezmierną wielkość tej siły, elektryczność pozostałaby na ostrym końcu. Widzieliśmy jednak, że opór izolatora może wprawdzie być bardzo wielki, lecz zawsze ma pewną granicę. Wynika z tego, że *elektryczność uchodzi przez ostry koniec przewodnika na zewnątrz, pomimo oporu otaczającego izolatora.* Możemy się o tem przekonać w nader prosty sposób. Weźmy metalowy izolowany cylinder *B*, o końcach zaokrąglonych (fig. 508) i naładujmy go za pomocą maszyny elektrycznej. Jeżeli w kilku miejscach cylindra umieścimy podwójne paski złota malarskiego, będą się one rozchodziły podczas ładowania cylindra, przyczem większy lub mniejszy kąt pomiędzy niemi wskaże większe lub mniejsze ładunki elektryczne w odpowiednich miejscach powierzchni cylindra. Skoro jednak przymocujemy do naładowanego cylindra ostry koniec metalowy, listki złote natychmiast zbliżą się do siebie, co będzie dowodziło przejścia elektryczności od przewodnika przez ostry koniec, do otaczającego powietrza. W ogóle wynika z tego, że przewodnika uzbrojonego w kolec nie można naładować tak silnie, jak ten sam przewodnik pozbawiony kolca. Z tego cośmy wyżej powiedzieli wynika dalej, że żadnego przewodnika nie można naładować dowolnie silnie. Albowiem zwiększając ładunek, powiększamy przez to samo gęstość, a więc i siły, które pędzą elektryczność na zewnątrz; nareszcie w tem miejscu przewodnika, w którem gęstość jest największa, siła owa staje się tak wielką, że przezwycięża opór powietrza lub innego środka izolującego. Wtedy zaś wszelka nowa ilość elektryczności spływa z przewodnika. Każdy przewodnik można przeto nała-

Fig. 508. Przewodnik z ostrym końcem.

dować tylko do pewnej granicy, która zależy od jego kształtu i od właściwości otaczającego izolatora. Im mniejszą zdolność odosabniania posiada środek otaczający, tem mniejszy ładunek elektryczny można wywołać na przewodniku.

§ 4. Elektryczność przez wpływ czyli indukcya. Kondensator. Butelka lejdejska Maszyna Holtz'a. Elektrometr Thomson'a.

Dotychczas znamy dwa sposoby elektryzowania ciał: tarcie i zetknięcie z innem ciałem naelektryzowanem. Ciało naelektryzowane w ten lub ów sposób zachowuje stale udzielony mu ładunek, jeżeli tylko można je doskonale odosobnić; gdy zaś tego dopiąć nie można, ciało w każdym razie zachowuje swój ładunek przez pewien przeciąg czasu, dopóki wystarcza izolacya. Wiemy dalej, że wszystkie punkty odosobnionego przewodnika, zetkniętego np. z potartym prętem szklanym, otrzymują ładunek jednego i tego samego rodzaju, mianowicie w tym wypadku dodatni. Gdybyśmy tak naładowanemu przewodnikowi dodali pewną ilość elektryczności ujemnej, ta ostatnia zniszczyłaby działanie równie wielkiej elektryczności dodatniej, wskutek czego cały przewodnik okazywałby ładunek dodatni (lecz mniejszy, od pierwotnego) lub ujemny, zależnie od tego czy doprowadzony doń ładunek ujemny jest mniejszy lub większy od pierwotnego ładunku dodatniego. W każdym więc wypadku, elektryczność na powierzchni przewodnika jest albo wyłącznie dodatnia, albo wyłącznie ujemna.

Wszelako możemy naelektryzować ciało jeszcze w inny sposób, różniący się wielce od tamtych, znanych nam już sposobów.

Jeżeli będziemy zbliżali potartą pałeczkę szklaną do metalowego guzika elektroskopu, wtedy listki złota zaczną się wzajemnie odpychać, *zanim jeszcze pałeczka szklana dotknie guzika metalowego*; wzajemne odchylenie listków będzie trwało tak długo, dopóki pałeczka szklana będzie się znajdowała w bliskości guzika. Gdy tylko oddalimy dostatecznie pałeczkę, listki znowu opadną. Inaczej mówiąc, elektryczność szklanej pałeczki ma własność *wzbudzania* stanu elektrycznego w przewodnikach,

przez to samo jedynie, że *znajduje się w bliskości* tychże. Działanie takie nosi miano *indukcyi*. Mówimy zwykle: ciało naelektryzowane *wzbudza* (indukuje) w pobliskich przewodnikach tak zwaną *elektryczność indukcyjną*.

Możemy z łatwością poznać różnicę, jaka zachodzi między zachowaniem się przewodnika, naelektryzowanego przez wpływ i przewodnika, naelektryzowanego w inny sposób. Elektryczność indukcyjna pozostaje na przewodniku *izolowanym* tylko tak długo, dopóki wzbudzające (indukujące) ciało naelektryzowane znajduje się w pobliżu. Jeżeli oddalimy to ciało, lub odbierzemy mu jego ładunek elektryczny, elektryczność indukcyjna drugiego przewodnika natychmiast zniknie. Gdybyśmy zbadali rodzaj elektryczności, wzbudzonej na drugim przewodniku, okazałoby się, że on posiada nie jeden, a *dwa rodzaje* elektryczności: dodatnią i ujemną, lecz oddzielone. Część powierzchni drugiego przewodnika posiada ładunek dodatni, część zaś ładunek ujemny; mianowicie te miejsca powierzchni, które znajdują się najbliżej ciała wzbudzającego otrzymują zawsze ładunek przeciwnego rodzaju, niż ładunek tegoż ciała, miejsca zaś bardziej odległe — ładunek tego samego rodzaju. Niechaj np. R (fig. 509)

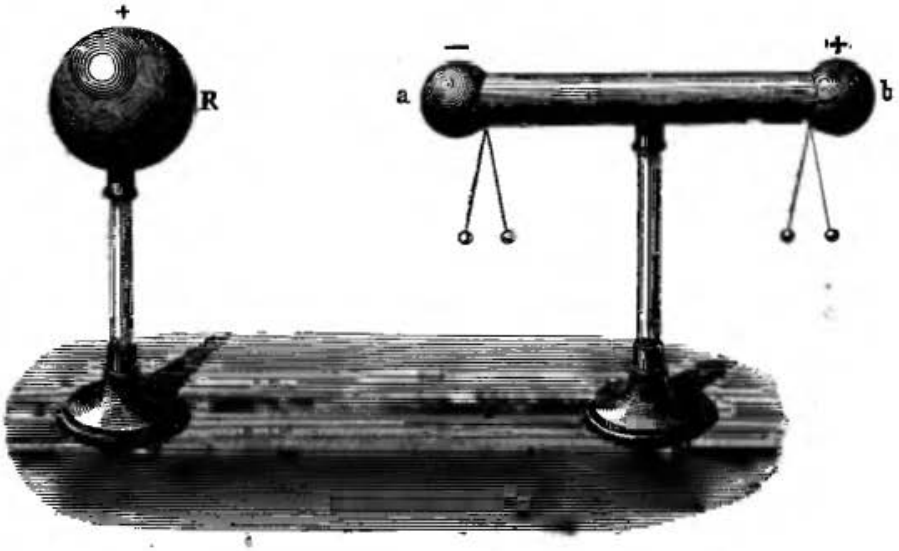


Fig 509. Indukcya.

przedstawia kulę szklaną, naelektryzowaną dodatnio. Jeżeli zbliżymy do niej cylinder odosobniony ab, wówczas lewa jego część a naelektryzuje się przez wpływ ujemnie, prawa zaś b

otrzyma ładunek dodatni. Gdyby ładunek kuli był ujemny, rozmieszczenie elektryczności na cylindrze ab byłoby wprost przeciwne, niż w obecnym wypadku. Przypuśćmy tedy, że ładunek kuli R jest dodatni, a więc że elektryczność w a jest ujemna, zaś w b dodatnia. Im więcej oddalamy się od a ku środkowi cylindra, tem mniejszą staje się gęstość elektryczności dodatniej. W środku znajdziemy miejsca, zupełnie pozbawione elektryczności, które razem wzięte, stanowią *pas obojętny*. Na pozór wydaje się, jak gdyby w skutek zbliżenia ciała R, w przewodniku ab powstały dwa rodzaje elektryczności i jak gdyby elektryczność tego ciała przyciągnęła elektryczność różnoimienną ku a, odepchnęła zaś jednoimienną ku b. Lecz wyobrażenie to wcale nie odpowiada rzeczywistemu stanowi rzeczy.

W tym, podobnie jak w każdym innym wypadku równowagi elektrycznej, potencyał na przewodniku ab musi być wszędzie jeden i ten sam. Potencyał ten jest po części wzbudzony przez siły, wychodzące z ciała R, po części zaś przez siły cząstek elektrycznych, znajdujących się na samym cylindrze ab.

Jeżeli za pomocą drutu metalowego połączymy koniec b cylindra z ziemią, wówczas potencyał cylindra spadnie do zera. Lecz przez wpływ dodatnio-elektrycznego ciała R elektryczność ujemna będzie przyciąganą ku a, elektryczność zaś dodatnia odpychaną ku b i ku drutowi, przez co elektryczność dodatnia spłynie z cylindra do ziemi. Jeżeli teraz przerwiemy połączenie cylindra z ziemią, czyli znów odosobnimy ten przewodnik, wówczas na ab pozostanie wyłącznie tylko ujemna elektryczność. *Możemy tedy elektryczność, wzbudzoną na odleglejszym końcu przewodnika, czyli elektryczność wzbudzoną drugiego rodzaju, odprowadzić do ziemi.*

Gdybyśmy natomiast połączyli ów drut z końcem a cylindra, w drucie tym również przez wpływ powstałaby elektryczność ujemna; gdybyśmy następnie drut ten usunęli, pozostałaby ona i nadal na przewodniku. Innemi słowy: *elektryczności wzbudzonej na bliższym końcu przewodnika, czyli elektryczności wzbudzonej pierwszego rodzaju, nie można odprowadzić do ziemi.*

Ponieważ elektryczność wzbudzoną drugiego rodzaju można

odprowadzić do ziemi, przeto na przewodniku indukowanym, następnie połączonym z ziemią i wreszcie znów odosobnionym, pozostaje tylko elektryczność wzbudzona pierwszego rodzaju. Dopóki ciało elektryczne R znajduje się w pobliżu, elektryczność ta rozchodzi się z małą gęstością w kierunku od a ku b. Jeżeli zaś usuniemy ciało R, nienormalne to rozmieszczenie ustępuje miejsca takiemu rozmieszczeniu elektryczności (w naszym wypadku ujemnej) na powierzchni cylindra ab, jakie odpowiada kształtowi jego. Teraz już rozmieszczenie elektryczności na powierzchni przewodnika będzie zupełnie takie same, jak gdybyśmy go naładowali przez tarcie, lub zetknięcie z innem ciałem naelektryzowanem. Mamy tedy ostatecznie trzeci sposób udzielania przewodnikom elektryczności *jednego* rodzaju.

Musimy obecnie dokładniej zbadać stosunki, zachodzące przy działaniu indukcyjnem. W chwili, gdy przy zjawisku indukcyi elektryczność wzbudzona osiąga stan równowagi, rozchodzi się ona jedynie po powierzchni przewodnika. Doświadczenie pokazuje, że *na każdym odosobnionym indukowanym przewodniku powstają zawsze równe ilości elektryczności dodatniej i ujemnej*. Gęstość elektryczności wzbudzonej musi w każdym punkcie powierzchni przewodnika być taką, ażeby wszystkie siły, działające w tym punkcie, zniosły się wzajemnie. Siły te pochodzą z jednej strony od elektryczności, wzbudzonej na przewodniku, z drugiej zaś od ciała wzbudzającego. Siły, pochodzące od elektryczności wzbudzonej, muszą być wszędzie jednakowe i wprost przeciwne tym, których źródłem jest samo ciało wzbudzające. Wtedy właśnie elektryczność przewodnika znajduje się w stanie spoczynku, czyli równowagi. Otóż przypuściliśmy, że ciało wzbudzające R jest naelektryzowanym *izolatorem*, np. kulą szklaną, w której elektryczność nie może przenosić się z miejsca na miejsce. Jeżeli zaś zamiast izolatora użyjemy *przewodnika* odosobnionego i naładowanego elektrycznością, np. kuli metalowej, wtedy zjawisko będzie nieco zawilsze, lecz pomimo to da się z łatwością objaśnić. Naładowana kula metalowa R (fig. 509) wzbudza w tym wypadku na cylindrze ab elektryczność dodatnią i ujemną, przyciągając różnoimienną ku a,

odpychając zaś jednoimienną ku *b*. Lecz jednocześnie na kuli metalowej elektryczność również ulega przesunięciu: siły wychodzące z *ab*, działają na ładunek elekryczny kuli tak, że ładunek ten musi się poruszać, dopóki wszystkie siły w każdym punkcie nie zniosą się wzajemnie. Wskutek tego gęstość elektryczności w punktach kuli nie będzie już tą samą, co poprzednio. Inaczej mówiąc, *wskutek obecności ciała indukowanego* (np. cylindra *ab*) *gęstość etektryczności w każdym punkcie przewodnika indukującego ulega zmianie.* Możemy z tego wyprowadzić ważniejszy jeszcze wniosek, a mianowicie, że potencyał kuli musi się znacznie zmniejszyć w razie, gdy ciało indukowane połączymy z ziemią. Potencyał w *R* jest bowiem równy pracy, jaką należy wykonać, ażeby sprowadzić cząsteczkę elektryczną z miejsca jakiegolwiek, w którem panuje potencyał równy zeru, na powierzchnię kuli *R*. W ogóle miejscem, o potencyale równym zeru, jest ziemia; lecz w naszym wypadku ciało indukowane, znajdujące się *w bliskości* ciała indukującego, również posiada taki potencyał, ponieważ jest połączone z ziemią. Rozumując w ten sposób można dowieść zupełnie ściśle, że w naszym wypadku praca, jaką należy wykonać, aby sprowadzić 1 kulomb na powierzchnię ciała *R* (z miejsca o potencyale zero), jest znacznie mniejszą, niż wtedy, gdy nie ma w pobliżu ciała połączonego z ziemią i indukowanego. Innemi słowy: *potencyał kuli R zmniejsza się w skutek sąsiedztwa ciała indukowanego i połączonego z ziemią.* A więc *jeżeli w blizkości naładowanego przewodnika umieścimy drugi, połączony z ziemią, potencyał tamtego znacznie się zmniejszy.* Poznamy zaraz ważne zastosowanie tego twierdzenia.

Przewodnik nasz *R* zachował cały swój ładunek elektryczny, niezależnie od tego, czy w bliskości jego znajdowało się ciało indukowane, lub nie. Lecz widzieliśmy, że potencyał jego zmniejszył się w skutek obecności jedynie ciała indukowanego i połączonego z ziemią. Stosunek ładunku elektrycznego przewodnika do jego potencyału nazywa się, jak wiemy, *pojemnością* tego przewodnika. Ponieważ tedy ładunek kuli *R* pozostał ten sam, potencyał zaś jego zmniejszył się dzięki obecności ciała indukowanego i połączonego z ziemią, przeto pojemność jego po-

większyła się. Mamy więc następujące twierdzenie: *Pojemność przewodnika powiększa się w skutek obecności indukowanego ciała, połączonego z ziemią*, czyli że temu przewodnikowi musimy dostarczyć większej ilości elektryczności, w razie gdy chcemy ażeby on zachował ten sam potencyał.

Możność ta powiększania pojemności, a więc i ładunku przewodnika, znalazła wiele różnorodnych zastosowań. W przeszłem jeszcze stuleciu zbudowano przyrząd, służący do nagromadzania większych ilości elektryczności na przewodniku o stosunkowo małych rozmiarach. Przyrząd ten, w prostszej formie, składa się z dwóch odosobnionych krążków metalowych *A* i *B* (fig. 510), które można dokładnie ustawić jeden naprzeciwko drugiego i które działają na siebie indukcyjnie. Krążek *B* daje się sprowadzić do położenia poziomego za pomocą drążka ruchomego *b*. Jeżeli wtedy, gdy on znajdzie się właśnie w takiem położeniu, połączymy drugi krążek *A* z konduktorem maszyny elektrycznej, będzie z niego spływała elektryczność na krążek *A*, tak długo, dopóki jej potencyał nie stanie się równy potencyałowi konduktora, większego zaś ładunku nie można krążkowi udzielić. Lecz gdy naprzeciwko krążka *A* ustawimy pionowo krążek *B*, połączony z ziemią, tak jak wskazano na figurze, potencyał pierwszego zmniejszy się znacznie, dzięki czemu nowe ilości elektryczności będą spływały z konduktora na *A*, dopóki znów nie nastąpi zrównanie potencyałów. Krążek *A* mieści więc w sobie większą ilość elektryczności, niż wtedy, gdy wpływ krążka *B* był usunięty.

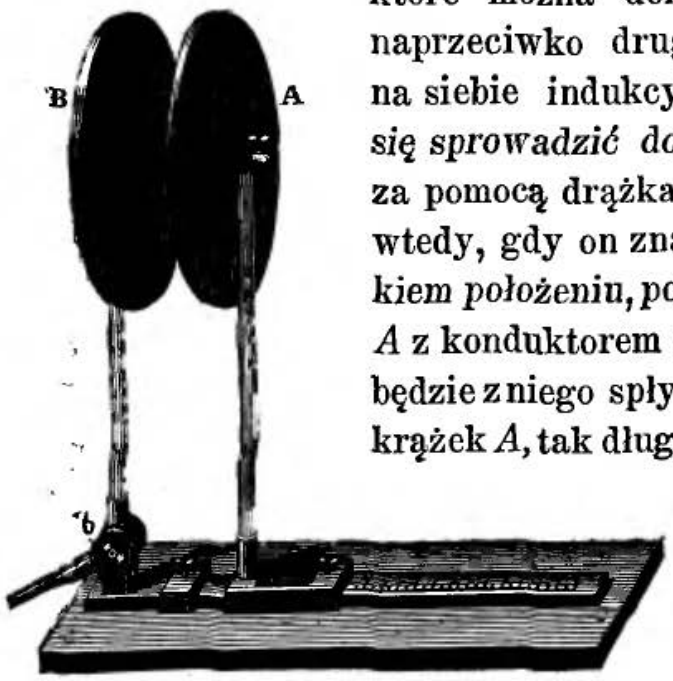


Fig. 510. Kondensator czyli akumulator.

Krążek *A* nazywamy *kolektorem*, krążek zaś *B kondensatorem*. Możemy tedy powiedzieć, że pojemność kolektora wzrasta znakomicie dzięki obecności kondensatora. Stosunek pojem-

ności samego kolektora do jego pojemności, gdy kondensator jest obecny, nazywa się *wzmocnieniem* danego przyrządu zagęszczającego; będziemy je krótko oznaczali przez *W*.

Liczba ta zależy od różnorodnych czynników, a mianowicie od *kształtu* i *wielkości* przewodników, w naszym więc wypadku krążków oraz od ich *odległości*, im większa bowiem jest odległość, tem mniejsze jest *W*. Wreszcie zależy ono, jak tego dowiódł Faraday, od natury *środka izolującego*, który wypełnia przestrzeń pomiędzy kolektorem, a kondensatorem. W opisie powyższym przyjęliśmy, że między temi dwiema płytami znajduje się powietrze. Jeżeli jednak zastąpimy je innym jakimkolwiek izolatorem: szkłem, kauczukiem, siarką i t. p., wówczas wartość *W* dla tego samego przyrządu będzie inną. Działanie izolatorów nie ogranicza się przeto na odosabnianiu naelektryzowanych przewodników, gdyż wywierają one oprócz tego jeszcze wpływ istotny na rozmieszczenie elektryczne. Z tego powodu izolatory nazwano także *dielektrykami*. Stałe izolatory, jak szkło, kauczuk, szellak i t. d. powodują przy innych warunkach jednakowych większy wzrost liczby *W*, niż powietrze. Oprócz tego posiadają one jeszcze jedną zaletę. Na dwóch przeciwległych stronach przyrządu zgęszczającego znajdują się elektryczności przeciwnych rodzajów, w stanie bardzo zgęszczonym. Lecz, jak wiemy, im większą jest gęstość elektryczności w pewnem miejscu, tem większą jest siła, starająca się zepchnąć ładunek z przewodnika. A więc dwie przeciwne sobie elektryczności kolektora i kondensatora mogą przezwyciężyć opór dzielącego je powietrza i połączyć się wzajemnie w formie iskry elektrycznej. W skutek tego nagromadzenie elektryczności za pomocą wyżej opisanego przyrządu staje się niemożliwe. Jeżeli natomiast jako dielektryka użyjemy ciała stałego jak np. szkła, opór, przeciwdziałający dążeniu przeciwnych elektryczności do połączenia się, będzie znacznie większy tak, że przeciwne ładunki krążków pozostaną w spoczynku. Chcąc tedy silnie naładować przyrząd zgęszczający, musimy użyć jako warstwy odosabniającej (dielektryka) ciała stałego, najlepiej szkła.

Najwygodniejszą i najbardziej rozpowszechnioną formą takiego przyrządu jest *butelka lejdejska*. Składa się on ze szklanej butelki (fig. 511), oklejonej wewnątrz i zewnątrz cynfolią do $^2/_3$ wysokości. Cynfolia ta odgrywa tutaj rolę krążków A i B w fig. 510; szkło zaś jest dielektrykiem. Butelka jest zaopatrzona w pokrywkę, przez którą przechodzi pręt metalowy z guzikiem, wystającym na zewnątrz; dolny koniec pręta dotyka cynfolii, znajdującej się wewnątrz czyli, jak mówią *zbroi wewnętrznej*.

Fig. 511. Butelka lejdejska.

Połączywszy guzik metalowy z konduktorem czynnej maszyny elektrycznej, zewnętrzną zaś zbroję z ziemią, możemy butelkę lejdejską naładować bardzo silnie. Jeżeli guzik ów jest połączony z konduktorem dodatnim maszyny elektrycznej, wtedy wewnętrzna zbroja ładuje się dodatnio, zewnętrzna zaś ujemnie, ponieważ elektryczność wzbudzona drugiego rodzaju spływa do ziemi. Gdybyśmy guzik butelki połączyli z ujemnym konduktorem maszyny, ładunki wewnętrznej i zewnętrznej zbroi byłyby przeciwnych, niż obecnie, rodzajów.

Ładunek elektryczny, jaki butelka lejdejska może pomieścić, jest tem większy, im większą jest wartość W oraz powierzchnia cynfolii. Pierwszą można powiększyć, zmniejszając odległość zbroi wewnętrznej od zewnętrznej, t. j. biorąc butelkę o cieńszych ścianach. Lecz okoliczność tę można wyzyskać tylko do pewnej granicy, jeżeli bowiem warstwa szkła pomiędzy zbrojami będzie zbyt cienką, nie zdoła się ona oprzeć sile, z jaką przeciwne ich elektryczności starają się połączyć i zostanie przebita przez iskrę elektryczną. Grubość szkła butelki możemy więc zmniejszać z korzyścią tylko do pewnego stopnia. Chcąc tedy nagromadzić większe ilości elektryczności, nie mamy innego wyboru, jak tylko znacznie powiększyć zbroje. Możemy także to samo osiągnąć, biorąc zamiast jednej, większą liczbę butelek lej-

dejskich. Połączmy mianowicie ze sobą zbroje wewnętrzne wszystkich butelek, wszystkie zaś zbroje zewnętrzne z ziemią; wówczas zbroje wewnętrzne tworzą razem jednę wielką zbroję. Jasną jest rzeczą, że np. w 7 butelkach lejdejskich, zupełnie jednakowych i połączonych w jeden układ, czyli *bateryę*, można nagromadzić 7 razy większą ilość elektryczności, niż w jednej tylko. Bardzo wygodną formę takiej bateryi podał Riess. Na załączonym rysunku (Fig. 512) widzimy 6 butelek lejdejskich, ustawionych wokoło środkowej siódmej. Ta ostatnia, zamiast w guzik, jest zaopatrzona w dużę kulę o 6-ciu wgłębieniach, w które wchodzą guziki prętów metalowych, przymocowanych ruchomo do guzików 6-ciu pojedyńczych butelek. Jeżeli wszystkie guziki znajdują się wewnątrz zagłębień, wtedy zbroje wewnętrzne są połączone. Zbroje zewnętrzne są połączone z ziemią za pomocą przewodzącego stolika, na którym są ustawione. Chcąc jedną z butelek wycofać z bateryi, należy jej guzik wyjąć z zagłębienia środkowej kuli. Opisane wyżej pudełko (patrz fig. 507), zawierające jednę trzecią mikrofarada, nie jest też niczem innem, jak tylko przyrządem zgęszczającym; dwie warstwy cynfolii odgrywają tutaj rolę zbroi, papier zaś nasycony parafiną jest warstwą dielektryczną (izolującą).

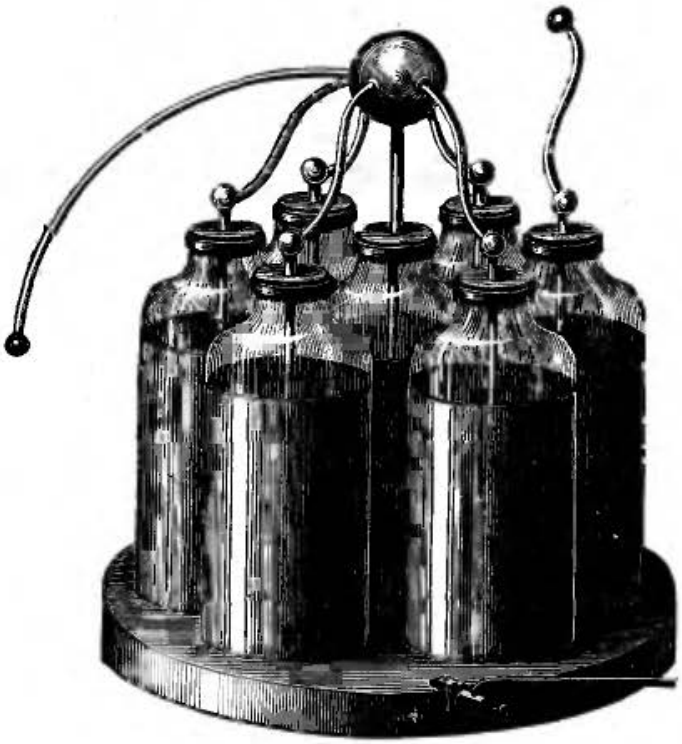


Fig 512. Baterya butelek lejdejskich.

Ażeby ułatwić czytelnikowi zrozumienie pewnych urządzeń, o których będziemy mówili w dalszym ciągu, zbadamy obecnie

działanie ostrego kolca, umieszczonego na indukowanym przewodniku. Jeżeli przewodnik taki *ab* (fig. 513) jest zaopatrzony w ostry koniec w miejcu *a*, bardziej odległem od ciała indukującego *C*, wtedy na końcu tym zostaje wzbudzoną elektryczność drugiego rodzaju; ponieważ zaś gęstość elektryczności na ostrym końcu jest nadzwyczaj wielką, przeto ładunek wzbudzony, o którym mowa, spływa z przewodnika do otaczającego go izolatora, t. j. w danym razie do powietrza. Na przewodniku *ab* pozostaje wyłącznie elektryczność wzbudzona pierwszego rodzaju. Podobnie, jeżeli ostry koniec znajduje się w *b*, spływa po nim elektryczność wzbudzona pierwszego rodzaju. Jednocześnie wszakże zmienia się rozmieszczenie elektryczności na kuli *C*; gęstość będzie mianowicie największą w tem miejscu jej powierzchni, które znajduje się tuż naprzeciwko ostrego końca. Ten znaczny wzrost gęstości powoduje atoli zarówno na kuli, jak na ostrym końcu przewodnika *ab*, upływ elektryczności. Jeżeli więc teraz usuniemy ostry koniec, kula *C* będzie zawierała mniejszą ilość elektryczności, aniżeli przedtem. Rzecz tak się przedstawia, jak gdyby ostry koniec metalowy wyssał część elektryczności z przewodnika *C*, chociaż o istotnem ssaniu mowy tutaj być nie może. Ostry koniec, zbliżony do ciała naelektryzowanego, powoduje tedy zmniejszenie się ładunku tego ciała, podczas gdy przewodnik połączony z tym ostrym końcem otrzymuje elektryczność jednego rodzaju. Jeżeli do przewodnika naelektryzowanego i zaopatrzonego w ostry koniec zbliżymy inny przewodnik jeszcze nienaelektryzowany, wówczas w przewodniku tym zostaną wzbudzone oba rodzaje elektryczności. Naprzeciwko końca znajduje się elektryczność pierwszego rodzaju tak zgęszczona, że spływa na zewnątrz. Na zbliżonym przewodniku

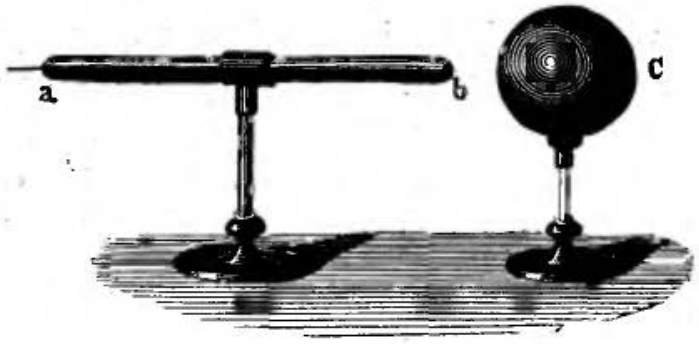


Fig. 513. Własności końców.

pozostaje przeto elektryczność wzbudzona wyłącznie drugiego rodzaju, t. j. jednoimienna z elektrycznością przewodnika, uzbrojonego w koniec. Działanie ostrych końców zastosowano przy maszynie elektrycznej, którą opisaliśmy wyżej. Konduktor jej jest połączony z pierścieniem, zaopatrzonym w kolce, zwrócone ku szklanej tafli. Dzięki tym kolcom ładuje się on elektrycznością wzbudzoną drugiego rodzaju, a więc tego samego, co elektryczność wywołana na tafli szklanej przez tarcie, t. j. dodatnią.

Mówiąc o indukcyi zwracaliśmy dotychczas uwagę wyłącznie na *przewodniki*, w których elektryczność może się łatwo przenosić; dostarczają też one najodpowiedniejszego materyału dla działań indukcyjnych. Indukcya nie zachodzi jednak wyłącznie w przewodnikach: ulegają jej także *izolatory*, znajdujące się w bliskości przedmiotu naelektryzowanego, z tą różnicą, że w ciałach tych nie następuje ona tak szybko, jak w przewodnikach: elektryczność pierwszego i drugiego rodzaju powstaje w nich bardzo powoli. Gdy usuwamy ciało wzbudzające, elektryczności przeciwne łączą się w indukowanych izolatorach stopniowo, nie odrazu. Proces ten wyobrażamy sobie tak, jak gdyby cząsteczki izolatora, pod wpływem sił, wychodzących z ciała indukującego, ulegały stopniowo pewnym zmianom położenia, o specyalnej naturze których nie mamy wyraźnego, uzasadnionego pojęcia. Wyrażamy to zwykle mówiąc że izolator zostaje *spolaryzowany* lub *dielektrycznie spolaryzowany* przez wpływ ciała indukującego. Gdy siły przestają działać, cząsteczki — podług tego objaśnienia — powracają stopniowo do swego normalnego położenia.

Obecnie możemy przejść do opisu maszyny elektrycznej, w której wielkie ładunki elektryczne wytwarzają się nie przez tarcie, lecz przez indukcyę. Maszynę tego rodzaju, t. zw. *indukcyjną*, zbudował Holtz. Oto jej zasada: Najprzód z zewnątrz udzielamy pewnej jej części mały ładunek elektryczny, który działa następnie indukcyjnie na inne części maszyny, izolatory i przewodniki; urządzenie jest takie, że ładunek elektryczny wzbudzony wzmacnia ładunek pierwotnie udzielony maszynie. Przy-

czyna i skutek potęgują się ustawicznie w tej maszynie i w ten sposób staje się ona nader silną.

Ażeby zrozumieć sposób działania maszyny, o której mowa, musimy jeszcze uprzednio zbadać zjawiska, zachodzące wtedy, gdy ciało naładowane R (fig. 514) działa jednocześnie na izolator, np. taflę szklaną d i przewodnik $a\,b$, uzbrojony w ostre kolce i umieszczony nad taflą. Okazuje się, że w tych warunkach izolator ładuje się elektrycznością jednego i tego samego rodzaju na obydwóch stronach. Niechaj ładunek przewodnika R będzie dodatni; wówczas jedna strona tafli d, zwrócona ku R otrzyma ładunek ujemny, przeciwna zaś strona będzie z początku naelektryzowana dodatnio. Jednocześnie także ulega indukcyi poprzez taflę izolującą przewodnik $a\,b$ tak, że na końcach jego a pojawia się elektryczność ujemna o bardzo znacznej gęstości. Otóż elektryczność ta spływa z końców na górną powierzchnię tafli d i łączy się z dodatnią elektrycznością tejże powierzchni. Ponieważ jednak indukcya odbywa się prędzej w przewodniku, aniżeli w izolatorze, przeto ujemna elektryczność końców przeważa, w skutek czego górna powierzchnia tafli d elektryzuje się ujemnie. W istocie więc obydwie powierzchnie tafli posiadają elektryczność jednego i tego samego rodzaju, różnoimienną z ładunkiem ciała indukującego R.

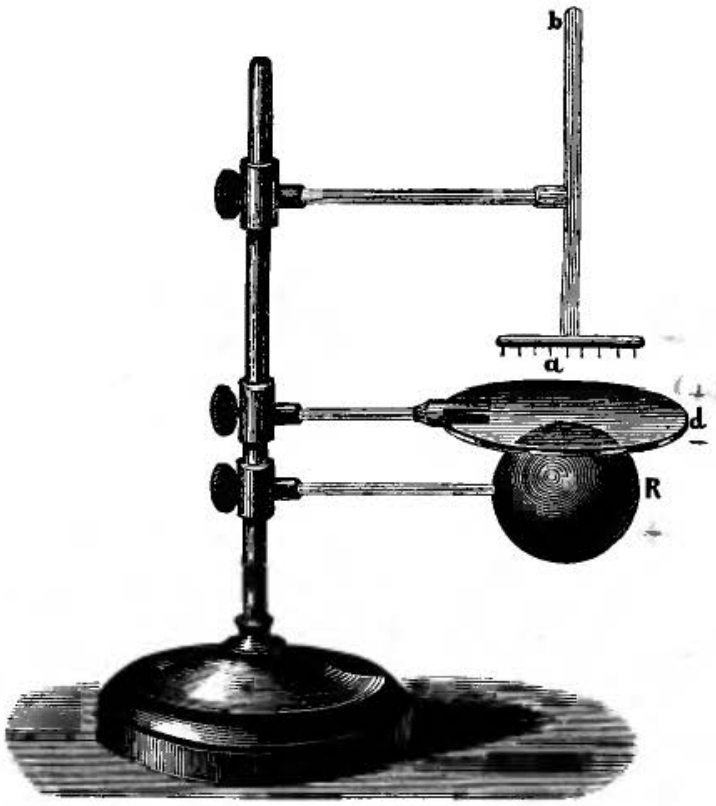


Fig. 514. Indukcya poprzez izolator.

Zjawisko to znalazło właśnie zastosowanie w maszynie indukcyjnej Holtz'a, przedstawionej na fig. 515. Maszyna ta skła-

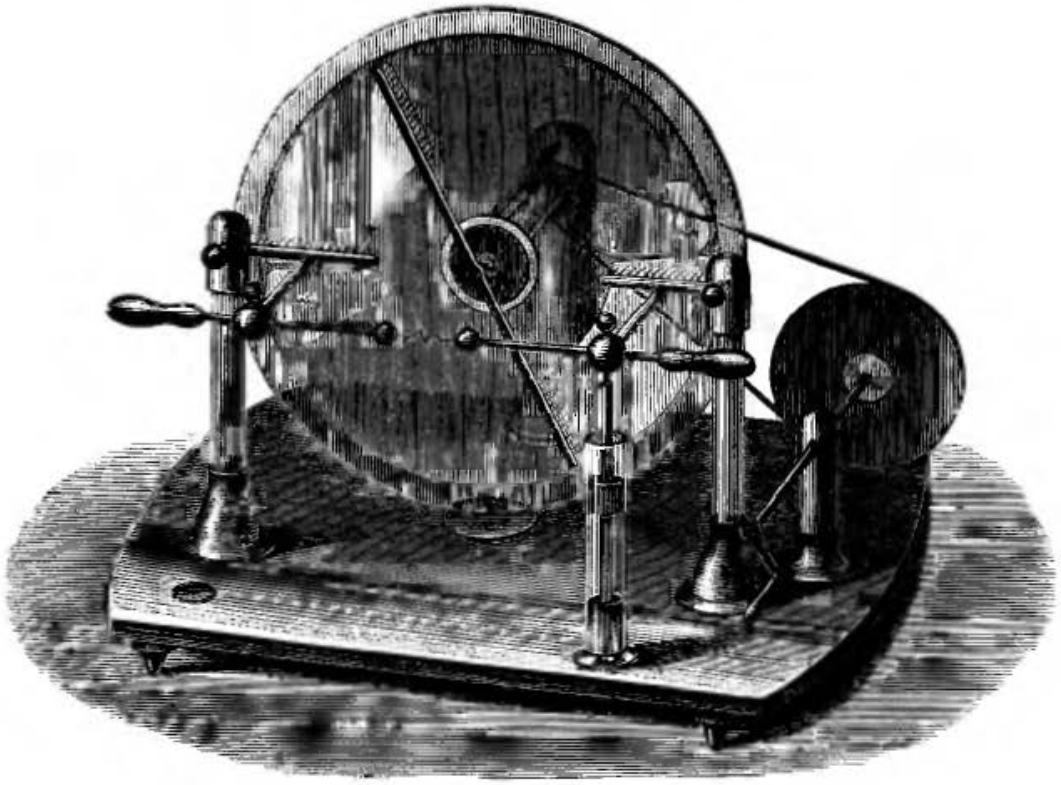


Fig. 515. Maszyna Holtz'a,

da się z dwóch tafli szklanych, powleczonych werniksem i ustawionych równolegle do siebie w niewielkiej odległości; jedna z nich jest nieruchomą, druga może się obracać. Na pierwszej (na rysunku tylnej i większej) w dwóch przeciwległych miejscach są wycięte otwory, do których dochodzą paski papieru, mające kształt wycinków o kącie mniej więcej równym 60^0 i przylepione do tylnej strony tafli nieruchomej. Wycinki te nazywamy zbrojami. Do przedniej strony tej tafli również są przylepione dwa paski papierowe, połączone z odpowiedniemi zbrojami strony tylnej. Zbroje na stronie przedniej przechodzą w szereg tępych końców, pokrytych cynfolią i zagiętych nieco ku przodowi, w kierunku tafli ruchomej; wypadają one mniej więcej w środku wycinków. Naprzeciwko przedniej strony tafli ruchomej znajdują się dwa grzebienie, t. j. przewodniki uzbrojone w kolce; grzebie

nie te, będąc wzajemnie odosobnione oraz od ziemi, są połączone z metalowemi kulami, które można przesuwać i które z początku stykają się. Chcąc wprawić maszynę w ruch, udzielamy jednej zbroi papierowej niewielki ładunek elektryczny, dotykając jej np. potartą sztabą ebonitową. Wówczas ładunki elektryczne wytwarzają się tak, jak to najlepiej poznać można z fig. 516.

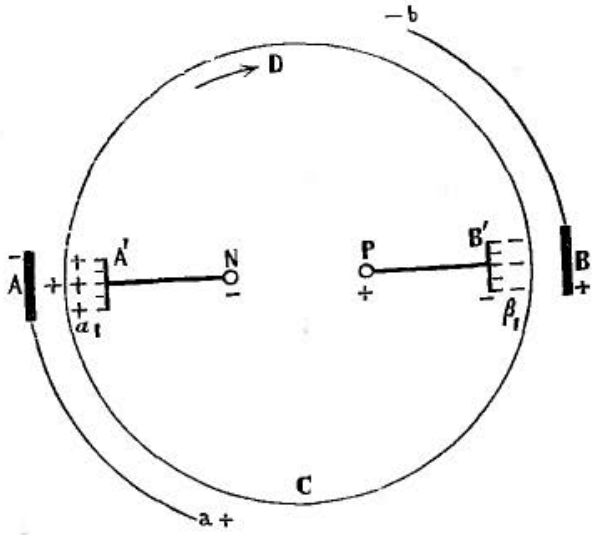


Fig. 516. Objaśnienie działania maszyny Holtz'a.

Wyobraźmy sobie taflę ruchomą maszyny jako cylinder, którego przecięciem niechaj będzie koło D; zewnątrz tego cylindra mamy zbroje papierowe A i B z końcami pokrytemi cynfolią a i b. Wprost A i B są umieszczone wewnątrz cylindra grzebienie metalowe A' i B', zaopatrzone w kule N i P, które z początku powinny stykać się wzajemnie. Jeżeli, w skutek zetknięcia ze sztabą ebonitową, zbroja papierowa A otrzymuje ładunek ujemny, wówczas, jak wiemy, tafla ruchoma elektryzuje się dodatnio na obu swych powierzchniach. Jednocześnie elektryczność ujemna przenosi się z A' przez N, P do B'; z B' spływa ona na jednę stronę ruchomej tafli szklanej, jednocześnie zaś przeciwległy kolec papierowy ulega indukcyi tak, że z niego również spływa elektryczność ujemna na taflę szklaną. A więc ruchoma tafla ma przy pierwszej zbroi papierowej A na obu swych powierzchniach ładunki dodatnie, przy drugiej zaś B ładunki ujemne. Lecz oto tafla szklana zaczyna się obracać. Po wykonaniu półobrotu to samo zjawisko powtarza się we wszystkich jej miejscach tak, że jedna jej połowa staje się dodatnio, druga zaś ujemnie elektryczną. Skoro jednak dodatnio elektryczna połowa zbliża się ku drugiemu końcowi b, zachodzi rzecz na-

stępująca: Zarówno koniec papierowy, jak i końce metalowe, wysysają elektryczność dodatnią z tafli tak, że elektryczność ta płynie wówczas z B' przez P i N do A', jednocześnie zaś elektryczność ujemna płynie z A' przez N i P do B'. Różnoimienne te elektryczności, płynące w kierunkach wprost przeciwnych, wzmacniają się tedy przy każdym obrocie tafli szklanej. Jeżeli kule N i P pozostają w zetknięciu, różnoimienne te elektryczności znoszą się. Skoro zaś oddalamy je od siebie, wówczas na jednej z nich gromadzi się elektryczność dodatnia, na drugiej ujemna, w skutek czego, jak zobaczymy, po pewnym czasie poczynają przeskakiwać między niemi iskry elektryczne. Na fig. 515 widzimy butelkę lejdejską, której zbroja wewnętrzna jest połączona z jedną kulą. Przez wprowadzenie butelki lejdejskiej, możemy powiększyć gęstość elektryczności na kulach. Maszyna Holtz'a jest jednym z najgenialniejszych przyrządów, jakie zna fizyka.

Z początku musieliśmy obydwie kule (N i P) maszyny wprodzać w zetknięcie wzajemne, ażeby elektryczność w ogóle mogła przenosić się od jednej do drugiej. Gdy jednak maszyna znajduje się już w ruchu, wówczas ładunki jej, a więc potencyał i gęstość elektryczna na kulach stają się tak wielkie, że zbytecznie jest utrzymywać kule nadal w zetknięciu. Jeżeli bowiem oddalimy je od siebie tak, że pomiędzy niemi będzie się znajdowała cieńsza, lub grubsza warstwa powietrza, wtedy elektryczność, dzięki znacznej swej gęstości, pocznie spływać i przechodzić przez warstwę powietrza od jednej kuli do drugiej. Temu upływowi elektryczności towarzyszy zjawisko świetlne; mianowicie w ciemności widzimy łagodne promienie niebieskie lub fioletowe, wychodzące z obu kul pod postacią snopów.

Powietrze, jako ruchliwy izolator, sprzyja upływowi elektryczności. Gęstość jej na ostrym końcu, naładowanym np. dodatnio, jest tak wielką, że może przezwyciężyć opór powietrza, lecz wówczas otaczające cząstki tego gazu stają się też dodatnio elektrycznemi, w skutek czego ostry koniec odpycha je na wszystkie strony. Miejsce tych odepchniętych cząstek zastępują nowe, jeszcze nienaelektryzowane, które przez zetknięcie z ostrym końcem elektryzują się również dodatnio, odskakują od

niego i t. d. Jeżeli końcowi ustawicznie dostarczamy elektryczności, np. za pomocą maszyny elektrycznej, wówczas wychodzi z niego prąd powietrza, zawierający cząstki naelektryzowane. Zjawisko to nazywamy *wiatrem elektrycznym*. Jednocześnie na ostrym końcu ma miejsce ciągłe wyładowanie elektryczności pomiędzy nim, a cząstkami powietrza, któremu towarzyszy słabe światło *migocące*. Światło tego rodzaju pojawia się przy ostrych końcach, snopy zaś promieni świetlnych powstają przy przewodnikach tępo zakończonych, a więc także przy kulach maszyny indukcyjnej.

Jeżeli jednak ładunki elektryczne, a więc także gęstość na kulach maszyny indukcyjnej, będzie *bardzo wielka* przy wysokim potencyale i jeżeli będziemy zapobiegali ciągłemu wyładowaniu, któremu towarzyszą snopy świetlne, wówczas wystąpią zjawiska różne od dopiero co opisanych. Ażeby tego dopiąć, wystarcza użyć dwóch kul maszyny indukcyjnej jako guzików do dwóch butelek lejdejskich, jak pokazano na fig. 515 dla jednej kuli. Wtedy bowiem, w skutek obracania maszyny, obydwie butelki' a wraz z niemi i kule naładują się bardzo silnie tak, że pomiędzy niemi nie będzie już miało miejsca ciągłe wyładowanie elektryczności. Gdy jednak na jednej kuli nagromadzi się elektryczność dodatnia, na drugiej ujemna i to w bardzo wielkich ilościach, wtedy opór powietrza zostanie gwałtownie przełamany, różnoimienne ładunki kul przyciągną się gwałtownie i pomiędzy niemi przeskoczy z hałasem *iskra elektryczna*. Przez dalsze obracanie tafli szklanej kule powtórnie się naładowują elektrycznością o wielkiej gęstości i znów przeskakuje iskra. Po każdem pojawieniu się iskry obydwie kule są częściowo wyładowane, albowiem przeciwne ich elektryczności częściowo się znoszą. To zjawisko stanowi *nagłe wyładowanie*.

Zupełnie to samo zachodzi, gdy zbliżamy przewodnik nienaelektryzowany do naładowanego przewodnika. W tym wypadku bowiem, na zbliżonym przewodniku powstaje elektryczność wzbudzona, różnoimienna odnośnie do ładunku pierwszego przewodnika; w miarę zbliżania, gęstość staje się tak wielką, że elektryczność przezwycięża opór powietrza, tutaj więc również

przeskakuje iskra elektryczna. Nawet po zbliżeniu palca do naładowanego przewodnika, widzimy przeskakującą iskrę i uczuwamy jednocześnie lekkie ukłucie w palec.

Zapoznawszy się z kilkoma metodami wytwarzania elektryczności statycznej oraz z najważniejszemi jej własnościami, zajmiemy się obecnie przyrządem, który pozwala nam odkryć bardzo małe nawet ładunki elektryczne, zbadać je co do znaku (+ czy —) i zmierzyć ich wielkość. Przyrządy tego rodzaju nazywamy *elektrometrami*. Już zwykły elektroskop o złotych listkach wskazuje nam istnienie ładunku elektrycznego i w pewnych granicach nawet wielkość jego. Albowiem im większe jest oddalenie listków, tem większą jest ilość elektryczności, dzięki której listki odpychają się wzajemnie. Lecz elektroskop ten nie jest dostatecznie czuły. Bardzo małe ładunki elektryczne nie powodują widocznego odchylenia się listków; bardzo wielkie ładunki natomiast sprawiają to, że listki rozchodzą się możliwie najdalej i dalszego powiększania się ładunku elektrycznego za pomocą tego elektroskopu zupełnie już odkryć nie można. Oprócz tego elektroskop ów nie wskazuje sam przez się, czy elektryczność badana jest dodatnia lub ujemna, do tego niezbędną jest jeszcze np. potarta laska laku, lub szkła. Otóż wszystkie te braki usunął W. Thomson, który zbudował różne elektrometry. Najważniejszym z nich jest elektrometr, przedstawiony na fig, 517, str. 958, który wskazuje i pozwala mierzyć nadzwyczaj małe ilości elektryczności.

Główne części tego przyrządu są następujące. Igła u z cienkiej blachy aluminiowej jest zawieszona na cienkich niciach x i y w pudełku mosiężnem, które składa sie z czterech oddzielnych ćwiartek a, b, c, d (kwandrans b jest opuszczony, przez co można widzieć igłę u), stojących na szklanych nóżkach. Ćwiartki a i d są ze sobą połączone drutem w; dwie pozostałe b i c również znajdują się w połączeniu metalicznem. Prócz tego ćwiartki a i c są zaopatrzone w pręciki metalowe l i m, przez które można do nich doprowadzać badaną elektryczność, lub też w razie potrzeby połączyć z ziemią. Pręciki te nazywamy *elek-*

trodami. Igła *u* dźwiga na osi swej zwierciadełko *t*, które odbija obraz płomienia w kierunku skali.

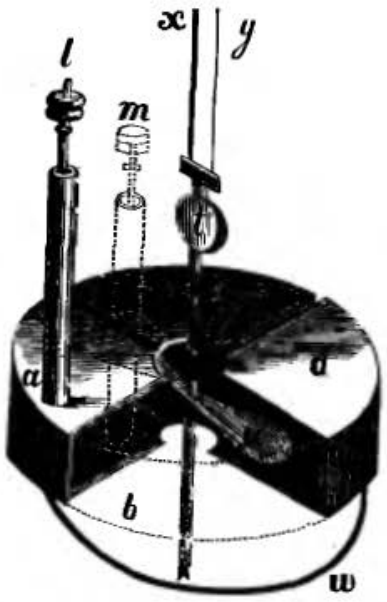


Fig. 517. Elektrometr kwadransowy W. Thomsona.

Przed użyciem przyrządu należy igłę raz na zawsze naładować bardzo silnie elektrycznością dodatnią i umieścić pomiędzy *ac* i *bd*, starając się, aby ładunek jej nie ulegał zmianie. Następnie łączymy jeden z elektrodów, np. *m*, z ziemią, przez co potencyał jego, jakoteż i obydwóch połączonych z nim ćwiartek *b* i *c*, staje się równym zeru. Przez drugi elektrod *l* doprowadzamy ćwiartkom *a* i *d* elektryczność badaną. Jeżeli elektryczność ta jest dodatnią, wówczas ćwiartki *a* i *d* odpychają igłę dodatnio elektryczną, która porusza się wskutek tego ku *b* i *c*, obraca się więc w kierunku strzałki zegara. Jeżeli natomiast doprowadzona elektryczność jest ujemną, ćwiartki *a* i *d* przyciągają igłę, która obraca się wtedy w kierunku przeciwnym, aniżeli strzałka zegara. Kierunek obrotu igły wskazuje tedy rodzaj elektryczności badanej, wielkość zaś obrotu, którą mierzy się wielkością przesunięcia obrazu płomienia na skali, daje miarę ładunku badanego. Przyrząd ten jest nadzwyczaj czuły i jak powiedzieliśmy pozwala mierzyć najmniejsze ilości elektryczności. W tym celu będziemy się nim posługiwali w dalszym ciągu.

Zastanowiwszy się nieco bliżej nad działaniem elektrometru kwandransowego widzimy, że to, co tutaj bezpośrednio mierzymy nie jest bynajmniej ładunkiem elektrycznym, lecz potencyałem; pośrednio tylko możemy z niego obliczyć wielkość ładunku, wyrażoną w pewnych jednostkach. Podczas mierzenia igła posiada stale bardzo wysoki potencyał. Dalej ciało badane łączymy cienkim drutem z jedną parą kwandransów, podczas gdy dru-

ga para znajduje się w połączeniu z ziemią, a więc potencyał jej równa się zeru. Otóż z ciała badanego płynie elektryczność na dwie pierwsze ćwiartki tak długo, dopóki potencyał ich nie stanie się równym potencyałowi tegoż ciała. Ćwiartki te zawierają więc tem więcej elektryczności, im wyższy jest potencyał ciała badanego. Kąt obrotu igły daje przeto bezpośrednio miarę *potencyału*, a nie ładunku ciała badanego. Lecz jeżeli znamy pojemność C tego ciała, możemy z łatwością obliczyć wielkość E jego ładunku elektrycznego, mianowicie za pomocą znanego nam wzoru $E = C \times P$, gdzie P oznacza potencyał.

Uzyskaliśmy tedy możność porównywania ładunków elektrycznych i potencyałów różnych ciał. Przez potencyał punktu lub przewodnika rozumiemy, jak wiadomo, tę ilość pracy, jaką należy wykonać, ażeby wbrew wszystkim siłom działającym sprowadzić 1 kulomb do danego punktu lub przewodnika z nieskończonej odległości, albo w ogóle z punktu o potencyale zero. Chcąc w taki sam sposób zamiast 1 kulomba sprowadzić do tego punktu lub przewodnika 2, 3, 4 i t. d. kulomby, musimy wykonać pracę 2, 3, 4 i t. d. razy większą. W ogóle więc ażeby sprowadzić pewną ilość elektryczności do punktu o znanym potencyale, należy wykonać pracę, równą iloczynowi z tego potencyału i doprowadzonej ilości elektryczności. Gdy już doprowadziliśmy tę ilość do danego punktu lub przewodnika, gdy więc wykonaliśmy już niezbędną pracę, wówczas jest ona niejako nagromadzoną w tym punkcie lub w przewodniku; te ostatnie posiadają wtedy, jak powiadamy, *pewną energię*, dzięki której mogą wywierać działanie na inne ładunki elektryczne i znów wykonywać pewną pracę. Energia nagromadzona jest dokładnie równa pracy, jaką zużyliśmy na sprowadzenie danej ilości elektryczności do danego punktu lub przewodnika i na wytworzenie w nich odpowiedniego potencyału.

A więc energią naelektryzowanego przewodnika, czyli pracę, jaką on może wykonać, mierzymy iloczynem z jego potencyału i ładunku elektrycznego.

Oznaczając, jak dotychczas, ładunki elektryczne w kulom-

bach, potencyały zaś w woltach, otrzymujemy wartość energii, zawartej w przewodniku naelektryzowanym, czyli pracy, jaką on może wykonać we wzorze wolt × kulomb. Energia przewodnika, którego potencyał równa się np. 1000 wol., ładunek zaś 2 kul., wynosi 2000 wolt kulombów; tyle także wynosi praca, jaką przewodnik może wykonać. Jeżeli np. przewodnik ten połączymy z ziemią za pomocą drutu, wówczas nastąpi wyładowanie: całkowita energia przewodnika przejdzie przez drut i wytworzy w nim ilość ciepła, równoważną pracy 2000 woltkulombów. Lecz w fizyce bywa zwykle używaną inna jednostka pracy, a mianowicie *erga*; jest to praca wykonana przez siłę równą 1 dynie przy przesunięciu ciała o 1 centymetr. *Otóż 1 wolt-kulomb jest równy 10 milionom ergom.* Liczba ta opiera się właśnie na przyjęciu 1 wolta, jako jednostki potencyału i 1 kulomba jako jednostki ładunku elektrycznego.

Wiemy z poprzednich ksiąg, że w praktyce za jednostkę pracy przyjęto 1 kilogrametr. Otóż ta jednostka pracy jest równa 98100000 ergom, zkąd 1 wolt × kulomb = $\frac{1}{9,81}$ kilogrametra.

W powyższym więc przykładzie przewodnik ów zawiera $\frac{2000}{9,81}$ = około 204 kilogrametrów energii; innemi słowy, ażeby go naładować potrzeba było zużyć 204 kilogr. pracy. Taką samą pracę może znów wykonać naładowany przewodnik.

Związek pomiędzy elektrycznemi jednostkami woltem, kulombem, a mechanicznemi ergą lub kilogrametrem, jest dla nas ważny dlatego, że pozwala wyrazić energię przewodnika w zwyczajnych miarach, jeżeli tylko zmierzymy jego potencyał oraz ilość elektryczności czyli ładunek.

ROZDZIAŁ II.

Elektrodynamika czyli nauka o elektryczności w stanie ruchu.

§ 1. Elektryczność przez dotknięcie. Prąd galwaniczny.

Przez długi czas sądzono, że nie można wytworzyć elektryczności inaczej, jak przez tarcie. Wprawdzie za pomocą raz naelektryzowanego ciała można było ponownie przez wpływ otrzymać elektryczność, ale zawsze należało mieć w tym celu ciało już naelektryzowane, a to inaczej powstać nie mogło, jak przez tarcie. Otóż u schyłku zeszłego stulecia profesor w Padwie, Volta, pobudzony przez przypadkowe spostrzeżenie Galvaniego, przedsięwziął cały szereg doświadczeń, które nie tylko dostarczyły nowych metod wywoływania elektryczności, ale znakomicie rozszerzyły horyzont wiedzy o jej działaniu. Volta po raz pierwszy dowiódł, że można wprowadzić ciało w stan elektryczny, nie posługując się bynajmniej tarciem; on pierwszy wykonał doświadczenia, za pomocą których udało mu się wzbudzić elektryczność wprost przez zetknięcie dwóch przewodników. Volta wykazał, że gdy dwa różne metale umieścimy wprost jeden na drugim, nie trąc ich bynajmniej o siebie, to już przez to samo zjawi się w nich stan elektryczny. Nie łatwo było Volcie tego dowieść, albowiem przy ówczesnych niedostatecznych środkach pomocniczych, a mianowie przy małej czułości jego elektroskopów, trudno było sprawdzić obecność bardzo niewielkiego ładunku elektryczności, jaką w ten sposób otrzymał. Ale teraz, dzięki niezmiernemu udoskonaleniu elektrometrów, łatwo jest powtórzyć *zasadnicze doświadczenie Volty*, jak je zwykle nazywają.

Bierzemy w tym celu (fig. 518, str. 962) starannie oszlifowaną tafelkę miedzianą *k* i również starannie oszlifowaną płytkę cynkową *z;* każda z nich jest przymocowana do szklanej pałeczki, a to dlatego ażeby można było je ujmować, nie sprowadzając jednocześnie połączenia z ziemią. Przyciskajmy teraz obie tafelki *k* i *z* ku sobie, bez tarcia, a po ich rozłączeniu spo-

strzeżemy, że obie stały się elektryczne. Gdy bowiem przybliżymy je do elektrodów elektrometru kwandransowego, to igła tego ostatniego ulegnie zboczeniu. Jednocześnie okazuje się, że zostały one wprost przeciwnie naelektryzowane. W naszym wypadku cynk jest dodatnio, miedź zaś ujemnie naelektryzowaną, czyli cynk posiada potencyał dodatni, miedź zaś ujemny. W ten sposób przez proste nałożenie na siebie dwóch różnych metali, istotnie wzbudziliśmy elektryczność. Musimy tedy przyjąć, że na powierzchni zetknięcia obu metali występuje jakaś siła, która wzbudza w nich elektryczność i to na jednym z nich wprost przeciwną, niż na drugim.

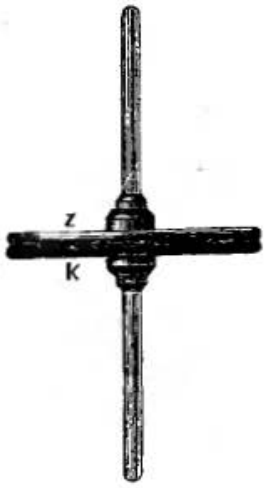


Fig 518. Wywołanie elektryczności przez zetknięcie.

Oznaczamy ją mianem energii rozdziału elektryczności. Występuje ona na powierzchni zetknięcia i wywołuje to, że potencyał obu metali jest względem siebie różny. Jedna tafelka na całej swej rozciągłości posiada pewien określony potencyał, druga tafelka posiada też na całej swej rozciągłości pewien określony potencyał, lecz różny od poprzedniego. Przyczem doświadczenie wykazało, że *energia rozdziału zawsze wytwarza tyle elektryczności, iż potencyały obu tafelek niezmiennie różnią się o jednę i tę samą wartość, bez względu na wielkość ich i kształt oraz niezależnie od tego, czy zawierają one jeszcze jakąś elektryczność.* Jeżeli obu tafelkom razem dostarczymy z zewnątrz, np. za pomocą maszyny elektrycznej, pewną ilość elektryczności, przypuśćmy dodatniej, to wprawdzie potencyał każdej z nich się wzmoże, ale pomimo to (w naszym wypadku) potencyał na cynku zawsze pozostanie o pewną stałą ilość większy od potencyału na miedzi. A zatem *energia rozdziału elektryczności tak oddziaływa, że różnica potencyałów na obu tafelkach pozostaje zawsze tą samą.* Niechaj np. różnica potencyałów wytworzonych na danej parze tafelek równa się 2 woltom. Jeżeli następnie jednę z nich połączymy z ziemią, tak iż jej potencyał stanie się równy zeru, wtedy energia rozdziału będzie tak działała, iż potencyał drugiej będzie wzrastał dopóty,

dopóki nie stanie się równy 2 woltom, a więc dopóki różnica potencyałów nie dojdzie do pierwotnej swej wysokości. Jeżeli zaś połączymy nasz układ tafelek z konduktorem maszyny elektrycznej, który zawiera np. 3000 wolt elektryczności, to jedna posiądzie potencyał 3000 wolt, druga zaś 3002 wolt. Przez zetknięcie więc dwóch różnorodnych metali występuje siła, która, wytwarzając na nich elektryczność, utrzymuje zarazem ciągle jednakową wartość różnicy ich potencyałów. Jest to fakt czysto doświadczalny, którego istnienia domyśleć się nie było można przy znanych dotychczas wiadomościach o elektryczności. Jeżeli więc połączymy jednę z obu odosobnionych tafelek, np. dodatnią, z elektrometrem kwadransowym, zauważymy zboczenie igły w kierunku dodatnim, równe 35 podziałkom skali. Połączywszy zaś drugą tafelkę z elektrometrem, otrzymamy zboczenie w kierunku ujemnym, także równe 35 podziałkom. Różnica obu zboczeń (+35 mniej —35) wynosi 70. Jeżeli teraz pozostawiwszy dodatnią w połączeniu z elektrometrem, odprowadzimy ujemną do ziemi, to otrzymamy znów 70-stopniowe zboczenie igły elektrometru. Ta więc liczba 70 jest miarą energii rozdziału elektryczności przy zetknięciu miedzi z cynkiem. Jak przy zetknięciu tych dwóch, tak też wszystkich innych metali powstaje energia rozdziału. Złoto i srebro stają się przy zetknięciu elektrycznemi, jak żelazo i cyna. I inne ciała przewodniki, jako to węgiel, tlenek manganu, nadtlenek ołowiu, powodują energię rozdziału pomiędzy sobą. Zawsze jedno ze stykających się ciał jest dodatnio, drugie zaś ujemnie elektrycznem. Dla tego też można ciała tak uszeregować, że przy zetknięciu każdych dwóch sąsiednich, poprzedzające staje się dodatnio, następujące zaś ujemnie naelektryzowanem. Szereg taki nosi miano *szeregu zetknięć.*

Szeregiem takim jest naprzykład następujący: cynk, kadm, cyna, ołów, wolfram, żelazo, bizmut, antymon, miedź, srebro, złoto, uran, tellur, platyna, palladium.

Z powyższego widać, że cynk przy zetknięciu ze wszystkiemi innemi metalami szeregu staje się dodatnim, kadm zaś w zetknięciu z niemi, z wyjątkiem jednego cynku, staje się dodatnio elektrycznym, przeciwnie stykając się z cynkiem elektryzuje się ujemnie. Palladium naodwrót przez zetknięcie

ze wszystkiemi wymienionemi w szeregu ciałami staje się ujemnym.

Bliższe ilościowe badania nad energią rozdziału elektryczności przy poszczególnych kombinacyach metali doprowadziły do odkrycia ważnego prawa. Widzieliśmy, że zboczenie igły elektrometru może nam służyć za miarę wielkości tej energii, jaka się pojawia przy zetknięciu dwóch metali. Otóż różni badacze wykonali takie pomiary, przyczem określali oni jej wielkość przy wszelkich możliwych kombinacyach dwóch metali. Oznacza się to zwykle w ten sposób, że nazwę dodatniego piszemy najprzód i pomiędzy obydwoma stawiamy prostopadłą kreskę. A więc:

Cynk | Miedź

oznacza energię rozdziału elektryczności pomiędzy cynkiem i miedzią. Energia rozdziału

Miedź | Cynk

ma wartość wprost przeciwną, albowiem metal ujemny stoi na czele.

Otóż Kohlrausch znalazł następujące wartości dla energii rozdziału, które zostały obliczone w stosunkn do Cynk | Miedź = 100.

Cynk | Miedź	= 100
Cynk | Złoto	= 112.7
Cynk | Srebro	= 105.6
Cynk | Platyna	= 107.0
Cynk | Żelazo	= 74.7
Żelazo | Miedź	= 31 9
Żelazo | Platyna	= 32.3
Żelazo | Złoto	= 39.7
Żelazo | Srebro	= 29.8
Miedź | Złoto	= 12.7

Na zasadzie tego co wyżej powiedziano, liczby te mają następujące znaczenie. Jeżeli kombinacya cynk | miedź wywołuje w elektrometrze zboczenie igły równe 100 podziałkom skali, czyli że wartość energii rozdziału pomiędzy cynkiem i miedzią wyraża się liczbą 100, to przy kombinacyi cynk | żelazo otrzymamy zboczenie równe 74,7 podziałkom, przy kombinacyi miedź | złoto równe 12,7 takich podziałek i t. d.

Otóż liczby te wykazują ciekawe prawo. Jeżeli położymy jeden na drugim trzy różne metale np. cynk, miedź, złoto, to otrzymamy energię rozdziału:

Cynk | Miedź + Miedź | Złoto = 100 + 12.7 = 112.7

a więc tę samą wartość, jaką ma podług powyższego szeregu kombinacya

Cynk | Złoto

kładąc w ten sam sposób jedne na drugie blaszki cynku, srebra, żelaza osiągamy energią rozdziału:

Cynk | Srebro + Srebro | Żelazo = 105,6 — 29,8 = 75,8

Energia rozdziału przy kombinacyi cynk | żelazo bezpośrednio wymierzona daje wartość 74,7 a więc prawie taką samą, jaka pojawia się przy powyższej potrójnej kombinacyi.

Małą tę różnicę objaśnić można niedokładnością liczb, której nie można uniknąć przy trudności tego rodzaju pomiarów. Zupełnie taki sam stosunek wykazują wszystkie inne potrójne kombinacye powyżej wymienionych metali. Spostrzegamy to samo i wtedy, gdy jeszcze większą ilość metali układamy jeden na drugim. Tak np. ułożywszy kolejno cynk, srebro, żelazo, złoto, miedź wytwarzamy energię rozdziału, której wartość wynosi:

Cynk | Srebro + Srebro | Żelazo + Żelazo | Złoto + Złoto | Miedź
= 105,6 — 29,8 + 39,7 — 12,7 = 102,8

Określając tę wartość bezpośrednio dla kombinacyi cynk | miedź otrzymujemy liczbę 100, a zatem prawie tę samą. Wyprowadzamy z tego prawo następujące:

Jeżeli ułożymy szereg z różnych metali, to energia rozdziału elektryczności całego układu jest równą energii pierwszego i ostatniego metalu, wziętych jako jedna para. Nosi ono miano *prawa szeregu zetknięć.*

Lecz fakt powstawania elektryczności przez zetknięcie dwóch różnych metali jest właściwie tylko szczególnym wypadkiem daleko ogólniejszego zjawiska. A mianowicie, elektryczność wytwarza się nietylko przy zetknięciu dwóch metali, ale w ogóle zawsze ilekroć podlegają zetknięciu dwa różne przewodniki stałe, ciekłe lub nawet gazowe.

Jeżeli położymy izolowaną, nienaelektryzowaną blaszkę cynkową na cienkiej warstwie czystej wody, równomiernie rozlanej na szklanej tafelce, a następnie zdejmiemy blaszkę i przytkniemy do elektrometru, przekonamy się, że staia się ona ujemnie elektryczną. W taki sam sposób blaszka miedziana przez zetknięcie z wodą nabiera własności elektrycznych i w ogóle rzec można, że wszelki metal, zetknięty z czystą wodą, staje się ujemnie naelektryzowanym. W miejscu więc zetknięcia wody z metalem powstaje także energia rozdziału, która wywołuje na nim elektryczność ujemną, na wodzie zaś dodatnią.

Podobnie każdy metal zetknięty z ługiem potasowym staje się ujemnie elektrycznym, podczas gdy ług nabiera przeciwnej elektryczności. W innych cieczach, np. w kwasie siarczanym, azotnym, w siarczanie cynku i t. p. jedne metale stają się dodatnio elektrycznemi, inne zaś — ujemnie. Ciecz w takim razie, rzecz jasna, przechodzi zawsze w przeciwny stan elektryczny.

A więc i tam, gdzie metal styka się z cieczą występuje energia rozdziału, dzięki której oba ciała, metal i ciecz, stają się elektrycznemi, przedstawiając przytem pewną określoną różnicę potencyałów. Ale wielkość tej energii jest i tutaj także różną dla rozmaitych metali i cieczy, jakkolwiek niezmiernie trudno jest wyrazić ją w ścisłych ilościowych danych. Albowiem gdy stykamy czystą blaszkę metaliczną z cieczą, to w większości wypadków następują swoiste zmiany chemiczne, wskutek czego wartość energii rozdziału wypada rozmaicie, stosownie do tego, czy metal pogrążony był w cieczy przez czas dłuższy lub krótszy. Do pewnego stopnia ścisłemi są następujące dane dla wartości energi omawianej i w tym razie obliczone w stosunku do połączenia cynk | miedź = 100.

Czysty	cynk | woda	=	— 61,6
„	miedź | woda	=	— 33,0
„	srebro | woda	=	— 17,0
„	złoto | woda	=	— 33,7
„	platyna | woda	=	— 44,7

Ponieważ liczby te są ujemne, przeto wykazują, że metale, zetnięte z wodą, przechodzą w stan ujemnie elektryczny; z po-

wyższych danych widać także, że energia rozdziału jest najwyższą dla kombinacyi cynku z wodą, najniższą zaś w razie zetknięcia tej ostatniej ze srebrem. Z liczb tych wywnioskować łatwo, że wody nie można zaliczyć do przytoczonego powyżej szeregu zetknięć, gdyż nie podchodzi ona pod prawo takiego szeregu. Albowiem podług niego winno być

Cynk | woda + woda | miedź = cynk | miedź = 100

tymczasem podstawiając wiadome liczby otrzymujemy

Cynk | woda + woda | miedź = — 61,6 + 33,0 = — 28,6.

Podobnie jak dla wody, tak też i dla każdej innej cieczy można określić wartość energii rozdziału. Wykonane pomiary dowiodły, że *ciecze nigdy nie podlegają prawu szeregu zetknięć.* Żadna ciecz nie daje się tak przyłączyć do szeregu, ażeby energia rozdziału, właściwa danemu systemowi metali i cieczy, była równą energii odpowiadającej połączeniu końcowych ciał tegoż systemu.

Dla tego też przewodniki dzielimy na dwie kategorye: *przewodniki pierwszego rzędu i drugiego rzędu.*

Do pierwszej kategoryi należą te ciała, które podlegają prawu szeregu zetknięć, a więc metale, niektóre nadtlenki metali np. manganu, ołowiu; następnie niektóre połączenia siarki.

Do drugiej należą te ciała, które się z pod prawa powyższego wyłamują i nie dają szeregu zetknięć z przewodnikami pierwszego rzędu. Należą tutaj kwasy, roztwory solne i sole stopione.

To odróżnianie przewodników pierwszego i drugiego rzędu pociąga za sobą ważne skutki. Zwróćmy najprzód uwagę na ciała pierwszej kategoryi i wyobraźmy sobie, iż pewna ilość należących do niej metali została ułożoną w ten sposób, że tworzy zupełnie zamknięte koło. Weźmy np. paski miedzi, cynku, srebra, żelaza i złota i ułóżmy je w zamknięte koło (fig. 519, str. 968). Wtedy każdy z nich może być rozpatrywany jako wyraz początkowy lub końcowy tego szeregu i w skutek prawa szeregu

zetknięć energia rozdziału w całem tem zamkniętem kole będzie równą

$$\text{miedź} \mid \text{miedź} = 0.$$

I rzeczywiście, jeżeli zsumujemy poszczególne liczby przytoczone wyżej, które wyrażają nam, jak wiadomo, odnośne wartości energii rozdziału, to otrzymamy:

miedź | cynk	+	cynk | srebro	+	srebro | żelazo	+	zelazo | złoto	+	złoto | miedź		
— 100	+	105,6	—	29,8	+	39,7	—	12,7	=	2,8.	

Ta liczba 2,8, która jest bardzo bliską zera, powstała tylko dzięki niedokładności odnośnych liczb. Gdyby te ostatnie były zupełnie ścisłe i zgodne z prawdziwym stanem rzeczy, to suma wszystkich energii rozdziału byłaby równą zeru.

Fig. 519 Koło zamknięte, składające się z kilku przewodników pierwszego rzędu.

Wynika z tego, że *w zupełnie zamkniętem kole z samych tylko przewodników pierwszego rzędu energia rozdziału równa się zeru.* Wiadomo zaś nam z poprzedniego, że właśnie ta energia wywołuje różnicę potencyałów dwóch stykających się metali. Rzecz więc oczywista, że w zamkniętem kole, gdzie energia rozdziału, równa zeru, działania swego nie wywiera, potencyał jest wszędzie jednakowy t. j. że elektryczność znajduje się w równowadze, czyli w spokoju.

Jeżeli natomiast w to koło, w jednem albo w kilku miejscach, wstawimy przewodnik drugiego rzędu, to oczywiście wspomniane prawo nie będzie się już tutaj stosowało, albowiem, jak nam wiadomo, ciało takie nie może być przyłączone do szeregu zetknięć. Wstawmy np. w powyższe koło, pomiędzy miedź i cynk, wodę, a przybierze ono postać przedstawioną na fig. 520. Teraz mamy w niem następującą energię rozdziału:

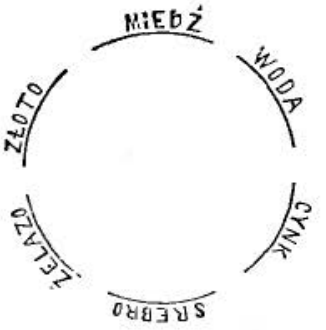


Fig. 520. Koło zamknięte, składające się z kilku przewodników pierwszego rzędu i z jednego drugiego rzędu.

miedź|woda + woda|cynk + cynk|srebro + srebro|żelazo + żelazo|złoto + złoto|miedź
— 33,0 + 61,6 + 105,6 — 29,8 + 39,7 — 12,7=131,4

A więc energia rozdziału w takiem kole zamkniętem, gdzie znajdują się przewodniki pierwszego i drugiego rzędu, nie równa się zeru, ale przeciwnie posiada bardzo wysoką wartość.

Z tego wyprowadzamy prawo takie: *w całkowicie zamkniętem kole, składającem się z przewodników pierwszego i drugiego rzędu, energia rozdziału nie jest równa zeru.*

Z prawa tego wynikają wnioski niezmiernej doniosłości. Zanim jednak przystąpimy do nich zauważymy, że wartość energii rozdziału, panującej w takiem kole zamkniętem, możemy przedstawić w sposób prostszy.

Przy jej określaniu uwzględniliśmy w powyższym rachunku cały szereg metali i jedną ciecz, mianowicie wodę. Ale nie wszystkie te ciała, jak się łatwo o tem przekonać, wywierają wpływ na wartość ostatecznej, wypadkowej energi rozdziału, która raczej zależy od tego, jakie dwa metale stykają się z wodą. Rzeczywiście w danym wypadku tylko miedź i cynk z nią się stykają i dają energię rozdziału:

miedź | woda + woda | cynk

nadto cynk jest połączony z miedzią za pośrednictwem całego szeregu bezpośrednio sąsiadujących ze sobą metali: cynku. srebra, żelaza, złota, miedzi.

W tym czysto metalicznym szeregu działa prawo szeregu zetknięć tak, że

cynk | srebro + srebro | żelazo + żelazo | złoto + złoto | miedź = cynk | miedź

A więc całkowitą energię rozdziału w powyższym układzie wyrazić możemy formułą skróconą:

miedź | woda + woda | cynk + cynk | miedź
— 33,0 + 61,6 + 100 = 128,6

Liczba ta różni się niewiele od otrzymanej pierwotnie 131,4 i to tylko wskutek niedokładności danych ilościowych.

Wynika z tego, że *jeżeli dwa różne metale A i B zetkniemy z jednej strony z cieczą, a z drugiej połączymy je za pośrednictwem dowolnego szeregu metali, to energia rozdziału w tem kole zamkniętem jest zupełnie niezależną od szeregu metali, jaki wiąże ze*

sobą ciała A i B. Wartość jej zależy tylko od energii właściwej połączeniom metali A i B oraz tych ostatnich z daną cieczą. A więc równa się ona

$$A \mid ciecz + ciecz \mid B + B \mid A$$

Możemy więc dwa metale, zanurzone w jakiejś cieczy połączyć ze sobą drutem dowolnym, a otrzymamy zawsze w całym tym zamkniętym układzie przewodników określoną energię rozdziału, która zależy jedynie od natury cieczy i pogrążonych w niej obu metali.

Zrozumienie tego, co się właściwie odbywa we wspomnianym układzie, wymaga bliższego wejrzenia w samą istotę sprawy i dlatego wkrótce jeszcze raz do niej powrócimy.

§ 2. Elementy Daniell'a, Bunsena, Leclanche'a i gazowy. Działanie prądu. Busola stycznych.

Wspominaliśmy już o tem, że każdy metal przez zetknięcie z wodą staje się ujemnie elektrycznym, lecz że rozmaite metale podlegają temu w niejednakowym stopniu. Jeżeli zaś dwa metale będą jednocześnie pogrążone w wodzie, to rzecz oczywista, że nastąpi na nich inny rozdział elektryczności.

Wyobraźmy sobie zanurzone w wodzie blaszki cynkową i miedzianą, nie połączone żadnym drutem ze sobą. Blaszka cynkowa dzięki energii rozdziału staje się natychmiast elektroujemną, woda zaś elektrododatnią, innemi słowy pierwsza z nich otrzymuje potencyał ujemny, druga zaś dodatni; energia która je wytworzyła, oczywiście dąży do tego, by taki podział elektryczności wciąż się utrzymywał. Ale mamy w wodzie także blaszkę miedzianą. Ta ostatnia otrzyma elektryczność dodatnią dzięki przewodnictwu wody, która, jak wiemy, stała się dodatnią, słowem miedź posiadałaby potencyał dodatni. Lecz z drugiej strony wskutek działania energii rozdziału, jaka się wywiązuje przy zetknięciu tej blaszki z wodą, otrzyma ona elektryczność ujemną, czyli potencyał ujemny. W każdym więc razie wskutek obecności cynku, ten ujemny potencyał miedzi zmniejsza się. Więcej nawet, gdyż energia rozdziału pomiędzy

cynkiem i wodą jest większa od tej, jaka się wytwarza pomiędzy miedzią i wodą tak, że potencyał dodatni wody przezwycięża potencyał ujemny samej miedzi, która ostatecznie posiada potencyał dodatni. Z cynkiem rzecz się ma wprost przeciwnie. Dzięki energii rozdziału otrzymuje on potencyał ujemny, woda zaś, z którą on się styka posiada nieznaczny potencyał dodatni, wskutek jednoczesnego stykania się jej z miedzią. W rezultacie na blaszce cynkowej pozostaje potencyał ujemny Z obu metali sam cynk odnośnie do wody jest bardziej ujemnie elektrycznym, aniżeli sama miedź. Jeżeli zaś oba te ciała jednocześnie pogrążamy w wodę, to silniej ujemny cynk pozostaje takim, podczas gdy słabiej ujemna miedź elektryzuje się dodatnio. To co mówimy tutaj o wspomnianych dwóch metalach stosuje się także do wszystkich innych. Wyprowadzamy więc taką zasadę: *Jeżeli dwa metale są zanurzone w cieczy, to jeden z nich staje się ujemnie, drugi zaś dodatnio elektrycznym, przyczem ten, który dzięki właściwej mu energii rozdziału jest bardziej negatywny, zostaje nim w danym wypadku.*

Przytoczyliśmy wyżej wielkość energii rozdziału dla pewnych metali odnośnie do wody. Widzieliśmy, że cynk | miedź = — 61,6, miedź | woda = — 33,0, srebro | woda = — 17,0, złoto | woda = — 33,7, platyna | woda = — 44,7. Z danych tych widać, że cynk jest najbardziej ujemnym i dla tego, jeżeli pogrążymy go z jakimkolwiek innym jeszcze metalem w wodzie, to on zawsze pozostanie ujemnym. Można tego dowieść za pomocą doświadczenia. Jeżeli umieścimy cynk i drugi jakiś metal w wodzie, odosabniając całe to urządzenie i następnie za pomocą kwandransowego elektrometru określimy rodzaj elektryczności zebranej na nich, przekonamy się, że cynk został naelektryzowany ujemnie, a ów drugi metal dodatnio. Możemy wszystkie metale tak uszeregować, ażeby z każdej ich pary poprzedzający stawał się ujemnie, a następujący dodatnio elektrycznym w zetknięciu, ma się rozumieć, z pewną określoną cieczą. Nosi to miano szeregu zetknięć w danej cieczy. Oczywiście dla różnych cieczy szereg ów będzie rozmaity.

Tak np. odnośnie do wody można je ułożyć w porządku następującym.

Cynk, ołów, cyna, żelazo, antymon, bizmut, miedź, srebro, złoto.

Rzeczywiście, jeżeli zanurzymy w wodzie jednocześnie np. ołów i żelazo, to pierwszy z nich wykaże ujemną, drugi zaś dodatnią elektryczność, albo gdy użyjemy żelaza i złota, to pierwsze stanie się ujemnem, drugie zaś dodatniem.

Dla rozcieńczonego kwasu siarczanego, szereg taki podług badań Poggendorff'a jest następujący:

cynk, kadm, żelazo, cyna, ołów, glin, nikiel, antymon, bizmut, miedź, srebro, platyna

i tak dla wszystkich cieczy szeregi te są mniej lub więcej odmienne.

Jeżeli bierzemy metale cynk i miedź oraz wodę, to w układzie tym panuje określona energia rozdziału, dzięki której potencyały obu metali różnią się między sobą o pewną określoną wielkość, bez względu na to, czy znaczna czy też nieznaczna jest ich istotna wartość. Przypuśćmy np. że ta różnica potencyałów wynosi 1 wolt; w takim razie jeżeli cały układ będzie odosobniony t. j. oba metale i ciecz nie będą połączone żadnym przewodnikiem z ziemią lub innemi jakiemiś źródłami elektryczności, to potencyał miedzi wynosić będzie $^1/_2$ wolt, a cynku $-^1/_2$ wolt, czyli że różnica równa się 1 woltowi. Jeżeli natomiast cynk odprowadzimy do ziemi, a więc zniżymy jego potencyał do zera, to oczywiście potencyał miedzi wzrośnie do 1 wolta, różnica między nimi pozostanie jedną i tą samą. Naodwrót, jeżeli miedź połączymy z ziemią, a więc potencyał jej doprowadzimy do zera, to na tej samej zasadzie potencyał cynku podniesie się do wysokości — 1 wolt. Jeżeli z drugiej strony połączymy cynk np. z konduktorem maszyny elektrycznej o potencyale równym 1000 woltom, to i metal ten otrzyma tejże wartości potencyał, ale jednocześnie potencyał miedzi wzrośnie do ilości 1001 wolt i różnica pomiędzy nimi będzie znowu ta sama. Gdy więc zanurzymy w wodzie sztabkę cynkową i miedzianą i pierw-

szą połączymy z ziemią, to druga posiadać będzie potencyał równy 1 woltowi, który udziela się wszystkim przewodnikom, połączonym z miedzią i odosobnionym. Jeżeli więc połączymy sztabkę miedzianą naszego naczynia z takąż sztabką cynkową innego, w którem także pogrążone są dwie takie sztabki, to ta ostatnia (cynk układu drugiego) otrzyma od pierwszej (miedź układu pierwszego) potencyał równy 1 woltowi. Oprócz tego miedź drugiego układu musi posiadać potencyał wyższy o 1 wolt niż cynk tegoż układu, oczywiście więc będzie on wynosił 2 wolty. Jeżeli teraz sztabkę miedzianą drugiego układu połączymy ze sztabką cynkową układu trzeciego to, jak z powyższego łatwo wywnioskować można, ta ostatnia będzie posiadała potencyał równy 2 woltom, a miedź tegoż układu potencyał równy 3 woltom i t. d. Łącząc tedy dowolną ilość, np. 10 jednakowych układów, przekonywamy się, że różnica potencyałów wytworzonych w końcowych ogniwach takiego łańcucha jest dziesięć razy większą, aniżeli w każdym układzie z osobna. A więc dziesięć naszych układów w podobny łańcuch ułożonych posiada w końcowych swych ogniwach różnicę potencyałów wynoszącą 10 woltów. Jeżeli tedy wszystkie nkłady, czyli ogniwa będą odosobnione, to pierwszy cynk będzie posiadał potencyał — 5 wolt, ostatnia zaś miedź potencyał + 5 wolt.

Fig. 521 wyobraża nam taki łańcuch z 5 ogniw, czyli tak zwaną *bateryę galwaniczną*. Układ złożony z jednej lub kilku

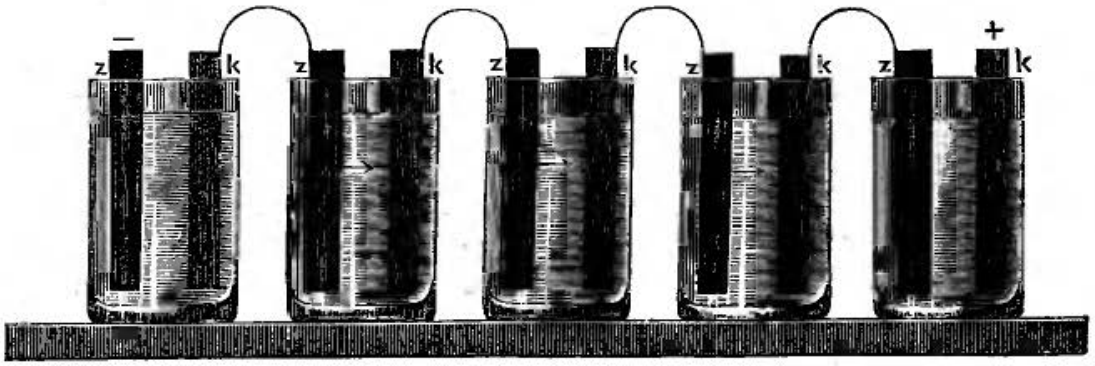


Fig 521. Baterya złożona z pięciu pojedyńczych układów czyli ogniw.

cieczy oraz z dwóch metali nazywa się ogniwem albo elementem galwanicznym. W każdem takiem ogniwie oba metale posiadają

określoną różnicę potencyałów, która zależy tylko od ich natury oraz od cieczy w jakiej są pogrążone, jest zaś niezależną od wielkości i formy metali oraz ilości cieczy. Tę określoną różnicę potencyałów nazywamy *siłą elektromotryczną*. Każde więc ogniwo galwaniczne posiada określoną siłę elektromotryczną. Jeżeli ustawimy szereg ogniw galwanicznych tak, ażeby zawsze dodatni metal jednego łączył się drutem z metalem ujemnym następnego, to szereg taki będzie nosił miano bateryi. Na fig. 521 widzimy, że miedź *k* jednego ogniwa wiąże się z cynkiem *z* następnego. Jedynie dwa końcowe metale są swobodne; nazywamy je *biegunami* bateryi, podobnie jak końce obu metali w każdem pojedyńczem ogniwie. Baterya ta posiada 5 razy większą siłę elektromotryczną, niż każde jego ogniwo z osobna. Dotąd widzieliśmy, że każdy metal w zetknięciu z cieczą staje się elektrycznym. Można więc zbudować takie ogniwo, w którem oba metale będą pogrążone nie w jednej cieczy, jak dotychczas zawsze przypuszczaliśmy, ale każdy z nich w innej, przyczem użyte ciecze będą ze sobą połączone przewodnikiem. I tutaj także jeden metal będzie dodatnio elektrycznym, drugi ujemnie; takie odgniwo posiada też swą określoną siłę elektromotryczną, która zależy jedynie od natury jego metali i cieczy. Ogniwa o dwóch metalach i dwóch cieczach są szczególniej często używane, z przyczyn o których później będziemy mówili i dla tego opiszemy tu kilka ich rodzajów.

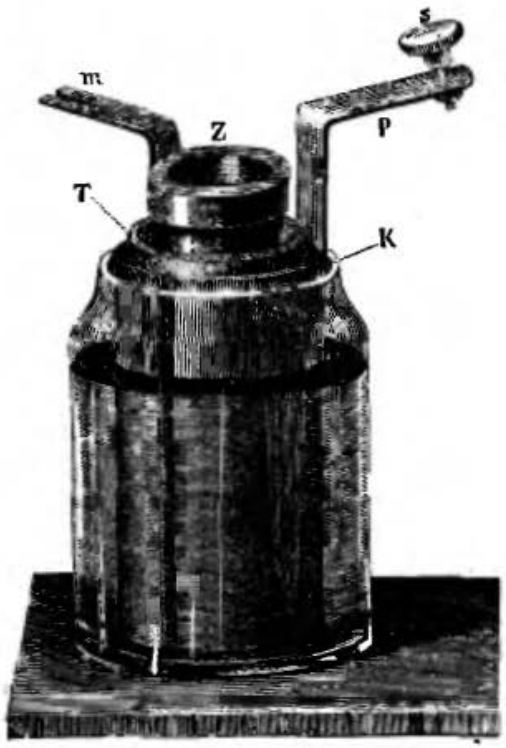


Fig. 522. Ogniwo Daniella

W *ogniwie Daniell'a* (fig. 522) widzimy metale cynk i miedź; pierwszy z nich jest pogrążony w rozcieńczonym kwasie siarczanym, druga zaś w siarczanie miedzi. Ażeby dwie te ciecze nie zmieszały się

zaraz ze sobą, lecz ażeby jednak mogły stykać się, oddzielamy je glinianym porowatym cylindrem. Do szklanego naczynia wlewamy roztworu siarczanu miedzi i pogrążamy w nim cylinder miedziany *K*. Następnie do tego ostatniego wstawiamy cylinder gliniany *T*, w którym, wypełniwszy go przedtem rozcieńczonym kwasem siarczanym, pogrążamy cylinder cynkowy *Z*. Do obu metalowych cylindrów są przylutowane blaszki *m* i *p*; ta ostatnia ze szrubą *s*. Nazywamy je *biegunami* ogniwa. Na biegunie cynkowym panować będzie potencyał ujemny, na biegunie zaś miedzianym dodatni. Siła elektromotryczna jednego ogniwa Daniell'a wynosi około 1 wolt (jest od niego mniejsza o jakie 5 do 10%). Chcąc połączyć wiele ogniw w jedną bateryę w sposób wyżej podany, należy tylko blaszkę *m* jednego elementu przyszrubować do blaszki *p* drugiego. Fig. 523 wyobraża nam taką bateryę z czterech ogniw nieco odmiennej, niż powyższe budowy. Inny element (Bunsena) często używany i posiadający większą, niż ogniwo Daniell'a siłę elektromotryczną, jest w najprostszej formie przedstawiony na fig. 524. Widzimy tutaj jeden tylko metal cynk, drugi bowiem został zastąpiony przez węgiel. Cynk jest zanurzony tutaj w rozcieńczonym kwasie siarczanym,

Fig. 523. Baterya z czterech ogniw.

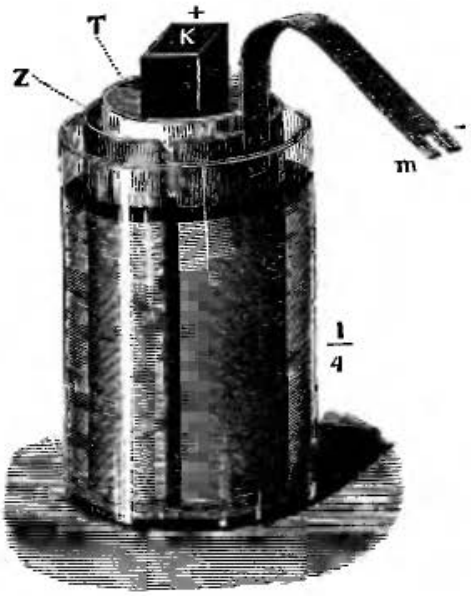


Fig. 524. Ogniwo Bunsena.

węgiel zaś w skoncentrowanym kwasie azotnym. Do naczynia wlewamy najprzód kwasu siarczanego, a następnie wstawiamy cylinder cynkowy *Z*, później cylinder gliniany *T* i nalawszy do tego ostatniego kwasu azotnego umieszczamy w nim *K*. I tutaj biegun cynkowy będzie elektroujemnym, węglowy zaś elektrododatnim.

Dalej jako przykład ogniwa innej jeszcze budowy, używanego często przy telefonach i dzwonkach elektrycznych, może służyć element Leclanche'a. Tu spotykamy znów węgiel i cynk, ale pierwszy z nich znajduje się w naczyniu glinianem, napełnionem mieszaniną tlenku manganu i węgla; cynk zaś jest zanurzony w roztworze salmiaku. W tym więc elemencie mamy do czynienia z jedną tylko cieczą. Istnieje jeszcze cały szereg ogniw o dwu metalach oraz jednej, albo dwóch cieczach; lecz trzy powyżej opisane najczęściej bywają używane.

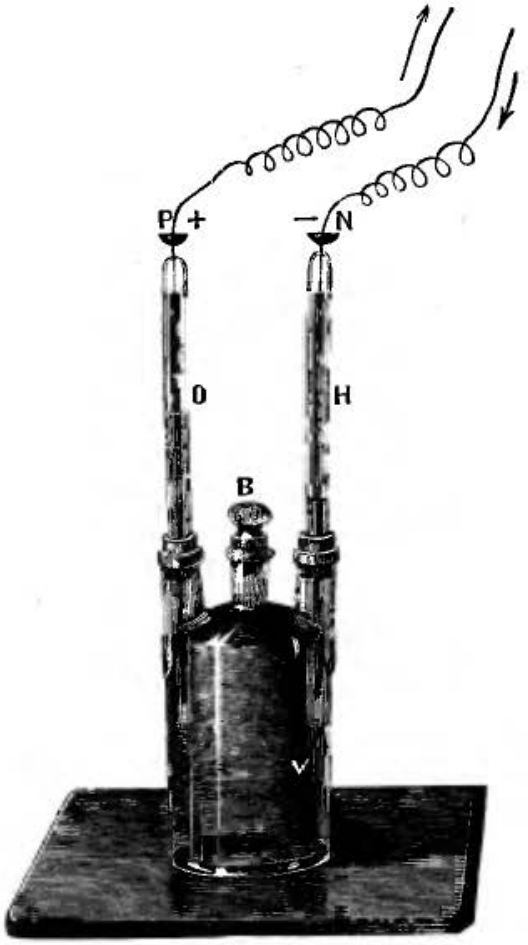


Fig. 525. Przyrząd, wykazujący powstawanie siły elektromotrycznej przez zetknięcie metali z gazami.

Podobnie jak dwa metale w jednej cieczy przedstawiają różnicę potencyałów, tak też dwie blaszki z jednego metalu zanurzone w dwóch różnych cieczach otrzymują różne potencyały, albowiem siła elektromotryczna pomiędzy pewnym metalem i różnemi cieczami nie jest jednakową. Ale nawet pomiędzy dwiema blaszkami jednego i tego samego metalu, zetkniętemi z dwoma różnemi gazami, powstaje różnica potencyałów. Można się o tem przekonać za pomocą przyrządu, przedstawionego na figurze 525. W butelce V, zaopatrzonej w dwie u góry zamknięte rurki szklane *O* i *H*, znajduje się rozcieńczony kwas siarczany.

W rurkach wiszą dwie blaszki platynowe na wlutowanych drutach platynowych, które są połączone z N i P. Jeżeli teraz wprowadzimy do jednej rurki tlen, do drugiej zaś wodór tak, ażeby wspomniane blaszki platynowe były po części temi gazami otoczone, po części zaś dolnemi końcami nurzały się w kwasie siarczanym, to obydwie wykażą pewną i to dość nawet znaczną różnicę potencyałów, jak się o tem łatwo przekonać można za pomocą elektrometru kwandransowego. Układ taki zowiemy też *ogniwem gazowem*. Jego siła elektromotryczna przy tlenie i wodorze, jako gazach i platynie jako metalu wynosi około $^9/_{10}$ wolt, przy węglu zaś użytym zamiast platyny siła ta potęguje się do wysokości 2,2 wolt.

Rozważmy teraz procesy, jakie się odbywają w danym elemencie galwanicznym. Jako przykład weźmy ogniwo Daniella. Na biegunie miedzianym, jak wiemy, istnieje elektryczność dodatnia i patencyał dodatni, na biegunie cynkowym zaś elektryczność ujemna i potencyał ujemny. Dwa te więc bieguny zachowują się zupełnie tak samo, jak konduktory maszyny elektrycznej, o których poprzednio już mówiliśmy. Jeżeli połączymy oba bieguny drutem, to elektryczność płynie od jednego z nich do drugiego. Elektryczności niebawem by się wyrównały i ogniwo przeszło by w stan nie elektryczny, gdyby nie wytwarzały się nowe ich ilości dzięki działającej bezustannie energii rozdziału elektryczności, które natychmiast się wyrównywają; na ich miejsce znów powstają świeże ilości i t. d.

W ten sposób wytwarza się *ciągły, trwały prąd elektryczny*, który płynie od wyższego potencyału przez drut łączący oba bieguny, przez metale i ciecze. W ogniwie Daniell'a na biegunie miedzianym panuje potencyał dodatni. Dodatnia więc elektryczność płynie po drucie do bieguna cynkowego, ztąd do kwasu siarczanego, z niego przez wypełnione cieczą pory glinianego cylindra do siarczanu miedzi i wreszcie przez ten ostatni i miedź do bieguna miedzianego. Prąd ten jest utrzymywany w ciągłości dzięki energii rozdziału, która na miejsce każdej wyrównanej ilości elektryczności dostarcza świeżego zapasu. Moglibyśmy zresztą z taką samą słusznością twierdzić, że elektryczność ujem-

na płynie od cynku po drucie do miedzi, a następnie od miedzi po przez ciecz do bieguna cynkowego. Jest to tylko inny sposób przedstawienia rzeczy. W jednym wypadku prąd posiada kierunek odwrotny, aniżeli w drugim. Zwykle kierunek elektryczności dodatniej nazywamy *kierunkiem prądu.*

W nieco uproszczonej formie przedstawiono kierunek prądu dodatniego w ogniwie galwanicznem na fig. 526. Po drucie przewodnim płynie prąd dodatni od miedzi do cynku i przez ciecz od cynku do miedzi.

Fig. 526. Szemat ogniwa galwanicznego.

W poprzednim rozdziale powiedzieliśmy, że w maszynie elektrycznej na jednym z konduktorów skupia się elektryczność dodatnia, na drugim zaś — ujemna i że zwolna następuje ich wyrównanie, po przez warstwę powietrza, która je rozdziela. Otóż jeżeli połączymy takie konduktory drutem przewodnim, to wyrównywanie obu rodzajów elektryczności nie będzie już, rzecz jasna, odbywało się przez warstwę powietrza, lecz przez drut, gdyż jak nam wiadomo, elektryczność rozchodzi się w metalu z nadzwyczajną łatwością. W ten sposób elektryczność dodatnia, posiadając potencyał wyższy na konduktorze dodatnim, dopóty będzie spływać po drucie ku konduktorowi ujemnemu, gdzie potencyał jest niższy, dopóki oba rodzaje elektryczności nie wyrównają się. Jeżeli zaś będziemy obracali maszynę i wskutek tego będziemy dostarczali konduktorom coraz nowych ilości elektryczności, wtedy oczywiście wyrównywanie to będzie nieprzerwane, czyli innemi słowy wytworzy się ciągły prąd elektryczny.

Prąd elektryczny wywiera pewne działanie na drut i na swe otoczenie, o którem powiemy w tem miejscu kilka słów. Przedewszystkiem drut się ogrzewa. Można to łatwo wykazać za pomocą przyrządu, zbudowanego przez Riess'a. Spiralnie zwinięty drut platynowy (fig. 527, str. 979) jest umieszczony w szklanej kuli wydłużonej w wązką rurkę, zawierającą nieco

wody. Końce drutu spiralnego, które wystają na zewnątrz kuli, łączy się za pomocą drutów z konduktorami maszyny elektrycznej. Wtedy drut platynowy stanowi łącznik pomiędzy nimi i zamienia się w przewodnik, po którym płynie prąd podczas obracania maszyny. Otóż drut ten ogrzewa się, jak się o tem łatwo przekonać można, gdyż i powietrze w kuli ogrzewa się, rozszerza i popycha wodę, której poziom w rurce podnosi się. To samo widzimy i w ogniwie galwanicznem, ale tutaj (z przyczyn, które poniżej poznamy), zjawisko występuje jeszcze wyraźniej. Jeżeli jako przewodnika (w przyrządzie, przedstawionym na fig. 526) użyjemy cienkiego, krótkiego drutu, wtedy on ogrzeje się od prądu i będziemy mogli wprost ręką skonstatować to podwyższenie temperatury. Gdy ogniwa bateryi (patrz fig. 521) będą połączone cienkim drutem, wtedy on rozpali się do czerwoności i nawet stopi się.

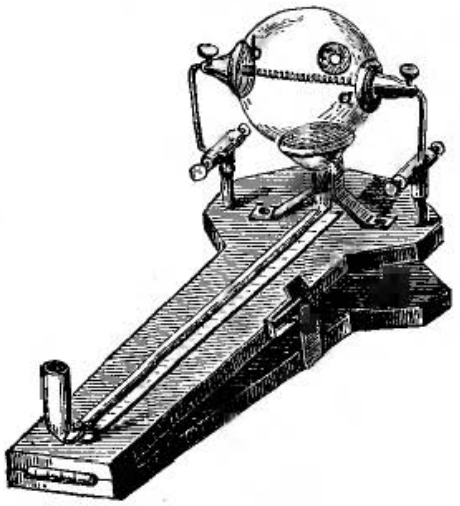


Fig. 527. Przyrząd Riess'a.

Widzieliśmy dalej w księdze o cieple (str. 801), że prąd elektryczny wywołuje zboczenie igły magnesowej, w około której bieg swój odbywa. W celu jakościowego wykazania prądu posługujemy się przyrządem, noszącym nazwę *busoli* czyli *elektrometru stycznych* (fig. 528). Składa się on w gruncie z igły magnesowej *n s*, zawieszonej na nitce i z drutu *b*, zgiętego w kształt koła, u dołu otwartego. Końce tego drutu, dochodzą do dwóch metalicznych klamr *d* i *e*. Jeżeli połączy-

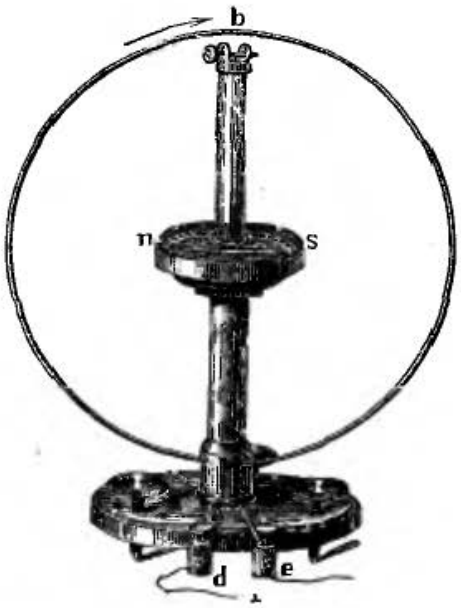


Fig. 528. Elektrometr czyli busola stycznych.

my za pomocą drutu klamrę *d* z biegunem miedzianym ogniwa galwanicznego, a klamrę *e* z biegunem cynkowym, to prąd dodatni będzie płynął od miedzi ku *d*, następnie przez cały drut okrągły, wokoło igły magnesowej ku *e*, stąd do cynku, a z tego ostatniego przez ciecz elementu z powrotem do miedzi. Igła magnesowa pod wpływem prądu, który biegnie po drucie, zbacza z naturalnego swego położenia; zwykle jest ona zwrócona ku północy, w danym zaś wypadku, to jest gdy prąd dodatni biegnie w kierunku strzałki, zboczenie jest tego rodzaju, że biegun północny cofa się w tył, biegun zaś południowy naprzód, jeżeli wyobrazimy sobie, że twarzą jesteśmy zwróceni ku busoli stycznych.

Łącząc biegun miedziany z *e*, cynkowy zaś z *d*, otrzymujemy prąd o kierunku przeciwnym, a wtedy i igła odchyla się w stronę wprost przeciwną poprzedniej. Oprócz tych dwóch działań prądu galwanicznego istnieje jeszcze cały ich szereg, których bliższem określeniem zajmiemy się wtedy dopiero, gdy poznamy warunki od jakich on zależy.

§ 3. Prawa prądu galwanicznego. Prądy rozgałęzione. Galwanoskop.

Każde ogniwo galwaniczne może wytwarzać ciągły prąd elektryczny. Rzeczywiście elektryczność musi tutaj znajdować się w ruchu nieprzerwanym, skoro w obrębie jednego i tego samego przewodnika potencyał nie jest wszędzie równy, lecz w różnych jego miejscach posiada rozmaitą wartość. W takim razie, jak wiemy, dodatnia elektryczność spływa z miejsc o wyższym potencyale do miejsc o niższym potencyale. W każdem ogniwie galwanicznem, którego bieguny nie są połączone i które dlatego nazywamy *otwartem*, obydwie blachy metaliczne (każda ze swoim biegunem) posiadają właściwy sobie potencyał; ten ostatni na jednej z nich jest wyższy o pewną stałą wielkość, niż na drugiej i dla tego przy połączeniu drutem obu blach powstaje prąd, biegnący od miedzi (w ogniwie np. Daniell'a) do cynku. Ale prąd biegnie także przez ciecz ogniwa, gdyż w miejscu zetknięcia jej z obu metalami działa energia rozdziału, a więc w bliskości je-

dnego z nich (cynku) powstaje potencyał wyższy, aniżeli w bliskości drugiego (miedzi). W ten sposob otrzymujemy stały prąd galwaniczny, płynący przez wszystkie części składowe ogniwa. Stosunki te możemy uzmysłowić sobie przez porównanie z prądem wody. Wyobraźmy sobie np. w rzece dwie rury, wypełnione wodą tak, że poziom jej w jednej z nich jest wyższy, aniżeli w drugiej. Jeżeli połączymy je za pomocą trzeciej bocznej rury, to woda będzie spływać z tej, w której poziom jest wyższy do tej, gdzie on jest niższy. A jeżeli jednocześnie postaramy się za pomocą pompy utrzymać poziom wody w obu rurach zawsze na jednej i tej samej wysokości, wtedy woda będzie ciągle płynęła z pierwszej rury do drugiej i za pomocą pompy będzie wciąż się wznosiła do pierwotnego poziomu. Z elektrycznością zjawisko odbywa się w sposób podobny. Poziomowi wody odpowiada potencyał elektryczny, funkcyą pompy pełni energia rozdziału. Od wyższego potencyału, który panuje na miedzi, elektryczność dodatnia płynie po drucie przewodnim do cynku i przez ciecz do miedzi, podczas gdy energia rozdziału podnosi ją znów do wysokości pierwotnego potencyału miedzi. A więc prąd elektryczny płynie ciągle w zamkniętem kole t. j. w kole, jakie tworzy ogniwo, którego bieguny są połączone ze sobą przewodnikiem.

Przez każdą część takiego zupełnie zamkniętego koła przebiega w każdej chwili pewna ilość elektryczności, innemi słowy przez każde przecięcie poprzeczne zamkniętego koła przebiega w ciągu jednostki czasu np. w sekundę, określona ilość elektryczności Prawda, iż *obwód prądu* (tem mianem oznaczamy cały zamknięty przewodnik, składający się z ogniwa i drutu), może w różnych miejscach posiadać niejednakowe przecięcia poprzeczne, lecz przy stałym prądzie musi co sekundę przepływać przez nie jednakowa ilość elektryczności, w przeciwnym bowiem razie nastąpiłoby jej nagromadzenie się w jednem miejscu. Ilość elektryczności, jaka w ciągu sekundy przebiega przez dane przecięcie poprzeczne, nazywamy *siłą prądu* albo *jego natężeniem*. Działają tu oczywiście różnorodne czynniki. Przedewszystkiem zależy ona od wielkości siły, która wytwarza prąd galwaniczny,

t. j. od siły elektromotrycznej ogniwa. Po drugie zależy ona od tego, przez jakie ciała prąd przebiega i jak te ostatnie są ukształtowane. Ale przy najróżnorodniejszych nawet kształtach zawsze jedna i ta sama ilość elektryczności przepływa w ciągu sekundy przez każde przecięcie danego obwodu, bez względu na jego wymiary. Innemi słowy, siła prądu w danym obwodzie jest wszędzie jednakową. *A więc w każdym obwodzie prąd galwaniczny posiada pewne natężenie, we wszystkich jego punktach jednakowe.* Możemy to sobie uzmysłowić przez porównanie ze zwykłym prądem wody. Jeżeli wyobrazimy sobie, iż przez jeden koniec rury, mającej w różnych miejscach rozmaitą szerokość, wlewać się będzie co sekundę np. 30 sześciennych metrów wody, a przez drugi jej koniec tyleż wylewać się będzie, to przez każde jej przecięcie poprzeczne, bez względu na jego wymiary, przepływać będzie co sekundę 30 sześć. metrów wody. W węższych miejscach rury płynie ona szybciej, w szerszych — wolniej. To samo jest z prądem elektrycznym, którego natężenie jest wszędzie jednakowe, gdyż przez każde przecięcie obwodu w ciągu określonej jednostki czasu przebiegają równe ilości elektryczności.

Ażeby módz mierzyć siłę prądów i módz porównywać je ze sobą musimy, rzecz jasna, posiadać jakąś stałą jednostkę, któraby nam umożliwiała tego rodzaju pomiary. Otóż mówimy, że prąd posiada jednostkę natężenia, gdy co sekundę przez każde przecięcie obwodu przepływa jeden coulomb. Jednostkę tę oznaczamy mianem jednego amperea, a więc w amperach określamy natężenie prądów. W jaki zaś sposób porównywamy je, gdy posiadają różne natężenie, o tem dowiemy się później.

Im prąd jest mocniejszy, tem oczywiście potężniejsze są skutki jego działania i dla tego o jego natężeniu możemy sądzić z ich siły. Najprostszym środkiem do tego celu jest znany nam elektrometr czyli busola stycznych (fig. 528). Jak wiemy, prąd elektryczny wywołuje w tym przyrządzie zboczenie igły magnesowej i to tem znaczniejsze, im prąd jest silniejszy; jednocześnie igła magnesowa pod wpływem magnetyzmu ziemskiego stara się przyjąć właściwe sobie normalne położenie t. j. stara się zwrócić ku północy. Otóż pod wpływem dwóch tych sił igła nasza przy-

biera pewne określone położenie, które tem bardziej różni się od normalnego, im prąd galwaniczny, płynący po drucie przyrządu, jest mocniejszy.

Oczywiście z wielkości owego zboczenia możemy wnosić o natężeniu różnych prądów, t. j. możemy twierdzić, że jeden z nich jest dwa lub trzy razy silniejszy, albo o połowę słabszy, niż drugi. Dokładne matematyczne obliczenia wykazały, że styczna trygonometryczna kąta zboczenia jest proporcyonalna do siły prądu. Stąd nazwa przyrządu „busola stycznych.“ Dla naszych celów wystarcza wiedzieć, że w przyrządzie tym posiadamy środek do porównywania natężenia prądów.

Od czegóż więc zależy siła prądu? Przedewszystkiem od wielkości siły elektromotrycznej ogniwa, im bowiem ta ostatnia jest większą, tem znaczniejsza ilość elektryczności przebiega przez przecięcie obwodu, a więc tem wyższe jest natężenie prądu. Łatwo się o tem przekonać za pomocą wspomnianego tylko co przyrządu. Weźmy ogniwo Daniell'a i połączmy je za pośrednictwem cienkich drutów (dla czego one powinny być cienkie — zobaczymy później) z busolą stycznych, a zboczenie igły wskaże nam pewne natężenie prądu. Połączmy teraz w szereg cztery ogniwa podobne i zetknijmy za pomocą takich samych cienkich drutów bieguny końcowe tej bateryi ze szrubkami busoli, a zobaczymy, że tym razem zboczenie igły jest o wiele znaczniejsze. Dokładny rachunek wykaże mianowicie, iż teraz siła prądu w całym obwodzie jest cztery razy większa od poprzedniej.

Rezultat podobny otrzymujemy z bateryą z mniejszej lub większej liczby ogniw. Z tego wyprowadzamy wniosek następujący: *Im większą jest siła elektromotryczna w danym obwodzie, tem znaczniejsze jest, przy innych warunkach jednakowych, natężenie prądu.* Rzeczywiście, jeżeli siła elektromotryczna jest dwa, trzy, cztery razy większą, wtedy i natężenie prądu wzrasta w tym samym stosunku. A więc mamy już jeden z czynników, warunkujących siłę prądu.

Ale, jak wyżej wspomnieliśmy, rodzaj, kształt oraz wielkość ciał, po których przebiega elektryczność, wywierają także wpływ.

Wiemy, że wszystkie ciała przedstawiają pewien opór przy przejściu elektryczności: izolatory bardzo znaczny, półprzewodniki mniejszy, a przewodniki względnie mały. Im większy jest opór, jaki musi pokonać elektryczność w swym biegu, tem mniejsza jej ilość przepływa w ciągu jednostki czasu (np. w sekundę) przez dane przecięcie, *a więc tem słabsze jest natężenie prądu.* Widzimy więc, że to ostatnie zależy także od całkowitego oporu, jaki prąd napotyka na swej drodze. Opór ten składa się z tego, jaki przedstawia samo ogniwo, a więc jego metale i ciecze, a następnie z oporu, jaki prąd napotyka w drutach przewodnich. Możemy tedy znów wyprowadzić ogólne prawo:

Im większy jest całkowity opór obwodu, tem mniejsze jest natężenie prądu.

Jeżeli opór powiększy się dwa, trzy, cztery razy (przy niezmiennej sile elektromotrycznej) to siła prądu zmniejszy się w tym samym stosunku.

Obadwa te prawa, noszą razem miano prawa Ohma; mogą one być sformułowane w sposób następujący:

W każdym zwyczajnym zamkniętym obwodzie natężenie prądu równa się sile elektromotrycznej podzielonej przez całkowity opór.

$$\text{Natężenie prądu} = \frac{\text{siła elektromotryczna}}{\text{opór}}$$

To prawo Ohma stosuje się do każdego prądu galwanicznego, jeżeli tylko uwzględnimy wszystkie siły elektromotryczne i całkowity opór.

Zajmiemy się teraz z kolei pytaniem o ile opór przewodników zależy od ich wielkości, kształtu, materyału i ugrupowania.

W większości wypadków prąd galwaniczny przebiega w naszych przyrządach po drucie miedzianym, platynowym, lub żelaznym; nawet ciecz, przez którą on płynie, można do pewnego stopnia porównać do drutów i mówić o jej długości i przecięciu. Rozpatrzmy więc w jakiej zależności pozostaje opór od drutu t. j. od jego długości, przecięcia i materyału, z którego on jest zrobiony. Ażeby wykazać wpływ rozmaitej długości drutu przewodniego, nie zmieniamy nic w danem ogniwie, bierzemy

tylko druty różnej długości (z jednego i tego samego materyału i jednakowej grubości) i za pomocą nich łączymy nasze ogniwo z busolą; ze stopnia zboczenia igły sądzimy o większem lub mniejszem natężeniu prądu, a więc o mniejszym lub większym oporze. Otóż okazuje się, że drut dwa, trzy, cztery razy dłuższy przedstawia tyleż razy większy opór. Z tego wyprowadzamy prawo następujące:

Opór drutu z danego materyału i określonej grubości jest tem większy, im drut jest dłuższy.

Jeżeli teraz, nie zmieniając długości drutu, będziemy zmieniali jego grubość, to w ten sam sposób wyprowadzić zdołamy prawo że

Opór drutu z danego materyału i określonej długości jest tem mniejszy, im większą jest jego średnica, to znaczy im on jest grubszy. Kształt przecięcia okrągły, czworokątny, albo nieprawigłowy wpływu żadnego nie wywiera, opór zależy tylko od jego wielkości.

Wreszcie uwzględnić także należy i rodzaj materyału, z którego drut jest zrobiony. Otóż jeżeli za jednostkę przyjmiemy opór drutu miedzianego określonej długości i grubości, to opór innych metali będzie się wyrażał ilością większą lub mniejszą. Liczba ta oznacza *opór właściwy* danego przewodnika w stosunku do oporu miedzi wziętego za jednostkę. Podamy później tablicę, która nam rzecz tę należycie wyjaśni; tutaj zaznaczymy tylko, iż opór właściwy żelaza wynosi 6,10, nowego srebra 18,8, to znaczy, że drut żelazny stawia 6,10 razy większy opór prądowi elektrycznemu, niż drut miedziany tej samej długości i średnicy, a drut nowosrebrny jest dla niego 18,8 razy oporniejszy.

Wiedząc teraz, jaki wpływ wywierają na opór przewodnika jego długość, średnica i rodzaj materyału, możemy sformułować prawo następujące:

Opór przewodnika równa sie jego oporowi właściwemu, pomnożonemu przez jego długość i podzielonemu przez średnicę.

$$\text{Opór przewodnika} = \text{opór właściwy} \times \frac{\text{długość}}{\text{średnica}}$$

Prawo to dotyczy przewodników wszelkiego rodzaju, niezależnie od tego, czy są to ciala stałe jak np. metale, węgiel, czy też ciała ciekłe w skład ogniwa wchodzące.

Ażeby jednak módz porównywać ze sobą różne opory, musimy przedewszystkiem posiadać pewną stałą jednostkę. Znajdziemy ją za pomocą prawa Ohma, które głosi jak wiemy,

$$\text{że natężenie prądu} = \frac{\text{siła elektromotryczna}}{\text{całkowity opór}}$$

Otóż jeżeli posiadamy taką siłę elektromotryczną, która równa się znanej nam jednostce t. j. 1 woltowi, to możemy wybrać taką długość, albo taką średnicę całkowitego obwodu, ażeby i natężenie prądu równało się jednostce, czyli 1 amperowi. W ten sposób otrzymany opór stanowi jednostkę i nazywa się 1 ohm; będziemy więc mogli teraz wszystkie opory wyrażać za pomocą ohmów. Ażeby wyrobić sobie jakieś pojęcie o wielkości tej jednostki, winniśmy dodać, że słup rtęci mający 1 milimetr kwadratowy w przecięciu i 106 cm. wysokości przedstawia właśnie jednostkę oporu czyli ohm. Otrzymujemy tedy stosunek:

$$1 \text{ amper} = \frac{1 \text{ wolt}}{1 \text{ ohm}}$$

Fig. 529. Połączenie 8-u ogniw Daniella w „szereg."

Obecnie możemy już z łatwością badać opór ogniw galwanicznych. Połączywszy ze sobą bieguny elementu Daniell'a za pomocą drutu, przedstawiającego pewien opór, otrzymujemy prąd, którego natężenie, jak wiemy, równa się sile elektromotrycznej ogniwa, podzielonej przez całkowity opór. Ten ostatni zaś składa się z oporu drutów, oraz z oporu ogniwa, który nosi miano *wewnętrznego.*

Połączmy teraz ze sobą ośm elementów Daniell'a tak, jak nam przedstawia figura 529, a prąd płynąć będzie od pierwszego do drugiego, od drugiego do trzeciego i t. d. aż do ósmego, skąd po drucie przewodnim powróci znów do pierwszego. Przy tem uszeregowaniu cynk każdego ogniwa jest połączony z miedzią następnego, a siła elektromotryczna całej bateryi jest ośm razy

większą od siły pojedyńczego Daniell'a. Ale i opór całej bateryi jest ośm razy większy od oporu jednego ogniwa, albowiem prąd musi tu przebyć ośm razy większą drogę w cieczy, przy tej samej średnicy. Możemy to przedstawić w taki sposób:

$$\text{Natężenie prądu} = \frac{\text{ośmiokrotna siła elektromotryczna jednego Daniell'a}}{\text{opór drutu} + \text{ośmiokrotny opór wewnętrzny jednego Daniell'a.}}$$

Jeżeli więc opór drutu jest bardzo nieznaczny w porównaniu z ośmiokrotnym oporem wewnętrznym jednego Daniell'a, to możemy go pominąć i wtedy otrzymujemy taką mniej więcej dokładną formułę:

$$\text{Natężenie prądu} = \frac{\text{siła elektromotryczna jednego Daniell'a}}{\text{opór wewnętrzny jednego Daniell'a}}$$

Widzimy więc, iż w tym razie nic nie zyskujemy na sile prądu przez związanie 8 ogniw w jeden powyższy szereg, albowiem prąd ogólny ma wtedy prawie takie same natężenie, jak w jednym Daniell'u.

Jeżeli przeciwnie opór drutu jest bardzo znaczny, o wiele większy od całkowitego oporu wewnętrznego bateryi, to możemy znów, nie bacząc na ten ostatni, formułkę powyższą uprościć w następujący sposób:

$$\text{Natężenie prądu} = \frac{\text{ośmiokrotna siła elektromotryczna jednego Daniell'a}}{\text{opór drutu.}}$$

A więc otrzymujemy prąd, którego natężenie jest w przybliżeniu ośm razy większe, aniżeli w jednem ogniwie.

Z rozumowań powyższych wyprowadzamy następujące prawidło: jeżeli w bateryi opór drutu przewodniego, albo innemi słowy obwodu *zewnętrznego*, jest bardzo znaczny w porównaniu z oporem wewnętrznym bateryi, to w celu otrzymania możliwie największego natężenia prądu najwygodniej jest wiązać ogniwa w szereg taki, jaki przedstawia figura 529. Można atoli i w inny jeszcze sposób związać je ze sobą, a mianowicie połączyć wszystkie blachy miedziane i wszystkie blachy cynkowe. Fig. 530, str. 988 wyobraża nam ten rodzaj wiązania elementów, o których mówimy, iż są połączone „na powierzchnię.“ Tutaj warunki są zupełnie inne: wszystkie cylindry miedziane tworzą jedną wielką masę miedzianą, podobnie jak i cynkowe, siła zaś elektromotryczna, jak wiemy, bynajmniej nie zależy od wielko-

ści metali tak, że w tego rodzaju bateryi nie jest ona wcale większą, niż w jednym Daniell'u. Ale za to opór wewnętrzny tego łańcucha jest inny, niż w pojedyńczym elemencie. Rzeczywiście

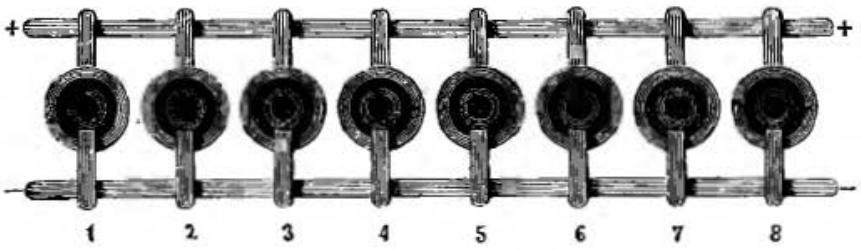


Fig. 53o. Połączenie ogniw Daniell'a „na powierzchnię"

wyobraźmy sobie, iż wszystkie ciecze i metale są umieszczone w jednem naczyniu, a wtedy przecięcie cieczy przez które biegnie prąd, jest ośm razy większe, niż w jednem ogniwie, a więc i opór wewnętrzny takiej bateryi jest ośm razy mniejszy, niż w każdym Daniell'u z osobna. Połączywszy tedy jej bieguny zewnętrznym drutem, otrzymujemy prąd, którego natężenie określa następująca formuła:

$$\text{Natężenie prądu} = \frac{\text{siła elektromotryczna jednego Daniell'a}}{\text{opór drutu} + \frac{1}{8}\text{ oporu wewnętrznego jednego Daniell'a.}}$$

Teraz warunki są wprost przeciwne tym, jakie istnieją przy pierwszym sposobie wiązania ogniw. Przypuśćmy, że opór drutu jest bardzo nieznaczny w stosunku do oporu wewnętrznego bateryi i że można go pominąć, wtedy otrzymujemy wyrażenie takie:

$$\text{Natężenie prądu} = \frac{\text{siła elektromotryczna jednego Daniell'a}}{\frac{1}{8}\text{ oporu wewnętrznego jednego Daniell'a.}}$$

a więc prąd, którego natężenie jest ośm razy większe w porównaniu z siłą prądu jednego Daniella.

Jeżeli przeciwnie opór drutu jest bardzo znaczny, będziemy mieli:

$$\text{Natężenie prądu} = \frac{\text{siła elektromotryczna jednego Daniell'a}}{\text{opór drutu.}}$$

a więc tak, jak w pojedyńczem ogniwie. Nie zyskujemy wtedy na jego natężeniu.

Możemy więc wyprowadzić następujące ogólne prawidła:

Ażeby otrzymać prąd o możliwie największem natężeniu nale-

ży wiązać ogniwa „w szereg“, gdy opór obwodu zewnętrznego jest znaczny, jeżeli zaś jest on niewielki, wtedy lepiej jest łączyć je „na powierzchnię.“

Jeżeli opór drutu nie jest bardzo wielki, ani bardzo mały w porównaniu z wewnętrznym oporem jednego ogniwa, to można je łączyć poczęści „w szereg“ po części zaś „na powierzchnię“ jak to pokazują figury 531, 532, 533, 534.

Na fig. 531 widzimy, że każde dwa Daniell'e są połączone „w szereg“ a każde cztery „na powierzchnię“, tu więc opór wewnętrzny bateryi wynosi $^2/_4$ t. j. połowę oporu jednego elementu.

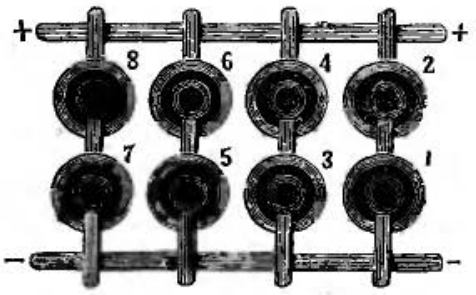


Fig. 531. Baterya z 8 ogniw; po 2 z nich związano w szereg, a po 4 połączono na powierzchnię.

Na fig. 532 resp. 533 widzimy znów po 3 resp. po 2 Daniell'e połączone w szereg, oraz po 3 resp. 2 ułożone na powierzchnię, tu opór równa się oporowi pojedyńczego ogniwa.

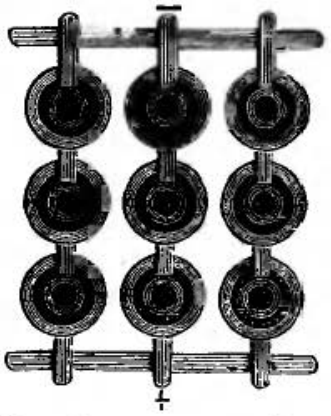


Fig. 532. Baterya z 9 ogniw; po 3 w szereg i po 3 na powierzchnię.

Na fig. 534, (str. 990) wreszcie spostrzegamy po 4 elementy związane w szereg oraz po 2 złączone na powierzchnię, tu oczywiście opór wzrasta w dwójnasób. Co się tyczy siły elektromotrycznej, to na fig. 531 równa się ona sile 2 Daniell'ów, na fig. 532 trzem, na fig. 533 dwom i wreszcie na fig. 534 czterem Daniell'om.

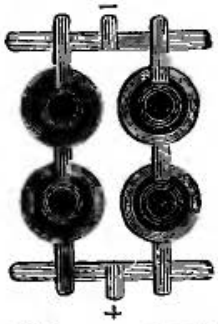


Fig. 533. Baterya z 4 ogniw po 2 w szereg i po 2 na powierzchnię.

Dotychczas rozpatrywaliśmy zawsze jeden zamknięty obwód, po którym przepływał prąd galwaniczny.

Przy badaniach jednak nad elektrycznością i przy jej zastosowaniach mamy nieraz do czynienia

z wypadkami natury ogólniejszej. Prąd musi nieraz przebiegać przez rozgałęziający się przewodnik, jak pokazuje figura 535. Widzimy tutaj, że prąd biegnie jak zwykle w kierunku strzałki od ogniwa Q do punktu a, rozgałęzia się w tym ostatnim, płynie następnie po drutach b i d do punktu c, gdzie zlewa się znów w jeden prąd płynący do miejsca, z którego wziął początek. Na podstawie uogólnionego prawa Ohma możemy wyprowadzić prawa dla wypadków, gdzie prąd się rozgałęzia. Otóż w punkcie a istnieje określony potencyał, zarówno jak i w punkcie c, a dzięki ich różnicy elektryczność płynie w kierunku $a\ b\ c$ i przez $a\ d\ c$.

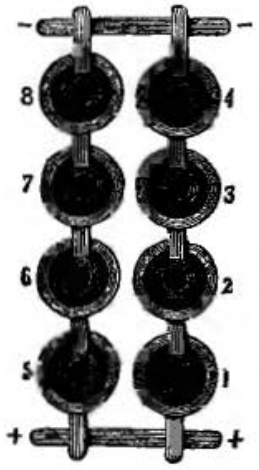


Fig. 534 Baterya z 8 ogniw, po 4 związano w szereg i po 2 na powierzchnię.

Z tych danych mamy:

$$\text{Natężenie prądu w } a\,b\,c = \frac{\text{różnica potencyałów } a\ c}{\text{opór } a\,b\,c.}$$

$$\text{Natężenie prądu w } a\,d\,c = \frac{\text{różnica potencyałów } a\ c}{\text{opór } a\,d\,c.}$$

Wynika z tego, że *natężenie prądów w obu gałęziach jest odwrotnie proporcyonalne do ich oporów.*

W nierozgałęzionej części przewodnika $a\ Q\ c$ prąd galwaniczny posiada natężenie równe sumie natężeń obu prądów rozgałęzionych, gdy więc oba przedstawiają jednakowy opór, to przez każdy z nich biegnie prąd, którego siła równa się połowie natężenia prądu głównego. Jeżeli w naszym przykładzie część $a\ d\ c$ przedstawia dwa razy większy opór niż $a\ b\ c$, to prąd płynący przez pierwszą jest dwa razy słabszy od tego, który biegnie wzdłuż $a\ b\ c$, a suma natężeń w obu równa się sile prądu w części nierozgałęzionej.

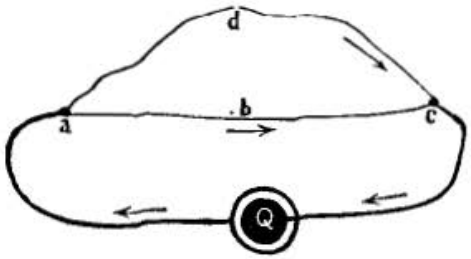


Fig. 535. Prąd rozgałęziony.

Należy dalej zauważyć, iż w naszym wypadku suma oporów, jakie elektryczność napotyka w obu gałęziach przewodnika, jest mniejsza od oporu każdego z nich z osobna. Zrozumiemy to łatwo, jeżeli wyobrazimy sobie, iż oba ramiona posiadają jednakową długość i średnicę. Wtedy prąd biegnie po nich z *a* jednocześnie i przytem tak, jak gdyby płynął po jednym drucie, którego średnica równałaby się sumie średnic obu gałęzi. Wiemy wszakże, że opór się zmniejsza w miarę wzrastania grubości przewodnika; gdy ta ostatnia w dwójnasób się powiększa, jak w naszym wypadku, opór oczywiście maleje do połowy. *A więc obydwie te gałęzie przewodnika, posiadające jednakową długość i grubość, przedstawiają razem opór o połowę mniejszy od oporu każdej z nich z osobna.* Jeżeli dwa lub więcej przewodników są tak połączone, że z jednej strony znajdują się wszystkie ich punkty końcowe, a z drugiej wszystkie punkty początkowe, to mówimy, iż są one uszeregowane obok siebie, albo *na powierzchnię.* Jeżeli natomiast punkt końcowy jednego drutu styka się z punktem początkowym drugiego i t. p. to powiadamy, iż przewodniki są złączone jeden za drugim albo *w szereg.* Nazwy te są więc zupełnie analogiczne do tych, o jakich wspominaliśmy, mówiąc o wiązaniu w bateryą ogniw galwanicznych. Posiadając np. 7 drutów o jednakowym oporze (fig. 536) i połączywszy je tak, jak nam wskazuje figura 537, otrzymujemy opór siedm razy większy, aniżeli w każdym drucie z osobna. Druty te są połączone w szereg.

Fig. 536. 7 drutów przewodnich jednakowej długości i grubości.

Jeżeli natomiast połączymy je tak, jak wskazuje figura 538

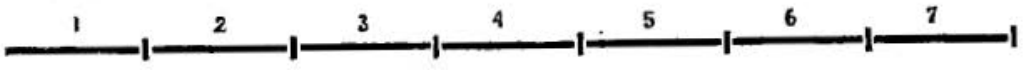


Fig. 537. 7 drutów związanych w szereg (jeden za drugim).

(str. 992) to opór ogólny tego całkowitego przewodnika zmaleje do

jednej siódmej oporu drutu pojedyńczego. Teraz połączyliśmy je *na powierzchnię*. Zrozumiemy łatwiej te stosunki przez porównanie z prądem prawdziwej cieczy np. wody. Wyobraźmy

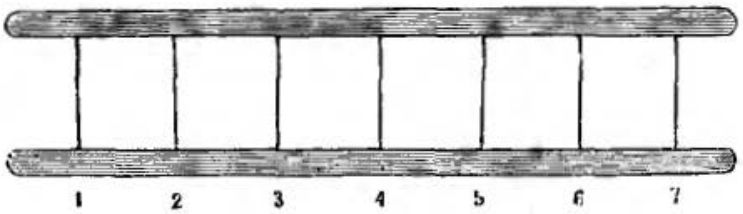


Fig. 538. 7 drutów związanych na powierzchnię (obok siebie).

sobie, że z rezerwoaru wypływa woda przez rurę, mającą 5 metrów długości i pewną określoną średnicę; ilość cieczy, jaka wylewa się co minuta, zależy od tarcia o ścianki rury, co możemy porównać z oporem przewodnika. Jeżeli rura owa posiada podwójną długość t. j. 10 metrów i średnicę tę samą, to oczywiście tarcie powiększa się w dwójnasób i ilość cieczy wypływającej w ciągu minuty maleje. Gdy zaś zaopatrzymy nasz rezerwoar zamiast w jedną 10-metrową rurę w dwie 5-metrowe biegnące obok siebie, wtedy ilość wody wypływającej w ciągu minuty podwoi się. Wprawdzie i tutaj istnieje tarcie w każdej rurze z osobna, lecz przez dwie rury jednakowej długości i szerokości wypływa w ciągu minuty dwa razy więcej wody, aniżeli przez jedną.

Jakościowo zupełnie to samo mamy z elektrycznością. Im więcej bowiem drutów ułożymy w szereg tem większy jest opór układu, im więcej zaś umieścimy ich na powierzchnię, tem opór jest mniejszy.

Rozgałęzienie prądu może być jeszcze bardziej skomplikowane, jeżeli np. oba ramiona przewodnika połączymy ze sobą za pomocą drutu, jak to widzimy na fig. 539. Widzimy tutaj dwa rozgałęzienia *a d b* i *a c b*, wychodzące z ogniwa *E* i zespolone drutem *c d*. Ten ostatni nosi miano *mostu*.

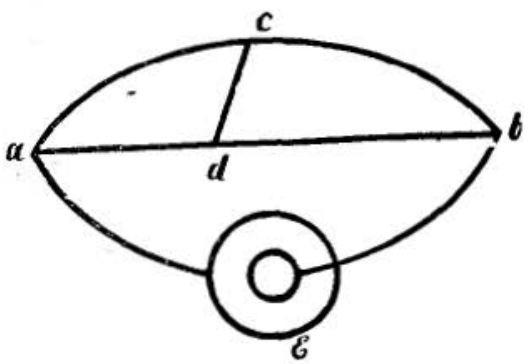


Fig. 539. Główny prąd rozgałęziony na dwa ramiona, które są połączone za pomocą t. zw. mostu.

Przyjrzawszy się figurze 540, str. 993, spostrzegamy

odrazu, że po drucie *c d*, czyli na moście, spotykają się dwa prądy o kierunkach przeciwnych: jeden z ramienia *a c* biegnie w kierunku *c d*, drugi zaś z ramienia *b d* płynie w kierunku *d c*. Może się przeto zdarzyć, że przez most będzie płynął prąd o natężeniu zero, czyli, że wcale nie będzie tutaj żadnego prądu, podczas gdy cały układ jest przebiegany przez prądy. Natężenie prądu w moście zależy od różnicy potencyałów w punktach *c* i *d*; jeżeli one będą jednakowe, to prąd wcale nie będzie przezeń przepływał. Lecz wtedy prąd idący wzdłuż ramienia *a c* musi tracić ze swego natężenia tyle, ile prąd biegnący po drucie *a d*, prąd znów płynący po drucie *c b* tyle, ile prąd na drodze *d b*.

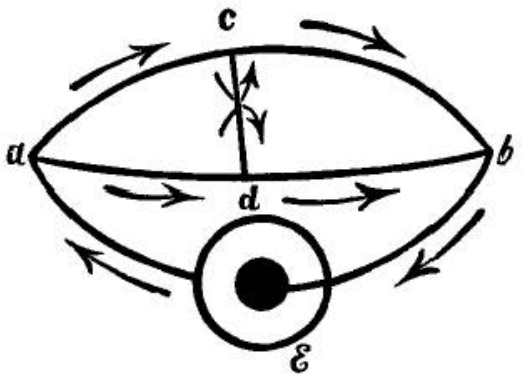


Fig 540. Kierunek prądów w przewodniku z figury 539.

Ponieważ więc przez most nie ma wcale płynąć prąd, możemy sobie wyobrazić, iż most ten został zupełnie usunięty, a wtedy natężenie prądów w *a c* i *c b* z jednej strony, i w *a d* i *d b* z drugiej, winno być jednakowe. Wtedy musi istnieć taki stosunek.

$$\frac{\text{opór w } a\,c}{\text{opór w } a\,d} = \frac{\text{opór w } c\,b}{\text{opór w } d\,b}$$

Widzimy więc, iż można w ten sposób porównywać ze sobą opór jednego drutu z oporem drugiego. Metodę tę po raz pierwszy zastosował Wheatstone i dlatego opisany rodzaj rozgałęzionych prądów nazywa się *mostem Wheatstone'a*. Taką kombinacyą drutów możemy jeszcze określić w sposób następujący: cztery punkty *a*, *d*, *b* i *c* są połączone odpowiednio z przewodnikami *a d*, *d b*, *b c* i *c a*. Wtedy te cztery punkty stanowią cztery końce równoległoboku, którego bokami są właśnie linie *a d*, *d b*, *b c* i *c a*. Każdą parę przeciwległych punktów równoległoboku łączy przekątna i jedna z nich (między *c* i *d*) stanowi most, druga zaś między *a* i *b* mieści w sobie ogniwo. Jeżeli więc opór

czterech boków równoległoboku odpowiada powyżej wyprowadzonej formule, to w jednej z przekątnych nie ma prądu galwanicznego, gdy w obrębie drugiej znajduje się ogniwo. Lecz obydwie przekątne są równoznaczne, możemy więc ogniwo *E* umieścić na moście *c d*, a wtedy przy danych warunkach przez gałęź *a b* nie płynie prąd. Tego rodzaju kombinacyę mostu Wheatstone'a, często używaną, wyobraża nam fig. 541.

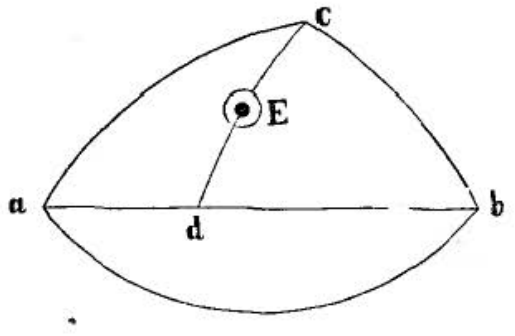


Fig. 541. Most Wheatstone'a.

Nie będziemy tu opisywali bardziej skomplikowanych sposobów rozgałęziania prądów galwanicznych; zauważymy tylko, że kombinacyj takich może być bardzo wiele. Kirchhof uogólnił prawo Ohma do wypadku prądu rozgałęzionego i znalazł dwa następujące prawa: *W każdem miejscu, gdzie styka się wiele drutów, suma wszystkich natężeń (każde z nich winno być wzięte ze znakiem odpowiednim do kierunku danego prądu) musi być równą zeru.* Prawo to nie oznacza nic innego, jak to, że co sekundę z miejsca takiego rozgałęzienia drutów musi odpływać tyle elektryczności, wiele jej przybywa, w przeciwnym bowiem razie nagromadziłaby się tutaj elektryczność. 2) *W każdej całkowicie zamkniętej części rozgałęzionego systemu, suma wszystkich strat w natężeniu musi być równą sile elektromotrycznej, faktycznie działającej w tej części.*

Dwa te prawa nazywamy *prawami Kirchhofa* o rozgałęzionych prądach.

Poznaliśmy więc zasadnicze prawa prądu galwanicznego, które wykazują nam zależność jego natężenia od siły elektromotrycznej bateryi i od oporu całkowitego zamkniętego obwodu. Potrzeba tedy, ażeby wszystkie te wielkości można było istotnie mierzyć i redukować do ustalonych jednostek czyli, ażeby o natężeniu prądów, o siłach elektromotrycznych, o oporach, można było tak mówić, jak o długości i ciężarze. Do tego celu służą rozmaite metody, które posługują się specyalnemi przyrządami.

Istnieją tedy przyrządy, wskazujące *istnienie* prądu elektrycznego, używane wtedy, gdy dokładna znajomość jego natężenia nie jest konieczna. Podobnie jak busola stycznych, polegają one na tem, że prąd elektryczny, biegnąc wokoło igły magnesowej, wyprowadza ją z jej zwykłego położenia północno-południowego i to tem bardziej, im większa jest ilość jego obrotów, oraz im płynie bliżej igły (porówn. str. 801—802). Wiemy już, że przyrząd staje się o wiele czulszym (z przyczyn, które później poznamy), jeżeli zamiast jednej igły magnesowej, użyjemy dwóch, zwróconych końcami w przeciwne strony. Układ taki zowie się *astatycznym*.

Figura 542 przedstawia taki przyrząd. Jedna z igieł ma-

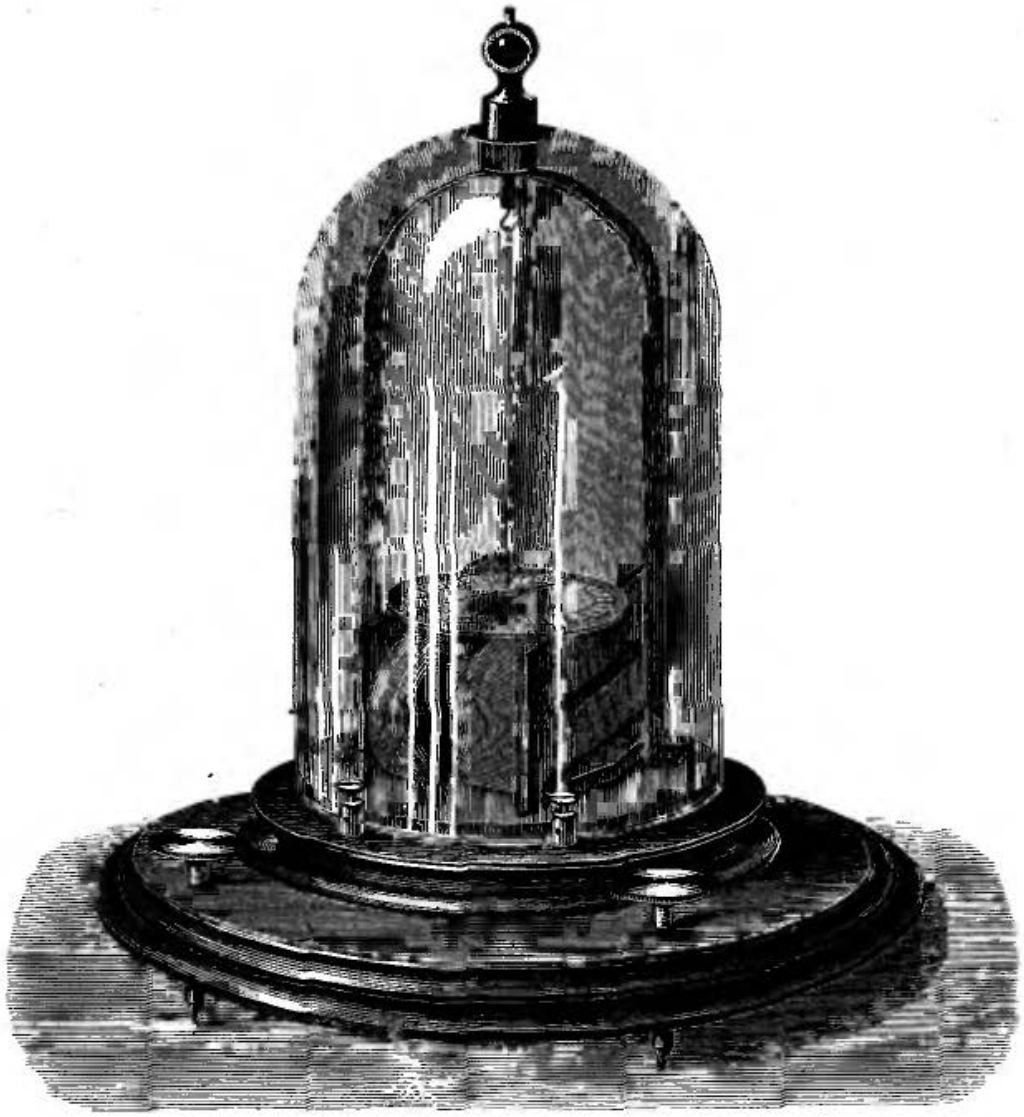


Fig. 542. Przyrząd wskazujący istnienie prądu, czyli galwanoskop.

gnesowych jest ukryta wewnątrz ramki, na którą wielokrotnie nawinięty jest drut, druga zaś, połączona z tamtą, porusza się po cyferblacie, zaopatrzonym w podziałki. W celu uchronienia przyrządu od prądów powietrza pokrywa go się szklanym kloszem. Dany prąd elektryczny doprowadza się do drutu za pośrednictwem dwóch szrub.

Takie przyrządy o wielu obrotach zowią się także *multyplikatorami.*

Do mierzenia prądów służyć one same przez się nie mogą dlatego, że nie możemy powiedzieć, jakiemu natężeniu odpowiada dane zboczenie igły. Lecz gdy zboczenie w dwóch wypadkach jest jednakowe, to zawsze *można twierdzić, że i natężenia* prądów, które je wywołały, są równe. Omawiane tedy przyrządy, których dokładnie mówiąc nie należy nazywać galwanometrami, lecz *galwanoskopami, konstatują* równość lub nierówność prądów.

Dalej istnieją oddzielne przyrządy do nagłego wstrzymania prądu, do szybkiego nadania mu innego kierunku (komutatory); mamy także normalne jednostki oporu, przygotowane z drutu, oraz specyalne przyrządy do szybkiego powiększenia lub zmniejszenia oporu (reostaty) i t. p., lecz w bliższy ich opis nie możemy się tutaj wdawać z powodu braku miejsca.

ROZDZIAŁ III.

Działania prądu galwanicznego.

§ 1. Działania cieplne i świetlne prądu galwanicznego.

Prąd elektryczny wywołuje w *przewodnikach, przez które* przepływa, różnorodne działania, zależne od natury tych przewodników.

Przedewszystkiem zapoznamy czytelnika ze zjawiskami, jakie wywołuje prąd elektryczny, płynący przez *przewodniki*

pierwszej klasy, t. j. przez metale, lub węgiel; początkowo tedy wyłączamy ciecze, z wyjątkiem rtęci.

Otóż najważniejsze działanie prądu elektrycznego polega na *ogrzaniu* przewodnika, przez który on płynie. Możemy się o tem przekonać, zanurzywszy cienki drut platynowy, zgięty spiralnie, w naczyniu napełnionem alkoholem, w którym tkwi termometr tak, jak wskazano na fig. 543. W chwili, gdy prąd elektryczny przebiega przez drut, ten się ogrzewa, ciepło jego udziela się w części alkoholowi, wskutek czego rtęć w termometrze podnosi się.

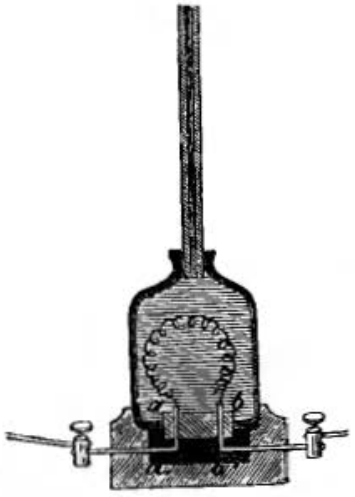


Fig. 543. Doświadczenie z drutem platynowym.

Prąd elektryczny wzbudza pewną ilość ciepła w każdej części drutu, skoro zaś — o czem łatwo można się przekonać — opór różnych części przewodnika jest różny, wówczas też ilości ciepła wywołane w nich przez prąd elektryczny są różne, mianowicie większemu oporowi odpowiadają zawsze większe ilości ciepła.

Wszelako ogrzanie każdej części przewodnika nie zależy jedynie od wielkości oporu, lecz także od natężenia prądu, w miarę jak ono wzrasta, powiększa się ilość wytworzonego ciepła, tak mianowicie, że natężeniu *dwa*, *trzy* i t. d. razy większemu odpowiadają ilości ciepła *cztery*, *dziewięć* i t. d. razy większe. Inaczej mówiąc, ilość ciepła wytworzonego przez prąd elektryczny w pewnej części przewodnika jest proporcyonalna do *kwadratu z natężenia prądu*. Z drugiej strony ilość ta jest *proporcyonalną do oporu* samej części przewodnika; oprócz tego nie zależy ona już od żadnych innych czynników tak, iż możemy powiedzieć, że *ilość ciepła wytworzona przez prąd elektryczny w każdej części przewodnika w ciągu pewnego czasu, np. w ciągu jednej sekundy, równa się jej oporowi pomnożonemu przez kwadrat z natężenia prądu.*

Prawo to zawdzięczamy Joule'owi; dla tego też nosi ono

miano *prawa Joule'a;* ciepło zaś, o którem mowa, nazywamy *ciepłem Joule'a.*

Ciepło Joule'a nie zależy zupełnie od siły elektromotrycznej, podtrzymującej prąd elektryczny. Jeden element Daniell'a sprawia pod tym względem skutek taki sam, jak baterya, utworzona z 10 elementów Daniell'a, połączonych w szereg, a więc mająca siłę elektromotryczną 10 razy większą, jeżeli tylko postaramy się, ażeby natężenie przechodzącego prądu w pierwszym i drugim wypadku było jednakowe.

Należy bardzo dokładnie baczyć na to, ażeby ciepło Joule'a, wytworzone w danej części przewodnika zależało li tylko, prócz natężenia, od oporu tej części. Natężenie prądu w zwyczajnem zamkniętem kole jest, jak wiadomo, wszędzie jednakowe, lecz ilości ciepła, wytwarzane w różnych częściach przewodnika, nawet jednakowo długich, są różne, skoro tylko stawiają one prądowi różny opór.

Całkowita ilość ciepła, wytworzonego w kole, przebieganem przez prąd, równa się oczywiście sumie oddzielnych ilości ciepła, wytworzonych w pojedyńczych jego częściach; a więc jest równa kwadratowi z ogólnego natężenia prądu pomnożonemu przez opór całego koła.

Ciepło, wytwarzane w danej części koła powoduje oczywiście podwyższenie jej temperatury. Jeżeli tedy natężenie prądu i opór tej części przewodnika są dosyć silne, podwyższenie temperatury staje się tak znaczne, że przewodnik w tem miejscu *rozżarza się*, wysyłając z początku promienie czerwone, następnie żółte, białe i wreszcie nawet *topi się*. Im mniejszą jest masa ogrzewanej części, tem większe podwyższenie temperatury powoduje jedna i ta sama ilość ciepła. Im cieńszy tedy jest drut, tem łatwiej możemy go rozżarzyć za pomocą prądu elektrycznego, tem bardziej, że opór drutu przy innych warunkach jednakowych wzrasta wraz ze zmniejszeniem jego przecięcia.

Połączmy np. trzy elementy Bunsen'a w szereg i związmy bieguny tej bateryi za pomocą jakiegobądź drutu metalowego, wstawiając w pewnem jego miejscu niezbyt długi, cienki drucik platynowy, zwinięty spiralnie (fig. 544). Ciepło Joule'a, wy-

tworzone w grubszych częściach drutu jest względnie niewielkie i nie wystarcza do ich rozżarzenia; lecz w cienkim druciku platynowym *A B* opór, a więc i ciepło Joule'a są bardzo wielkie tak, że przy nieznacznem jego przecięciu rozżarza go ono do białości.

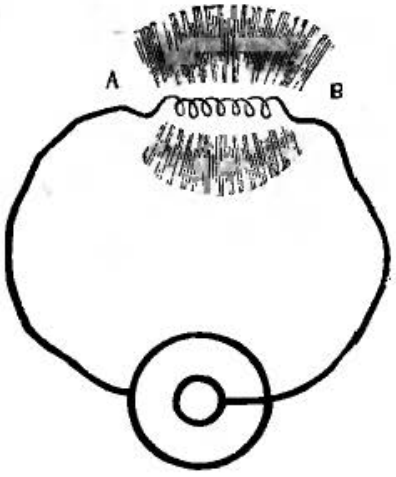


Fig. 544. Rozżarzanie drucika platynowego za pomocą prądu elektrycznego.

Mając bardzo silny prąd elektryczny możemy rozżarzyć, a nawet stopić drut grubości igły do robienia pończoch i długości jednego metra.

Widzieliśmy wyżej, że opór właściwy różnych ciał metalicznych, np. srebra i platyny, jest różny. Jeżeli tedy prąd o odpowiedniem natężeniu płynie przez łańcuch, złożony naprzemian z jednakowo długich i grubych kawałków platyny *p* i srebra *s* (fig. 545), wówczas części *p* rozżarzą się, podczas gdy części *s* pozostaną jeszcze zupełnie ciemne, dlatego że opór właściwy platyny jest większy, niż opór właściwy srebra. Na tej zasadzie możemy wykonać cały szereg różnych doświadczeń.

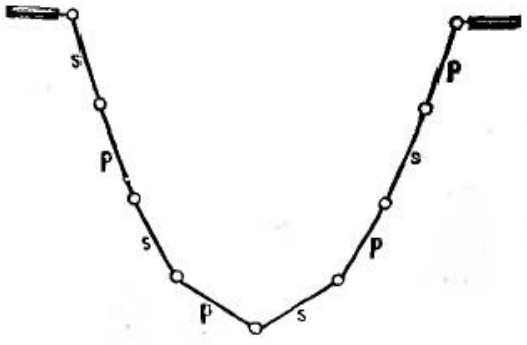


Fig 545 Łańcuch z drutów o niejednakowym oporze.

Ta własność prądu galwanicznego ogrzewania i rozżarzania przewodników, znalazła rozległe zastosowanie, np. w medycynie, gdzie na tej zasadzie oparto leczenie galwanokaustyczne, dalej jako sposób podpalania materyałów wybuchowych, przedewszystkiem jednak — dzięki Edison'owi — przy oświetlaniu mieszkań, o czem podamy obszerniejsze wiadomości w dalszym ciągu. Lampy zbudowane na tej zasadzie i zwane żarowemi, składają się w gruncie z cienkiego pręcika węgla, jak np. wskazuje fig. 546, gdzie jest on zgięty w podkowę i zamknięty w szklanem naczyniu. Przez

drut przymocowany do węgla przebiega prąd, ponieważ zaś węgiel przedstawia nader wielki opór, przeto rozżarza się on silnie.

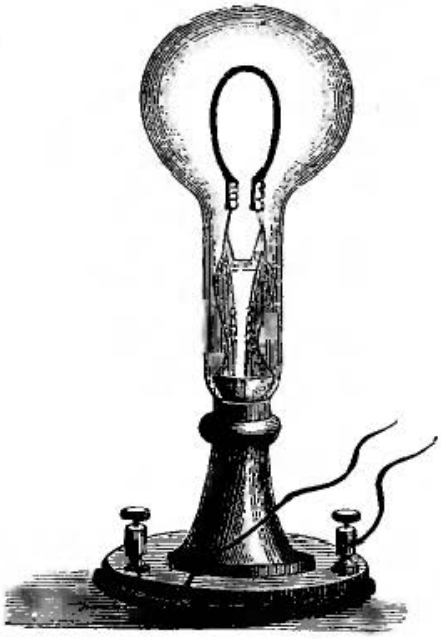


Fig. 546. Lampa żarowa.

Nietylko zjawisko ogrzewania przewodnika, przez który płynie prąd elektryczny, lecz także odnośne prawo Joule'a można było przewidzieć na podstawie prawa zachowania energii, stanowiącego jedną z największych zdobyczy fizyki bieżącego stulecia. Według tego prawa energia nie może być stworzoną, ani też zniszczoną. Chcąc wywołać jakieś zjawisko fizyczne, musimy wykonać pewną ilość pracy; zniszczeniu więc tego zjawiska musi towarzyszyć wyzwolenie równej ilości pracy. Otóż w prądzie elektrycznym odbywa się ustawiczne wyrównywanie elektryczności różnoimiennych, płynących od bieguna cynkowego do miedzianego i od bieguna miedzianego do cynkowego; elektryczności te niszczą się wciąż wzajemnie. Ponieważ zaś wytwarzanie elektryczności jest połączone z wykonywaniem pracy, przeto niszczeniu elektryczności musi towarzyszyć wyzwolenie pracy. Jeżeli więc prąd elektryczny w danym wypadku nie wykonywa pracy mechanicznej (co, jak zobaczymy dalej, jest w samej rzeczy możliwe), wówczas całkowita ilość pracy wyzwolonej zamienia się na ciepło. Jeżeli zaś prąd elektryczny wykonywa jeszcze jaką pracę, wówczas ilość ciepła, wytworzona w kole tego prądu, powinna być mniejszą. Zobaczymy, że teoretyczny ten wniosek znajduje swe potwierdzenie w doświadczeniu.

Opisując zjawiska, dotyczące ciepła Joule'a, przyjęliśmy, że prąd galwaniczny płynie tylko przez przewodniki pierwszej klasy, mianowicie przez metale lub węgiel. Uczyniliśmy to zaś dlatego, że prąd elektryczny, płynący przez ciała ciekłe, ma zazwyczaj jeszcze inną pracę do wykonania, z czego wynika, że

twierdzenia powyższe nie są wogóle słuszne dla ciał ciekłych. Jeżeli jednak prąd płynie przez ciało ciekłe i nie ma przytem żadnej pracy do wykonania, wówczas ciepło wytwarza się i w tym wypadku podług prawa Joule'a.

Możemy także wyprowadzić prawo Joule'a wprost z zasady zachowania energii. Jeżeli pewien ładunek elektryczny, równy np. 5 kulombom, znajduje się na pewnym przewodniku o potencyonale równym 3 woltom, wówczas energia tego przewodnika jest, jak wiemy, równą 15 wolt $\times$ kulombom, czyli, że może on wykonać pracę równą 150,000,000 ergom. Ponieważ jeden kilogrametr równa się $9{,}81 \times 10$ milionów erg, to przewodnik ów może także wykonać

$$\frac{15}{9{,}81}$$

kilogrametrów pracy. Tę ilość pracy musimy wykonać, ażeby sprowadzić 5 kulombów do potencyału 3 wol.; praca ta zostaje wyzwoloną, skoro tylko przewodnik nasz łączymy z ziemią, przez co potencyał jego spada do zera. Jeżeli jednak sprowadzamy elektryczność nie do potencyału zero, lecz do innego, mniejszego od 3 wolt., np. do potencyału 1 wol. wówczas wyzwala się ilość pracy równa

$$\frac{5 \times (3-1)}{9{,}81} = \frac{10}{9{,}81}$$

kilogrametrom. Wogóle, jeżeli pewna ilość kulombów przechodzi od potencyału wyższego do niższego, mierzonego w woltach, praca wyzwolona równa się

$$\frac{\text{ilości kulombów} \times \text{różnicę woltów}}{9{,}81}$$

kilogrametrów. Naodwrót, chcąc ten sam ładunek podnieść z potencyału niższego na wyższy, musimy wykonać dokładnie taką samą ilość pracy. Otóż w prądzie elektryczność dodatnia płynie wciąż od potencyału wyższego do niższego, różnica zaś potencyałów jest niczem innem, jak tylko siłą elektromotryczną. Ilość elektryczności (mierzonej w kulombach), jaka spływa w ciągu sekundy, nazwaliśmy natężeniem prądu, mierzonem w amperach. Z tego wynika, że ilość pracy, jaką prąd elektryczny wyzwala w ciągu sekundy, równa się:

$$\frac{\text{sile elektromotrycznéj w woltach} \times \text{natężenie prądu w amperach}}{9{,}81}$$

kilogr. Jeżeli tedy pracy tej nie zużywamy, np. do wprowadzenia w ruch pewnej maszyny, zamieni się ona całkowicie na ciepło. Ogólna więc ilość ciepła Joule'a wytworzonego w całem kole prądu w ciągu 1 sekundy, jest równa iloczynowi z siły elektromotrycznej prądu i jego natężenia. Ponieważ podług prawa Ohm'a siła elektromotryczna jest proporcyonalną do natężenia prądu i całkowitego oporu, to całkowita ilość ciepła Joule'a jest równa kwadratowi z natężenia prądu, pomnożonemu przez całkowity opór. To stanowi właśnie prawo Joule'a, wyprowadzone z zasady zachowania energii. Prawo Joule'a nie dotycze jedynie całkowitego oporu, lecz stosuje się także do każdej oddzielnej części koła i do jej oporu. Lecz i to również można wyprowadzić z zasady zachowania energii, zastępując w powyższem rozumowaniu siłę elektromotryczną elementu galwanicznego przez różnicę potencyałów na końcowych punktach danej części przewodnika. W każdej części obiegu prądu, mamy pewien zasób energii, proporcyonalny do natężenia prądu i do różnicy potencyałów na początku i na końcu danej części; energia ta w naszym wypadku występuje w kształcie równoważnej ilości ciepła.

Ciepło Joule'a pozostaje oczywiście to samo bez względu na to, czy prąd płynie w przewodniku w jednym lub drugim kierunku. Chcąc przeto rozżarzyć drut metalowy za pomocą prądu, możemy mu nadać jeden lub drugi kierunek, a osiągnięty skutek będzie zawsze jeden i ten sam.

Dotychczas przyjmowaliśmy, że koło prądu jest zupełnie zamknięte i że składa się wyłącznie z przewodników stałych. Skoro tylko przerwiemy koło w jakiemkolwiek miejscu, wstawiając pomiędzy ciała przewodzące jakikolwiek izolator, prąd natychmiast przestanie płynąć, co kładzie tamę dalszemu rozwijaniu się ciepła Joule'a. Wówczas element galwaniczny jest otwarty; na biegunach jego znajduje się tylko elektryczność swobodna. Najprostszy sposób przerwania prądu polega na tem, że swobodne końce jego obwodu rozdzielamy warstwą powietrza, które jak wiemy jest złym przewodnikiem elektryczności. Widzieliśmy jednak wyżej, że bezwzględnych izolatorów elektryczności w naturze wcale nie ma; w szczególności zaś powietrze

ogrzane przewodzi elektryczność dosyć dobrze. Skoro więc siła elektromotryczna jest dostatecznie wielką, elektryczność może przezwyciężyć nawet bardzo wielki opór warstwy powietrza. Przezwyciężaniu temu towarzyszy jednak wytwarzanie się ciepła i to w ilościach bardzo obfitych, właśnie dlatego, że opór warstwy powietrza jest bardzo znaczny. Wskutek tego warstwa ta rozżarza się i wraz z nią końce przewodników, pomiędzy którymi ona się znajduje. Jeżeli w pewnem miejscu przerwiemy drut, łączący bieguny bateryi galwanicznej o dosyć wielkiej sile elektromotrycznej (składającej się np. z 20—30 elementów Bunsen'a, połączonych w szereg) przez co włączymy wkoło prądu niewielką warstwę powietrza, wówczas zobaczymy iskry przeskakujące pomiędzy końcami drutu. Prąd elektryczny płynie więc także przez warstwę powietrza, lecz jednocześnie powoduje zjawiska świetlne. W punktach przejściowych od ciała przewodzącego do powietrza opór jest bardzo wielki i dlatego końce przewodników, czyli t. zw. elektrodów, rozżarzają się i spalają stopniowo. Jeżeli substancya ich jest łatwo podzielna, wówczas od jednego elektrodu odrywają się drobne cząstki i przenoszą się na przeciwległy.

Tak więc pomiędzy elektrodami, łatwo podzielnemi, tworzy się łuk świetlny z rozżarzonych cząstek powietrza i elektrodów. Zjawisko to występuje bardzo wyraźnie pomiędzy elektrodami cynkowemi, żelaznemi lub rtęciowemi. Najpiękniej jednak zjawisko to zachodzi pomiędzy elektrodami z *węgla*, rozdzielonemi warstwą powietrza: końce węgli rozżarzają się do białości, pomiędzy nimi zaś tworzy się niebieskawy łuk świetlny z rozżarzonych cząstek powietrza i węgla. Zjawisko to nazywamy *łukiem świetlnym Davy'ego*, ponieważ Davy pierwszy je zauważył. Na fig. 547 widzimy przyrząd, służący do wywołania tego zjawiska. *K* i *Z* są to druty metalowe od bateryi galwanicznej, które przez *A* i *B* dochodzą do pałeczek węglowych *a* i *b;* te ostatnie możemy zbliżać lub oddalać dowolnie jednę od drugiej. Z początku wprowadzamy węgle w zetknięcie wzajemne, zamykając w ten sposób prąd elektryczny, następnie rozsuwamy je, oddzielając warstwą powietrza. Jeżeli tylko siła elektromotry-

czna bateryi jest dosyć wielka, wtedy otrzymujemy łuk świetlny taki, jak pokazuje figura.

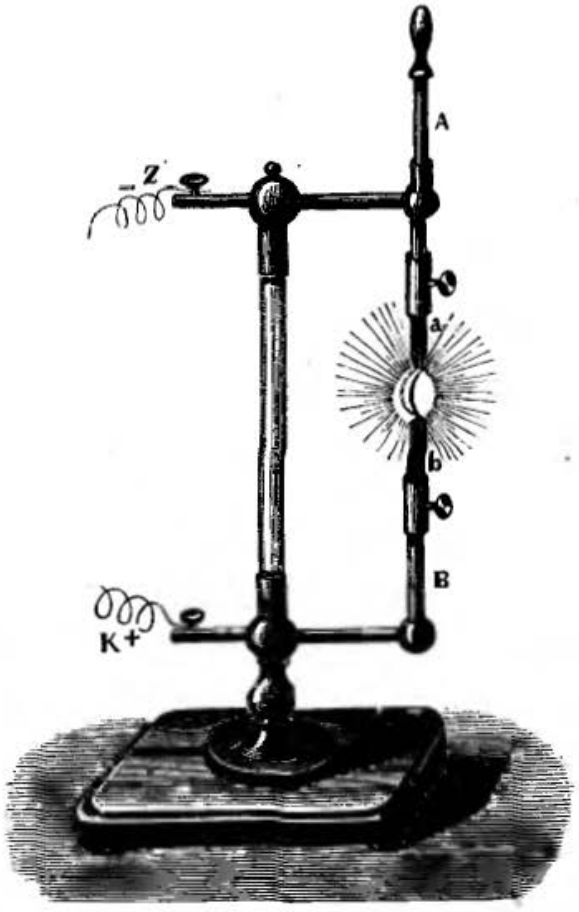


Fig 547. Łuk świetlny Davy'ego.

Od końców węgli, szczególnie od tego, który znajduje się w połączeniu z dodatnim biegunem elementów, przelatują do drugiego pałające cząstki. Zaostrzywszy końce węgli, przekonamy się, że po krótkim już czasie ostrze dodatniego węgla znikło i ustąpiło miejsca kraterowi, z którego cząstki przeskakują do ujemnego węgla. *Ten ostatni zaś* ostrza swego nie traci. Po pewnym czasie trwania świetlnego łuku, końce węgli wyglądają tak, jak je przedstawia fig. 548 w silnem powiększeniu. Guzowate wypukłości pochodzą od obcych domieszek, które topnieją przy silnym żarze i osadzają się na powierzchni węgla. Temperatura do białości rozżarzonych końców węgla jest bardzo wysoką, dochodzi bowiem do 2500—4000 stopni Celsiusa. Oba węgle spalają się oczywiście wskutek gorąca, a ponieważ nadto sporo cząstek przechodzi od dodatniego węgla do ujemnego, przeto pierwszy maleje rychlej, niż drugi. Doświadczenie poucza, że dodatni węgiel spala się w przybliżeniu dwa razy prędzej, niż ujemny. W miarę spalania węgli, przestrzeń między nimi wypełniona powietrzem wzrasta i nastaje wreszcie chwila, w której opór jej wzmaga się do tego stopnia, że prąd nie może go przezwyciężyć. Wówczas prąd przestaje *płynąć i łuk świetlny gaśnie. Chcąc tedy utrwalić na dłuższy*

czas łuk świetlny musimy w miarę spalania się węgli zbliżać ku sobie ich końce. Można to przez pewien czas uskuteczniać

Fig. 548. Końce dodatniego i ujemnego węgla, pomiędzy któremi istnieje łuk świetlny.

mechanicznie za pomocą ręki. Dla trwałego jednak utrzymania łuku, należy postarać się ażeby węgle same zbliżały się do siebie w miarę spalania. W tym celu wymyślono różne przyrządy, tak zw. *lampy elektryczne czyli regulatory*, które w dalszym ciągu opiszemy.

Światło elektryczne przewyższa znakomicie pod względem jasności wszystkie inne sztuczne źródła świetlne, jakie znamy.

Dlatego też nadaje się ono w wysokim stopniu do oświetlenia miast, ulic i placów.

Powiedzieliśmy, że świetlny łuk wówczas tylko może się pojawić, gdy siła elektromotryczna bateryi jest tak wielką, że może przezwyciężyć opór powietrza. Należy tedy dla wywołania światła elektrycznego czerpać elektryczność ze źródeł o wysokiej sile elektromotrycznej. Davy po raz pierwszy otrzymał to światło, używając bateryi złożonej z 2000 elementów, połączonych w szereg. W tym wypadku mógł on podtrzymać łuk świetlny tak długo, dopóki końce węgli nie spaliły się na odległości 7 centymetrów od siebie. Z wielkością łuku świetlnego wzrasta wogóle jasność światła przezeń wysyłana. Zazwyczaj jednak sprowadza się odległość pomiędzy końcami węgli do 3—6 milimetrów, ponieważ wtedy natężenie światła w stosunku do długości łuku staje się o wiele większem, choć całkowita jasność jest mniejszą.

W łuku świetlnym istnieje jednak siła elektromotryczna, która przeciwdziała tamtej sile elektromotrycznej. Łatwo można się o tem przekonać, łącząc końce węgli w chwili, gdy pierwotny prąd się przerywa, z galwanoskopem. Silne odchylenia igły galwanoskopu pokazują, że w łuku świetlnym działa jeszcze jedna siła elektromotryczna. Z kierunku odchyleń poznajemy, że prąd przez tę siłę wywołany, płynie przez węgle w kierunku przeciwnym kierunkowi pierwotnego prądu. Ta siła przeciwdziałająca w galwanicznym łuku świetlnym, której istnienie zauważył Edlund, jest znaczną. Wynosi ona około 35 do 40 wolt. Z tego właśnie powodu należy używać źródła prądu, które wywołuje na końcach węgli różnicę potencyałów, równą najmniej 40 wolt. W razie bowiem przeciwnym łuk świetlny nie mógłby trwale istnieć. Ta przeciwdziałająca siła elektromotryczna w łuku świetlnym nie została jeszcze dostatecznie wyjaśnioną naukowo, ani też praktycznie zastosowaną, zasługuje jednak na uwagę, gdyż przedstawia dla nas pierwszy przykład, że każde działanie przez prąd wywołane i zależne od jego kierunku, może wywołać znów prąd elektryczny. Że kierunek prądu w łuku świetlnym wywiera pewien wpływ, można

wnioskować z tego, że dodatni węgiel dwa razy prędzej się spala, niż ujemny. Przy wszystkich następnych działaniach prądu elektrycznego znajdziemy taką samą odwracalność.

§ 2. Termoelektryczność.

Podczas, gdy ciepło Joule'a pojawia się w każdej części obwodu prądu, jako równoważnik wyzwolonej pracy, sam prąd elektryczny wywołuje w pewnych wypadkach działania cieplne innego jeszcze rodzaju.

Jeżeli drut przewodni elementu galwanicznego składa się z dwóch *różnych* metali, np. z miedzi i żelaza, zlutowanych lub w jakikolwiek inny sposób spojonych stale ze sobą, wówczas w miejscu spojenia, oprócz ciepła Joule'a, zachodzi jeszcze szczególnego rodzaju ogrzanie lub oziębienie, zależnie od kierunku prądu w tem miejscu. Najsilniej działanie to występuje w przewodniku, składającym się ze sztabek bizmutowej i antymonowéj. Jeżeli prądz elementu Daniell'a *S* (fig. 549) płynie od miedzi w kie-

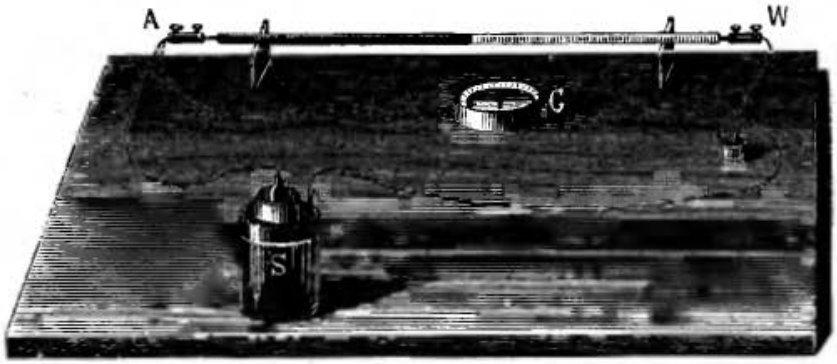


Fig. 549. Prąd płynie przez przewodnik z dwóch różnych metali, spojonych ze sobą.

runku sztaby *W A*, (*W* bizmut, *A* antymon) i powraca do elementu, wtedy miejsce spojenia *oziębia* się, t. j. staje się zimniejszem od otoczenia. Chcąc, ażeby ciepło Joule'a, które zawsze występuje, możliwie mało pokrywało tę stratę ciepła, należy użyć sztabek dosyć grubych; wówczas bowiem opór, a więc i ciepło Joule'a, są nieznaczne. Widzimy tedy, że prąd elektryczny, płynący od bizmutu do antymonu, powoduje oziębienie w miejscu ich spoje-

nia. Jeżeli natomiast prąd dodatni płynie od antymonu do bizmutu, wówczas w miejscu spojenia wytwarza się większa ilość ciepła, niż tego wymaga prawo Joule'a. Działanie to prądu elektrycznego odkrył Peltier; dlatego też dodatnią lub ujemną ilość wytworzonego ciepła nazywamy *ciepłem Peltier'a.* W naszym wypadku jest ono dodatnie lub ujemne, czyli powoduje ogrzanie lub oziębienie, zależnie od tego, czy prąd elektryczny płynie od antymonu do bizmutu, czy też od bizmutu do antymonu.

Ten wpływ oziębiający prądu elektrycznego Lenz uwidocznił bardzo wyraźnie za pomocą następującego doświadczenia. W miejscu spojenia bizmutu i antymonu, wywiercił on otwór, napełnił go wodą i zanurzył w niej kulkę termometru. Następnie umieścił on całą sztabę w topniejącym śniegu, przez co ona i woda w otworze osiągnęły temperaturę 0°. Otóż, jeżeli w doświadczeniu tem prąd z elementu Daniell'a płynął w kierunku od bizmutu do antymonu, wtedy temperatura w miejscu spojenia spadała poniżej zera tak, że woda stopniowo zamarzała; po upływie pięciu minut zamieniła się ona całkowicie w lód i miała temperaturę 3,5° poniżej zera.

Podobnie, jak w miejscu spojenia bizmutu i antymonu, ciepło Peltier'a pojawia się także w miejscu spojenia jakichbądź innych dwóch metali. Jaki powinien być kierunek prądu elektrycznego, ażeby spowodował oziębienie w miejscu spojenia, tego naprzód przewidzieć nie można, zależy to bowiem od natury metali spojonych. Otóż doświadczenie uczy, że prąd elektryczny, płynący od bizmutu do innego spojonego z nim metalu: antymonu, żelaza, srebra, miedzi, złota i t. d., powoduje oziębienie w miejscu spojenia. Wogóle możemy wszystkie metale ułożyć w taki szereg, z którego odrazu można poznać, w jakim kierunku prąd powinien płynąć przez kombinacyę dwóch metali, ażeby miejsce ich spojenia oziębiło się. Szereg taki nazywamy *termoelektrycznym szeregiem napięć.* Oto jeden, w którym zestawiono kilkanaście metali.

Bizmut,
Rtęć,
Platyna,

Złoto,
Miedź,
Cyna,
Ołów,
Cynk,
Srebro,
Żelazo,
Antymon,

Jeżeli tedy mamy np. sztabę spojoną z żelaza i miedzi i chcemy wiedzieć, w jakim kierunku należy przepuścić prąd, ażeby miejsce spojenia oziębiło się, to z powyższego szeregu znajdujemy, że prąd dodatni powinien płynąć od miedzi przez owo miejsce do żelaza. Puszczając prąd w przeciwnym kierunku, otrzymujemy podwyższenie temperatury w miejscu spojenia.

Pomiędzy ciepłem Peltier'a, a ciepłem Joule'a zachodzi więc ta różnica, że to ostatnie nie zależy zupełnie od kierunku prądu, podczas gdy pierwsze zmienia znak (+ na — lub odwrotnie) wraz ze zmianą kierunku prądu.

Przy opisanem działaniu prądu elektrycznego napotykamy znów na odwracalność zjawisk fizycznych, mianowicie:

Podobnie, jak prąd elektryczny powoduje ogrzanie, lub oziębienie w miejscu spojenia dwóch różnych metali, zależnie od swego kierunku, tak też wskutek zewnętrznego ogrzania lub oziębienia miejsca spojenia dwóch różnych metali, połączonych w zamknięte koło, powstaje prąd elektryczny.

Możemy się o tem z łatwością przekonać za pomocą następującego doświadczenia. Na załączonym rysunku (fig. 550) widzimy sztabkę bizmutu *o p*, do której w punktach *m n* jest przylutowana zgięta sztabka miedziana. W swobodnej przestrzeni między tymi dwoma

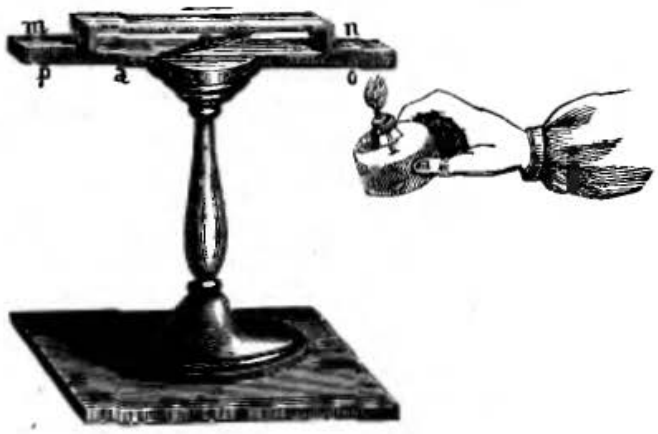


Fig. 550. Ogniwo termoelektryczne.

metalami znajduje się ruchoma igła magnesowa. Otóż jeżeli ogrzewamy jedno z miejsc spojenia, np. *o n*, powstaje prąd elektryczny, istnienie którego poznajemy z tego, że igła magnesowa odchyla się od swego pierwotnego położenia. Prąd ten płynie w kierunku strzałki, t. j. od bizmutu przez miejsce ogrzane do miedzi i wraca w kierunku *a o* do miejsca spojenia *n o*. Podobnie też w naszem kole zamkniętem powstaje prąd elektryczny przy oziębieniu jednego z miejsc spojenia, np. *n o*, za pomocą lodu; w tym wypadku jednak prąd płynie od miedzi przez miejsce oziębione do bizmutu. Prądy te, odkryte przez Seebeck'a w r. 1823, nazywamy *prądami termoelektrycznymi*. Mamy więc tutaj prądy elektryczne, które powstają nie w elementach galwanicznych, lecz jedynie wskutek działania ciepła. Jeżeli temperatura miejsc spojenia dwóch różnych metali, tworzących zamknięte koło, jest różna, wówczas przez koło to przepływa prąd elektryczny. W kombinacyi naszej bizmutu z miedzią prąd dodatni płynie zawsze przez cieplejsze miejsce spojenia od bizmutu do miedzi, przez zimniejsze więc od miedzi do bizmutu. We wszystkich innych kombinacyach dwóch metali kierunek prądu termoelektrycznego również zależy od ich natury. Możemy wszystkie metale połączyć w szereg taki, ażeby dodatni prąd termoelektryczny płynął przez ogrzane miejsce spojenia od metalu poprzedzającego do następnego. Szereg ten jest identyczny z wyżej podanym termoelektrycznym szeregiem napięć:

bizmut, rtęć platyna, złoto, miedź, cynk, ołów, cynk, srebro, żelazo, antymon.

Bizmut i antymon są najbardziej od siebie odległe w tym szeregu i dają najsilniejsze prądy termoelektryczne.

Przy prądzie termoelektrycznym, podobnie jak przy każdym innym, należy odróżniać siłę elektromotryczną, natężenie i opór.

Siła elektromotryczna, odpowiadająca danej kombinacyi, zależy oczywiście od natury metali spojonych i od różnicy temperatur obu miejsc spojenia. Im większa jest ta różnica, tem większą jest siła elektromotryczna danej kombinacyi. Tę ostatnią, złożoną z dwóch różnych metali, spojonych ze sobą, nazy-

wamy *elementem termoelektrycznym*, przez analogią do elementu galwanicznego. Siła elektromotryczna elementu termoelektrycznego jest więc tem większą, im większą jest różnica temperatur miejsc spojenia. Prawo to jednak nie stosuje się do każdej temperatury. Przy wyższej bowiem temperaturze budowa metalu często ulega zmianie, wskutek czego zmienia się także jego różnica termoelektryczna względem drugiego metalu.

Opór wewnętrzny elementu termicznego jest wogóle bardzo mały; element taki bowiem składa się tylko z ciał metalicznych i nie zawiera żadnych cieczy. W obieg elementu termicznego można oczywiście włączać dowolny opór, prąd ztakiego elementu można przepuszczać przez różne możliwe przyrządy, przecinając w pewnem miejscu jeden z dwóch drutów i łącząc wolne jego końce z zewnętrznem kołem prądu.

Siła elektromotryczna elementu termicznego i opór całkowity wpływają tak samo na natężenie prądu, jak przy elementach galwanicznych, t. j. według prawa Ohm'a

$$\text{natężenie} = \frac{\text{siła elektromotryczna}}{\text{opór}}$$

Otóż co się tyczy siły elektromotrycznej elementu termicznego, jest ona stałą pod tym jedynie warunkiem, że temperatura miejsc spojenia elementu nie zmienia się. Ażeby warunkowi temu zadość uczynić zanurzamy np. jedno miejsce spojenia w lodzie topniejącym, utrzymując je tym sposobem stale przy temperaturze zero, drugie zaś miejsce spojenia zanurzamy w wodzie wrzącej, przez co temperatura jego równa stale 100° C. Celowi temu najlepiej odpowiada urządzenie elementu termicznego, przedstawione na fig. 551, gdzie *a a* wyobraża zgiętą sztabę bizmutową, do końców której są przylutowane druty miedziane. Te ostatnie przechodzą następnie przez dwa małe oczka, końce zaś ich możemy połączyć zapomocą krótkich lub długich przewodników. Jeden koniec zgiętej sztaby bizmutowej zanurzamy w naczyniu z wrzącą wodą, drugi — w naczyniu, napełnionem topniejącym lodem, przez co siła elektomotryczna tego elementu zachowuje stałą wartość, równą w danym razie we-

dług Pouillet'a w przybliżeniu $\frac{6}{1000}$ wolt. Wszystkie inne kombinacye metali dają również siły elektromotryczne; są one jednak wszystkie o wiele mniejsze, niż siła elektromotryczna jednego elementu Daniell'a. Przyjmując np. siłę elektromotryczną prądu termicznego pomiędzy czystem srebrem i kupną miedzią za 1 (przy różnicy temperatur, wynoszącej 100°, równa się ona w przybliżeniu $\frac{2}{10000}$ wolt) otrzymujemy dla sił elektromotrycznych innych kombinacyj (oczywiście przy tych samych różnicach temperatury miejsc spojenia) następujące liczby:

Fig. 551. Element termiczny.

srebro	— bizmut . . .	32,9
„	— nowe srebro. .	5,2
„	— rtęć	2,5
„	— ołów	1,0
„	— czysty antymon.	9,87
„	— tellur	197
„	— selen	290

W czterech pierwszych kombinacyach dodatni prąd płynie od srebra przez zimniejsze miejsce spojenia do drugiego metalu, w trzech ostatnich zaś w kierunku przeciwnym, zgodnie z porządkiem danych metali w termoelektrycznym szeregu napięć.

Liczby dla telluru i selenu są stosunkowo bardzo wielkie. Ciała te nie mają już czysto metalicznego charakteru. Większe jeszcze siły termoelektryczne otrzymujemy przez połączenie pewnych siarków metalicznych ze sobą lub z miedzią. W ten sposób możemy otrzymać elementy, których siła elektromotryczna, przy różnicy temperatur miejsc spojenia, równej 100° lub 150°, wzmaga się do $^1/_{15}$ albo do $^1/_6$ wolt.

Wogóle jednak siły elektromotryczne elementów termicznych są bardzo małe; wzrastają one wprawdzie wraz z różnicą temperatur miejsc spojenia, lecz tylko dopóty, dopóki budowa metali nie ulega znacznej zmianie. Przy wysokich temperaturach siła elektromotryczna elementu częstokroć nietylko nie wzrasta, lecz nawet maleje tak, że dla wielu kombinacyj znika nawet zupełnie przy pewnej temperaturze. Przy temperaturach jeszcze wyższych siła elektromotryczna występuje wprawdzie na nowo, lecz kierunek prądu termoelektrycznego jest przeciwny, niż poprzedni.

Chcąc tedy wzmocnić do pewnego stopnia natężenie prądu termoelektrycznego, nie można w danym razie uciekać się do możliwie wielkich różnic w temperaturze. Należy raczej postąpić tak, jak z elementami galwanicznymi, t. j. połączyć ze sobą pewną ich liczbę w szereg i ogrzewać zawsze miejsca spojenia jednakowo położone. W ten sposób otrzymujemy *stos termoelektryczny*. Stos taki opisaliśmy już w księdze poprzedzającéj (fig. 458, str. 801); *A* są to sztabki antymonowe, *B*—bizmutowe; miejsca spojenia oznaczono tam liczbami 1, 3, 5,... po jednej stronie i 2, 4, 6... po drugiej. Utrzymując parzyste i nieparzyste miejsca spojenia przy różnych temperaturach, otrzymujemy prąd termoelektryczny. Prawa strona wspomnianej figury (str. 801) wyobraża stos termoelektryczny, gotowy do użycia. W elementach termicznych ciepło bezpośrednio zamienia się na elektryczność. Ciepło mianowicie, które z zewnątrz doprowadzamy do jednego z miejsc spojenia wywołuje prąd elektryczny. Ponieważ ciepło jest jednym z najpotężniejszych czynników natury, ponieważ dostarcza ono energii dla największych naszych maszyn, przeto możnaby sądzić, że przemiana ciepła w elektryczność stanowi źródła bardzo potężnych działań elektrycznych. Dotychczas jednak jest inaczej. Siła elektromotryczna elementów termicznych jest bardzo nieznaczną tak, że nawet cały ich szereg wywołuje względnie niewielkie rezultaty. Istotnego zadania bezpośredniej przemiany ciepła na elektryczność, odpowiadającej zamianie elektryczności na pracę, którego rozwiązaniu towarzyszyłyby naukowe i praktyczne zdo-

bycze wielkiej doniosłości, jeszcze nie dokonano i nasuwa się nawet pytanie, czy rozwiązaniu tego problematu nie kładzie tamy sama istota elektryczności, która dziś jeszcze jest dla nas zagadką.

§ 3. Działanie chemiczne prądu elektrycznego. Elektroliza. Prądy polaryzacyjne.

Elektryczność wielostronniej, aniżeli pozostałe siły przyrody jest w związku z innemi zjawiskami. Oprócz działań świetlnych i cieplnych, prąd elektryczny wywołuje działania chemiczne, które zarówno dla naukowego badania elektryczności, jak i dla praktycznego jej zastosowania ogromnej są wagi.

Prąd elektryczny płynie trwale tylko przez zupełnie zamknięty łańcuch. Przewodniki zaś są, jak wiemy, dwojakiej natury i należą do pierwszej lub drugiej klasy. Do pierwszej zaliczamy wszystkie metale, węgiel, selen i szereg innych nie bezpośrednio metalicznych ciał. Do przewodników drugiej klasy należą wszystkie złożone ciecze, które wogóle przewodzą prąd. Gdy więc prąd elektryczny przechodzi przez tego rodzaju złożoną ciecz, wtedy powoduje zawsze chemiczny jej rozkład, który podlega pewnym dokładnie określonym prawom. Dlatego przewodniki drugiej klasy nazywamy *elektrolitami*, ponieważ elektryczność je rozkłada. Proces zaś rozkładu nazywamy *elektrolizą*. Już poprzednio używaliśmy często słowa *elektrod*, dla oznaczenia końców przewodników, doprowadzających prąd. Przy elektrolizie termin ten wprowadził pierwszy Faraday. Chcąc mianowicie przepuścić prąd elektryczny ze stosu galwanicznego przez ciecz, musimy w niej zanurzyć dwie blachy, albo dwa druty metalowe, z których jeden jest połączony z dodatnim, drugi zaś z ujemnym biegunem bateryi. Te blachy lub druty noszą nazwę *elektrodów*.

Gdy zanurzymy w cieczy dwa elektrody z tego samego (lub z różnego metalu), np. dwa elektrody platynowe i przepuścimy przez nie prąd elektryczny, wtedy ciecz rozłoży się na swoje składniki. Rozkład ten na pozór nie odbywa się w całej cieczy,

lecz *tylko na samych elektrodach.* Zanurzywszy np. dwie blachy platynowe w wodzie i przepuściwszy przez nie prąd z dwóch lub trzech elementów Bunsena, spostrzegamy, że na elektrodzie dodatnim i ujemnym powstają gazy, a mianowicie na dodatnim tlen, na ujemnym wodór. Zjawisko to w wodzie nie jest tak prostem, jak się zdaje i dlatego opiszemy je później.

Z góry już można przewidzieć, że jeżeli ciecz rozpada się na swoje składniki, to gdy one wogóle posiadają do tego zdolność, mogą znów działać chemicznie na ciecz lub na elektrody. Z tego właśnie powodu bardzo często przy elektrolizie otrzymujemy nie rzeczywiste produkty rozkładu, lecz te, które powstają przez działanie składników na ciecz lub elektrody. Wówczas powiadamy, że składniki elektrolitycznie powodują *procesy wtórne.* Przy przesyłaniu prądu przez elektrody platynowe i przez roztwór chlorku sodu (sól kuchenna) w wodzie, powinien pojawić się na elektrodzie dodatnim wolny chlor, na ujemnym zaś sód. W istocie sód się wydziela, ale działa natychmiast rozkładająco na wodę i daje wodan sodu i wodór, podczas gdy wolny chlor łączy się natychmiast z elektrodem platynowym, tworząc chlorek platyny; z tego powodu nie widać ani sodu ani chloru. Jeżeli jednak użyjemy tutaj elektrodów z węgla, to tylko na jednym z nich (ujemnym) elektroliza powoduje tego rodzaju wtórne procesy. W tym wypadku wydziela się na ujemnym elektrodzie wodór (zamiast sodu), na dodatnim zaś swobodny gazowy chlor.

Cieczami przewodzącemi, są wogóle kwasy, np. kwas siarczany, solny, azotny i roztwory soli w wodzie. Właśnie te ostatnie mają dla elektrolizy szczególną wagę i dlatego o nich głównie będziemy mówili. Każda sól, np. siarczan miedzi, zawiera jako jeden składnik metal, w tym wypadku miedź, drugim zaś składnikiem jest kwas, tlen, chlor lub inne ciało, tutaj kwas siarczany. Przy elektrolizie roztworu soli metal *wydziela się zawsze na ujemnym elektrodzie,* reszta zaś soli na dodatnim. W naszym więc wyżej przytoczonym przykładzie rozkładu soli kuchennej sód wydziela się na elektrodzie ujemnym. Tak samo przy rozkładzie siarczanu miedzi, miedź, w siarczanie cynku

cynk, w azotanie srebra srebro, w chlorku złota złoto, osiadają w czystym stanie metalicznym na ujemnym elektrodzie. Z tego łatwo poznać, jak ważnem jest to działanie prądu elektrycznego; daje ono bowiem możność wydzielania metali (z ich soli) w czystym stanie, co na innej drodze tylko bardzo wielkiemi środkami może być uskutecznione. Drugi składnik soli wydziela się zatem na elektrodzie dodatnim, a ponieważ jest to zwykle kwas, przeto prawie zawsze tworzy on związek chemiczny z metalem elektrodu lub z samą cieczą. Jeżeli np. elektrolizuje się siarczan cynku pomiędzy elektrodami miedzianemi, wtedy na elektrodzie ujemnym pojawia się cynk, na dodatnim zaś rodnik kwasu siarczanego natychmiast łączy się z miedzią elektrodu, tworząc siarczan miedzi; w ten sposób przez *proces wtórny* na dodatnim elektrodzie mamy siarczan miedzi. Inny przykład: Przy rozkładzie zgęszczonego rozczynu dwuchlorku cyny ($Sn\ Cl_2$) pojawia się na elektrodzie ujemnym cyna, na dodatnim zaś powstałby swobodny chlor. Ostatni jednak działa natychmiast na sam rozczyn soli, to jest na dwuchlorek cyny i zamienia go na chlorek cyny tak, że na elektrodzie dodatnim nie powstaje chlor, lecz chlorek cyny.

A więc składnik wydzielony na dodatnim elektrodzie może wywołać wielką liczbę procesów wtórnych.

Również metal występujący na elektrodzie ujemnym może wejść w związek chemiczny z innemi znajdującemi się tamże ciałami, jeżeli wogóle posiada silną energię chemiczną.

Szczególnie silnie działają alkaliczne metale potas i sód i dlatego występują w nich często procesy wtórne. Przy rozkładzie np. rozczynu siarczanu sodu pomiędzy elektrodami platynowemi wydziela się na ujemnym elektrodzie sód, ten jednak rozkłada natychmiast wodę rozczynu na rodnik wody ($H\ O$) i wodór. Rodnik łączy się z sodem w wodzie, tworząc wodan sodu, wodór zaś wyzwala się na ujemnym elektrodzie pod postacią pęcherzyków. Procesy wtórne występują przytem także na dodatnim elektrodzie. Wydzielający się tam rodnik kwasu siarczanego łączy się natychmiast z wodorem wody, tworząc kwas siarczany, drugi zaś składnik wody, tlen, wyzwala się i występuje w for-

mie pęcherzyków na dodatnim elektrodzie. Przy elektrolizie tedy siarczanu sodu (SO_4 Na_2) powinien powstawać na ujemnym elektrodzie sód, na dodatnim rodnik kwasowy (SO_4). W rzeczywistości zaś przez procesy wtórne mamy na ujemnym wodór, na dodatnim tlen. Te właśnie procesy wtórne spowodowały przy pierwszem odkryciu elektrolizy wielki błąd. Przy przepuszczaniu prądu elektrycznego (za pomocą elektrodów platynowych) przez naczynie napełnione zwykłą wodą, na ujemnym pojawia się wodór, na dodatnim tlen. Myślano tedy, że woda rozkłada się bezpośrednio na te swoje dwa składniki. Późniejsze badania wykazały, że rzecz ma się zupełnie inaczej. Czysta woda, wolna od najmniejszych śladów rozpuszczonych w niej soli, nie przepuszcza wcale prądu elektrycznego, czyli jest doskonałym izolatorem. Jeżeli woda do pewnego stopnia dobrze przewodzi, jak to ma miejsce we wspomnianych doświadczeniach z elektrolizą wody, to zawiera ona wtedy większą lub mniejszą ilość soli, mianowicie sodowych i potasowych. Prąd rozkłada te sole, a metale na ujemnym elektrodzie rozkładają wodę, łączą się z tlenem i uwalniają wodór, który w ten sposób tutaj powstaje. Reszta soli łączy się na dodatnim elektrodzie z wodorem wody i uwalnia tlen. W ten sposób przy przejściu prądu przez (niezupełnie czystą) wodę, pojawiają się wprawdzie jej składniki wodór i tlen, lecz nie przez bezpośrednią elektrolizę, a przez procesy wtórne. To samo dzieje się przy słabem zakwaszeniu wody dowolnym kwasem, np. siarczanym. Wtedy wodór kwasu siarczanego (SO_4 H_2) uwalnia się na ujemnym elektrodzie, na dodatnim zaś reszta (SO_4) łączy się z wodorem wody i tlen tejże uwalnia się. Zakwaszenie wody przynosi tę korzyść, że wskutek tego staje się ona lepszym przewodnikiem.

Skąd jednak pochodzi to, że przy elektrolizie swobodne składniki występują tylko na elektrodach, a zatem tylko w miejscach, w których prąd elektryczny wchodzi i wychodzi. Na to pytanie daje odpowiedź teorya elektrolizy Clausiusa. Według tej teoryi każda złożona cząsteczka, np. chlorku sodu, składa się z dwóch części o elektrycznościach przeciwnych t. j. z dodatniego metalu i ujemnej reszty. Cząsteczka zatem jest nieelek-

tryczną. W wodnym roztworze soli nie pływają jedynie same jej cząsteczki, gdyż niektóre z nich ulegają przy rozpuszczaniu się dyssocyacyi, czyli rozłożeniu; tak np. w rozczynie soli kuchennej, pojedyńcze cząsteczki są rozłożone na swoje atomy chlor i sod. Te atomy zatem, które mają silny ładunek elektryczny, noszą miano *jonów* cząsteczki. Jeżeli więc zanurzymy w takim rozczynie dwa elektrody, z których jeden jest dodatnio, drugi zaś ujemnie elektrycznym, to ich elektryczności działają przyciągająco i odpychająco na ładunki elektryczne jonów. Elektrod ujemny przyciąga dodatnio naelektryzowane metalowe jony, dodatni zaś ujemną resztę. W ten sposób w cieczy odbywa się postępowy ruch, czyli *wędrówka* wszystkich metalowych jonów w jednym, wszystkich zaś pozostałych jonów w drugim kierunku. Ponieważ jednak podczas tej wędrówki we wnętrzu cieczy istnieje wszędzie ta sama liczba dodatnich i ujemnych jonów, przeto wnętrze to na pozór pozostaje niezmienionem.

Na granicach wszelako, na samych elektrodach rzecz ma się inaczej. Tu bez przerwy zbliżają się do ujemnego elektrodu dodatnie metalowe jony, oddają mu swój ładunek i pozbywszy się go, pozostają w miejscu. To samo dzieje się z ujemnymi jonami reszt na elektrodzie dodatnim.

Według tej teoryi zatem, nie prąd elektryczny rozkłada cząsteczki; one bowiem są już po większej części rozłożone; prąd wywołuje tylko pewien ich ruch, czyli wędrówkę. Pomimo, że teorya ta na pierwszy rzut oka wydaje się nieco sztuczną, to jednak pozwala się zastosować z zadziwiającą dokładnością do wszystkich, nawet najsubtelniejszych zjawisk, występujących przy badaniu złożonych cieczy i dlatego pozyskała ona dość ogólne uznanie.

Z zakwaszonej wody otrzymujemy, jak już zaznaczyliśmy, przez elektrolizę i towarzyszące jej procesy wtórne, wodór i tlen, to jest oba składniki wody. Można dwa te gazy otrzymać oddzielnie umieściwszy każdy elektrod w naczyniu, u góry zamkniętem i napełnionem wodą. Przyrząd taki przedstawia fig. 552. Obie rurki szklane *o* i *h* napełnia się wodą i zanurza w misce *A*, która również jest nią napełniona tak, że ciecze

w obu rurkach komunikują ze sobą przez wodę w *A*. W każdej rurce znajduje się platynowy elektrod, przechodzący przez korek, który zamyka od dołu naczynie *A*. W *f* i *f'* znajdują się szrubki, w które wkłada się druty elementu. W chwili tedy, gdy prąd dosięga elektrodów i przechodzi przez wodę, na jednym z nich pojawia się (*h*) wodór na drugim (*o*) tlen. Gazy te podnoszą się w rurkach i zwolna wypychają z nich wodę.

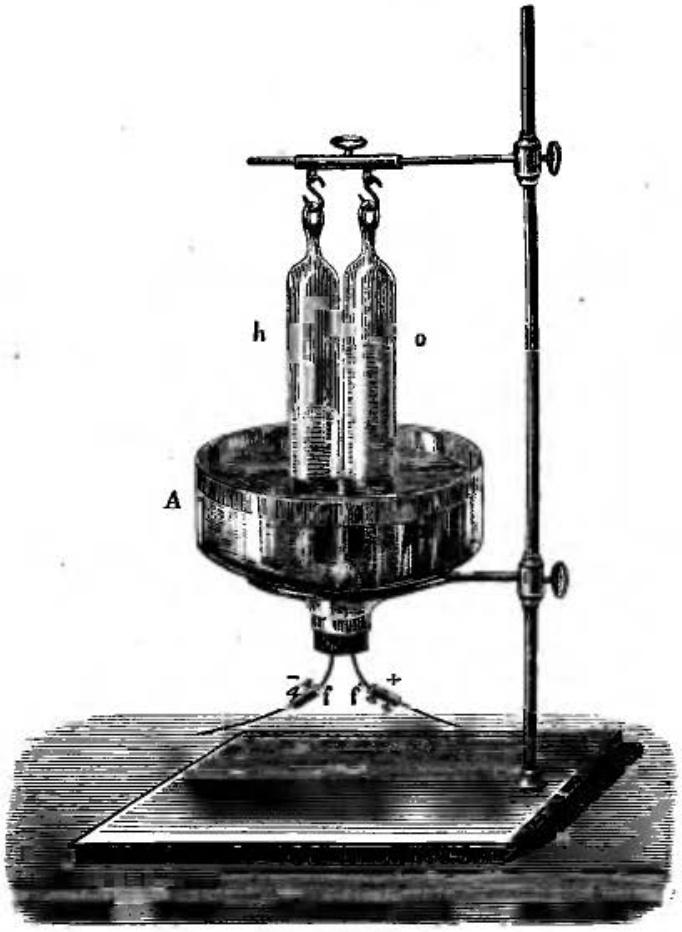


Fig. 552. Przyrząd do rozłożenia wody.

Wykonywując to doświadczenie, spostrzegamy odrazu, że w tym samym czasie powstaje dwa razy tyle (na objętość) wodoru niż tlenu. W rurce *o* znajduje się zawsze tylko połowa objętości gazu w porównaniu z objętością gazu w rurce *h*. Musiałoby tak być naturalnie, gdyby prąd bezpośrednio rozkładał wodę. Ponieważ 16 gramów tlenu zajmuje tyle miejsca, ile 1 gram wodoru (przy jednakowem ciśnieniu i temperaturze), w każdej zaś cząsteczce wody zawartych jest 16 części wagowych tlenu i 2 części wagowe wodoru, przeto wydzielony wodór musi zająć dwa razy większą objętość, jeżeli woda rzeczywiście zostaje rozłożona bezpośrednio przez prąd. Proces w wodzie jest wszelako wtórnym, fakt zaś, że pomimo to ilości wodoru i tlenu są takie, jak przy rozkładzie bezpośrednim, staje się dopiero zrozumiałym wobec ogólnego prawa, odkrytego przez Faraday'a.

Wiadomo, że chemia znalazła dla każdego ciała pewną liczbę, czyli ciężar atomowy, który w połączeniu z formułą chemiczną danego związku wskazuje, ile części wagowych każdego pierwiastku w związku tym się znajduje.

Jeżeli np. chemia podaje dla chloru (*Cl*) ciężar atomowy 35,5, a dla srebra (*Ag*) ciężar atomowy 108, i jeżeli chlorek srebra ma za wzór *Ag Cl*, to znaczy, że 35,5 części wagowych chloru łączy się z 108 częściami wagowemi srebra i daje 143,5 części wagowych chlorku srebra.

Albo jeżeli siarka (*S*) ma ciężar atomy 32, tlen (*O*) ciężar atomowy 16, miedź (*Cu*) ciężar atomowy 63,5, i jeżeli formuła chemiczna dla siarczanu miedzi jest SO_4 *Cu*, oznacza to, że 32 części wagowe siarki łączą się z 64 częściami wagowemi tlenu i 63,5 częściami wagowemi miedzi, dając 159,5 części wagowych siarczanu miedzi.

Otóż przy każdym rozkładzie elektrolitycznym składniki pojawiają się na elektrodach dokładnie w tym samym stosunku wagowym, w jakim znajdują się w rozłożonym związku. Np. przy elektrolizie chlorku srebra mamy zawsze na ujemnym elektrodzie 108 części wagowych srebra, jeżeli na dodatnim powstaje 35,5 części wagowych chloru; przy elektrolizie siarczanu miedzi mamy na ujemnym elektrodzie 63,5 części wagowych miedzi, podczas gdy na dodatnim występuje 96 części wagowych rodnika SO_4. Podobnie przy elektrolizie chlorku cynku, którego formuła jest $Zn\ Cl_2$ mamy (ciężar atomowy cynku jest 65,2, a chloru 35,5) na ujemnym elektrodzie zawsze 65,2 części wagowych cynku, na dodatnim zaś 70 części wagowych chloru.

Jeżeli wydzielone jony ulegają wtórnym procesom z elektrodami, albo z cieczą, to każdy z nich łączy się zawsze z tyloma częściami wagowemi elektrodu, albo cieczy, które go chemicznie równoważą.

Jeżeli więc np. siarczan sodu $Na\ So_4$ podlega elektolizie tak, że na ujemnym elektrodzie pojawia się Na_2 (2×23 części wagowych), to sód ten rozkłada równoważną mu ilość wody na

2 (*Na OH*) i wydziela z niej H_2, a więc tyle wodoru, wiele potrzeba do zrównoważenia wydzielonego sodu.

Innemi słowy: Przy elektrolizie składniki cieczy wydzielają się zawsze w równoważnych ilościach, a jeżeli wtórne procesy mają miejsce, to i te odbywają się w ilościach równoważnych.

Otóż jak zachowują się wydzielone ilości elektrolitów, jeżeli przepuszczamy prąd kolejno przez *rozmaite* ciecze, mogące uledz rozkładowi?

Na to pytanie Faraday starał się znaleść odpowiedź za pomocą całego szeregu doświadczeń. Odpowiedź ta brzmi: *Pod wpływem tego samego prądu we wszystkich elektrolizie poddanych cieczach składniki wydzielają się w tym samym czasie w stosunku ilościowym, odpowiadającym ich chemicznej równoważności.*

Przykład prawo to objaśni. Gdy przepuszczamy jeden i ten sam prąd kolejno przez trzy naczynia z cieczami, które ulegają tedy jednocześnie elektrolizie, to wydzielone ilości jonów muszą znajdować się w stosunku ich równoważników chemicznych. Fig. 553 pokazuje urządzenie doświadczenia, jeżeli

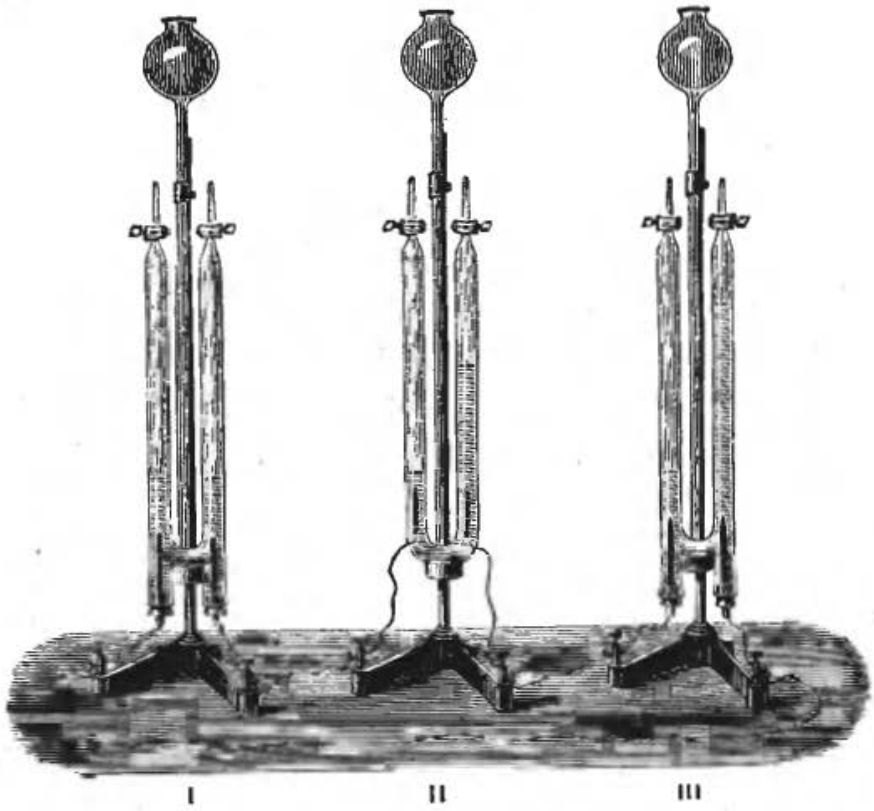


Fig. 553. Elektroliza.

wydzielone ilości są *lotne*. W każdem z trzech naczyń pałeczki węgla służą jako elektrody, prąd zaś idzie od pierwszego do drugiego i od tego do trzeciego naczynia. Do pierwszego naczynia nalewamy kwasu solnego ($H\ Cl$), do drugiego zakwaszonéj wody ($H_2\ O$), do trzeciego rozczynu amoniaku ($H_3\ N$). Wówczas w pierwszem naczyniu musi przy elektrolizie wydzielić się taka sama objętość wodoru na ujemnym elektrodzie, co chloru na dodatnim, w drugiem naczyniu podwójna objętość wodoru na ujemnym, niż tlenu na dodatnim, a w trzeciem trzy razy tyle wodoru na ujemnym, jak azotu na dodatnim elektrodzie. Gdy więc prąd przechodzi, wydzielona objętość wodoru jest we wszystkich trzech naczyniach jednakową, a objętość chloru taka sama jak wodoru, objętość zaś tlenu jest o połowę i w końcu objętość azotu o dwie trzecie mniejsza, niż objętość wodoru. Ciężar zaś pewnej objętości wodoru ma się tak do ciężaru równej objętości chloru, dalej do ciężaru o połowę mniejszej objętości tlenu, oraz do ciężaru o dwie trzecie mniejszej objętości azotu jak $1 : 35{,}5 : {}^{16}/_{2} : {}^{14}/_{3}$, i to właśnie są tak zwane chemiczne równoważniki wodoru, chloru, tlenu i azotu.

Gdy więc ten sam prąd przechodzi przez szereg rozmaitych elektrolitów, wtedy ilości wagowe wydzielonych substancyj mają się do siebie dokładnie, jak chemiczne równoważniki tych substancyj w danym związku.

Prąd np., który w oznaczonym czasie wydziela z wody 1 gram gazu piorunującego, wydziela także w tym samym czasie 3,522 gramów miedzi z siarczanu miedzi i 12,99 gramów srebra z azotanu srebra, ponieważ liczby $1 : 3{,}522 : 11{,}99$ są w takim do siebie stosunku, jak równoważniki gazu piorunującego, miedzi w siarczanie miedzi, srebra w azotanie srebra.

Ważnem jest pytanie, od jakich warunków prądu elektrycznego zależy ilość wydzielonych substancyj? Otóż doświadczenie pokazało, że ilość elektrolitów wydzielonych w określonym czasie zależy jedynie od ilości elektryczności, jaka w tym czasie przeszła przez ciecz. Ilość elektryczności, jaka podczas sekundy przechodzi przez dane przecięcie, nazwaliśmy *natężeniem* prądu. *A zatem ilość ciał elektrolitycznie wydzielonych*

w ciągu każdej sekundy, zależy tylko od natężenia prądu. Można to łatwo sprawdzić za pomocą doświadczeń.

Bez względu na to, czy przez naczynie przechodzi prąd z jednego elementu Daniell'a, czy też z 10 takich elementów (połączonych w szereg) ilość jonów wydzielonych w jedną sekundę pozostanie ta sama, jeżeli tylko w drugim razie powiększymy opór o tyle, że natężenie prądu będzie takie same, jak w pierwszym razie.

Ponieważ więc ilość jonów wydzielonych elektrolitycznie, zależy jedynie od natężenia prądu elektrycznego, przeto o *natężeniu* prądu możemy sądzić na podstawie tych ilości. Przyrządy, służące do tego celu, noszą miano *woltametrów*. Istnieje cały ich szereg, w których rolę elektrolitów odgrywają różne ciała, bądź lotne, bądź stałe, jak np. gaz piorunujący, związki miedzi, lub srebra.

Dotychczas przyjmowaliśmy, że oba elektrody, zanurzone w elektrolitycznej cieczy, są zrobione z jednego i tego samego metalu, np. z platyny. Warunek ten wszelako nie jest konieczny. Zjawisko elektrolizy w cieczach zachodzi także i wtedy, gdy rolę elektrodów odgrywają dwa różne metale. Ilekroć prąd elektryczny przebiega przez ciecz zdolną do rozkładu, tyle razy zawsze następuje elektroliza. Z tego zaś wynika, że rozkład elektrolityczny cieczy powinien zachodzić również w każdym czynnym elemencie galwanicznym i to dokładnie podług prawa Farada'y. W rzeczy samej, wniosek ten potwierdziło doświadczenie. Jeżeli np. prąd elektryczny płynie przez element Daniell'a, składający się z miedzi, zanurzonej w rozczynie siarczanu miedzi i cynku, zanurzonego w rozcieńczonym kwasie siarczanym, wtedy w elemencie tym odbywa się ustawiczny rozkład obydwóch cieczy. Siarczan miedzi $Cu\ SO_4$ rozkłada się na miedź Cu i związek SO_4, który nie może jednak pozostać w stanie swobodnym. Dalej, rozcieńczony kwas siarczany $SO_4\ H_2$ rozkłada się na wodór H_2 i resztę SO_4. W samym więc elemencie elektrodem ujemnym jest miedź, ponieważ dodatni prąd elektryczny płynie w elemencie od cynku do miedzi. Wskutek tego miedź, wydzielana z siarczanu miedzi, osadza się

na elektrodzie miedzianym, który pokrywa się warstwą błyszczącego czystego metalu. Reszta SO_4 wędruje w stronę cynku. Jednocześnie jednak wodór H_2, *uwolniony przez elektrolizę* z kwasu siarczanego, wędruje w kierunku przeciwnym, spotyka tę resztę SO_4 i dwa te składniki łączą się, tworząc znów kwas siarczany $H_2 SO_4$. *Reszta zaś* SO_4 *z kwasu siarczanego* (pierwotnie rozłożonego elektrolitycznie) wędruje w stronę elektrodu dodatniego, to jest cynkowego, osadza się na nim, tworząc z cynkiem siarczan cynku. Wszystkie te rozkłady i połączenia zachodzą, podług prawa Faraday'a, w ilościach równoważnych, tak, że wskutek tych procesów chemicznych wewnątrz elementu galwanicznego, cynk rozpuszcza się ustawicznie w kwasie siarczanym, jednocześnie zaś równoważna ilość miedzi osadza się na elektrodzie miedzianym.

Gdy cynk rozpuszcza się w kwasie siarczanym, wówczas — jak uczy termochemia— *powstaje* zawsze pewna ilość ciepła; natomiast przy wydzielaniu się czystej miedzi z siarczanu miedzi *zużywa* się pewna, mianowicie mniejsza, ilość ciepła. A więc procesy chemiczne w elemencie galwanicznym wyzwalają pewną ilość ciepła, które wszelako nie pozostaje jako takie w elemencie i nie podnosi jego temperatury, lecz zamienia się w energię *elektryczną i podtrzymuje prąd galwaniczny. Możemy tedy* powiedzieć, że źródłem energii prądu elektrycznego (czyli ilości pracy, jaką on może wykonać) jest ciepło, wyzwalające się w elemencie galwanicznym dzięki procesom chemicznym. Otóż tutaj istnieją dwie możliwości, pomiędzy któremi nauka dotychczas nie zrobiła wyboru ostatecznego: albo elektryczność rozwija się wprzód przez samo zetknięcie metali z cieczami i wywołuje następnie procesy chemiczne, które podtrzymują nadal prąd elektryczny, albo też elektryczność wogóle powstaje dopiero wskutek procesów chemicznych. Pierwszy pogląd nosi miano prądu galwanicznego przez *zetknięcie*, drugi zaś *teoryi chemicznej*. Co się tyczy elementów galwanicznych, w skład których wchodzą metale i ciecze, to pytanie ma podrzędne tylko znaczenie, albowiem w elementach tego rodzaju energia procesów chemicznych jest w każdym razie równoważna

energii prądu elektrycznego. Pytanie to staje się zasadniczo ważnem dopiero wobec faktu, że elektryczność powstaje przy zetknięciu dwóch metali. Zwolennicy pierwszej teoryi utrzymują, że elektryczność zostaje wzbudzoną jedynie przez zetknięcie dwóch różnych metali, podczas gdy zwolennicy teoryi chemicznej twierdzą, że elektryczność wcale się nie wytwarza, jeżeli nie ma oddziaływania chemicznego, bądź za pośrednictwem gazów, bądź wilgoci. Pytanie to podlega jeszcze naukowej dyskusyi.

Widzieliśmy już kilkakrotnie, że każde działanie prądu elektrycznego, zależne od jego kierunku, może wzbudzić prąd elektryczny. To samo występuje także przy działaniach elektrolitycznych prądu. Można już z góry przewidzieć, że w pewnych razach musi powstać nowa siła elektromotryczna, gdy przesyłamy prąd galwaniczny przez naczynie rozkładowe i gdy w ten sposób elektrolizujemy ciecz. Przepuśćmy np. prąd zapomocą dwóch blaszek platynowych przez rozczyn azotanu srebra. Same przez się dwie blaszki z tego samego metalu, zanurzone w cieczy, nie posiadają siły elektromotrycznej. W naczyniu, zawierającem rozczyn azotanu srebra i dwie blaszki platynowe nie ma zatem z początku żadnej siły elektromotrycznej. Jeżeli jednak przez to naczynie przepuścimy prąd, azotan srebra ulegnie elektrolizie i na jednej blaszce platynowej wydzieli się srebro, które ją pokryje. W naczyniu rozkładowem mamy tedy obecnie dwie blaszki nie z tego samego metalu, jedna bowiem jest z czystej platyny, druga z platyny, powleczonej srebrem. Dwa różne metale w cieczy działają wobec siebie elektrycznie, z czego wynika, że przez elektrolizę musi w naczyniu rozkładowem powstać siła elektromotryczna. Ten wynik rozumowania znajduje też w rzeczywistości potwierdzenie. Lecz nie tylko wtedy, gdy jeden elektrod powleka się warstwą innego metalu w naczyniu rozkładowem występuje przeciwdziałająca siła elektromotryczna. W takich wypadkach nawet, gdzie nie możemy dostrzedz żadnej zmiany elektrodów, to jednak po przejściu prądu wykazują one wzajemne działanie elektromotryczne. Jeżeli np. zanurzymy dwie blaszki platy-

nowe w wodzie zakwaszonej i przepuścimy przez utworzone w ten sposób naczynie rozkładowe prąd elektryczny, wówczas, jak wiadomo, na powierzchni jednego elektrodu osiądzie wodór, na powierzchni drugiego tlen. Zdawałoby się, że gazy te nie powodują żadnej zmiany w elektrodach platynowych tak, że w tych warunkach nie mogą one wywierać na siebie działania elektromotrycznego. A jednak mamy i w tym wypadku pewne działanie elektromotryczne. Przy każdym rozkładzie elektrolitycznym elektrody przechodzą w stan odmienny, wskutek czego występuje wzajemne ich na siebie działanie elektomotryczne. Dla oznaczenia tego stanu wprowadzono termin *polaryzacya*. Powiadamy, że elektrody zostają *spolaryzowane*, gdy tylko prąd przebiega przez naczynie rozkładowe. Ponieważ więc dwa elektrody spolaryzowane wywierają na siebie działanie elektromotryczne, to jeżeli połączymy je drutem, będzie przez niego oraz przez naczynie rozkładowe płynął prąd elektryczny. Prąd taki, płynący od jednego do drugiego spolaryzowanego elektrodu, nazywamy *prądem spolaryzowanym*. Jeżeli więc np. przesyłamy prąd elektryczny z bateryi elementów Daniell'a przez elektrody platynowe i naczynie napełnione wodą zakwaszoną, wówczas ulegają one polaryzacyi. Przerwawszy tedy związek elektrodów z biegunami elementu Daniell'a i połączywszy je następnie ze sobą oraz z galwanometrem, otrzymamy odchylenie igły magnesowej, jako objaw prądu spolaryzowanego. W doświadczeniu tem rodzaj zboczenia igły wskazuje, że kierunek prądu spolaryzowanego jest wprost przeciwny kierunkowi pierwotnego, polaryzującego prądu, którego źródłem jest element Daniell'a. Zjawisko to występuje nietylko w wypadku, gdy platynowe elektrody ulegają polaryzacyi w wodzie zakwaszonej, lecz w każdym wogóle wypadku *prąd spolaryzowany płynie zawsze w kierunku przeciwnym, niż prąd pierwotny polaryzujący*.

Już *podczas* przepływu prądu polaryzującego elektrody, zanurzone w naczyniu rozkładowem, wywierają na siebie działanie elektromotryczne tak, że podczas samej polaryzacyi płynie prąd elektryczny z naczynia rozkładowego przez drut przewodni w kierunku przeciwnym prądowi polaryzującemu. Wsku-

tek tego prąd pierwotny, czyli polaryzujący, słabnie. Z tego zaś wynika, że nie możemy zastosować wprost prawa Ohm'a do prądu elektrycznego, płynącego przez ciecz, tak jak to poprzednio uczyniliśmy z prądem, płynącym przez przewodnik metalowy. Gdy prąd elektryczny płynie przez przewodnik metalowy (lub wogóle przez przewodnik, nie ulegający rozkładowi elektrolitycznemu), wówczas prawo Ohm'a brzmi tak:

$$\text{natężenie prądu} = \frac{\text{siła elektromotryczna elementu}}{\text{opór całkowity}}$$

natomiast, jeżeli prąd płynie przez ciecz, wówczas sile elektromotrycznej elementu *przeciwdziała* siła elektromotryczna prądu spolaryzowanego tak, że prawo Ohm'a w tym wypadku brzmi:

$$\text{natężenie} = \frac{\text{siła elektromotryczna elementu} - \text{siła elektromotr. prądu spolaryzowanego.}}{\text{opór całkowity}}$$

Prąd z elementu (to jest z naczynia rozkładowego z cieczą elektrolityczną i elektrodami) spolaryzowanego, czyli t. zw. *elementu wtórnego*, płynący w kierunku przeciwnym, niż prąd polaryzujący, powoduje też elektrolizę w samym elemencie wtórnym, podobnie jak każdy inny prąd elektryczny. Ponieważ jednak prąd spolaryzowany płynie w kierunku przeciwnym, niż prąd pierwotny, przeto na blasze platynowej, która wpierw pokrywała się warstwą tlenu, osadzi się obecnie wodór, na blasze zaś, poprzednio pokrytej wodorem, osadzi się tlen. Siła elektromotryczna prądu spolaryzowanego maleje więc, gdy prąd ten płynie i jest tem mniejszą, im dłużej to ma miejsce. Wreszcie gdy wydzielone gazy na blachach platynowych zneatralizują się zupełnie, prąd spolaryzowany znika całkowicie. Prąd spolaryzowany trwa więc tylko przez pewien przeciąg czasu, dopóty mianowicie, dopóki zmiany chemiczne elektrodów nie zostaną zupełnie zniesione. Elementy spolaryzowane, czyli elementy wtórne, odgrywają ważną rolę w nowszej elektrotechnice.

Możemy też oczywiście z elementów wtórnych, połączonych w szereg lub na powierzchnię, utworzyć *bateryę spolaryzowaną*, czyli *wtórną* o znacznej sile elektromotrycznej. W ten sposób możemy otrzymać bardzo silny prąd elektryczny, który jednak trwa tylko przez pewien przeciąg czasu. Do świeżego

użytku musimy znów spolaryzować, czyli *naładować* bateryą. W zastosowaniach technicznych baterye wtórne noszą miano *akumulatorów*, ponieważ za pomocą ich możemy nagromadzać i przechowywać energię prądu spolaryzowanego.

ROZDZIAŁ IV.

Magnetyzm.

§ 1. Siły magnetyczne. Solenoidy. Wzajemny wpływ prądów galwanicznych i magnesów. Galwanometry.

Wszystkie działania prądu elektrycznego, które dotychczas omówiliśmy, zachodzą li tylko na drodze prądu. Obwód jego ogrzewa się według prawa Joule'a; w miejscu spojenia dwóch różnych metali występuje działanie Peltier'a; w miejscu, gdzie prąd jest przerwany, występuje iskra elektryczna, która w pewnych wypadkach zamienia się na łuk świetlny; ciecze wreszcie, przez które płynie prąd elektryczny, ulegają rozkładowi elektrolitycznemu.

Lecz przytoczone zjawiska nie wyczerpują jeszcze całego pola działania prądu elektrycznego. Już przy metodzie mierzenia prądu galwanicznego za pomocą busoli stycznych, lub innych galwanometrów, korzystamy z działania prądu na magnes; zboczenie igły magnesowoj z położenia normalnego jest dla nas wskazówką, że po zwojach drutu galwanometru płynie prąd elektryczny. Otóż to działanie jest tylko szczególnym wypadkiem związku zachodzącego między prądem galwanicznym i magnesem.

Dzięki dalszym poszukiwaniom różnych fizyków odkrywano coraz to nowe związki między elektrycznością, a magnetyzmem tak, że zdołano nawet sprowadzić zupełnie zjawiska magnetyczne do galwanicznych. Ogół tych stosunków, zachodzących między elektrycznością i magnetyzmem, nosi miano nauki o *elektromagnetyzmie*.

Wiadomo, że każdy magnes posiada dwa bieguny: północ-

ny i południowy. Magnes jakikolwiek, zawieszony w ten sposób, że może swobodnie się obracać, przybiera zawsze pewien stale oznaczony kierunek. Koniec wskazujący na północ ziemi nazywamy biegunem północnym, koniec przeciwległy zaś — biegunem południowym magnesu. W sztabie magnesowej np. (fig. 554) jeden koniec jest zawsze biegunem północnym, drugi — południowym; podobnie jak w igle magnesowej (fig. 555). Oprócz tej własności przybierania oznaczonego kierunku, każdy magnes posiada drugą jeszcze, znaną i bardzo ważną własność, mianowicie przyciąga i odpycha inne magnesy, jako też żelazo niemagnetyczne. Prawa przyciągania i odpychania dwóch biegunów magnetycznych są zupełnie takie same, jak prawa przyciągania i odpychania dwóch ciał naelektryzowanych. Bieguny różnoimienne przyciągają się wzajemnie, bieguny zaś jednoimienne odpychają się. Zjawisko przyciągania, zachodzące między magnesem i żelazem niemagnetycznem, polega na działaniu zupełnie podobnem do indukcyi elektrycznej. Jeżeli mianowicie zbliżymy kawałek niemagnetycznego miękiego żelaza do magnesu, żelazo już wskutek tego stanie się magnetycznem, podobnie jak ciało nieelektryczne elektryzuje się przez indukcyę, jeżeli je umieścimy w bliskości ciała naelektryzowanego. W tym wypadku mówimy też, że magnes wzbudza magnetyzm w żelazie przez *indukcyę magnetyczną*. Dzięki temu magnes zawsze przyciąga miękie żelazo, albowiem każdy biegun wzbudza w zbliżonem żelazie na bliższym końcu biegun przeciwny, na odleglejszym

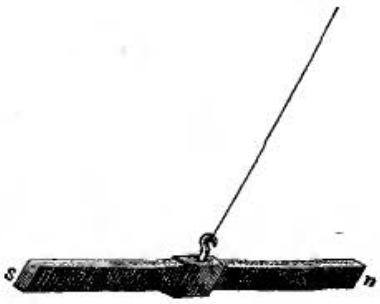


Fig. 554. Sztaba magnesowa.

Fig. 555. Igła magnesowa.

biegun ten sam i przyciąganie biegunów różnoimiennych przeważa odpychanie jednoimiennych. Zjawisko to występuje bardzo wyraźnie, gdy na sztabę magnesową sypiemy opiłki żelazne; przyczepiają się one wtedy do jej końców, które przybierają wygląd szczotek (fig. 556).

Miękie żelazo, namagnesowane przez indukcyę magnetyczną, traci magnetyzm swój całkowicie w chwili, gdy oddalamy je od magnesu. Inaczej jednak zachowuje się pod tym względem stal. Kawałek stali, namagnesowany przez indukcyę, zachowuje zawsze pewną ilość magnetyzmu, nawet po oddaleniu go od magnesu. Wiadomo, że można namagnesować niemagnetyczne miękie żelazo i stal, pocierając je gotowym już magnesem. Otóż i w tym także wypadku okazuje się, że miękie żelazo traci magnetyzm swój bardzo szybko, podczas gdy stal zachowuje nabyte własności magnetyczne. Dla tego właśnie używamy stali do budowy *trwałych* magnesów, a nie miękiego żelaza. Magnesy, które w chwili oddalenia magnesu indukcyjnego tracą magnetyzm swój całkowicie, nazywamy, dla odróżnienia od magnesów trwałych, *czasowymi*. Magnesom nadajemy różne kształty dla nas dogodne: igieł, sztab magnetycznych, lub też podków (fig. 557). Każdy tedy magnes przyciąga i zatrzymuje z pewną siłą miękie żelazo. Do przyciągniętego żelaza można przyczepiać ciężarki, które magnes też będzie dźwigał. Powiadamy, że magnes jest tem silniejszy, im większą jest jego zdolność dźwigania. Największą taką zdolność, przy jednakowej zresztą ilości stali, posiadają podkowy magnetyczne. Chcąc otrzymać magnes możliwie silny, układamy na podkowie magnetycznej szereg blach stalowych, podo-

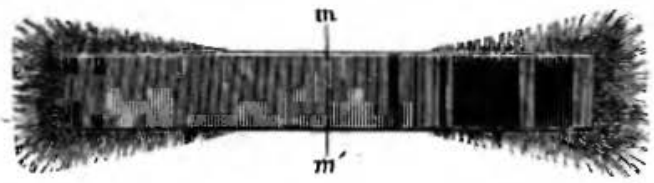


Fig. 556. Sztaba magnesowa i opiłki żelazne.

Fig. 557. Magnes w kształcie podkowy.

bnego kształtu, z których każda jest magnesem i ześrubowujemy je razem, jak pokazano na fig. 558. Taki układ magnesów przedstawia bardzo znaczną siłę. Układ ważący np. 100 kilogramów dźwiga 450 kilogramów, t. j. ciężar $4^1/_2$ razy większy od własnego swego ciężaru.

Fig. 558. Układ magnesów.

Każdy magnes wykazuje własności magnetyczne nietylko na biegunach, lecz na całej swej powierzchni, z tą różnicą, że na biegunach działanie przyciągające i odpychające jest największe. O tem, że magnes na całej powierzchni jest magnetyczny, można się przekonać zapomocą następującego doświadczenia. Połóżmy sztabę z miękiego żelaza obok dwa razy dłuższej sztaby magnetycznej; żelazo stanie się magnesem, niezależnie od tego, czy jeden z jego końców znajduje się w bliskości bieguna, środka, lub wreszcie jakiegokolwiekbądź innego miejsca sztaby. Widzimy tedy, że środkowe części magnesu również działają indukcyjnie na miękie żelazo. Magnes, którego bieguny są połączone za pomocą kawałka żelaza, nazywa się *zamkniętym*. Magnes taki wywiera na zewnątrz znacznie słabszą siłę przyciągającą i odpychającą, niż magnes niezamknięty, pomimo to jednak jest on zupełnym magnesem i może wywierać nawet bardzo znaczne działanie magnetyczne. Nosi on także miano *bezbiegunowego*, ponieważ nie posiada swobodnych biegunów. Przykład takiego magnesu mamy na fig. 558; innego przykładu dostarcza namagnesowany pierścień żelazny.

Możemy magnetyzować żelazo nietylko za pomocą gotowych już magnesów, lecz także za pomocą prądu.

Gdy prąd galwaniczny płynie spiralnie wokoło niemagnetycznej sztaby z miękiego żelaza, wtedy staje się ona magnetyczną. W celu wykonywania odnośnych doświadczeń, nawijamy na pusty cylinder drewniany drut, okręcony jedwabiem (fig. 559). Końce tego drutu łączymy z biegunami bateryi galwa-

nicznej. Jeżeli w wydrążeniu cylindra umieścimy sztabę z miękkiego żelaza, stanie się ona bardzo silnie magnetyczną; jeden jej koniec będzie biegunem północnym, drugi południowym. Dla tego też cylinder taki owinięty drutem, nazywamy *cewką magnetyczną*. Lecz magnetyzm żelaza miękiego znika wraz z przerwaniem prądu galwanicznego. Z tej przyczyny magnes taki, który zawdzięcza swe własności magnetyczne prądowi, zowie się *elektromagnesem*. Zachodzi tedy pytanie, który koniec elektromagnesu *A B* (fig. 560) staje się pod wpływem prądu biegunem północnym, który zaś południowym. Odpowiedź na to pytanie daje nam prawidło Ampere'a, które brzmi tak:

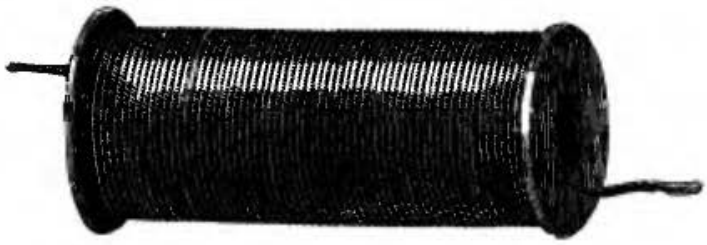
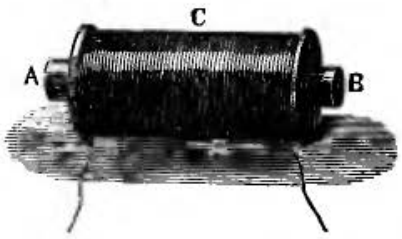


Fig. 559. Cewka magnetyczna.



560. Elektromagnes.

Wyobraźmy sobie, że płyniemy wzdłuż drutu cewki magnetycznej w kierunku dodatniego prądu i że zawsze jesteśmy zwróceni twarzą do sztaby; wówczas będziemy mieli biegun północny po lewej ręce, południowy zaś po prawej.

Jeżeli zmienimy kierunek prądu, wówczas biegun północny będzie południowym, południowy zaś północnym elektromagnesu.

Prosty elektromagnes możemy zresztą zastąpić innym, mającym kształt podkowy. Nawijając jednak drut na sztabę, musimy zawsze mieć na względzie przytoczone wyżej prawidło Ampere'a, jeżeli chcemy otrzymać dwa różnoimienne bieguny na dwóch jej końcach. Na podstawie tego prawidła łatwo przekonać się, że kierunek prądu wokoło biegunów elektromagnesu jest taki, jak wskazuje fig. 561. Koniec *S*, do którego prąd dodatni najprzód przybywa, przedstawia biegun południowy, drugi zaś koniec *N* jest biegunem północnym. Ażeby zawsze można

było odrazu dowiedzieć się, jak płynie prąd wokoło biegunów, należy zauważyć, że widziany z góry płynie on wokoło bieguna południowego w kierunku strzałki zegara, wokoło zaś północnego w kierunku przeciwnym (fig. 562).

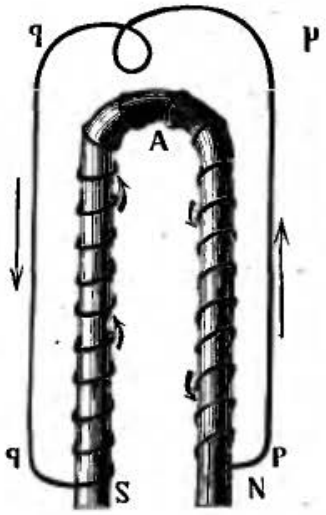


Fig 561. Kierunek prądu wokoło biegunów elektromag.

Jeżeli przerywamy prąd, magnetyzm żelaza znika. W istocie jednak znika dopiero po upływie pewnego, bardzo krótkiego wprawdzie, lecz wymiernego czasu. Dla wytłómaczenia tych zjawisk magnetycznych przypuszczamy, że cząsteczki w każdym kawałku żelaza są już same przez się magnetyczne, lecz że zajmują najróżnorodniejsze położenia i że magnetyzowanie za pomocą magnesu, lub prądu polega na tem właśnie, że nadaje ono im wszystkim jeden i ten sam kierunek. Działania tych cząsteczek, czyli drobnych magnesów, które poprzednio znosiły się wzajemnie, wzmacniają się teraz dzięki zgodności kierunków. Węgług tej teoryi magnes jest żelazem, w którem wszystkie cząsteczki są jednakowo położone. Dalej przypuszczamy, że wywołanie np. w stali podobnych zmian kierunków cząsteczek nie jest wcale łatwem, są one ze sobą tak ciasno związane, iż każdej zmianie kierunku przeciwdziała znaczna siła. Siłę tę nazywamy *koercytywną*, czyli oporną. Skoro więc w stali jest ona znaczną, to jasną jest rzeczą, że stal nie daje się łatwo magnetyzować; osiągamy to dopiero przy użyciu czynników magnetyzujących i działających w przeciągu długiego czasu. Również jasną jest rzeczą, że skoro uda się nam namagnesować kawałek stali, to musi ona zachować nabyte własności magnetyczne, właśnie dzięki sile, która przeszkadza cząsteczkom zająć pierwotne nieprawidłowe położenia. Inaczej jest z miękiem

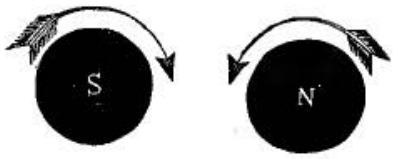


Fig 562. Bliższe objaśnienie kierunku prądu.

żelazem, którego siła koercytywna jest bardzo nieznaczną, prawie żadną. Miękie żelazo magnetyzuje się więc natychmiast pod wpływem siły magnetyzującej, lecz magnetyzm jego znika też wkrótce po usunięciu tej siły. Żelazo miękie nie jest jednak, jak już powiedzieliśmy, zupełnie pozbawione siły koercytywnej, chociaż jest ona tu o wiele mniejszą, niż w stali. Wskutek tego nie osiąga ono największego stopnia magnetyzmu natychmiast po zamknięciu prądu magnetyzującego, lecz dopiero po upływie pewnego czasu, który w każdym razie stanowi tylko ułamek sekundy. Podobnie nie traci ono magnetyzmu swego natychmiast po przerwaniu prądu magnetyzującego, lecz stopniowo, aczkolwiek w czasie bardzo krótkim. Własność ta wywiera często szkodliwy wpływ przy wielu zastosowaniach elektromagnesów i musimy z nią się liczyć w pewnych wypadkach, nawet przy użyciu najbardziej miękiego żelaza.

Działanie tej siły opornej tłómaczy nam inne jeszcze zjawisko, występujące przy elektromagnesach. Ponieważ nawet w najmiększem żelazie magnetyzującemu ruchowi cząsteczek przeciwdziała pewien opór, przeto prąd elektryczny, nadający im inny kierunek, musi także pokonać i tenże opór. W tym więc celu musimy masie żelaza dostarczyć pewnej ilości pracy. Proces ten można sobie tak wyobrazić, jak gdyby cząsteczki żelaza przy obracaniu, przy zmianie kierunku tarły się wzajemnie; przy wszelkiem zaś tarciu, gdzie przezwyciężamy jakikolwiek opór, powstaje *ciepło*. Ciepło musi tedy rozwijać się przy magnesowaniu i odmagnesowywaniu żelaza miękiego. Jeżeli raz jeden tylko zamkniemy prąd i wzbudzimy przez to magnetyzm w żelazie, wówczas ogrzanie będzie niedostrzegalne. Skoro jednak (jak to najczęściej się dzieje przy maszynach elektrycznych) prąd jest bardzo szybko i naprzemian zamykany i przerywany, lub też bardzo szybko zmienia kierunek tak, iż magnetyzm elektromagnesu ulega ciągłym zmianom, wówczas przy każdej takiej zmianie powstaje pewna, acz mała bardzo ilość ciepła. Małe te ilości dodają się, ciepło nagromadza się w masie żelaza i ogrzewa je bardzo silnie. Okoliczność ta jest czasem wielce niedogodną przy użyciu maszyn elektrycznych.

Oprócz zdolności magnesowania, którą dopiero co opisali-

śmy, prąd elektryczny posiada jeszcze inne własności magnetyczne. Profesor w Kopenhadze, Oerstedt pierwszy spostrzegł, że igła magnesowa odchyla się od swego położenia północno-południowego pod wpływem prądu elektrycznego. Zjawisko to opisaliśmy już poprzednio; widzieliśmy także jego zastosowania. Wiemy nadto, że kierunek odchylenia igły magnesowej zmienia się wraz z kierunkiem prądu, powodującego to odchylenie. Otóż Ampere przekonał się, że do kierunku odchylenia igły stosuje się to samo prawidło, które poznaliśmy przy elektromagnesie. *Wyobraźmy sobie mianowicie, że płyniemy w kierunku dodatniego prądu i że jesteśmy zwróceni twarzą do igły; wówczas biegun jej północny odchyli się na lewo.*

Działanie więc, jakie prąd elektryczny wywiera na igłę magnesową jest obrotowe; dąży ono do wprowadzenia igły w położenie prostopadłe do kierunku prądu. Na igłę magnesową, znajdującą się w bliskości prądu elektrycznego, działają tedy dwie siły: magnetyzm ziemski, który stara się zawsze nadać igle kierunek północno-południowy, oraz prąd elektryczny, który stara się odchylić ją od tego położenia. Gdyby nie było magnetyzmu ziemskiego, najsłabszy prąd elektryczny zdołałby już odchylić igłę tak, że byłaby prostopadłą do jego kierunku. Ponieważ jednak działaniu temu sprzeciwia się magnetyzm ziemski, przeto igła odchyla się od położenia północno-południowego tylko o taki kąt, przy którym obrót wywołany przez magnetyzm ziemski i obrót spowodowany przez prąd równoważą się wzajemnie.

Prąd działa *obrotowo* na igłę magnesową dlatego, że ona posiada dwa bieguny o przeciwnych własnościach i że siła, wywierana przez prąd na *biegun północny* ma kierunek wprost przeciwny kierunkowi siły, wywieranej na *biegun południowy*.

Doświadczenia wykazały, że *wielkość siły*, wywieranej przez prąd na biegun magnesu, zależy bezpośrednio od natężenia prądu. Oprócz tego zależy ona od odległości prądu od bieguna magnesu. Następujące proste rozumowanie posłuży nam do zrozumienia odnośnego prawa. Niechaj będzie zamknięty obwód prądu, w którym ten ostatni posiada pewne natężenie. Obwód ten otacza powierzchnię określonej wielkości. Otóż całkowita siła, jaką ten obwód prądu wywiera na biegun magnesu, jest dokładnie

tak wielką i ma dokładnie ten sam kierunek, co siła wywierana przez krótką sztabę magnesową, którą możnaby sobie wyobrazić przechodzącą prostopadle do powierzchni obwodu. Przytem długość tej wyobrażonej sztaby magnesowej (to jest odległość jej biegunów) i jej natężenie muszą tak być wymierzone, ażeby długość ta pomnożona przez natężenie bieguna północnego równała się iloczynowi z natężenia prądu i otoczonej przezeń powierzchni. *Działanie obwodu prądu jest dokładnie takie same, jak działanie w ten sposób zbudowanego magnesu.* Zasada ta o elektromagnetycznem działaniu prądu nosi nazwę *prawa Biot-Sawart'a.* Dla każdej sztaby magnesowej iloczyn z natężenia bieguna północnego i odległości biegunów oznacza się jako *moment* sztaby. Prawo Biot-Sawart'a można zatem wyrazić w sposób następujący: *Siła wywierana przez prąd na biegun magnesu jest równa sile, jaką na tenże biegun wywierałaby krótka sztaba magnesowa, przechodząca prostopadle przez powierzchnię obwodu prądu i której moment jest rowny iloczynowi z natężenia prądu i wielkości jego powierzchni.*

Z prawa tego wynika, że igła magnesowa, która może się obracać, musi starać się zająć położenie prostopadłe do powierzchni prądu. Albowiem oś przypuszczalnego magnesu, zastępującego prąd, jest wszak prostopadłą do powierzchni prądu.

Prawo Biot-Sawart'a wykazuje więc, że iloczyn z natężenia i powierzchni prądu jest równy momentowi sztaby magnesowej. Jeżeli tedy oznaczy się jednostkę dla momentu magnesów, co też uczyniono, to można z tego znaleść także jednostkę natężenia prądu. W istocie tak postąpiono i jednostka w ten sposób określona zowie się *etektromagnetyczną jednostką natężenia prądu.* Nasza jednostka, czyli amper, jest dziesięciokrotną tak znalezionej jednostki.

Na podstawie tego elektromagnetycznego działania prądu, oraz na zasadzie prawa Biot-Sawart'a, zbudowano wszystkie przyrządy, służące do mierzenia prądu, to jest busole i galwanometry.

Mówiąc wyżej o igle magnesowej przyjęliśmy, że jest ona umieszczona na osi w ten sposób, iż może się tylko obracać. Jeżeli zaś przymocujemy ją do korka, pływającego po powierzchni wody, wówczas będzie ona nietylko się obracać, lecz wykona

inne jeszcze ruchy pod wpływem prądu elektrycznego. Prąd mianowicie, podobnie jak magnes, wywiera na igłę magnesową przyciąganie i odpychanie, co występuje najwyraźniej wtedy, gdy prąd biegnie po spiralnej.

Jeżeli ruchoma sztaba magnesowa znajduje się w bliskości spiralnego przewodnika, po którym płynie prąd elektryczny, wtedy zachodzą dwa działania: popierwsze magnes stara się zająć położenie prostopadłe do płaszczyzny oddzielnych zwojów, czyli idące w kierunku osi spiralnego przewodnika; po drugie— i to właśnie działanie chcemy obecnie opisać — przewodnik ten wciąga magnes do wnętrza swego, lub też odpycha go. Widzimy więc, że przewodnik spiralny, po którym płynie prąd, czyli t. zw. *solenoid*, działa podobnie jak magnes. Każdy magnes posiada dwa bieguny, którym w solenoidzie odpowiadają dwie końcowe płaszczyzny. Koniec solenoidu skręconego na prawo, w który najprzód wchodzi prąd dodatni, zachowuje się tak samo, jak biegun południowy magnesu, koniec zaś, przez który prąd opuszcza solenoid, zachowuje się jak biegun północny magnesu. Tak np. na fig 563 lewe końce solenoidów (oznaczone +) odgrywają role biegunów południowych, prawe zaś (oznaczone —) biegunów północnych. Dla tego też solenoid I odepchnie magnes $N S$, solenoid II przyciągnie magnes $S N$, wciągnie go do wnętrza, jak widzimy na rysunku III, dopóki środek magnesu nie znajdzie się dokładnie w środku solenoidu, wówczas bowiem nastąpi równowaga, przedstawiona na rysunku IV. Jeżeli posuniemy sztabę $S N$ jeszcze bardziej na

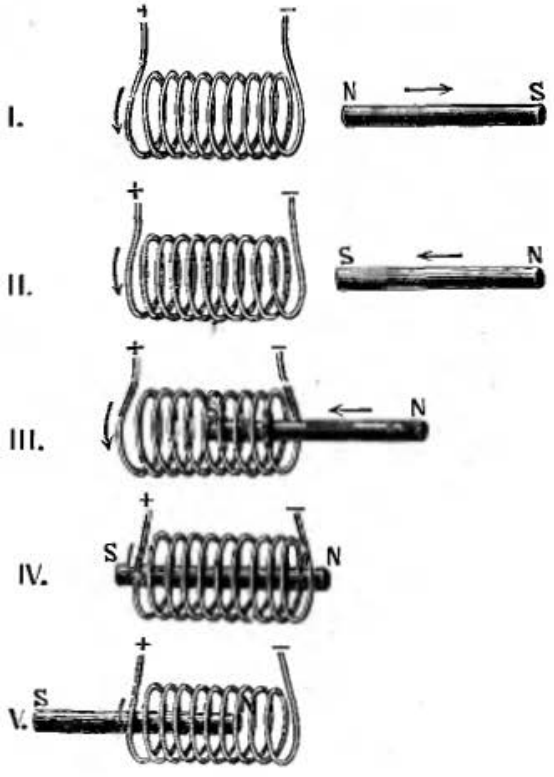


Fig. 563. Działanie solenoidów na magnes.

na lewo, jak w V, solenoid znowu wciągnie ją do środka i powtórzy się położenie IV.

Jeżeli sztaba *N S* nie jest magnesem, lecz tylko miękiem żelazem, wtedy pod wpływem solenoidu magnetyzuje się i następnie zostaje przezeń przyciągniętą, lub odepchniętą; tutaj jednak zawsze mamy wypadek II, nigdy zaś I, to znaczy że solenoid *wciąga* zawsze miękie żelazo do wnętrza, dopóki nie nastąpi położenie IV.

Ponieważ prąd galwaniczny wywiera działanie obrotowe na magnes, to można z góry przewidzieć, że przez odpowiednią kombinacyę magnesów i prądów magnes mógłby *stale obracać* się wokoło prądu. Dokładne badanie matematyczne pokazuje, że do tego potrzeba koniecznie, ażeby część przynajmniej obwodu prądu była mocno połączona z obracającym się magnesem, a więc ażeby z nim się poruszała. Otóż Faraday pierwszy istotnie zbudował przyrząd, w którym magnes obraca się stale wokoło prądu elektrycznego. Odnośne przyrządy mogą ulegać różnym zmianom i na małą skalę użyto ich do otrzymania ruchów obrotowych za pomocą elementów galwanicznych. Wszystkie te działania elektryczności na magnesy dają się sprowadzić do wzajemnego działania na siebie prądów galwanicznych.

Podobnie, jak prąd galwaniczny działa na magnes, odchylając go, lub obracając, tak też magnes działa na prąd. Ażeby się o tem przekonać, należy przedewszystkiem uczynić obwód prądu *ruchomym*. W tym celu posługujemy się przyrządem Ampere'a, przedstawionym na fig. 564. Końce przewodnika *a d c b*, odpowiednio zagięte, są zanurzone w miseczkach *x y*, napełnionych rtęcią i osadzonych na słupkach przewodzących. Jeżeli słupek *v* połączymy z jednym np. + biegunem, *t* zaś z drugim biegunem bateryi galwanicznej, będziemy mieli obwód prądu *v y a d c b x t*, którego część *a d c b* może się obracać na około pionowej osi. Na podstawce tej możemy zresztą zawieszać solenoidy i przewodniki jakichbądź kształtów. W ten sposób przekonamy się, że magnes powoduje ruch prądu, podobnie jak prąd wywoływał ruch magnesu. Jeżeli zbliżymy np. magnes do przewodnika ruchomego *a d c b*, wtedy płaszczyzna jego będzie dążyła do za-

jęcia położenia, prostopadłego do osi magnesu. Prąd taki, podobnie jak igła magnesowa, ulega sile magnetyzmu ziemskiego. Oś solenoidu, zawieszonego na przyrządzie Ampere'a, przyjmuje kierunek północno-południowy, czyli zachowuje się względem południka magnetycznego zupełnie tak samo, jak igła magnesowa. Widzieliśmy także, że jeden koniec solenoidu ma zupełnie te same własności magnetyczne, co biegun północny magnesu, drugi koniec własności te same co biegun południowy. Podobnie jak magnesy mogą obracać się wokoło prądu, tak też prądy obracają się wokoło magnesu.

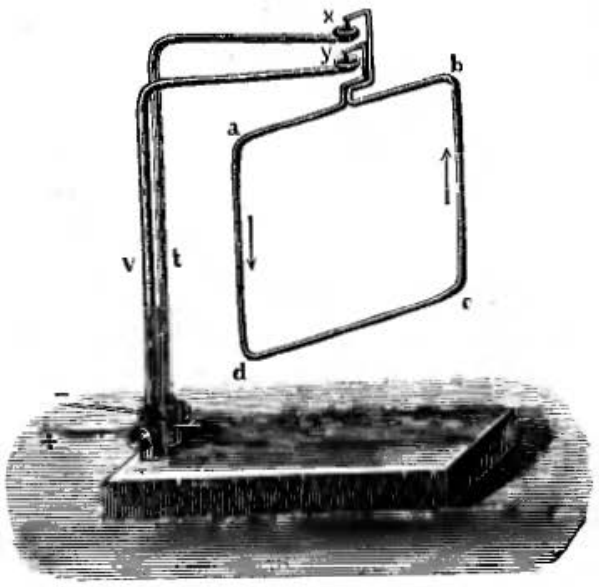


Fig. 564. Przyrząd Ampere'a

Wiemy tedy, że biegun magnesu wywiera zawsze pewną siłę na prąd galwaniczny i jeżeli obwód prądu jest ruchomy, wtedy ulega on tej sile. Na podstawie tego faktu możemy obecnie wytłómaczyć pewne uderzające zjawisko, które występuje przy elektrycznych łukach świetlnych. Łuk elektryczny nie jest wszak niczem innem, jak tylko masą ogrzanego powietrza, w którem unoszą się rozżarzone cząstki węgla i przez które płynie prąd elektryczny. Jest on więc ruchomą częścią prądu i musi ulegać działaniu magnesu, podobnie jak drut ruchomy, po którym płynie prąd. Przedewszystkiem więc elektryczny łuk świetlny musi stawać prostopadle do kierunku południka magnetycznego, jeżeli to wogóle jest możliwe bez przerwania prądu. Tak jest w rzeczy samej. Jeżeli węgle, pomiędzy któremi pojawia się łuk, są ustawione poziomo, wtedy wygina się on najprzód nieco ku górze wskutek ruchu ogrzanego powietrza, następnie zaś przyjmuje pewien kierunek pod wpływem magnetyzmu ziemskiego. Dla tego właśnie istnieje zawsze pewne małe odchyle-

nie łuku od położenia pionowego. Jeżeli zbliżymy do łuku elektrycznego bieguny magnesu, otrzymamy zawsze pewne odchylenie od pierwotnego położenia w jednym, lub drugim kierunku, zależnie od położenia bieguna względem łuku.

We wszystkich doświadczeniach, które opisaliśmy w tym paragrafie, można oczywiście stalowe magnesy zastąpić przez elektromagnesy, które powodują zupełnie te same zjawiska obrotowe i zmiany kierunku.

Działanie prądu na magnes znajduje, jak wiemy, zastosowanie w *galwanometrach*, to jest w przyrządach, służących do mierzenia natężenia prądu za pomocą jego działania magnetycznego. Najprostszym przyrządem tego rodzaju jest *busola stycznych* (fig. 528, str. 979). Otóż wiemy, że jeżeli przez koło *b* przepuścimy prąd elektryczny, igła wyjdzie z płaszczyzny koła, lecz dzięki przeciwdziałaniu magnetyzmu ziemskiego, które stara się ją zatrzymać w tej płaszczyźnie południka magnetycznego, zatrzyma się pod pewnym kątem do niej. Można dowieść, że natężenie samego prądu jest proporcyonalne do stycznej trygonometrycznej tego kąta odchylenia. Odczytawszy więc wielkość kątów odchylenia w kilku wypadkach, możemy porównać ze sobą natężenia odnośnych prądów, które przepuszczaliśmy wzdłuż drutu *b*. Zamiast pojedyńczego koła *b*, możemy wziąć cały ich szereg, a więc np. zwoje drutu izolowanego i nawiniętego na ramkę drewnianą, mającą kształt koła. Wówczas otrzymamy przy tem samem natężeniu prądu większe odchylenia igły, niż przy użyciu jednego tylko koła *b*. Igła zwykle osiąga położenie równowagi dopiero po wykonaniu mniej, lub więcej szybkich wahnięć wokoło tego położenia. Ażeby przyśpieszyć stan równowagi igły, możemy użyć małego magnesu, który obracamy przy każdym obrocie igły i który przyciąga tę ostatnią.

Busola stycznych podaje natężenie prądu w dowolnych jednostkach, zależnych od rozmiarów przyrządu. Chcąc wyrazić w amperach natężenie, wskazane przez busolę stycznych, lub przez inny jakikolwiek galwanometr, wystarcza połączyć galwanometr i woltametr w jeden obwód i przepuścić przezeń dowol-

ny prąd elektryczny. Z ilości cieczy, rozłożonej w woltametrze, możemy za pomocą odpowiednich tablic obliczyć natężenie prądu w amperach. Lecz ten sam prąd odchyla igłę galwanometru na pewien kąt. Otóż styczna trygonometryczna S tego kąta, pomnożona przez pewną, łatwo dającą się określić liczbę K również wyraża natężenie prądu w amperach (N) tak, że mamy $K \times S = N$. Liczba ta $K = \frac{N}{S}$ nazywa się *współczynnikiem redukcyi* danego galwanometru do amperów. Współczynnik ten jest oczywiście różny dla różnych przyrządów i zależy od ich rozmiarów. Musimy go tedy oznaczać dla każdej busoli oddzielnie, lecz gdy raz znajdziemy wartość tego współczynnika dla danego przyrządu, wtedy możemy za pomocą niego mierzyć natężenia prądów w amperach. Ponieważ magnetyzm ziemski zmienia się stopniowo, odchylenie zaś igły w busoli zależy odeń, przeto współczynnik redukcyi zmienia się nawet dla jednej i tej samej busoli tak, że po upływie pewnego czasu należy go nanowo oznaczać.

Ażeby magnetyzm ziemski mógł działać swobodnie, należy usuwać wszelkie żelazne przedmioty z sąsiedztwa busoli. Dla uniknięcia zaś wpływu elektromagnetycznego drutów doprowadzających prąd na igłę galwanometru, zwijamy razem każde dwa druty w kierunkach wprost przeciwnych, wówczas bowiem działania elektromagnetyczne każdej pary drutów kompensują się.

Busola stycznych nie nadaje się do mierzenia bardzo słabych prądów, gdyż czułość jej jest wtedy zbyt małą (koło b musi znajdować się zawsze w znacznej odległości od igły). Z drugiej strony nie możemy też stosować tego przyrządu do mierzenia bardzo silnych prądów, one bowiem rzucają igłą i zmieniają jej magnetyzm.

Chcąc mierzyć słabe prądy, należy zamiast jednego koła b busoli wziąć szereg takich kół, czyli zwojów, które będąc bardzo ciasno nawinięte wokoło igły, przyczyniają się do spotęgowania ogólnego wpływu prądu. Przyrządy tak zbudowane nazywamy *galwanometrami* lub *multyplikatorami*. W przyrządach tych je-

dnak pomiędzy natężeniem prądu, a odchyleniem igły magnesowej nie istnieje już tak prosty związek, jak w busoli stycznych. Możemy jednak każdym multyplikatorem mierzyć natężenia prądów, jeżeli zwoje drutów są obracalne i to niezależnie od igły. Gdy mianowicie ustawimy przyrząd tak, ażeby płaszczyzny jego zwojów i oś igły magnesowej znajdowały się w płaszczyźnie południka magnetycznego i przepuścimy prąd przez zwoje, wówczas igła się odchyli o pewien kąt i w pewnym kierunku. Jeżeli następnie obrócimy nieco zwoje w tym samym kierunku, igła odchyli się jeszcze dalej, aż wreszcie dojdziemy do takiego położenia, w którem igła będzie równoległą do płaszczyzn zwojów. W tem położeniu prąd nie może odchylić igły, gdyż magnetyzm ziemski równoważy działanie jego na nią. Inaczej mówiąc siła, z jaką prąd działa na igłę równa się wówczas czynnej składowej magnetyzmu ziemskiego. Ponieważ składowa ta jest prosto proporcyonalną do wstawy kąta odchylenia igły (i zwojów) od płaszczyzny południka magnetycznego, przeto natężenie prądu, płynącego w zwojach, jest również prosto proporcyonalne do wstawy tegoż kąta odchylenia. W ten sposób możemy zapomocą jakiegokolwiek bądź galwanometru porównywać ze sobą natężenia prądów; oznaczywszy za pomocą woltametru współczynnik redukcyi danego przyrządu, możemy następnie wyrażać natężenie każdego prądu w amperach.

Wogóle nie możemy sądzić z odchyleń bezpośrednich galwanometru (bez obracalnych zwojów) o natężeniu prądów, ponieważ nie znamy prawa, według którego tak skomplikowana masa zwojów działa na igłę magnesową. Jeżeli jednak odchylenia igły są bardzo małe, wtedy możemy przyjąć, że odchylenia te są proporcyonalne do sił działających, w naszym więc wypadku do natężenia prądu. Ograniczając się tedy do bardzo małych odchyleń igły magnesowej, możemy w rzeczy samej mierzyć natężenia prądów za pomocą galwanometrów. W celu dokładnego odczytywania tych nieznacznych odchyleń, posługujemy się małem zwierciadlem, połączonem z igłą magnesową i obserwujemy skalę, odbitą w tem zwierciadełku za pomocą lunety,

odpowiednio ustawionej. Ta sama metoda znajduje zastosowanie w elektrometrze kwadransowym, który wyżej opisaliśmy.

Jeżeli natężenie prądu, które mamy zmierzyć, jest bardzo małe, wówczas otrzymujemy też bardzo małe odchylenia. Do mierzenia zaś silniejszych prądów galwanometry te są nieodpowiednie, dają bowiem zbyt wielkie odchylenia. Chcąc jednak temu zapobiedz, należy zbudować galwanometr z przesuwalnymi zwojami drutów, przez które przepływa prąd elektryczny tak, ażeby można było dowolnie zbliżać je, lub oddalać od magnesu, wówczas bowiem nawet przy znacznem natężeniu prądu otrzymamy małe odchylenia. Galwanometr, oparty na tej zasadzie, został zbudowany przez Wiedemann'a, dla braku jednak miejsca nie możemy wdawać się w bliższy jego opis.

Ażeby galwanometr był czułym, należy możliwie osłabić wpływ magnetyzmu ziemskiego na igłę magnesową. W rzeczy samej, gdybyśmy usunęli całkowicie działanie magnetyzmu ziemskiego, wówczas już najsłabszy prąd powodowałby odchylenie igły magnesowej, która zajęłaby położenie prostopadłe do płaszczyzny, otoczonej przed prąd, a więc mielibyśmy nawet przy najsłabszym prądzie elektrycznym odchylenie, wynoszące 90 stopni. Im bardziej tedy osłabiamy wpływ magnetyzmu ziemskiego, tem większe odchylenia otrzymujemy przy słabem natężeniu prądu i tem łatwiej możemy je mierzyć. Otóż możemy znieść wpływ magnetyzmu ziemskiego za pomocą układu astatycznego, złożonego z dwóch igieł magnesowych, który opisaliśmy wyżej (patrz str. 802 fig. 459). Układ taki nie podlega działaniu magnetyzmu ziemskiego, ponieważ obie igły są ze sobą stale połączone tak, że nad biegunem północnym dolnej znajduje się biegun południowy górnej, nad południowym więc biegunem pierwszej biegun północny drugiej. Możemy osiągnąć ten sam skutek, umieszczając nad igłą, lub z boku, ruchomy magnes, który można umieszczać w dowolnej odległości od magnesu galwanometru (igły magnesowej) i pod dowolnym do niego kątem; to osłabia działanie magnetyzmu ziemskiego i pozwala osiągnąć żądany stopień astatyzmu.

§ 2. Wzajemny wpływ prądów galwanicznych. Molekularne prądy magnetyczne.

Zjawisko opisane w poprzednim paragrafie możemy, krótko mówiąc, sprowadzić do tego, że prądy galwaniczne, a raczej przewodniki, po których one płyną, zachowują się zupełnie tak samo, jak magnesy. Swobodnie zawieszony solenoid znajduje się w płaszczyźnie południka magnetycznego, podobnie jak magnes, ulega jego sile przyciągającej lub odpychającej, posiada biegun północny i południowy, przyciąga lub odpycha bieguny swobodnie zawieszonego magnesu i wreszcie magnetyzuje miękkie żelazo. Należy tedy przypuścić, że dwa solenoidy przyciągają lub odpychają się wzajemnie, podobnie jak różnoimienne, lub jednoimienne bieguny dwóch sztab magnesowych. Przypuszczenie to w rzeczy samej stwierdzono doświadczalnie i to nietylko dla solenoidów, które w każdym razie odznaczają się pewną szczególną formą, lecz wogóle dla jakichkolwiek bądź przewodników, wzdłuż których płyną prądy galwaniczne. Ampere zbadał to wzajemne oddziaływanie prądów galwanicznych, objaśnił je za pomocą genialnych doświadczeń i rozumowań i sprowadził do prostego prawa. Naukę o wzajemnym wpływie prądów galwanicznych nazywamy *elektrodynamiką*. Jednocześnie także nauka zawdzięcza Ampere'owi teoryę magnetyzmu, zwaną teoryą molekularnych prądów, zbudowaną na zasadzie podobieństwa, jakie przejawia się wielostronnie pomiędzy działaniem magnesów z jednej strony i solenoidów z drugiej. Za pomocą tej teoryi możemy wszystkie zjawiska, opisane w poprzedzającym paragrafie, przedstawić jako szczególne wypadki zjawisk elektrodynamicznych. Teorya ta pozwoli nam wniknąć głębiej w naturę zjawisk obracania się magnesów wokoło prądów i prądów wokoło magnesów.

W celu badania wzajemnego wpływu prądów galwanicznych posługujemy się przyrządem Ampere'a, który opisaliśmy już wyżej. Na załączonym rysunku (fig. 565) widzimy przewodnik stały *f g* i ruchomy *a d c b;* część przewodnika stałego jest

równoległą do *a d* i *c b*; w przewodniku ruchomym prąd płynie w kierunku *a d c b*, t. j. w kierunku strzałek. Otóż jeżeli w przewodniku *g f* prąd dodatni płynie od *g* ku *f*, czyli w tym samym kierunku, co prąd w *c b*, wówczas *g f* przyciąga *c b*,

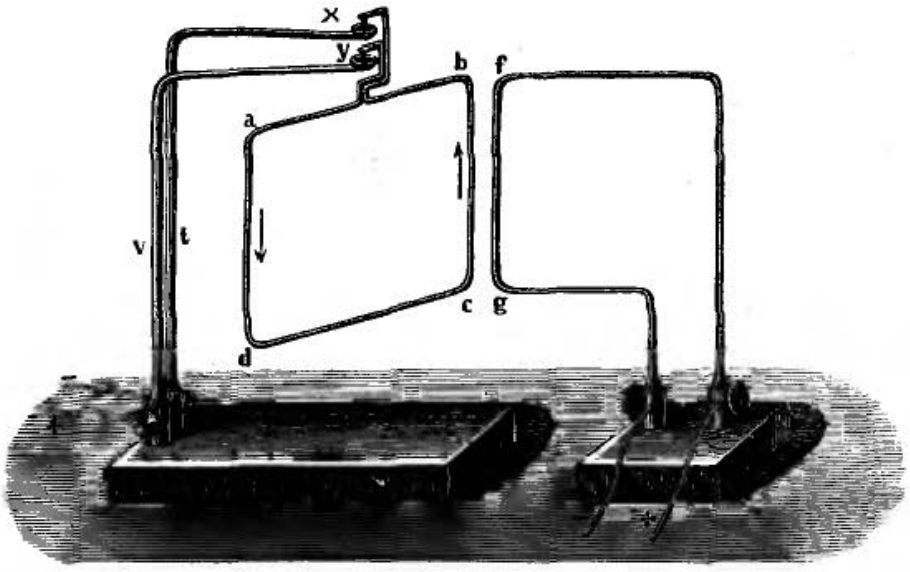


Fig. 565. Doświadczenie Ampere'a.

jeżeli natomiast prąd płynie od *f* ku *g*, t. j. w kierunku wprost przeciwnym niż w *c b*, wówczas *g f* odpycha *c b*. Podobnie zachowuje się bok *a d* przewodnika ruchomego wobec przewodnika *f g:* jeżeli kierunek prądu w *f g* jest ten sam co w *a d*, wówczas mamy przyciąganie, jeżeli jest wprost przeciwny, mamy odpychanie. Wynika z tego twierdzenie następujące:

Dwa prądy równoległe i skierowane w jedną stronę, przyciągają się, dwa zaś prądy równoległe, lecz płynące w kierunkach wprost przeciwnych, odpychają się wzajemnie.

Ponieważ taki ruchomy przewodnik, jak *a d c b* już sam przez się ulega wpływowi magnetyzmu ziemskiego i bok, w którym dodatni prąd płynie z dołu do góry, zwraca się na zachód, przeto zjawiska wzajemnego przyciągania lub odpychania dwóch prądów równoległych nie występują tutaj bardzo wyraźnie. Ażeby usunąć ów wpływ magnetyzmu ziemskiego, Ampere zbudował t. zw. *astatyczny* obwód prądu, przedstawiony na fig. 566. Drut *a b c e f d* jest tak zgięty, że zarówno w częściach ze-

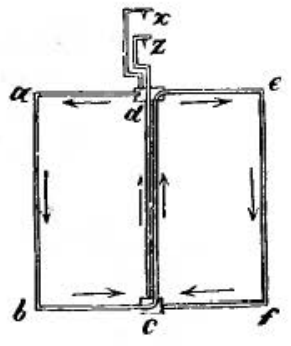


Fig. 566. Astatyczny obwód prądu.

wnętrznych *a b* i *e f*, jako też i wewnętrznych prąd płynie w tych samych kierunkach, ponieważ przy takiem urządzeniu magnetyzm ziemski działa jednakowo na każdą połowę drutu, przeto działanie jego na całkowity obwód znosi się tak, że w każdem położeniu drut zachowuje stan równowagi. Po zbliżeniu do takiego astatycznego przewodnika stałego obwodu prądu, zobaczymy bardzo wyraźnie, że prądy równoległe o kierunkach zgodnych przyciągają się, prądy równoległe o kierunkach przeciwnych odpychają się wzajemnie. Chcąc jeszcze bardziej wzmocnić to działanie elektrodynamiczne, należy pojedyńczy przewodnik stały zastąpić przez liczny szereg zwojów, w których prąd płynie w jednym kierunku.

Zbadawszy prądy *równoległe*, Ampere przeszedł do badania *prądów skrzyżowanych*. Dwa prądy skrzyżowane mogą leżeć w jednej i tej samej płaszczyźnie, jak np. na fig. 567, lub w dwóch różnych płaszczyznach, jak na fig. 568. Do obu wypadków atoli stosuje się jedno i to samo prawo. Dwa prądy skrzyżowane mają zawsze punkt przecięcia: rzeczywisty, jak punkt *f* w fig. 567, albo wyobrażony jak *r* w fig. 568. Otóż prawo, znalezione przez Ampere'a dla prądów skrzyżowanych opiewa, że:

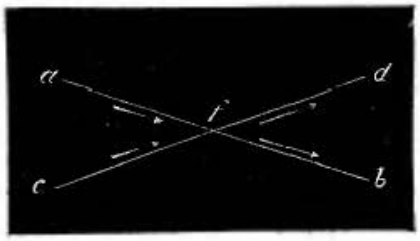


Fig. 567. Prądy skrzyżowane leżące w jednej płaszczyźnie

Dwa prądy skrzyżowane przyciągają się, jeżeli oba płyną ku punktowi skrzyżowania, lub obadwa odeń się oddalają. Jeżeli natomiast jeden prąd płynie ku temu punktowi, drugi zaś oddala się, wówczas prądy te odpychają się wzajemnie.

W wypadku np. przedstawionym na fig. 567 *a f* i *c f* jako też *f d* i *f b* przyciągają się, natomiast *a f* i *f d*, oraz *c f* i *f b* odpychają się wzajemnie, odpychanie zaś to współdziała z przyciąganiem tak, że przewodniki *a b* i *c d* zajmują wreszcie poło-

żenie równoległe. Z powyższego więc prawa wynika że:

Dwa prądy skrzyżowane dążą w każdym wypadku do położenia równoległego, w którem kierunki ich są jednakowe.

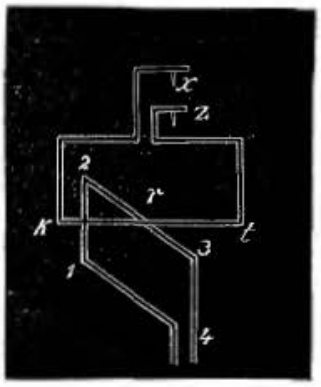


Fig. 568. Prądy skrzyżowane, leżące w różnych płaszczyznach.

Powyższe dwa prawa jakościowe o działaniu wzajemnem prądów równoległych i skrzyżowanych, prowadzą do kilku ciekawych wniosków, stwierdzonych przez doświadczenie. Jeżeli dwie części prądu *a b* i *b c* (fig. 569) spotykają się pod pewnym kątem i w jednej z nich prąd płynie ku punktowi przecięcia *b*, w drugiej zaś od tego punktu, wówczas dwie te części odpychają się wzajemnie. Wskutek tego kąt *a b c* staje się coraz bardziej rozwartym i wreszcie linie *a b* i *b c* tworzą jedną prostą, w której prąd płynie od *a* przez *b* ku *c*. Wtedy zawsze musi jeszcze mieć miejsce odpychanie pomiędzy częściami *a b* i *b c*. Skoro zaś *a b c* jest już linią prostą, wtedy możemy uważać ją jako jedną część obwodu. Z tego zaś wynika, że *oddzielne części obwodu prostolinijnego muszą się wzajemnie odpychać*. Zjawisko to oczywiście nie może występować w przewodnikach stałych np. w drutach. O słuszności jednak powyższego wniosku możemy przekonać się za pomocą przyrządu de la Rive'a, w którym druty przewodzące są zanurzone w rtęci. Naczynie, w którem ciecz ta znajduje się, jest podzielone na dwa oddziały za pomocą nieprzewodzącej przegrody. Oddziały te są połączone cienkim, łukowato zgiętym drutem miedzianym, którego końce pływają w rtęci i które odpychają się, gdy prąd płynie przez nią.

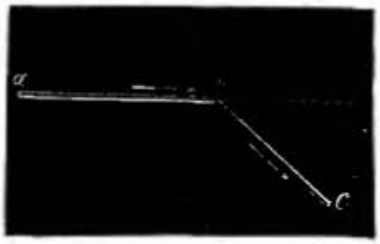


Fig. 569 Dwie części obwodu prądu tworzące kąt

Oto jeszcze jeden ważny wniosek z prawa prądów skrzyżowanych. Jeżeli *a b* (fig. 570) stanowi długą prostolinijną część prądu, który płynie w kierunku *a b*, *c d* zaś częścią innego prądu, któ-

ry płynie w kierunku od *c* ku *d*, to możemy do dwóch tych prądów skrzyżowanych zastosować prawo powyższe, uważając *r* za punkt skrzyżowania. Według tego prawa *a r* odpycha *c d*, zaś *r b* przyciąga *c d;* jeżeli tedy przewodnik *c d* jest tak umieszczony, iż może się poruszać tylko w kierunku strzałki *e*, wówczas pod wpływem prądu *a b* będzie on w rzeczy samej poruszał się w tym kierunku, t. j. zawsze równolegle do prądu *a b*. Zamiast długiego drutu prostolinijnego *a b* możemy wziąć drut, lub jakikolwiek zresztą przewodnik kolisty. Wówczas drut *c d*, odpowiednio przymocowany, musi obracać się po kole, a mianowicie w kierunku prądu *a b* lub też w kierunku wprost przeciwnym, zależnie od tego, czy prąd płynie od *c* ku *d*, czy też od *d* ku *c*.

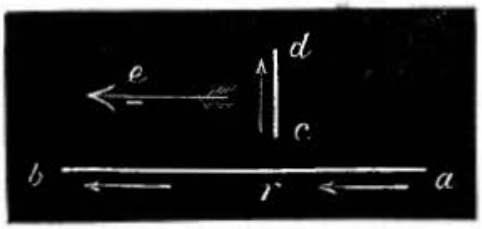


Fig. 570. Jeszcze o prądach skrzyżowanych.

Wszystkie te zjawiska, które możnaby jeszcze w różny sposób zmodyfikować, Ampere podciągnął pod jedno prawo, które nazywamy *prawem Ampere'a*. Prawo objaśnia mianowicie, jaką siłę wywiera dana mała część, czyli *element prądu* na jakikolwiek element innego prądu. Wielkość tej *siły elektrodynamicznej* zależy od wzajemnego *położenia* elementów prądu. Siła, jaką *a b* wywiera na *c d* w położeniu, oznaczonem na fig. 571 *A*, jest inną niż w położeniu oznaczonem na fig. 571 *B*. Oprócz tego siła ta zależy od wzajemnej *odległości* elementów prądu, jest ona mianowicie tem mniejszą, im większą jest ta odległość.

A Fig. 571. Wzajemny wpływ prądów. B

W końcu siła elektrodynamiczna zależy od *natężenia* prądów, płynących w częściach jednego i drugiego przewodnika: im wię-

ksze jest natężenie obu prądów, tem większe jest wzajemne działanie elektrodynamiczne. W naturze oczywiście nie mamy do czynienia z oddzielnemi częściami prądu, lecz zawsze z całym obwodem. Chcąc tedy obliczyć działanie całkowite, musimy znaleść wypadkową sił elektrodynamicznych, wywieranych przez wszystkie oddzielne elementy danych prądów.

Zupełna analogia, jaka zachodzi pomiędzy prądami, w szczególności solenoidami z jednej strony i magnesami z drugiej, naprowadziła Ampere'a na myśl, że można wytłómaczyć działanie magnesu, jeżeli będziemy go uważali za układ prądów galwanicznych. Przyjąwszy, że wokoło każdej cząsteczki żelaza płynie prąd galwaniczny, możemy w rzeczy samej wytłómaczyć wszystkie działania magnesu za pomocą działań elektrodynamicznych tych prądów, które Ampere nazywa *molekularnymi*. W zwykłem niemagnetycznem miękiem żelazie cząsteczki ze swymi prądami molekularnymi są ugrupowane całkiem bezładnie. Jeżeli pewien prąd molekularny działa na zewnątrz np. przyciągająco, to zawsze znajdzie się inny, który działa na zewnątrz z siłą równą, lecz odpychająco, czyli że żelazo, którego cząsteczki są ułożone bezładnie, nie wywiera na zewnątrz żadnego działania elektrodynamicznego: wypadkowa wszystkich sił elektrodynamicznych równa się zeru. Jeżeli zaś owiniemy to miękie żelazo drutem, po którym płynie prąd elektryczny, wówczas działa on elektrodynamicznie na każdy oddzielny prąd molekularny. Ponieważ, jak widzieliśmy wyżej, prądy skrzyżowane dążą zawsze do położenia równoległego, przeto cząsteczki ze swymi prądami molekularnymi (jeżeli mogą swobodnie się poruszać) muszą ułożyć się tak, iż prądy te osiągają jednakowy kierunek równoległy do prądu, który płynie w zwojach drutu. Na załączonym rysunku (fig. 572) widzimy przekrój sztaby z miękiego żelaza; wielka strzałka wskazuje kierunek prądu magnetyzującego; prądy zaś molekularne, podług omawianej teoryi, układają się pod wpływem tegoż prądu tak, jak wskazują strzałki mniejsze.

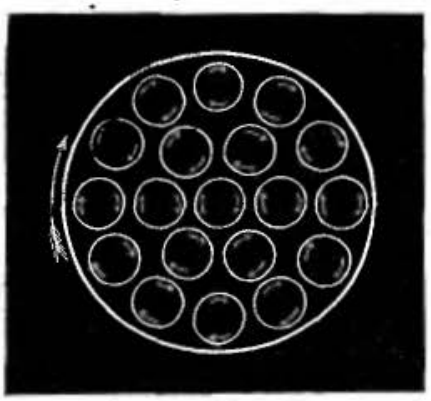


Fig. 572. Prądy molekularne.

W magnetycznym kawałku żelaza wszystkie prądy molekularne płyną równolegle w jednym i tym samym kierunku wokoło cząsteczek żelaza. W tych miejscach, gdzie dwa prądy molekularne spotykają się, mają one wprost przeciwne kierunki. Na fig. 573 widzimy dwa prądy molekularne o kierunkach jednakowych, wskutek tego właśnie w stronach AB i CD kierunki ich są wprost przeciwne, jak wskazują strzałki. Wskutek tego, działania elektrodynamiczne stron wewnętrznych we wszystkich cząstkach znoszą się wzajemnie tak, że możemy przyjąć, iż wokoło każdego magnesu płynie prąd, który jest sumą wszystkich zewnętrznych prądów molekularnych. Możemy tedy sztabę magnesową (fig 574) uważać po prostu za taką, wokoło której płynie szereg równoległych prądów galwanicznych. Otóż, patrząc na sztabę od strony S, mamy taki sam kierunek prądów w jakim obracają się strzałki zegara; patrząc zaś od strony N, widzimy, że one płyną w kierunku przeciwnym, niż wskazówki zegarowe. Chociaż tedy wszystkie prądy molekularne płyną w jednym kierunku, to na końcach sztaby magnesowej mamy kierunki przeciwne, gdy zwracamy się twarzą raz ku jednemu, drugi raz ku drugiemu jej końcowi. Jeden koniec jest biegunem północnym, drugi południowym. Widzieliśmy już przy magnetyzowaniu żelaza za pomocą prądu, że wokoło bieguna południowego prąd magnetyczny płynie w kierunku strzalek zegarowych; możemy przeto odrazu powiedzieć,

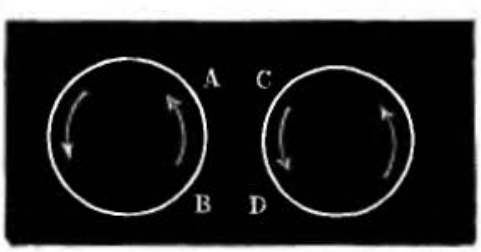


Fig. 573. Dwa prądy molekularne.

Fig 574 Sztaba magnesowa uważana jako szereg prądów galwanicznych.

że prądy molekularne, rozpatrywane ze strony bieguna południowego, mają kierunek strzałek zegara tak, jak wskazuje fig. 574, gdzie N oznacza biegun północny, S biegun południowy. Obecnie możemy już z łatwością sprowadzić wzajemne przyciąganie i odpychanie magnesów do działania elektrodynamicznego. Na fig. 575 widzimy trzy pary magnesów; strzałki

Fig. 575. Objaśnienie wzajemnego przyciągania i odpychania magnesów.

wskazują kierunki ich prądów molekularnych. Kierunki te w biegunach przyległych pierwszej pary są zgodne, drugiej i trzeciej wprost przeciwne; w I powinniśmy tedy mieć przyciąganie, w II i III natomiast odpychanie. Tak też jest w istocie: bieguny jednoimienne odpychają się, bieguny różnoimienne przyciągają się wzajemnie.

Podobnie też na podstawie powyższej teoryi staje się jasnem działanie magnesów na prądy galwaniczne i działanie prądów na magnesy. Na fig. 576 kierunki prądów w drucie spiralnym i prądów molekularnych w sztabie magnesowej $N\,S$ są wprost przeciwne i w tym wypadku mamy wzajemne odpychanie; na fig. 577 natomiast kierunki prądów są zgodne, dzięki czemu mamy przyciąganie wzajemne. Jeżeli magnes jest stale umocowany, solenoid zaś swobodny, wówczas ten ostatni porusza się; w przeciwnym zaś wypadku porusza się sztaba magnesowa. Gdy mianowicie magnes jest swobodny, jest on wciągany do wnętrza so-

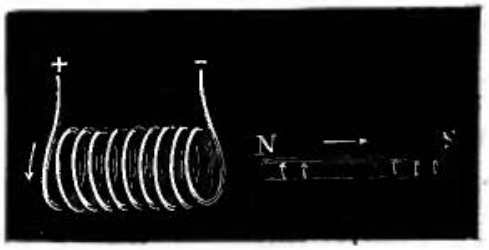


Fig. 576. Objaśnienie wzajemnego odpychania solenoidów i magnesów.

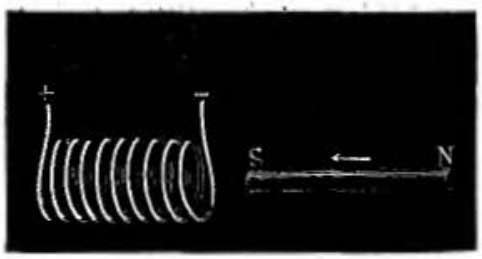


Fig. 577. Objaśnienie wzajemnego przyciągania solenoidów i magnesów.

lenoidu, dopóki środek magnesu nie znajdzie się w środku zwojów; wówczas następuje równowaga, przy jakimkolwiek bowiem dalszym ruchu, magnes wraca do tego położenia (Fig. 578).

Widzimy tedy, że różne przejawy działania magnesów na prądy i prądów na magnesy można w sposób bardzo prosty objaśnić za pomocą teoryi prądów molekularnych Ampere'a i sprowadzić do zjawisk elektrodynamicznych.

Działania prądu galwanicznego, opisane w ostatnich dwóch paragrafach, znalazły bardzo rozległe zastosowanie w praktyce; o przedmiocie tym będzie mowa w dalszym ciągu.

Przy wszystkich zbadanych przez nas działaniach prądu elektrycznego: cieplnych, świetlnych i chemicznych spotykaliśmy się z zadziwiającym faktem, a mianowicie z odwracalnością zjawisk w następującem tego słowa znaczeniu: Każde działanie wywołane przez prąd i zależne od jego kierunku, może też na odwrót wywołać prąd elektryczny. Można tedy przypuścić, że wszystkie działania opisane w niniejszym rozdziale, które wszakże w gruncie zależą od kierunku prądu, mogą wzbudzać prądy elektryczne. Widzieliśmy, że prąd elektryczny zamienia zwykłe miękkie żelazo w magnes; nasuwa się tedy pytanie, czy na odwrót magnetyzowanie żelaza nie wzbudza prądu elektrycznego? Zobaczymy, że tak jest w istocie. Widzieliśmy dalej, że prądy elektryczne poruszają magnesem; otóż przekonamy się, że można wywoływać prądy za pomocą ruchu magnesów. Widzieliśmy w końcu, że ruchomy obwód prądu porusza się, nawet obraca ustawicznie pod wpływem obwodu stałego. Otóż zobaczymy, że sam ruch obwodu galwanicznego może wzbudzić prąd w przewodniku. Krótko mówiąc, wszystkie działania dotychczas zbadane, dają się odwrócić i noszą nazwę działań indukcyjnych.

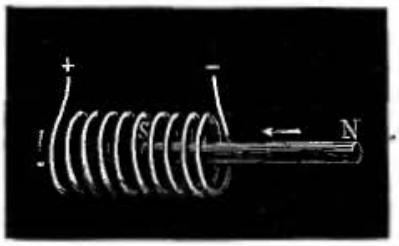


Fig. 578. Magnes w środku solenoidu.

§ 3. Prądy indukcyjne. Drgania elektryczne. Doświadczenia Hertz'a. Związek pomiędzy światłem i elektrycznością.

Faraday, którego nazwisko jaknajchlubniej jest związane z rozwojem nauki o elektryczności, nietylko odkrył ważne i ciekawe zjawiska indukcyi elektrycznej, lecz także głęboko je zbadał. Oparł się on na znanych oddawna zjawiskach elektryczności przez wpływ, polegających, jak wiemy, na tem, że sama obecność ciała naelektryzowanego wystarcza do wywołania elektryczności w ciele poprzednio nienaelektryzowanem. Otóż Faraday zastanawiał się, czy prąd płynący w danym przewodniku nie mógłby wzbudzić prądu w innym przewodniku, umieszczonym w pobliżu niego. Na pytanie to starał się on odpowiedzieć za pomocą zręcznie pomyślanych i wykonanych doświadczeń, przyczem tak genialnie prowadził swe badania, że wszystko prawie co wiemy o odnośnych zjawiskach, jest jego dziełem.

Gdy prąd elektryczny jest zamykany lub otwierany, wtedy w zamkniętym przewodniku, znajdującym się w pobliżu, powstaje zawsze momentalny prąd.

Pomimo, że oba przewodniki są zupełnie oddzielone, przy otwieraniu lub zamykaniu jednego z nich w drugim, zupełnie prądu pozbawionym, pojawia się prąd galwaniczny. Oto pierwszy rodzaj indukcyi, odkryty przez Faraday'a. Chcąc wywołać to zjawisko należy koniecznie, ażeby oba przewodniki znajdowały się nader blisko jeden od drugiego. Do tego celu najlepiej nadają się dwa puste cylindry drewniane, na które nawinięty jest drut. Mniejszy cylinder wstawia się w wydrążenie większego i w ten sposób otrzymuje się dwa druty oddzielone, lecz wzajemnie bardzo blizkie (fig. 579 *A* i *B*). Końce drutu na większym cylindrze dochodzą do klamr *a* i *b*, zaś końce drutu na mniejszym są doprowadzone do *c* i *d*. Otóż drut wewnętrzny łączy się z elementem *E*, zewnętrzny zaś z galwanoskopem *M*. Mamy tedy dwa zamknięte przewodniki i w jednym z nich (wewnętrznym) płynie prąd, drugi (zewnętrzny) jest pozbawiony prądu. Gdy prąd w drucie wewnętrznym zostaje przerwany,

że prądy molekularne, rozpatrywane ze strony bieguna południowego, mają kierunek strzałek zegara tak, jak wskazuje fig. 574, gdzie N oznacza biegun północny, S biegun południowy. Obecnie możemy już z łatwością sprowadzić wzajemne przyciąganie i odpychanie magnesów do działania elektrodynamicznego. Na fig. 575 widzimy trzy pary magnesów; strzałki

Fig. 575. Objaśnienie wzajemnego przyciągania i odpychania magnesów.

wskazują kierunki ich prądów molekularnych. Kierunki te w biegunach przyległych pierwszej pary są zgodne, drugiej i trzeciej wprost przeciwne; w I powinniśmy tedy mieć przyciąganie, w II i III natomiast odpychanie. Tak też jest w istocie: bieguny jednoimienne odpychają się, bieguny różnoimienne przyciągają się wzajemnie.

Podobnie też na podstawie powyższej teoryi staje się jasnem działanie magnesów na prądy galwaniczne i działanie prądów na magnesy. Na fig. 576 kierunki prądów w drucie spiralnym i prądów molekularnych w sztabie magnesowej $N\,S$ są wprost przeciwne i w tym wypadku mamy wzajemne odpychanie; na fig. 577 natomiast kierunki prądów są zgodne, dzięki czemu mamy przyciąganie wzajemne. Jeżeli magnes jest stale umocowany, solenoid zaś swobodny, wówczas ten ostatni porusza się; w przeciwnym zaś wypadku porusza się sztaba magnesowa. Gdy mianowicie magnes jest swobodny, jest on wciągany do wnętrza so-

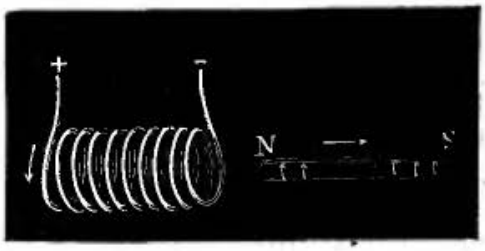


Fig. 576. Objaśnienie wzajemnego odpychania solenoidów i magnesów.

kiego drutu miedzianego, a to dlatego, ażeby prąd był w nim dostatecznie silny.

Badając zboczenia igły, wywołane przez prądy indukcyjne, przekonywamy się, że istnieje pewna różnica w kierunku zboczenia, zależna od tego, czy prąd jest otwierany, lub zamykany. Gdy prąd indukujący jest otwarty, igła zbacza w jedną stronę, gdy jest zamknięty, kierunek zboczenia jest przeciwny tamtemu. Ponieważ z kierunku zboczenia igły można sądzić o kierunku dodatniego prądu w drucie indukowanym, to znaleziono, że prąd indukowany, powstały przez *zamknięcie*, płynie w *kierunku przeciwnym*, niż prąd indukujący, że natomiast prąd indukowany, powstały przez *otwarcie* ma *ten sam kierunek* co prąd indukujący. Prąd indukujący zowie się także *głównym*, indukowany zaś *wtórnym*.

Jeżeli drut przychodzący z *p* szybko zanurzamy i wyciągamy naprzemian z naczynia z rtęcią, wtedy otrzymujemy szereg szybko następujących po sobie prądów indukcyjnych, płynących w jednym, lub w drugim kierunku. Gdy prądy takie następują po sobie bardzo szybko, wtedy noszą miano zmiennych. W tym wypadku kierunek dodatniego prądu zmienia się ustawicznie i nader prędko.

Oczywiście, że przez zanurzanie i wyjmowanie ręką drutu z rtęci nie można otrzymać bardzo szybko zmieniających się prądów indukcyjnych i dlatego zbudowano przyrządy, w których prąd indukujący *sam przez się* ulega ciągłemu zamykaniu i otwieraniu. Do najprostszych przyrządów tego rodzaju należy *przerywacz Neef'a*. Działanie jego polega na tem, że prąd indukujący biegnie wokoło kawałka miękiego żelaza, które wprowadza w stan magnetyczny. Magnes ten przyciąga kotwicę, przez co, dzięki odpowiedniemu urządzeniu, prąd zostaje przerwany i kotwica znów oswobadza się od magnesu. W podobny sposób można otrzymać prądy indukcyjne w jednym i w drugim kierunku. Takie prądy są bardzo pożyteczne np. w medycynie. W tym celu końce drutu indukowanego łączy się z dwoma mosiężnemi walcami, które osobnik podlegający elektryzowaniu trzyma w rękach. Wtedy prądy zmienne prze-

chodzą przez ciało człowieka i w pewnych razach wywołują zbawienny skutek.

Niekoniecznie jednak potrzeba zupełnie przerwać prąd, ażeby otrzymać prąd indukcyjny. *Wszelkie osłabienie, lub wzmocnienie prądu głównego powoduje prąd wtórny*, przyczem osłabienie wywiera co do kierunku taki sam wpływ, jak otwarcie, wzmocnienie zaś wywiera to samo działanie, co zamknięcie prądu indukującego.

Więcej nawet, *wystarczy bowiem przesuwać tylko jedną spiralną względem drugiej, ażeby otrzymać momentalny prąd indukcyjny.* Gdy przepuszczamy prąd przez drut indukujący, to potrzeba jedynie zbliżać go, lub oddalać od drutu indukowanego, ażeby otrzymać prąd indukcyjny. Przy takiem zbliżaniu i oddalaniu obojętną jest okoliczność, czy spiralna indukująca jest ruchomą, indukowana zaś stałą, czy też naodwrót. Gdy *zbliżamy* ku sobie druty, wtedy prąd indukcyjny płynie w przeciwnym kierunku, niż indukujący, a więc tak samo, jak przy zamknięciu prądu. *Oddalając* natomiast druty od siebie otrzymujemy prąd indukcyjny o takim samym kierunku, jak indukujący, a więc oddalanie działa tak, jak otwieranie prądu.

Przez kolejne tedy zbliżanie i oddalanie prądu możemy w danym przewodniku wytworzyć prądy o zmiennych kierunkach. Jeżeli to odbywa się bardzo szybko, te łączą się i robią wrażenie prądu nieprzerwanego. Powstają wtedy prądy zmienne. Lecz można także z łatwością wytworzyć przez indukcyę prądy o stałym kierunku. Jeżeli mianowicie połączymy drut indukujący z komutatorem tak, ażeby zawsze przy zbliżaniu drugiego drutu prąd płynął w nim w kierunku przeciwnym, aniżeli przy oddalaniu, wtedy w drucie indukowanym w obu razach powstanie prąd o tym samym kierunku. Jeżeli przytem zbliżanie i oddalanie odbywa się dostatecznie szybko, wtedy w istocie otrzymujemy w drucie indukowanym ciągły prąd o pewnym określonym kierunku.

Stosunki istniejące pomiędzy prądami galwanicznemi i magnesami, które poznaliśmy wyżej, nasuwają pytanie, czy magnesy działają tak samo indukcyjnie, jak prądy. Pytanie to prowadzi do całego szeregu zjawisk, poznanie których pozwo-

liło olbrzymio rozszerzyć zastosowania elektryczności, to znaczy, że one stanowią podstawę całej nowoczesnej elektrotechniki.

Ponieważ, według teoryi Ampere'a, magnes jest to wielka liczba prądów molekularnych o jednakowym kierunku, to oddalenie lub zbliżenie magnesu do zamkniętego przewodnika, a więc np. do drutu spiralnie skręconego, powinno wywołać momentalny prąd indukcyjny. Wniosek ten znajduje potwierdzenie w praktyce. Przy zbliżeniu magnesu *N S* do spiralnie zwiniętego drutu *A* (fig. 580), którego końce są połączone za pośrednictwem galwanoskopu *M*, powstaje w nim momentalny prąd indukcyjny i igła galwanoskopu ulega zboczeniu.

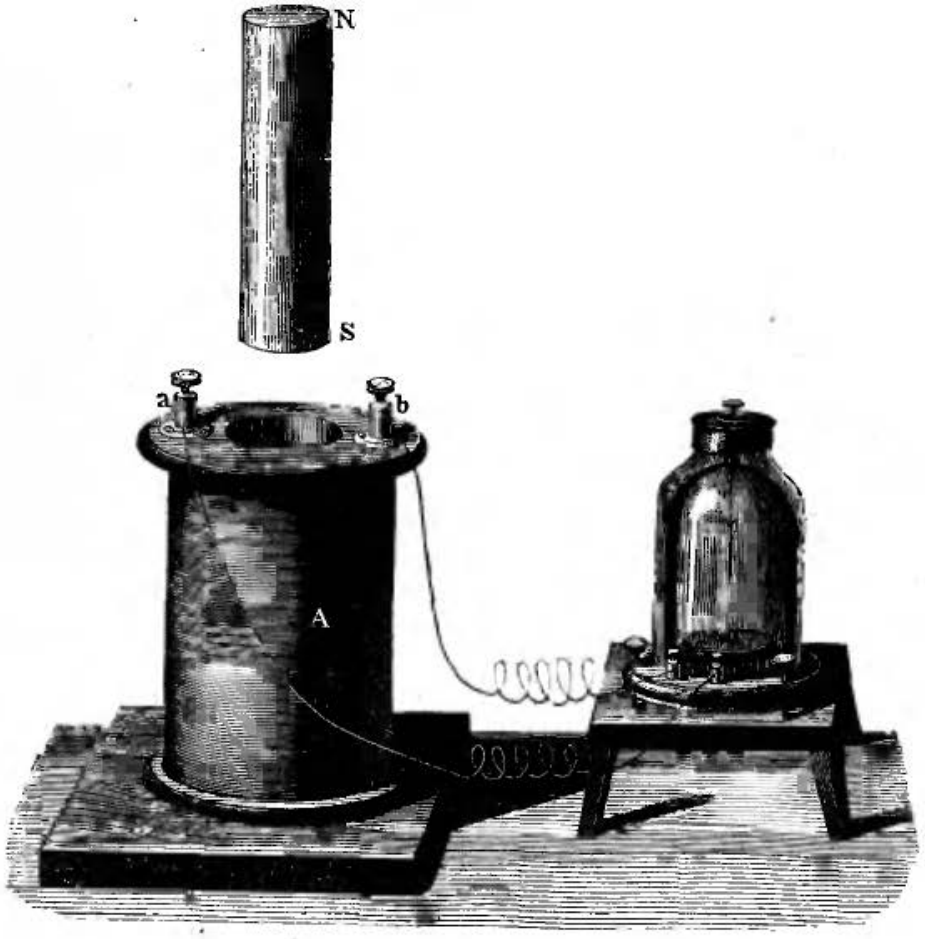


Fig. 580. Indukujące działanie magnesów.

Oddalając magnes od spiralnej, otrzymujemy znów chwilowy prąd indukcyjny, lecz biegnący w kierunku przeciwnym. Kierunek prądów indukcyjnych zrozumiemy, gdy wyobrazimy so-

bie bieg prądów molekularnych. Wokoło bieguna południowego prądy te płyną w kierunku strzałki zegara, a więc w drucie spiralnym prąd płynie przy *zbliżaniu* tegoż bieguna w kierunku przeciwnym, przy zbliżaniu zaś bieguna północnego w kierunku tym samym. Podobnie się dzieje, gdy biegun południowy lub północny jest oddalany od drutu indukowanego. Wszystkie te dane co do kierunku prądów indukcyjnych, które powstają przy zbliżaniu lub oddalaniu prądów, albo magnesów do przewodników, można ująć w jedno prawo, jeżeli weźmiemy pod uwagę przyciąganie i odpychanie, wywierane przez wzajemne działanie prądów, lub też prądów na magnesy. Prawo to można wyrazić w sposób następujący: *Za każdem poruszeniem prądu lub magnesu w bliskości przewodnika, w tym ostatnim powstaje prąd. Przytem obojętną jest okoliczność, czy prąd albo magnes porusza się względnie do przewodnika, czy też ten ostatni względnie do prądu albo magnesu. Kierunek prądu indukowanego jest zawsze taki, że dzięki wpływowi elektrodynamicznemu na prąd indukujący, lub na magnes, nadałby temuż ruch wprost przeciwny.* Gdy np. zbliżamy biegun północny, prąd indukcyjny ma taki kierunek, że starałby się odepchnąć go. Gdy natomiast biegun północny jest oddalany, prąd indukcyjny ma taki kierunek, że przyciągnąłby biegun północny. Ogólne to prawo zostało wypowiedziane przez Lenz'a i nosi też nazwę *prawa Lenz'a.*

Na podstawie tego prawa można w każdym wypadku oznaczyć kierunek prądu indukcyjnego, który został wywołany za pomocą ruchu. Na figurze 581 sztaba *N S* przedstawia magnes, przesuwany w kierunku strzałek przez spiralnie zwinięty drut. Na biegunie południowym magnesu prądy molekularne z przodu biegną z góry na dół, wskutek czego prąd w drucie przy zbliżaniu tegoż bieguna płynie z przodu z dołu do góry, jak wskazuje rysunek pierwszy. Taki sam kierunek ma jeszcze prąd indukcyjny w rysunku drugim. Lecz z chwilą gdy środek magnesu przechodzi przez spiralną, prąd zmienia kierunek, jak wskazują rysunki trzeci i czwarty. Jeżeli następnie od strony lewéj zbliża się biegun północny, wtedy kierunek prądu znów się odwraca, jak w rysunku piątym i szóstym

i w końcu, gdy środek magnesu jest wysunięty po za spiralną, mamy znów zmianę w kierunku prądu. Otrzymujemy tedy prądy indukcyjne o zmiennym kierunku, dzięki ruchowi magnesu odnośnie do przewodnika.

To daje nam sposób otrzymywania prądów elektrycznych bez uciekania się do galwanicznych elementów, lecz jedynie przez prosty ruch drutu przewodniego w blizkości magnesu, albo magnesów w bliskości drutów. Za pomocą odpowiednio urządzonego komutatora można prądy te o zmieniającym się wciąż kierunku zamienić w prąd o kierunku stałym.

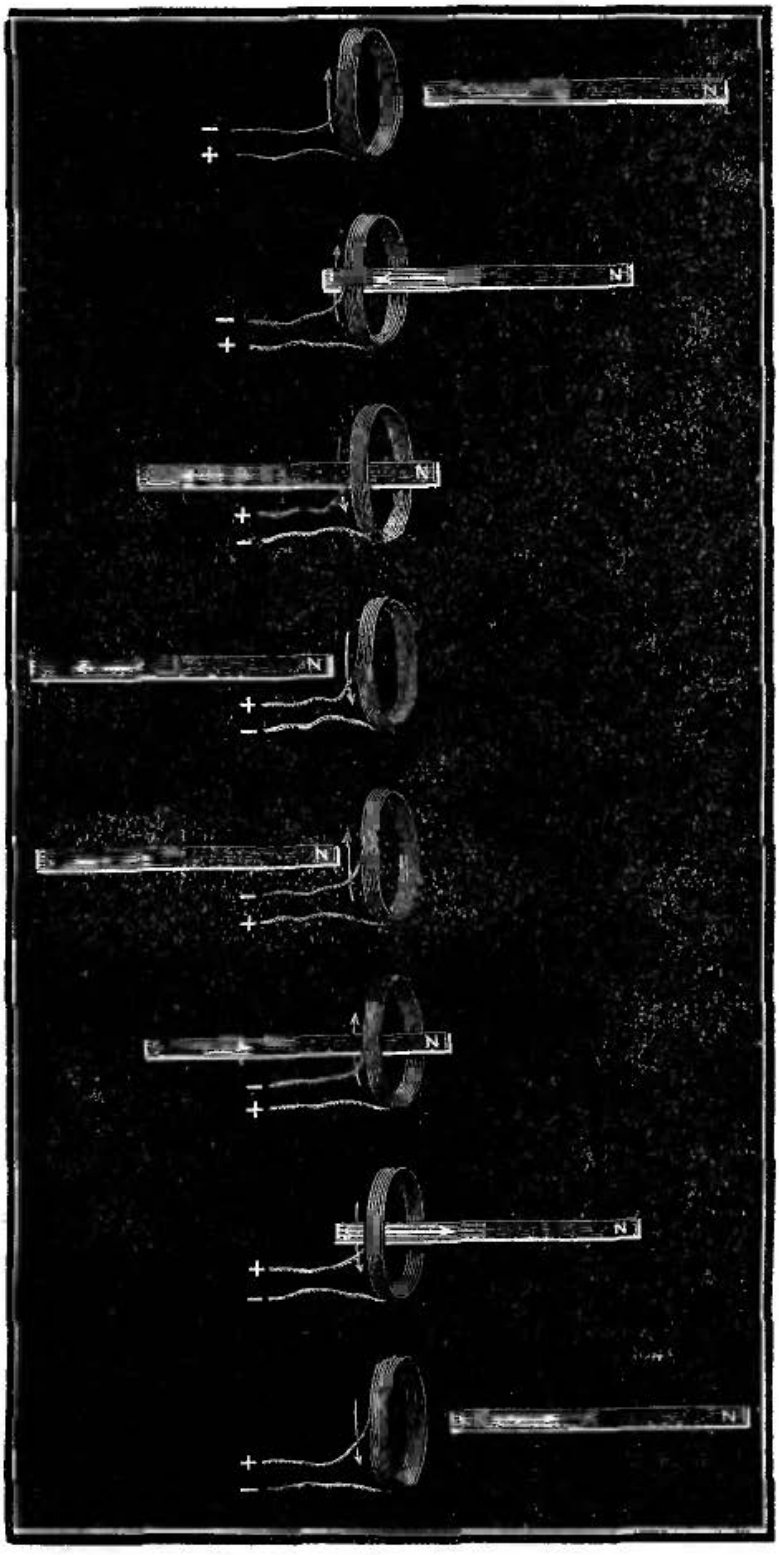
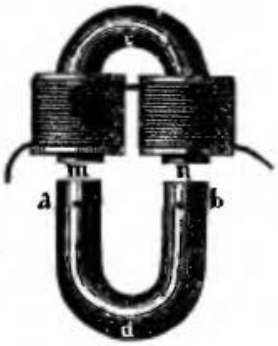


Fig. 581. Kierunek prądów indukcyjnych.

Niechaj ab (fig. 582) przedstawia magnes, którego biegun północny znajduje się w a, biegun zaś południowy w b. Jeżeli wprost każdego z biegunów

umieścimy cewkę owiniętą drutem i osadzoną na zgiętym drewnianym cylindrze, wtedy przez obracanie cewek przed biegunami magnesu można wytworzyć w nich zmienne prądy. Druty na obu cewkach są połączone ze sobą. Gdy jedna z nich oddala się od bieguna północnego, wtedy jednocześnie druga oddala się od bieguna południowego. Ażeby prądy te w drutach nie przeciwdziałały, lecz wspomagały się wzajemnie, zwoje spiralnych muszą odpowiednio przechodzić jedne w drugie. Gdy np. spiralna *a* oddala się od bieguna północnego i spiralna *b* oddala się od bieguna południowego, wtedy prądy indukcyjne w *a* płyną w kierunku przeciwnym, niż strzałka zegarowa, w *b* zaś w kierunku takim samym. W celu wzajemnego połączenia tych dwóch przeciwnych prądów nawija się drut na obu ramionach w przeciwnych kierunkach, jak pokazuje fig. 561 (patrz. wyżej), gdzie zwoje są rozciągnięte umyślnie, dla pokazania ich biegu. Figura ta pokazuje kierunek prądu w spiralnie zwiniętym drucie, oraz w zewnętrznym przewodniku *q q p p*. Gdy cewki zamieniły swe położenia względem biegunów magnesu, a więc po wykonaniu pół obrotu, powstaje w nich nowy prąd indukcyjny, lecz w przeciwnym kierunku, jeżeli bowiem z początku tak się poruszały, że np. jedna oddalała się od *a*, druga zaś od *b*, to obecnie pierwsza zbliża się do *a*, druga do *b*. A więc przy każdym pół obrocie obu cewek powstaje w nich nowy prąd indukcyjny i jeżeli one obracają się dostatecznie prędko, otrzymuje się szereg szybko po sobie następujących prądów o zmiennym kierunku.



Fig, 582. Przewodnik wobec magnesów.

To co opisaliśmy tutaj szematycznie, znalazło zastosowanie w wielu przyrządach, W tych ostatnich znajdujemy zwykle silny magnes i dwie cewki, wprawiane w szybki ruch obrotowy za pomocą koła. Końce drutu na cewkach dochodzą do dwóch odosobnionych kawałków metalu, które mogą poruszać się wraz z niemi, a więc np. do dwóch izolowanych pierścieni na osi metalicznej. Do osi tej przylegają dwie sprężyny, które są zatem

zawsze połączone z końcami spiralnego drutu i tworzą nieruchome zakończenia ruchomych drutów cewkowych. Jeżeli sprężyny owe połączymy za pomocą jakiegobądź przewodnika, to jest przyrządu lub ciała ludzkiego, wtedy przechodzą przezeń prądy, wytwarzane w ruchomych cewkach. Maszynę podobną nazywamy *magnetoelektryczną*.

Za każdym razem, gdy obydwie cewki obracają się na 90 stopni, powstaje prąd o kierunku przeciwnym, albowiem raz dodatni impuls prądu jest skierowany ku *a*, drugi raz ku *b*. Wskutek tego przez drut na cewkach przepływają prądy zmienne. Jeżeli jednak do przyrządu jest dodany komutator, który przy każdym obrocie osi na 90 stopni odwraca się, prąd zaś od cewek przechodzi najprzód przez niego, to rzecz oczywista, że wtedy po drucie pomiędzy *a* i *b* prądy muszą płynąć ustawicznie w tym samym kierunku. W przewodniku łącznym otrzymuje się tedy wielką ilość prądów o jednakowym kierunku, czyli prąd, który przy bardzo szybkim obrocie cewek nie różni się wcale od prądu stałego. W ten sposób wytwarza się prąd galwaniczny o stałym kierunku bez uciekania się do elementów galwanicznych.

Samo zużytkowanie pracy, potrzebnej do obracania cewek przed biegunami magnesu, pozwala nam tedy wytwarzać prądy elektryczne. Jak widzieliśmy wyżej, prąd taki w bateryach galwanicznych powstaje wskutek spalania się cynku, innemi słowy, energia chemiczna, jaka się wówczas pojawia, zamienia się bezpośrednio w energię elektryczną. W danym zaś wypadku energia ruchu, czyli praca zużyta na obracanie cewek, przechodzi bezpośrednio w energię elektryczną. Ten właśnie fakt stanowi potężną dźwignię dla nowoczesnej elektrotechniki i z tego źródła płyną najwspanialsze jej wyniki praktyczne.

Podobnie jak ruch, tak też wzmacnianie i osłabianie magnesu wpływają indukująco na przewodnik. Zjawisko to można już naprzód przewidzieć na podstawie teoryi Ampere'a, według której magnetyzowanie polega na ujednostajnieniu kierunku prądów molekularnych. Prądy, które poprzednio przeciwdziałały sobie, są tak skierowane, że stają się współczynne, a więc

muszą także powodować powstawanie prądów indukcyjnych. Jeżeli kawałek miękiego żelaza owiniemy drutem i będziemy je obracali przed biegunami magnesu, wtedy żelazo samo będzie się naprzemian magnetyzowało i wytworzy prąd w otaczającym je drucie. Oprócz tego istniejący już magnes wpływa także indukująco na drut i dwa te działania dodają się, lecz indukcya pochodząca od żelaza jest daleko silniejsza.

A więc wszelka zmiana w położeniu i mocy prądu galwanicznego, albo magnesu powoduje prąd indukcyjny w przewodniku, znajdującym się w pobliżu. Dotychczas przyjmowaliśmy, że zmiany te są względnie znaczne, lecz rezultat ów występuje także przy najmniejszych nawet zmianach w położeniu i sile indukujących magnesów. Najbardziej zadziwiającym i genialnie pomyślanym przykładem podobnego działania indukującego jest telefon Bell'a, który później poznamy.

Prądy indukcyjne, jakie powstają przez zamykanie i otwieranie prądu głównego, stają się o wiele silniejsze, jeżeli do głównej spiralnej wprowadzamy miękie żelazo i następnie kolejno zamykamy i otwieramy prąd. Wtedy bowiem otrzymuje się prądy indukcyjne nietylko od pojawiającego się i znikającego prądu, lecz także od magnetyzmu, który pojawia się i zanika wewnątrz drutu indukującego; prądy te wzmacniają się i czynią wpływ indukcyi o wiele potężniejszym.

Wszędzie gdzie elektryczność płynie przez drut przewodzący, musi istnieć jakaś siła elektromotryczna, powodująca właśnie ten ruch. Należy tedy zastanowić się nad siłą elektromotryczną prądu indukowanego i zbadać zależność jej od natężenia prądu głównego, czyli indukującego, od ilości zwojów głównego drutu, oraz od względnego ruchu prądów indukowanego i indukującego.

Otóż badania doświadczalne wykazały, że siła elektromotryczna prądu indukowanego jest tem większa, im większe jest natężenie prądu wzbudzającego, to jest głównego. Jeżeli zaś prąd indukowany nie powstaje pod wpływem innego prądu, lecz magnesu, wtedy jego siła elektromotryczna zależy od mocy indukującego magnesu. Ponieważ prąd wywiera takie same magnetyczne działania, jak magnes, to można oba wypadki uogólnić w sposób następujący: *im silniejszym jest wpływ główne-*

go prądu, albo magnesu, tem większą jest siła elektromotryczna w drucie indukowanym.

Dalej siła elektromotryczna prądu indukcyjnego zależy bezpośrednio od *szybkosci z jaką zmienia się moc lub położenie głównego prądu, albo magnesu.* Im prędzej magnes indukujący jest np. zbliżany, tem większa jest siła elektromotryczna prądu indukcyjnego; to samo stosuje się do obrotu cewek w maszynie magnetoelektrycznej. Lecz siła ta jest zupełnie niezależna od materyału z którego zrobionym jest drut. Oprócz tego jest ona tem większa, im szybciej główny prąd jest przerywanym.

W końcu siła elektromotryczna prądu indukowanego zależy od ilości zwojów, jaką opisuje drut indukowany. Przy innych warunkach tych samych *siła elektromotryczna prądu indukcyjnego jest tem większą, im liczniejsze są zwoje drutu indukowanego.*

Natężenie prądu indukcyjnego zależy, podług prawa Ohm'a od jego siły elektromotrycznej i od całkowitego oporu obwodu.

Przez powiększanie liczby zwojów drutu indukowanego można zatem ogromnie spotęgować siłę elektromotryczną prądów indukcyjnych i nadawać jej moc tysiąców wolt. Za pomocą prądu głównego o nieznacznej sile elektromotrycznej, równej 1 do 2 woltów, można z łatwością wytworzyć prąd wtórny o bardzo wielkiej sile elektromotrycznej. Przyrządy, służące do tego, noszą specyalnie nazwę *indukcyjnych.*

Podobny przyrząd średniej wielkości jest przedstawiony na fig. 583. Składa się on z wewnętrznego drutu spiralnie zwi-

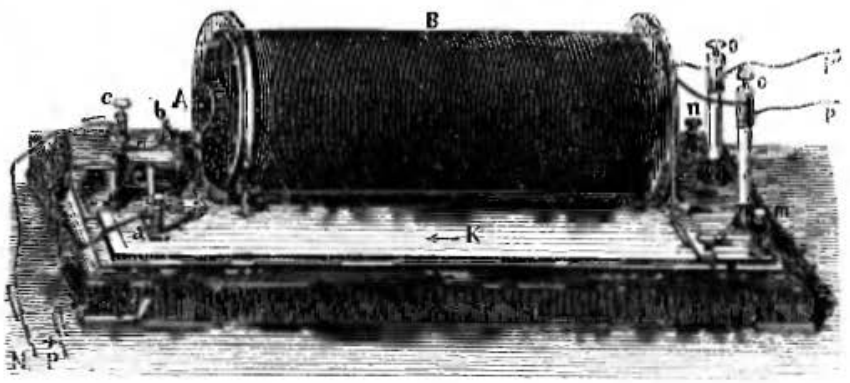


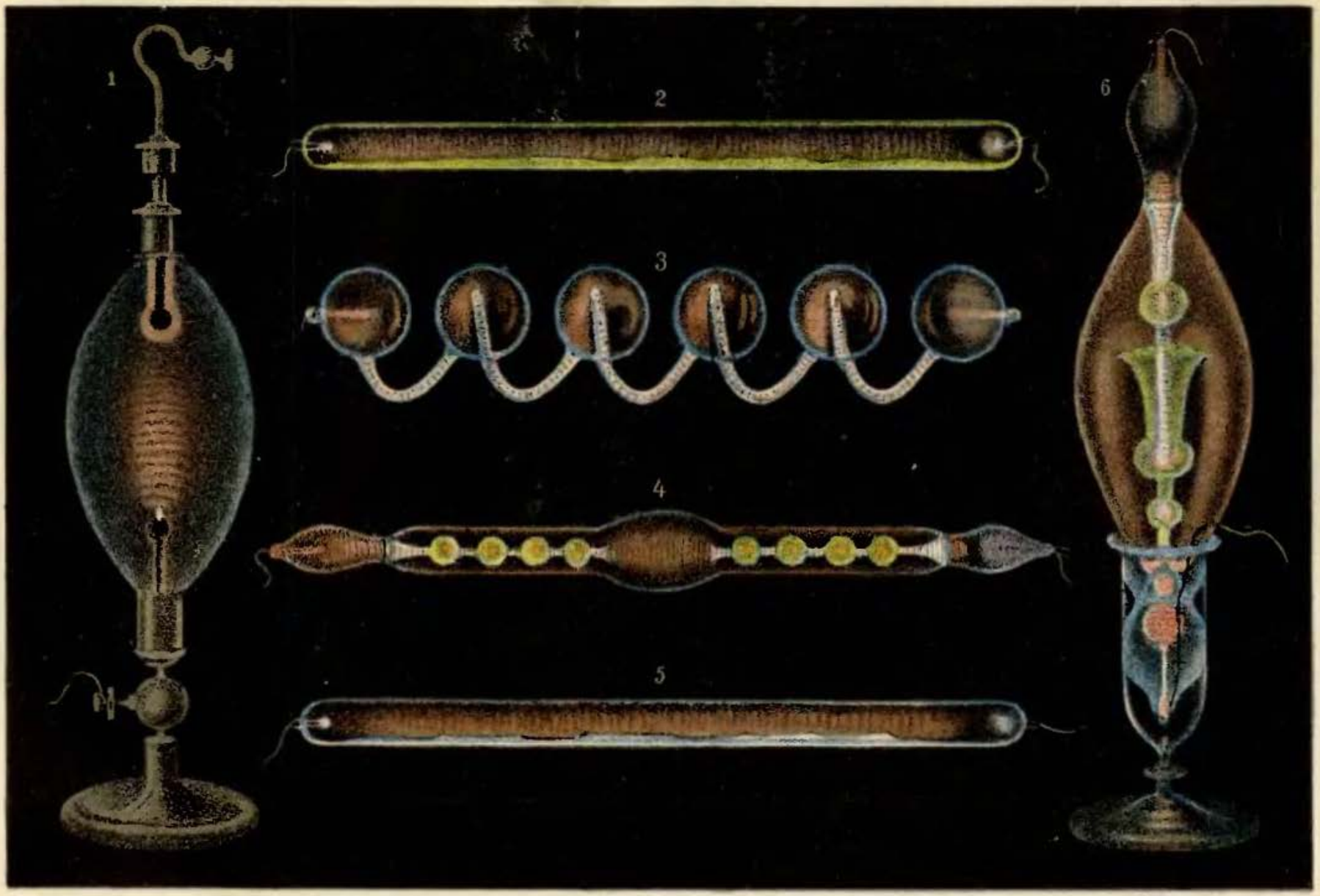
Fig. 583. Przyrząd indukcyjny.

niętego (na rysunku niewidoczny) i otaczającego wiązkę A drutów żelaznych; jest to spiralna główna. Zewnętrzny zaś drut B jest indukowany. Prąd główny biegnie od P przez komutator i przerywacz b do zewnętrznej spiralnej i powraca przez N. Prąd indukowany płynie przez p i p' do tego przewodnika, gdzie chcemy go spożytkować. W celu spotęgowania siły elektromotrycznej, to jest napięcia prądu wtórnego, drut zewnętrzny składa się z bardzo wielkiej liczby zwojów.

Ponieważ przyrządy te służą do bardzo wielu celów, przeto zbudowano je w objętości jeszcze znacznie większej. Największym z nich jest aparat indukcyjny Ruhmkorff'a, służący głównie do otrzymywania iskier elektrycznych. Bardzo cienki miedziany drut wtórny ma tutaj długość 100,000 metrów, opisuje zatem olbrzymią ilość obrotów i przez to siła elektromotryczna prądu indukcyjnego jest nadzwyczaj wielką. Wiemy jednak, że elektryczność o wysokiem napięciu musi być nader starannie izolowaną, jeżeli nie ma uledz rozproszeniu. Dlatego w przyrządzie Ruhmkorff'a i innych tego rodzaju, należy koniecznie odosobnić starannie druty, co najlepiej osiąga się przez silne okręcenie ich jedwabiem, wełną, albo kauczukiem, oraz przez umieszczenie substancyi izolującej pomiędzy oddzielnemi warstwami drutu.

Wszystkie zjawiska, do których potrzeba elektryczności o wysokiem napięciu, można doskonale wywołać za pomocą przyrządu indukcyjnego. Mieliśmy już sposobność zauważyć, że elektryczność o wielkiem naprężeniu może z łatwością przezwyciężyć opór warstwy powietrza, znajdującej się pomiędzy końcami drutu przewodniego. Elektryczność z maszyny elektrycznej przechodzi łatwo przez powietrze między elektrodami. Powstaje wtedy iskra elektryczna, albowiem napięcie elektryczności wytwarzanej w maszynie elektrycznej, jest bardzo znaczne. W przyrządach indukcyjnych elektryczność również posiada nadzwyczaj wysokie napięcie i dlatego mogą one, podobnie jak maszyny elektryczne, służyć do wytwarzania iskier. Nietylko powietrze, lecz i inne ciała izolujące, szczególniej zaś szkło, mogą być przebite przez taką elektryczność o wielkiem napięciu.

Wogóle przy zamykaniu i przerywaniu prądu głównego,



w Lit. „Zofija" S. A. Bukaty

VIII. Światło elektryczne w rozrzedzonych gazach.

1. Prążkowane światło w parach alkoholu. 2. Fosforescencyja siarku wapnia. 3. Prążkowane światło w rurce Geisslera. 4. Fluorescencyja szkła uranowego. 5. Fosforescencyja siarku strontu. 6. Fluórescencyja szkła uranowego i siarczanu chininy.

Szkoła Rolnicza
Biblioteka
Wyższa
Pleszew

powstają dwa przeciwne prądy indukcyjne tak, że oba końce wtórnego drutu stanowią naprzemian przeciwne bieguny. Lecz należy dodać, że napięcie prądu przy otwieraniu jest zawsze o wiele silniejsze, niż przy zamykaniu tak, że podczas odnośnych doświadczeń przez powietrze przechodzi zawsze tylko pierwszy. Wówczas jeden koniec drutu wtórnego jest stale biegunem dodatnim, drugi zaś stale biegunem ujemnym.

Bardzo ciekawe, lecz niezupełnie jeszcze objaśnione zjawiska powstają przy przepuszczaniu elektryczności o wysokiem napięciu przez przestrzenie, napełnione bardzo rozrzedzonem powietrzem. Nie widać wtedy przeskakujących iskier, lecz łagodne, napozór ciągłe światło zabarwione, które oświeca przestrzeń pomiędzy dwoma elektrodami (Porówn. str. 529 w księdze o świetle i patrz tablicę p. t. „Światło elektryczne w rozrzedzonych gazach“). Geissler i inni przygotowują rurki szklane, napełnione bardzo rozrzedzonem powietrzem i zaopatrzone na końcach w blaszki platynowe, do których mogą być przyczepione druty od przyrządu indukcyjnego. Te właśnie rurki służą do odnośnych doświadczeń. Zamiast rozrzedzonem powietrzem, można je także napełniać innemi gazami w stanie rozrzedzenia, a wtedy otrzymuje się odmienne zabarwienie światła.

Jeszcze piękniejszemi stają się te zjawiska, jeżeli powietrze w rurkach jest doprowadzone do stanu nadzwyczajnego rozrzedzenia, jak to uczynili Hittorf i Crookes. W takich *rurkach Crookes'a* światło rozprzestrzenia się od ujemnego elektrodu pod postacią prostolinijnych promieni i powoduje fosforescencyę ciał, na które pada.

Nie zatrzymujemy się dłużej nad temi zjawiskami, które, jak powiedzieliśmy, nie zupełnie są objaśnione i z nader wielką trudnością dają się podciągnąć pod znane nam prawa zasadnicze.

Przy wytwarzaniu prądów za pomocą przyrządów indukcyjnych przyjmowaliśmy, że główny prąd jest otwierany i zamykany przez oddzielny przerywacz. Lecz to stanowi tylko jeden z licznych sposobów wytwarzania prądów indukcyjnych. Inna szeroko stosowana metoda polega na tem, że przez główną spiralną przesyła się prądy zmienne, otrzymane np. za pomocą maszyny magneto-elektrycznej. W tym wypadku kie-

runek i siła prądu w głównym drucie zmieniają się ustawicznie, wskutek czego w spiralnej, która go otacza, muszą powstawać prądy indukcyjne. Przy nowszych zastosowaniach prądy indukcyjne są wytwarzane w taki mianowicie sposób.

Widzieliśmy, że siła elektromotryczna, napięcie prądu indukcyjnego jest tem większe, im znaczniejszą jest liczba zwojów wtórnych, oraz im większe jest natężenie prądu głównego. Z faktu tego korzystamy w celu otrzymania z głównego prądu o nieznacznem napięciu, lecz względnie wielkiej sile, prądów indukcyjnych o bardzo wysokiem napięciu i nieznacznem natężeniu. Naodwrót także można drogą indukcyi otrzymać prąd o większem natężeniu i mniejszem napięciu, niż w prądzie głównym. Jeżeli mianowicie drut, czyli obwód wtórny, składa się z nielicznych, grubych zwojów, obwód zaś główny opisuje ich bardzo wiele i jeżeli przez ten ostatni przesyłamy prąd o wielkiej sile elektromotrycznej, lecz naturalnie o nieznacznem natężeniu, wtedy stosunki w drucie wtórnym stają się wprost przeciwne. Mianowicie indukowana siła elektromotryczna staje się względnie mała dlatego, że jest bardzo mało wtórnych zwojów oraz, że natężenie prądu głównego jest nieznaczne. Natomiast prąd wtórny może stać się silnym, gdyż opór wewnętrzny jest bardzo mały, składa się bowiem z niewielu zwojów grubego drutu.

Przyrządy indukcyjne pozwalają nam więc za pomocą głównych prądów o wielkiem natężeniu i nieznacznem napięciu wytwarzać prądy wtórne o wielkiem napięciu oraz nieznacznem natężeniu i naodwrót. Wiadomo, że w prądzie elektrycznym energia wytworzona w każdej sekundzie jest równa iloczynowi z jego napięcia i natężenia. Widzimy tedy, że drogą indukcyi można energii elektrycznej prądu nadać inną postać, naturalnie bez powiększenia jej ilości. Ta przemiana energii elektrycznej o wysokiem napięciu w elektryczność o napięciu nizkiem i naodwrót daje się uskutecznić, o ile sądzić można na podstawie dotychczasowych naszych zapatrywań, jedynie z prądami zmiennymi dlatego, że przy indukcyi powstają takie właśnie prądy. Praktyczne zastosowanie przemiana ta znalazła w tak zw. transformatorach, o których później będzie mowa.

Faraday odkrył również pewien szczególnie ważny i cie-

kawy wypadek prądów indukcyjnych, którym chcemy obecnie zająć się.

Podobnie mianowicie, jak prąd galwaniczny wytwarza przy swem powstawaniu i zanikaniu prądy indukcyjne w obwodzie, znajdującym się w pobliżu, tak też powoduje on takież prądy *w swoim własnym obwodzie*. W najprostszy sposób można to wykazać za pomocą spiralnie zwiniętego drutu, przez który przepuszcza się prąd z elementu galwanicznego. Ten ostatni płynie wówczas przez zwoje leżące obok siebie równolegle. Otóż w chwili, gdy prąd zostaje przerwany, każdy zwój wytwarza prąd indukcyjny w pozostałych; to samo stosuje się do zamknięcia prądu. Takie prądy indukcyjne w samym obwodzie głównego prądu, noszą nazwę *extra-prądów*. Przy zamknięciu prądu, extra-prąd płynie w spiralnej w kierunku przeciwnym, niż prąd główny, który go wytworzył, a więc w tym wypadku główny prąd jest osłabiony przez extra-prąd. Dlatego każdy prąd przesłany do obwodu, nie osiąga odrazu całej swej mocy, lecz nabiera jej stopniowo, w każdym razie w czasie nader krótkim. Dochodzi on mianowicie do zupełnego swego natężenia dopiero po przejściu extra-prądu, powstałego przez zamknięcie. Gdy natomiast bieg prądu zostaje przerwany, wtedy powstały przytem extra-prąd płynie w tym samym kierunku co prąd pierwotny.

Siła elektromotryczna extra-prądów zależy po pierwsze, podobnie jak dla wszystkich prądów indukcyjnych, od natężenia głównego prądu i po drugie od prędkości, z jaką natężenie to zmienia się. Im szybszą i naglejszą jest ta zmiana, tem większą jest siła elektromotryczna, albo napięcie extra-prądu. Otóż przy zamknięciu prądu natężenie jego, jak wspomnieliśmy wyżej, wzrasta stopniowo i to od zera do całkowitej jego wartości. A więc zmiana natężenia nie jest wówczas nagłą, lecz stopniową i dlatego extra-prąd przy zamykaniu posiada względnie nieznaczne napięcie. Inaczej jest przy przerywaniu prądu. Właśnie w chwilę przed przerwaniem prąd posiada całkowite swe natężenie i zaraz po tem staje się ono równem zeru. Zmiana natężenia przy przerwaniu prądu jest zatem bardzo nagłą, z czego

wynika, że odnośny extra-prąd musi mieć bardzo wielkie napięcie, o wiele większe, niż extra-prąd, który powstaje przy zamknięciu prądu. Tak jest w samej rzeczy. Prąd przy przerwaniu posiada tak wysokie napięcie, że pod postacią iskry przebija warstwę powietrza, znajdującą się pomiędzy dwoma przewodnikami, oddzielenie których spowodowało przerwanie prądu.

Dalszym skutkiem tej różnicy we wzmaganiu się i osłabianiu prądu jest to, że w obwodzie wtórnym prądy, które powstają przy przerywaniu, muszą również mieć wyższe napięcie, niż prądy powstające przy zamykaniu. Albowiem zamknięcie głównego prądu odbywa się stopniowo, gdyż extra-prąd płynie mu naprzeciw, przerywanie zaś odbywa się nagle i szybko. Z tego właśnie powodu w przyrządzie indukcyjnym jedynie prądy przy przerwaniu są zdolne przebić powietrze, gdyż napięcie ich jest o wiele wyższe od napięcia prądów, które powstają przy zamknięciu.

Według tego, cośmy wyżej powiedzieli extra-prądy powstają zawsze wtedy, gdy w obwodzie zmienia się natężenie prądu. Jeżeli w obwodzie znajduje się spiralna, wtedy z powodu licznych zwojów extra-prądy stają się silne i łatwo je poznać, niemniej przeto istnieją one w każdym dowolnym przewodniku, w którym natężenie prądu ulega jakiejbądź zmianie. Należy jednak zauważyć, że *kształt przewodnika* spiralny, prosty, lub jakibądź inny wpływa na siłę elektromotryczną extra-prądu. Odnośne pytanie możnaby sformułować w taki sposób: o ile większą jest siła elektromotryczna extra-prądu w drucie skręconym spiralnie, niż w tym samym drucie wyprostowanym, jeżeli naturalnie zmiana natężenia w obu wypadkach odbywa się z jednakową szybkością? Otóż dla każdego kształtu i wielkości obwodu otrzymuje się pewną liczbę, czyli *spółczynnik samo-indukcyi* tegoż obwodu. Im większy jest ten spółczynnik dla danego przewodnika, tem silniej napięte są extra-prądy, jakie powstają w nim przy zmianie prądu głównego.

W celu możliwego osłabienia extra-prądów w przewodniku, należy jego spółczynnik samo-indukcyi, czyli samopotencyał uczynić możliwie małym. W cewce, okręconej spiralnym dru-

tem, cel ów osiąga się przez to, że drut zgina się pośrodku i nawija go tak, że obydwie jego połowy leżą zawsze obok siebie. Wtedy prąd w dwóch sąsiednich zwojach płynie zawsze w kierunku przeciwnym i dlatego extra-prądy w pojedyńczych zwojach znoszą się wzajemnie.

Ponieważ przy każdej zmianie natężenia prądu w przewodniku powstaje extra-prąd, wynika z tego, że i prądom zmiennym, płynącym w drucie, muszą towarzyszyć stale extra-prądy. Jeżeli tedy przez przewodnik, którego samo-potencyał nie jest bardzo mały, przepuszczamy prądy zmienne o pewnej określonej sile elektromotrycznej, wtedy natężenie w tym przewodniku jest mniejsze, niż tego wymaga prawo Ohm'a. W istocie bowiem nie działa wtedy sama owa siła, gdyż przeciwdziała jej istniejąca zawsze siła elektromotryczna extra-prądu. Przy tej samej więc zewnętrznej sile elektromotrycznej natężenie prądu w takim obwodzie jest mniejsze, innemi słowy wydaje się, jak gdyby opór jego przeciwko prądom zmiennym był większy, niż przeciwko prądom stałym.

Nader ważną rolę odgrywają extra-prądy *przy wyładowaniu kondensatora.* Gdy butelka lejdejska jest naładowana, wtedy na jednej ze zbroi. np. wewnętrznej, znajduje się elektryczność dodatnia, na drugiej zaś ujemna i przytem w jednakowych na obu ilościach. Otóż jeżeli obydwie zbroje łączymy za pomocą drutów, które można przesuwać i jeżeli te ostatnie zbliżamy ku sobie, wtedy dodatnia elektryczność płynie od wnętrza na zewnątrz, a więc np. w kierunku z góry na dół, butelka się wyładowuje i pomiędzy drutami przeskakuje iskra, zanim jeszcze one zetknęły się ze sobą. Wyładowanie odbywa się przez przewodniki i przez tę iskrę. Proces ten jest nader szybki, można jednak wyśledzić warunki, jakie zachodzą w tym krótkim czasie. Na obydwóch zbrojach butelki istnieje wszak pewna określona różnica potencyału, która według prawa Ohm'a pcha elektryczność przez druty i powietrze. Przez to ilości elektryczności na zbrojach zmniejszają się, albowiem wyrównywują się wskutek prądu i różnica potencyału na obu zbrojach maleje. Siła elektromotryczna wprawiająca w ruch elektry-

czność jest w następujących po sobie odstępach czasu coraz mniejszą i dlatego przy wyładowaniu takiej butelki, natężenie prądu zmniejsza się szybko w nadzwyczaj krótkim czasie, począwszy od pewnej najwyższej wartości. Ponieważ przy każdej zmianie natężenia prądu w przewodniku powstają extra-prądy, przeto muszą one także działać przy podobnem wyładowaniu butelki. W chwili, gdy rozpoczyna się prąd wyładowujący, pojawia się także extra-prąd o kierunku przeciwnym, niż kierunek tamtego tak, że gdy pierwszy płynie od zbroi wewnętrznej ku zewnętrznej, drugi płynie odwrotnie. Otóż właściwy prąd słabnie tak szybko, że ów extra-prąd przeważa i gdy w pierwszej chwili elektryczność płynie np. z góry na dół, to wkrótce potem sunie z dołu do góry. Lecz extra-prąd również słabnie wkrótce i powstaje nowy extra-prąd, który znów płynie z góry na dół i przeważa pierwszy extra-prąd tak, że elektryczność płynie ponownie z dołu do góry i tak dalej. Prąd wyładowujący nie płynie tedy, jakby właściwie należało sądzić, bezpośrednio od zbroi wewnętrznej ku zewnętrznej, lecz wskutek działania extra-prądów sunie naprzemian od pierwszej do drugiej, następnie od drugiej do pierwszej, dalej od pierwszej, do drugiej i t. p.

Krótko mówiąc, otrzymuje się *wyładowanie oscylujące*, powstają *drgania elektryczne*. Ażeby one mogły pojawić się, każdorazowe extra-prądy muszą być o tyle silne, ażeby były w stanie przezwyciężyć poprzedzające prądy. Innemi słowy odnośne zjawisko występuje wtedy, gdy samopotencyał przewodnika posiada co najmniej pewną określoną wartość, zależną od oporu całego obwodu i pojemności butelki lejdejskiej. Lecz gdy warunek ten istnieje, wtedy butelka lub kondensator rzeczywiście wyładowuje się w sposób drgający. W pewnych odstępach czasu szybko, następujących po sobie, kierunek prądu pomiędzy obydwiema zbrojami odwraca się. Czas jaki upływa pomiędzy dwoma odwróceniami prądu zowie się *peryodem jednej oscylacyi*. Fakt ten poraz pierwszy zaobserwował Feddersen przy wyładowaniu butelki lejdejskiej; udało mu się nawet wymierzyć peryod takich oscylacyj tak, że znalazł np. jeden, równy miliono-

wej części sekundy. W tak krótkim czasie elektryczność przy tych wyładowaniach porusza się tam i napowrót. Również Kirchhof, opierając się na rozumowaniach teoretycznych, obliczył peryod tych drgań, który zależy od pojemności i samopotencyału danego przewodnika.

Podobne wyładowania drgające występują w przyrządach indukcyjnych, gdzie pomiędzy wtórnemi biegunami przeskakują iskry. Ponieważ jednak samopotencyał takich przyrządów jest o wiele większy, niż w jednym kondensatorze, przeto i peryod wyładowań jest o wiele dłuższy. W takich otwartych przyrządach indukcyjnych wyładowanie w jedną i w drugą stronę trwa około jednej dziesięciotysiącznej części sekundy.

Takież drgania muszą występować za każdym razem, gdy ma miejsce wyładowanie pomiędzy dwoma naładowanemi przewodnikami. Lecz peryod tych oscylacyj jest tem mniejszy, im nieznaczniejszą jest pojemność i samopotencyał tych przewodników. Jeżeli np. przewodnik a_1 A a (fig. 584) jest naładowany dodatnio, przewodnik zaś b_1 B b ujemnie, wtedy pomiędzy a i b ma miejsce wyładowanie oscylacyjne.

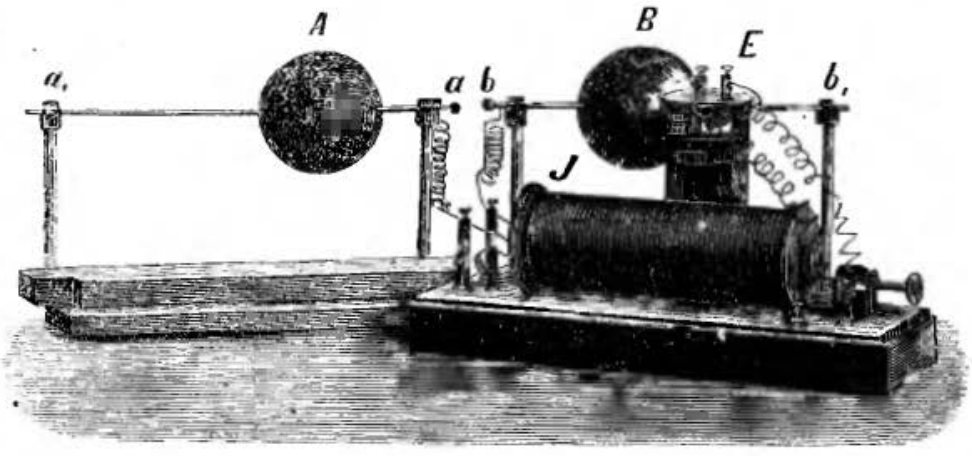


Fig. 584. Wyładowanie oscylacyjne.

Gdy więc za pomocą drutów łączymy wtórne bieguny przyrządu indukcyjnego I z dwoma prostemi przewodnikami a a_1 i b b_1 pomiędzy któremi znajduje się niewielka warstwa powietrza, wtedy między kulkami a i b przeskakują oddzielne iskry wyładowujące. Lecz i tutaj również każda iskra jest oscylacyj-

ną. Wyładowanie zachodzi w sposób drgający, a ponieważ samopotencyał i pojemność tych prostolinijnych przewodników z ich kulkami są bardzo małe, to i czas trwania jednej oscylacyi jest nader nieznaczny. Mógłby on nawet wypaść zbyt małym i dlatego powiększa się pojemność tych przewodników przez dodanie metalowych kul A i B. W takich przyrządach czas trwania jednej oscylacyi dochodzi do stu milionowych części sekundy. Proces wyładowania w takim przyrządzie należy wyobrazić sobie w sposób następujący: Przy otwarciu głównego prądu w I powstaje bodziec indukcyjny, który ładuje przewodnik $a\ A\ a_1$ np. dodatnio, przewodnik zaś $b\ B\ b_1$ ujemnie. Te dwie przeciwne elektryczności łączą się zaraz poprzez warstwę powietrza, znajdującą się pomiędzy a i b, lecz wskutek działania extra-prądu elektryczność sunie peryodycznie tam i napowrót tak, że w całym prostolinijnym przewodniku od a_1 do b_1 mają miejsce prostolinijne drgania. Wyładowanie między a i b nie odbywa się wcale przez metalowy drut przyrządu indukcyjnego, gdyż ten posiada zbyt wielki samopotencyał, lecz właśnie przez warstwę powietrza. Drgania te, które jak powiedzieliśmy następują po sobie w odstępach czasu, równych około stom milionowym sekundy, zachodzą przy każdem oddzielnem otwarciu prądu. Nie istnieją one już wcale wtedy, gdy wskutek powtórnego otwarcia głównej cewki powstaje nowy prąd ku a i b, który na nowo ładuje A i B; wyładowanie jest znów drgające i t. d.

Otóż te nadzwyczaj szybkie drgania elektryczne nabrały olbrzymiego znaczenia dzięki najnowszym doświadczeniom Hertz'a, które ogromnie rozszerzyły obszar elektrodynamiki.

Dawniej już zadawano sobie pytanie, czy przeniesienie się działania indukcyjnego od głównego przewodnika np. A do wtórnego B wymaga pewnego czasu, któryby można zmierzyć, innemi słowy, czy posiada ono jakąś *szybkość rozprzestrzeniania się*. Jeżeliby tak było, to działanie indukcyjne, rozchodzące się od przewodnika A do różnych przewodników B, umieszczonych w niejednakowej od A odległości, musiałoby ich dosięgać w rozmaitym czasie? Lecz pytania tego nie można było rozstrzygnąć

na drodze doświadczalnej, pomimo wszelkiego prawdopodobieństwa, że odpowiedź będzie twierdzącą. Albowiem gdyby szybkość ta wynosiła np. 10 milionów metrów na sekundę i gdyby nawet można było za pomocą subtelnych metod mierzenia czasu dokładnie zmierzyć $^1/_{10000}$ sekundy, wtedy wtórny przewodnik musiałby znajdowac się w odległości 1000 metrów od głównego, ażeby upłynął pewien wymierny czas pomiędzy otwarciem głównego prądu i pojawieniem się prądu wtórnego. Lecz przy takich odległościach działania indukcyjne, nawet przy użyciu naszych najdelikatniejszych przyrządów, nie mogą już być poznane, innemi słowy szybkość rozprzestrzeniania się działań indukcyjnych nie daje się określić za pomocą takich bezpośrednich pomiarów.

Otóż zadanie to staje się możliwem wobec istnienia drgań elektrycznych. Jeżeli w głównym przewodniku prąd odwraca się co każdą milionową część sekundy, wtedy przy powyższem przypuszczeniu o szybkości roprzestrzeniania już w odległości 10 metrów od głównego przewodnika dałoby się zauważyć pewne opóźnienie wpływu indukcyi. Gdy np. prąd w głównym przewodniku płynie z początku z góry na dół, wtedy odpowiedni prąd indukcyjny w przewodniku wtórnym, oddalonym od tamtego o 10 metrów, zacznie się po upływie jednej milionowej części sekundy, lecz tymczasem kierunek głównego prądu znów ulega odwróceniu. W przewodniku oddalonym o 20 metrów odwrócenia miałyby znów miejsce jednocześnie i w tym samym kierunku co w przewodniku głównym, w drucie oddalonym o 30 metrów nastąpiłoby znów opóźnienie i t. d. Innemi słowy, jeżeli wogóle działanie indukcyjne potrzebuje czasu do rozprzestrzenienia, to przenoszenie się sił takich elektrycznych drgań od głównego przewodnika musi odbywać się w sposób *falowy*.

Jeżeli np. główne drganie w $A\,B$ (fig. 585) trwa już od pewnego czasu i w danej chwili prąd w $A\,B$ płynie od A do B, to w tym samym momencie w punkcie β, oddalonym o 10 metrów, prąd indukcyjny musi płynąć w kierunku przeciwnym od β do β, w punkcie zaś δ oddalonym o 20 metrów płynie znów jak w $A\,B$,

to jest od δ do δ. Pomiędzy temi punktami muszą znajdować się takie, jak α, γ, ε, gdzie w tym samym momencie wcale nie płynie prąd, a więc które znajdują się wtedy w spoczynku. Gdyby w tym momencie w miejscach $\alpha\ \beta\ \gamma\ \delta\ \varepsilon$ i t. d. umie-

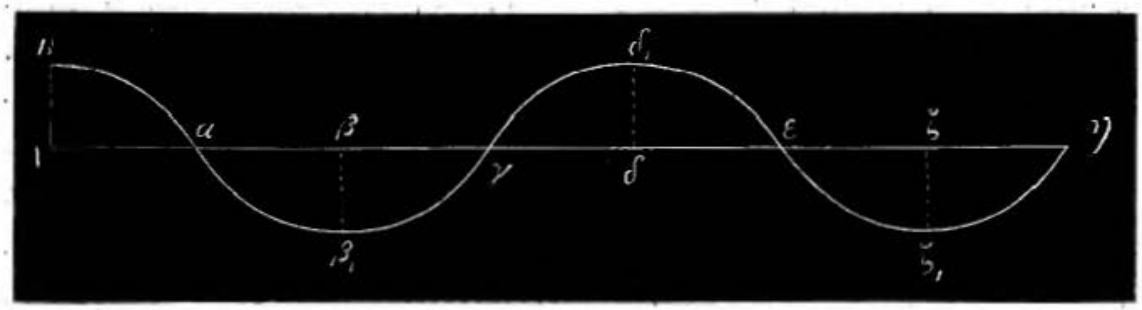


Fig. 585. Fala elektryczna.

szczono wtórne przewodniki, możnaby wtedy zauważyć, że w β i ζ prąd płynie z góry na dół, w δ z dołu do góry, podczas gdy po środku między niemi wcale nie ma prądu.

W podobny jednak sposób nie można urządzać doświadczeń. Lecz za to, jeżeli całe to rozumowanie jest słuszne, można posunąć się o krok dalej i wnioskować w sposób następujący. Jeżeli ruch falowy rozchodzi się od głównego przewodnika do przegrody metalicznej, wtedy fale elektryczne muszą także od tej ostatniej powrócić przez powietrze tak, jak pobiegły w tę stronę, wskutek czego tworzą się *fale stojące*. Wówczas od głównego przewodnika w A biegnie fala do przegrody MN (fig. 586) i tę falę oznaczamy linią $B\ \gamma\ \varsigma_1\ \beta\ \varepsilon\ \alpha\ \delta_1$. Od prze-

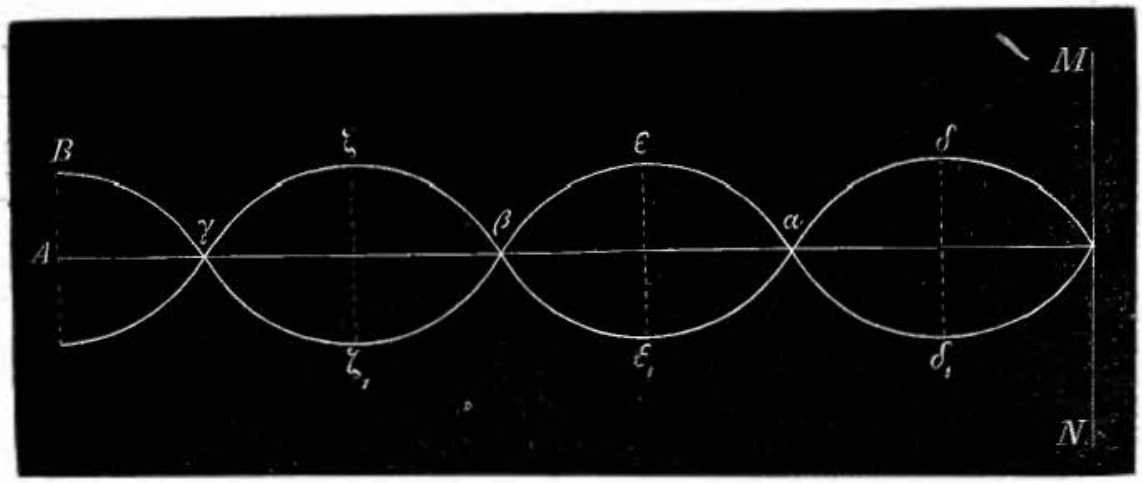


Fig. 586. Fale stojące.

grody zaś powraca fala do *A* i tę oznaczamy linią $\delta\ \alpha\ \varepsilon_1\ \beta\ \varsigma\ \gamma$. Pomiędzy głównym przewodnikiem i przegrodą istnieją więc stojące fale siły elektrycznej, innemi słowy, w niektórych punktach zwanych *węzłowemi* nie ma wcale działania elektrycznego, jak np. w α, β, γ; w innych miejscach, czyli w *brzuszkach* δ ε ς i na początku siła elektryczna jest największa. Dalej od węzła do brzuszka wzmaga się ona, od brzuszka zaś do następnego węzła znów maleje.

Otóż czy istotnie doświadczenie wykazuje podobne rozmieszczenie elektrycznej siły? Pytanie to mogło być roztrzygnięte przedewszystkiem za pomocą czegoś, coby wskazywało istnienie i moc siły indukcyjnej w przestrzeni pomiędzy głównym przewodnikiem a przegrodą. Środek ten znalazł Hertz. W miejscach, gdzie chciał obserwować elektryczność, umieszczał on wtórny przewodnik z niewielką warstwą powietrza. Przewodnik ten może być prostolinijny, lub innego dowolnego kształtu; figura 587 przedstawia jeden z nich. Jest to kolisty drut *S S*, w jednem miejscu przerwany i umieszczony na drewnianej podstawie. Naprzeciwko zaokrąglonego kawałka metalu *b* znajduje się delikatne ostrze *a*, które można zbliżać, lub oddalać od *b*. W podobnym przewodniku powstają również przez indukcyę drgania elektryczne, objawiające się iskierkami, przeskakującemi pomiędzy *b* i *a*. Przytem wielkość tych iskierek, to jest odległość od *b* do *a*, przy której przeskakują jeszcze iskry, daje miarę działającej siły elektrycznej.

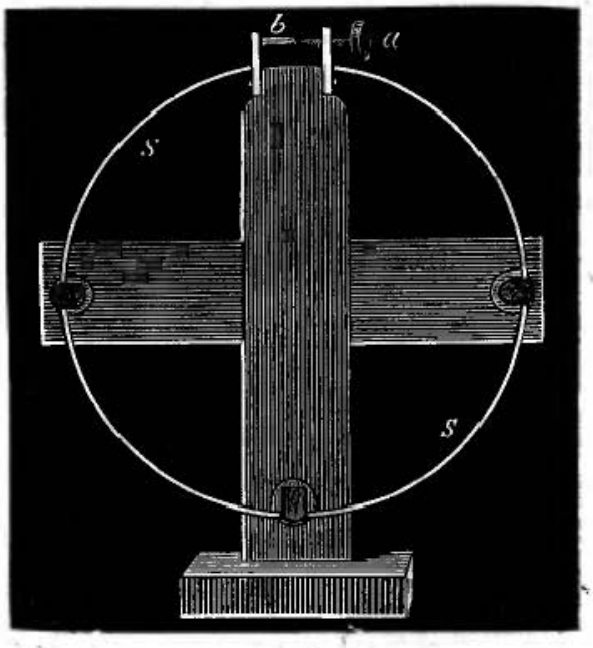


Fig. 587. Przewodnik do badania fal elektrycznych.

Za pomocą takiego wtórnego przewodnika można zbadać, czy pomiędz ymiejscem głównego drgania i przegrodą przewodzącą rzeczywiście istnieją stojące fale

siły elektrycznej. Doświadczenia Hertz'a dowiodły tego w sposób niewątpliwy. Umieścił on główny przewodnik (patrz figurę 584) w odległości 13 metrów od przegrody tak, ażeby druty prostolinijne stały pionowo, czyli, że drgania elektryczne odbywały się w kierunku pionowym do góry i na dół. Przegroda była tylko w części metalową. Według przypuszczenia tedy ruch falowy szedł od przewodnika do przegrody i od tej ostatniej z powrotem. W przestrzeni tej utworzyły się stojące fale. Otóż umieszczał on tylko co opisany przewodnik tak, że istniejące w danem miejscu przestrzeni siły musiały wywołać w nim drgania elektryczne. Niechaj *A M* (fig. 588) wyobraża przegrodę przewodzącą, Podziałki wskazują bezpośrednio rzeczywiste odległości podczas tego doświadczenia. W pobliżu przegrody przy *A* wtórny przewodnik nie pokazywał wcale iskier. Po oddaleniu go od przegrody wystąpiły iskry i stawały się co-

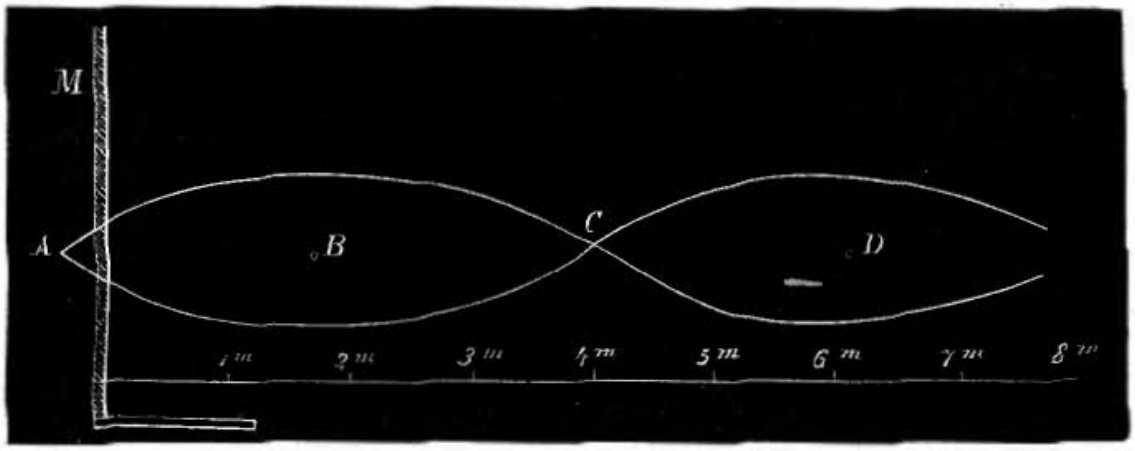


Fig. 588. Fale stojące.

raz silniejszemi, dopóki wtórny przewodnik nie doszedł do miejsca *B*, leżącego na odległości coś około 1,72 metr. od przegrody. Przy dalszem posuwaniu siła i długość iskier poczęła znów maleć, aż do punktu *C* w odległości 4,12 metr. od przegrody, w którym to punkcie znikły prawie zupełnie. Jeszcze przy dalszem przesuwaniu od *C* iskry znów wzmagały się i w punkcie *D*, leżącym w odległości 6,5 metr., osiągnęłyby swe maximum, gdyby nie blizkość tamże głównego przewodnika, który powodował pewne nieprawidłowości.

Doświadczenie to pokazuje bezpośrednio falowe rozchodzenie się siły elektrycznej, dowodzi bowiem istnienia stojących fal, utworzonych przez fale biegnące tam i napowrót. Prócz skonstatowania tego faktu, można z doświadczenia tego oznaczyć także *szybkość rozprzestrzeniania* się siły elektrycznej. W punkcie B mamy brzuszek, w punkcie C węzeł elektrycznej stojącej fali. Odległość pomiędzy B i C wynosi 2,4 metr., a więc długość jednej stojącej fali, licząc od węzła do węzła, jest równa 4,8 metr. Otóż z figury 586 widzimy, że jedna całkowita, biegnąca naprzód fala tworzy zawsze przy odbiciu dwie całkowite fale stojące. Mianowicie długość $\gamma\,\alpha$ jest to jedna fala postępowa i na tej długości znajdują się dwie całe fale stojące $\gamma\,\beta$ i $\beta\,\alpha$. W naszem doświadczeniu długość jednej fali postępowej wynosi 9,6 metr. Do tego potrzeba jeszcze tylko znać czas trwania oscylacyi danych fal, ażeby módz obliczyć szybkość rozprzestrzeniania. Otóż czas trwania dla głównych drgań, który można obliczyć z wymiarów przyrządu, wynosi około 3,1 sto milionowych sekundy, z czego wynika, że:

$$\text{szybkość rozprzestrzeniania fal elektr.} = \frac{9{,}6 \text{ metr.}}{3{,}1 \text{ stomilionowych sek.}}$$

czyli, że równa ona 310000 kilometrów na sekundę.

Rezultat ten ma nadzwyczaj ważne znaczenie, albowiem szybkość ta jest identyczna z tą, z jaką światło rozchodzi się w przestrzeni. Fale elektrodynamiczne (indukcyjne) przebiegają przestrzeń z tą samą prędkością, co i fale świetlne. Ponieważ z wielkiej szybkości światła wywnioskowano, że materya, czyli eter, przez który one biegną, jest nadzwyczaj subtelny i elastyczny, to musimy także przyjąć, że i fale elektrodynamiczne rozprzestrzeniają się za pośrednictwem eteru. Możemy nawet iść dalej i powiedzieć, że fale świetlne i elektrodynamiczne są jednem i tem samem, a mianowicie drganiem eteru, lecz niejednakowo. Świetlne fale, działające na nasze oko, mają długość równą 4 do 7,5 dziesięciotysięcznych milimetra, zależnie od barwy. Dłuższe fale, mające od 1 do 2 tysiącznych milimetra, działają jeszcze jako cieplne na delikatne przyrządy. Fale elektrodynamiczne są wprawdzie o wiele większe, gdyż długość ich wynosi kilka centymetrów lub metrów,

lecz jest to tylko różnica ilościowa. Podobnie czas drgania dla fal elektrodynamicznych wyraża się w setkach lub tysiącach milionowych części sekundy, dla fal zaś świetlnych jest on o wiele krótszy, wynosi bowiem bilionowe części sekundy. Możnaby więc na podstawie powyższych doświadczeń powiedzieć, że fale elektrodynamiczne o nader nieznacznym peryodzie drgań przedstawiają się nam jako fale świetlne i naodwrót fale świetlne o względnie bardzo długim peryodzie drgań nie są dla nas już światłem, lecz objawiają się pod postacią działań elektrodynamicznych, czyli indukcyjnych.

Jeżeli całe to rozumowanie jest słuszne, to fale elektrodynamiczne powinny wywoływać takie same zjawiska, co i fale świetlne. Również i ten wniosek został dowiedziony przez Hertz'a na drodze doświadczalnej. Fale rozchodzą się w przestrzeni od głównego przewodnika i rzecz naturalna, że w pewnej odległości są osłabione. Lecz gdy główny przewodnik jest umieszczony w ognisku wklęsłego zwierciadła, wtedy fale nie mogą rozpraszać się we wszystkich kierunkach i biegną bardziej skupione wzdłuż osi zwierciadła. Otóż Hertz umieścił proste druty $A\,a$ i $B\,b$ od głównego przewodnika (fig. 589) na linii ogniskowej metalowego zwierciadła S_1. Druty przewodnie

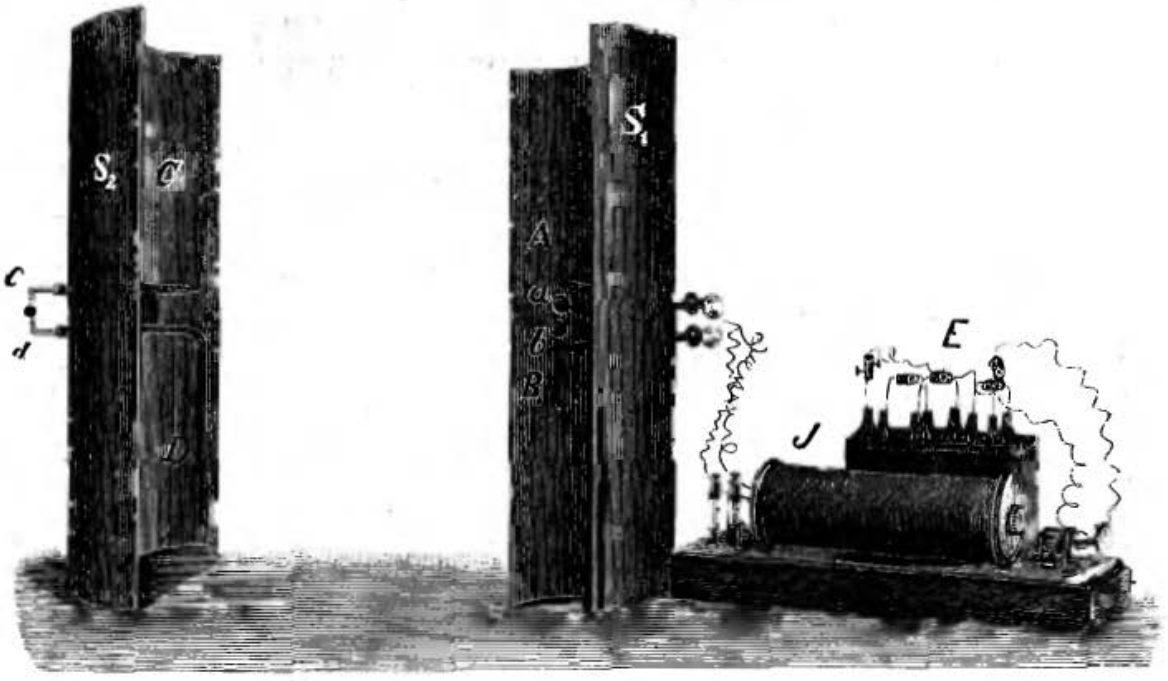


Fig. 589. Doświadczenie Hertz'a.

od induktora J przebijały to ostatnie. Z tym głównym przewodnikiem działanie w przewodniku wtórnym objawiało się bez zwierciadła na odległości 2 metrów, przy użyciu zaś zwierciadła na odległości 5 do 6 metrów, właśnie dzięki skupieniu przez nie fal. Gdy i przewodnik wtórny umieszczano na linii ogniskowej wklęsłego zwierciadła, wtedy nawet na odległości 16 do 20 metrów można było bez trudności odkryć odnośne działanie. Lewa strona figury 589 wskazuje, jak był umieszczony wtórny przewodnik. Na linii ogniskowej zwierciadła S_2 znajdowały się proste druty przewodnie C i D, od których szły druty poprzez zwierciadło w tył do kuli c i ostrego końca d; pomiędzy temi ostatniemi można było obserwować iskry, nie potrzebując przytem stawać na drodze promieni. Pierwsze zwierciadło w istocie wytwarza, dzięki głównemu drganiu, *promień elektryczny* który zostaje odbity od drugiego zwierciadła ku linii ogniskowej, gdzie powoduje silne drgania w przewodniku wtórnym.

Gdy pomiędzy dwoma zwierciadłami ustawia się metalowy ekran prostopadle do kierunku promienia, wtedy iskry wtórne gasną całkowicie. Natomiast promień przechodzi przez izolatory; przenika przez drzwi zamknięte z jednego pokoju do drugiego. Jeżeli zwierciadła ustawimy nie jedno naprzeciwko drugiego, lecz tak ażeby kierunki ich promieni przecinały się prostopadle, wtedy we wtórnym przewodniku nie otrzymamy wcale iskier. Gdy zaś w miejscu przecięcia umieścimy blachę metalową pod kątem 45°, wtedy promień odbije się od niej, upadnie na wtórne zwierciadło, wskutek czego w przewodniku wtórnym pojawią się żywe iskry. Widzimy więc, że promienie elektryczne ulegają zupełnie tak samo odbiciu, jak promienie świetlne. Wiemy dalej, że promień świetlny przy przejściu przez pryzmat zostaje załamany; otóż i promienie elektryczne ulegają załamaniu. Hertz puszczał promień główny na pryzmat smołowy (którego boki były równe 1,2 metr., wysokość zaś 1,5 metr. i który ważył 12 centnarów) i zauważył z początku, że gdy wtórny przewodnik znajdował się akuratnie na drodze promieni, wtedy nie było żadnych iskier. A więc pryzmat odchylał promień z pierwotnego jego położenia. Po odszukaniu kierunku,

w którym występowały iskry w drugiem zwierciedle, można było znaleść odchylenie, jakiemu ulegał wtedy promień elektryczny. W podobny sposób wywołano z falami elektrycznemi wszystkie te zjawiska, jakie znano w dziedzinie światła, przez co ostatecznie dowiedzioną została jednorodność zjawisk świetlnych i elektrycznych.

Nowe te odkrycia dały początek mechanicznemu pojmowaniu zjawisk elektrycznych, albowiem proces drgań elektrycznych objaśnia się na podstawie sprężystości eteru. Pozostaje jeszcze jednak cały obszar prądów nieprzerwanych, czyli ciągłych, dalej rozchodzenie się ich w przewodnikach i wreszcie dziedzina zjawisk elektrostatycznych, co do których wspomniane eksperymenty nie dają żadnego objaśnienia. Należy go wszakże oczekiwać od niedalekiej zapewne przyszłości.

Widzieliśmy tedy w rozdziale niniejszym, że elektryczność można zamieniać prawie bezpośrednio w inne postaci energii i że właściwość tę posiada ona w stopniu daleko wyższym, niż pozostałe siły przyrody. Oprócz tego prąd elektryczny rozprzestrzenia się z nadzwyczajną prędkością i pozostaje zawsze w danym obwodzie, to jest w drutach przewodnich. Elektryczność może w każdej chwili być przeprowadzoną w dowolne miejsce, niezależnie od tego, gdzie została wytworzoną, albowiem przezwycięża ona poniekąd przestrzeń i czas. Żadna inna siła przyrody nie posiada takich doniosłych dla nas własności i dlatego też żadna z nich, nie wyjmując ciepła, nie znalazła tak olbrzymich zastosowań w praktyce, jak elektryczność.

ROZDZIAŁ V.

Zastosowania elektryczności.

§ 1. Maszyny dynamoelektryczne.

Wspomnieliśmy już w końcu poprzedniego rozdziału, że łatwość, z jaką elektryczność pozwala zamienić się we wszystkie prawie inne postacie energii, to jest w światło, ciepło, magne-

tyzm, energię chemiczną, ruch mechaniczny, czyni ją niezwykle przydatną do zastosowań praktycznych. Energia promienia świetlnego albo wcale, albo też niezupełnie i z trudnością daje zamienić się w inne postaci energii. Przeciwnie, prąd elektryczny powinien tylko być przepuszczony przez oddzielone dwa węgle, ażeby wytworzył światło, potrzeba go tylko przeprowadzić przez druty, a da on ciepło i światło. Gdy płynie spiralnie wokoło sztaby żelaznej, wytwarza magnetyzm; umieszczony w bliskości innego prądu, albo magnesu, powoduje ruch tego ostatniego, lub też sam poczyna się ruszać; przepuszczony przez jakąś złożoną ciecz, rozkłada ją na jej części składowe.

Widzieliśmy, że prądy elektryczne mogą być wytwarzane w rozmaity sposób. Tak, dwa metale zanurzone w cieczy i połączone w jeden zamknięty obwód, dają prąd elektryczny; w tym razie powstaje on wskutek przemiany *energii chemicznej*. Dwa różne metale ogrzane, lub oziębione w miejscu wzajemnego zetknięcia wytwarzają prąd elektryczny, zwany termicznym, gdyż powstaje on tutaj dzięki *energii cieplnej*. W zamkniętym obwodzie, umieszczonym w pobliżu magnesu, lub prądu elektrycznego i poruszanym w dowolny sposób, powstają prądy elektryczne. Te prądy, zwane indukcyjnemi, wytwarzają się przez ruch, a więc przez zużycie *energii ruchowej*, albo pracy mechanicznej. Dla celów technicznych, gdzie chodzi o najtańsze i najprostsze sposoby otrzymania prądów wielkiego natężenia i znacznej siły elektromotrycznej, wytwarzanie ich za pomocą pracy mechanicznej jest wielce korzystnem. Termoelektryczność jest tutaj wyłączoną dlatego, że dotychczas nie zdołano otrzymać prądów o wielkiej sile i natężeniu jedynie przez zużycie ciepła za pomocą stosów termoelektrycznych.

Lecz wytwarzanie silnych prądów za pośrednictwem elementów galwanicznych również nie jest wcale dla nas wygodnem. Wprawdzie przez stosowne powiększenie ich liczby możnaby otrzymymywać prądy o natężeniu i sile elektromotrycznej, jakieby się nam podobały, atoli to właśnie powiększanie ilości użytych elementów jest dla celów praktycznych prawie niemożliwem.

Albowiem każdy element, jak się łatwo domyśleć, wymaga starannego obchodzenia się z nim, częstej zmiany cieczy, oraz metali. Znaczna ilość elementów zajmuje dużo miejsca; oprócz tego silniejsze z nich, wytwarzają szkodliwe i nieprzyjemne pary. Wreszcie zastosowanie elementów jest bardzo drogie, albowiem we wszystkich prawie prąd elektryczny zostaje otrzymany dzięki spalaniu się, czyli utlenianiu cynku, który stanowi nader drogi materyał palny. Z tych powodów użycie elementów galwanicznych do wytwarzania silnych prądów elektrycznych, potrzebnych w technice, okazało się prawie zupełnie niemożliwem i wszystkie odnośne próby spełzły na niczem. Natomiast o wiele skuteczniejszym środkiem jest indukcya, a szczególniej *indukcya magnetyczna.* Pokazaliśmy w poprzedzającym rozdziale, że ruch zamkniętego obwodu (najlepiej spiralnie zwiniętego drutu) w bliskości magnesu wytwarza chwilowe prądy indukcyjne w tymże obwodzie i że można z łatwością otrzymać cały szereg takich prądów, obracając przed biegunami magnesu dwie połączone ze sobą cewki, owinięte drutem (patrz str. 1060 fig. 582).

Jest to najprostszy przykład maszyny, w której prądy elektryczne powstają wskutek ruchu induktora przed magnesem i która dlatego właśnie nosi nazwę *magnetoelektrycznej.* W pierwszej właściwej takiej maszynie jądro żelazne wraz ze spiralnemi było nieruchome, magnes zaś, zgięty w podkowę obracał się wokoło swej osi. Działanie na druty spiralne było oczywiście to samo, to jest przy każdym pół obrocie magnesu powstawal nowy prąd indukcyjny, o kierunku przeciwnym poprzedniemu.

Siła elektromotryczna prądów indukcyjnych w cewkach zależy głównie od mocy indukujących magnesów, oraz od szybkości obrotu. Ponieważ magnesów stalowych nie można namagnesować dowolnie silnie, to starano się poradzić sobie w inny sposób, a mianowicie powiększono liczbę magnesów indukujących, oraz cewek indukcyjnych. W jednej z dawniejszych podobnych maszyn znajdowały się trzy magnesy w podkowę, ustawione pionowo, po nad ich końcami zaś obracało się sześć połączonych razem cewek z jądrami z miękiego żelaza, które były

wszystkie przymocowane do tafli żelaznej. Maszyny takie należało obracać ręką. Gdy zaś chodziło o otrzymanie znacznie silniejszych prądów, musiano maszyny owe budować tak, ażeby mogły być wprawiane w bardzo szybki ruch obrotowy przez motor parowy, lub gazowy.

Dalszą zasadą budowy podobnych maszyn była możliwa blizkość ruchomych cewek od biegunów indukujących magnesów, albowiem im bliżej one znajdują się od tych ostatnich, tem silniejszym jest wpływ indukcyi. W podobny sposób zbudowano we Francyi po raz pierwszy wielkie maszyny o 32 do 48 magnesach i 64 do 96 cewkach, obracających się tuż przed biegunami magnesów. Były one poruszane siłą pary i dawały prądy tak silne, że używano ich i jeszcze używają do wytwarzania światła elektrycznego w latarniach morskich. Bezpośrednio maszyny dają oczywiście prądy zmienne, które jednak do oświetlenia elektrycznego nadają się równie dobrze, jak prądy o kierunku stałym, albowiem natężenie światła nie zależy od kierunku prądu.

W celu możliwego zbliżenia zwojów drutu do magnesów, Siemens nadał induktorowi formę walcowatą. Użył on mianowicie podłużnego kawałka żelaza, które na przecięciu poprzecznem posiada kształt podwójnego T (fig. 590, *E* gdzie przecięcie to jest zacienione) i jądro to owinął drutem tak, że zwoje biegły równolegle do długości walca. Liczba zwojów ułożonych jedne na drugich była taką, że cały induktor (jądro żelazne wraz ze zwojami) posiadał znów formę walcowatą, jak wskazują poprzeczne i podłużne przecięcia (fig. 590). Taki walec umieszczano pomiędzy biegunami szeregu magnesów, leżących obok siebie i posiadających na biegunach koliste wyżłobienia, w które dokładnie wchodziła odnośna część powierzchni walca. Ten ostatni wprawiano w nader szybki ruch obrotowy za pomocą korby i rozmaitych kół zębatych. W maszynie z walcowatym induktorem Siemens'a znajduje się on tak blisko biegunów magnetycznych, że jego jądro żelazne musi możliwie namagnesować się i dlatego prądy indukcyjne w drutach stają się ró-

wnież możliwie silne, o ile rozumie się pozwalają na to warunki przyrządu.

W tej i podobnych maszynach używają stalowych magnesów do indukowania prądów. Otóż magnetyzm ich jest bez porównania

Fig. 590. Induktor Siemens'a.

słabszy od tego, jaki można wywołać w równie wielkim kawałku miękiego żelaza za pomocą prądów elektrycznych. Można było za tem łatwo przewidzieć, że prądy indukcyjne maszyny magnetoelektrycznej staną się o wiele silniejszemi w razie zastąpienia stalowych magnesów przez elektromagnesy. Pierwszym, który dokonał tego w istocie był Wilde, jego zaś maszyna stanowi przejście do najważniejszego odkrycia na tem polu, to jest do maszyn dynamoelektrycznych.

Wilde wytworzył najprzód prąd za pomocą zwykłej magnetoelektrycznej maszyny o induktorze Siemens'a i stalowych magnesach i następnie prąd ten ujednostajniony za pośrednictwem komutatora przepuszczał przez zwoje wielkiego elektromagnesu, pomiędzy biegunami którego znajdował się drugi induktor walcowaty większych rozmiarów. Wskutek działania prądu pierwszej z tych maszyn żelazne jądro elektromagnesu magnesowało się bardzo silnie i dzięki temu prądy w drugim induktorze posiadały wielką moc. Figura 591 przedstawia maszynę Wilde'a. Część dodatkowa, wytwarzająca prąd dla elektromagnesów, jest umieszczona na głównej maszynie, a jej walcowaty induktor znajduje się pomiędzy biegunami stalowych magnesów. Jej prąd, którego kierunek jest ujednostajniony przez komutator, przechodzi przez *a* i *b* do zwojów elektromagnesu *B* głównej maszyny. Walcowaty induktor *m* tej ostatniej, obracany pomiędzy biegunowemi częściami *C C* jej magnesu, daje silne prądy, które mogą być użyte do wytwarzania

światła, oraz do innych celów. Oba induktory są połączone rzemieniami z walcem, obracanym przez motor parowy.

Mniejsze maszyny, dające prądy zmienne, nie mogły być użyte bezpośrednio, lecz należało je dopiero za pośrednictwem

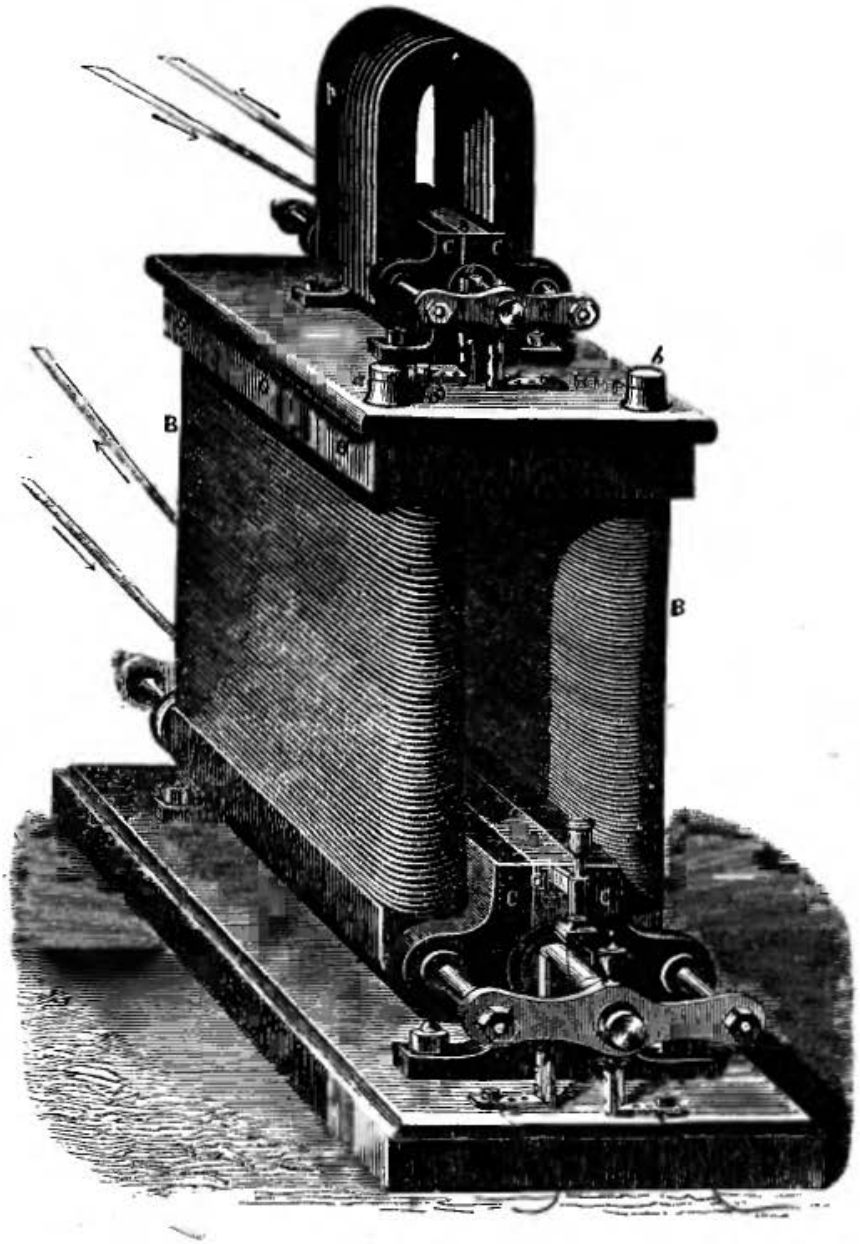


Fig. 591. Maszyna Wilde'a.

komutatora zamieniać w takie, które dawały prąd o stałym kierunku. W miarę jednak postępów elektrotechniki poczęto dla pewnych celów budować właśnie takie maszyny o prądach zmiennych. Podczas gdy z początku umiano budować tylko te ostatnie i jedynie ich używano, to po wynalezieniu maszyn

o prądzie stałym, straciły one swe znaczenie, wyjąwszy dla specyalnych zastosowań, jak np. dla świec Jabłoczkowa. W nowszych atoli czasach prądy zmienne nabrały znów wielkiego i nieoczekiwanego znaczenia, gdyż w sposób prosty i tani umożliwiają takie przenoszenie energii elektrycznej, jakiego nie można osiągnąć z prądem stałym. Albowiem najkorzystniejszemi dla przenoszenia na odległość energii elektrycznej są prądy o możliwie wysokiej sile elektromotrycznej, czyli napięciu. Wprawdzie można w zasadzie z maszyn wszelkiego rodzaju otrzywymać prądy o wysokiej sile elektromotrycznej, jeżeli tylko będziemy powiększali liczbę zwojów na induktorze, oraz szybkość obrotu. Faktycznie jednak w maszynach o ruchomych częściach nie można wywoływać zbyt wysokiego napięcia, albowiem łatwo następuje przeskakiwanie elektryczności. Otóż prądy zmienne można z wszelką łatwością i pewnością sprowadzać za pomocą *transformatorów*, o których później będzie mowa, ze stanu nizkiego napięcia do wysokiego i naodwrót i to stanowi doskonały środek do przesyłania elektryczności w sposób najtańszy. Wytwarza się prądy zmienne o dowolnem, umiarkowanem napięciu, przekształca je w napięcie wysokie i przesyła na odległość, gdzie znów zostają sprowadzone do żądanego, nizkiego stanu napięcia. Z prądami o jednostajnym kierunku proces ten nie daje wykonać się w sposób tak prosty dlatego, że nie ma odpowiedniego prostego transformatora. Z tych powodów obecnie znów budują olbrzymie maszyny o prądzie zmiennym. Wszystkie one składają się z indukowanych cewek owiniętych drutem, stanowiących razem induktor, czyli zbroję oraz z indukujących magnesów, które tylko w rzadkich wypadkach są stalowe, najczęściej zaś są to elektromagnesy.

Wspomnieliśmy już, że każdą maszynę o prądzie zmiennym można za pomocą komutatora zamienić w taką, która daje prąd jednostajny. Lecz w miarę rozwoju elektrotechniki przekonano się, że istnieje prostszy sposób wytwarzania prądu o stałym kierunku. Mianowicie Pacinotti zastąpił dawniejszy induktor przez zamknięty żelazny pierścień, całkowicie owinięty drutem, którego końce były spojone. Później Gramme owinął pierścień

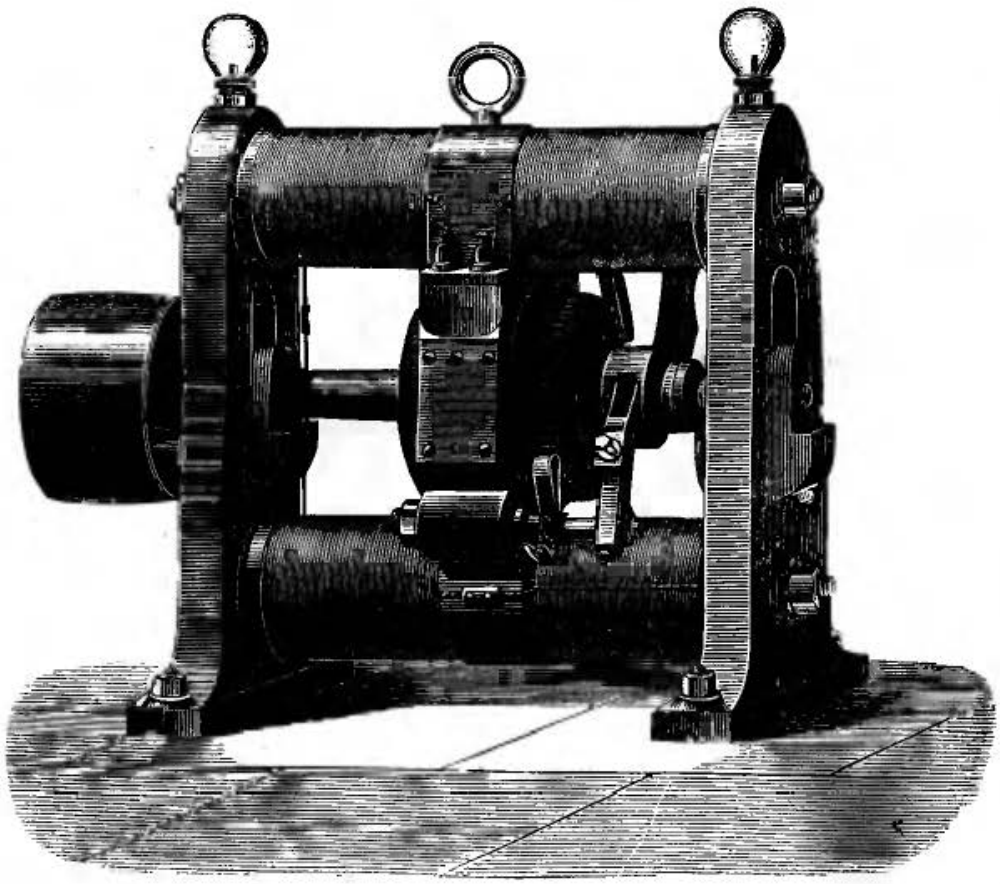
wielką ilością oddzielnych drutów, których końce dochodziły do osi i tam łączyły się z paskami miedzi. Te ostatnie są odosobnione od siebie i każdy z nich stanowi łącznik pomiędzy końcem jednej i początkiem sąsiedniej cewki drucianej. Część osadzona na osi, złożona z pewnej liczby pasków miedzianych i leżących pomiędzy niemi pasków odosabniających, zowie się *kollektorem*, albo zbiornikiem prądu. Do niego w dwóch, wprost przeciwległych miejscach, przylegają dwie szczotki z cienkiego drutu, z któremi jest połączony zewnętrzny obwód zamykający. Użycie takiego pierścienia umożliwiło bezpośrednie otrzymanie prądów indukcyjnych o stałym kierunku, na mocy bowiem pewnego rozumowania można w pierścieniu tym znaleść takie dwa miejsca, że jeżeli zostaną połączone zewnętrznym drutem, to prąd będzie w nim płynął stale w jednym kierunku.

W roku 1867 Werner Siemens dokonał innego, nader ważnego odkrycia. Rozumował on mianowicie, że skoro raz wytworzy się prąd w induktorze, to należy go tylko w odpowiedni sposób przepuszczać przez spiralne zwoje, biegnące wokoło magnesów, ażeby znacznie spotęgować moc tych ostatnich. Nie koniec na tem, ponieważ bowiem każdy kawałek żelaza jest już nieco magnetyczny wskutek działania magnetyzmu ziemskiego, to jako ciała indukującego dość jest użyć miękiego żelaza, zgiętego w podkowę oraz dość przepuścić wokoło niego prąd z induktora, ażeby zamieniło się ono w silny magnes, który znakomicie spotęguje prąd. Taka jest słynna zasada dynamiczna Siemens'a i podług niej budują się wszelkie nowsze maszyny. Nie ma w nich właściwego magnesu; słaby magnetyzm każdego jądra żelaznego rozpoczyna działanie, dopiero zaś z biegiem maszyny wytwarzają się magnesy i potężnie wpływają na jej czynność. Ponieważ magnetyzm występuje tutaj poniekąd jako wytwór pośredniczący w zamianie pracy na elektryczność, to Siemens nazwał przyrządy te *maszynami dynamicznemi* albo *dynamoelektrycznemi* od wyrazu dynamos, co znaczy po grecku praca. W podobnej maszynie musi z początku istnieć w induktorze słaby chociażby prąd, któryby zamienił żelazo w elektromagnes. Lecz jak powiedzieliśmy, nawet najbardziej miękie żelazo jest

nieco magnetycznem i to wystarcza do wywołania słabego prądu w induktorze. Prąd ten płynie w odpowiednim kierunku wokoło jąder żelaznych, magnetyzuje je i sam wskutek tego zostaje wzmocniony. W ten sposób prąd ustawicznie potęguje magnetyzm, który z kolei wzmacnia prąd, dopóki wreszcie magnesy nie osiągają swego maximum i wtedy działalność maszyny dochodzi do zenitu.

Otóż pierwszym, który jednocześnie zastosował zbroję pierścieniową oraz zasadę dynamiczną Siemens'a do budowy omawianych maszyn był Gramme, a były one tak doskonałe, że obecnie jeszcze należą do najlepszych i najwydajniejszych maszyn.

Figura 592 przedstawia właśnie maszynę Gramme'a w jej głównej postaci. Pośrodku widać osadzoną na osi zbroję pier-



Fig, 592. Maszyna Gramme'a.

ścieniową z kollektorem prądu po prawej stronie. Z przodu i z tyłu dochodzą doń obydwie szczotki druciane, z prawej zaś i lewej strony pierścienia widzimy elektromagnesy. Bieguny

północne (np. u góry) i południowe (u dołu) znajdują się naprzeciwko siebie, przyczem bieguny jednoimienne są połączone mocnemi żelaznemi kotwicami, kolisto wyżłobionemi. W wyżłobienia te wchodzi zbroja pierścieniowa. Prąd płynie np. od przedniej szczotki (do której przyszedł z pierścienia) do prawego elektromagnesu, opływa jego dolną i górną odnogę i dosięga górnego prawego kleszcza. Jednocześnie prąd sunie od tylnej szczotki wokoło lewych odnóg magnesowych i dochodzi do drugiego górnego kleszcza. Do dwóch tych kleszczów przyczepia się zewnętrzny przewodnik, przez który chcemy przepuścić prąd.

Ażeby dać czytelnikowi pojęcie o wielkości podobnej maszyny dynamicznej powiemy, że tylko co opisana ma wysokości 0,60 metr., 0,35 metr. szerokości i 0,65 metr. długości; waga zaś jej wynosi 180 kilogramów. Druty jej są zrobione z miedzi, pierścień zaś robi 1000—1500 obrotów na minutę.

Co do natężenia prądów i ich siły elektromotrycznej, to pod tym względem istnieje ważna różnica pomiędzy maszynami magneto- i dynamoelektrycznemi.

W maszynie magnetoelektrycznej magnesy mają stale jedną i tę samą moc, siła zaś elektromotryczna, która powstaje wskutek obrotu pierścienia, zależy bezpośrednio od natężenia pola magnetycznego i jest tem większą, im ono jest silniejsze. Dalej zależy ona od położenia jądra żelaznego względem biegunów magnesu. Im bliżej tych ostatnich znajduje się pierścień, im lepiej i silniej jest on indukowany, tem silniejsze są prądy indukcyjne. Również na siłę elektromotryczną wpływa szybkość obrotu pierścienia tak, że przy innych warunkach niezmienionych, siła ta w danej maszynie jest prosto proporcyonalną do ilości obrotów, wykonanych np. w ciągu minuty. Wreszcie siła ta zależy od liczby zwojów na jądrze żelaznem i od ich położenia względem indukujących biegunów, a mianowicie wzrasta wraz z jej powiększeniem tak, że pierścień o 1000 zwojach wytwarza, przy innych warunkach jednakowych, 1000 razy większą siłę elektromotryczną, niż pierścień o 1 zwoju.

Gdy oba bieguny maszyny magnetoelektrycznej są połączone zewnętrznym drutem, wtedy przez cały obwód przepływa

ustawicznie prąd elektryczny, którego natężenie, podług prawa Ohm'a, wyraża się tak:

$$\text{natężenie} = \frac{\text{siła elektromotryczna}}{\text{opór całkowity}}$$

Całkowity opór składa się z oporu wewnętrznego maszyny, oraz z zewnętrznego obwodu. W maszynie magnetoelektrycznej opór wewnętrzny stanowią tylko zwoje na pierścieniu; im więcej ich jest, tem większy jest ten opór, lecz tem znaczniejszą jest także siła elektromotryczna. Jeżeli opór zewnętrzny jest niewielki, wtedy nie potrzeba zbyt znacznej siły elektromotrycznej do jego przezwyciężenia i pierścień może być otoczony małą ilością zwojów. Gdy przeciwnie opór zewnętrzny jest bardzo duży, gdy np. składa się on z szeregu lamp elektrycznych, wtedy liczba zwojów na induktorze musi być nader znaczną, jeżeli chcemy, ażeby siła elektromotryczna była dostatecznie wielką i wytworzyła w obwodzie zewnętrznym odpowiednie natężenie.

A więc w maszynie magnetoelektrycznej siła elektromotryczna zależy tylko od mocy magnesów stalowych, od ilości obrotów oraz liczby zwojów na induktorze, *nie zależy zaś wcale od oporu zewnętrznego.* Lecz natężenie prądu w całym obwodzie zależy naturalnie od tego oporu.

Zupełnie inaczej jest w maszynach dynamicznych, w których dopiero prąd wzbudza magnetyzm. Tutaj siła magnesów zależy od natężenia prądu, płynącego w całym obwodzie, a więc także od oporu zewnętrznego. Z kolei siła elektromotryczna prądów indukcyjnych zależy od potęgi magnesów. A więc w maszynach dynamicznych siła elektromotryczna *zależy od oporu zewnętrznego* i zmienia się z każdą zmianą tego ostatniego. Jeżeli np. opór zewnętrzny wzrasta, wtedy najprzód maleje natężenie prądu, wskutek czego magnesy, a więc i siła elektromotryczna słabną i następuje zmniejszenie natężenia w całym obwodzie.

W każdej maszynie magnetoelektrycznej jedna szczotka druciana otrzymuje podczas obracania elektryczność dodatnią, druga zaś ujemną. Obie szczotki zupełnie odpowiadają biegunom elementu galwanicznego. Jeżeli podczas biegu maszyny

połączymy jedną ze szczotek z elektrometrem, przy niezamkniętym obwodzie, wtedy zboczenie igły wskaże, że na szczotce istnieje swobodna elektryczność, np. dodatnia. Połączenie z drugą szczotką powoduje zboczenie, które dowodzi obecności na niej elektryczności ujemnej. Natomiast w niezamkniętej maszynie dynamicznej, nawet bardzo szybko obracanej, nie powstaje żadna siła elektromotryczna, oprócz tej, która pochodzi od wrodzonego magnetyzmu elektromagnesów. Albowiem dopóki maszyna nie jest zamkniętą, nie przepływa żaden prąd, elektromagnesy nie są pobudzane i nie wytwarzają prądów indukcyjnych. A więc na biegunach nie pojawia się swobodna elektryczność.

W końcu dodamy jeszcze, że, jak tylko co widzieliśmy, w zamkniętej maszynie magnetoelektrycznej całkowity opór składa się z oporu induktora oraz z oporu zewnętrznego obwodu. W maszynie zaś dynamicznej dołącza się do tego opór drutów na elektromagnesach, który zawsze musi być dość znacznym, albowiem moc elektromagnesów wzrasta wraz z powiększeniem liczby zwojów. Przy tych samych więc warunkach opór w maszynach dynamicznych jest już sam przez się większy, niż w magnetoelektrycznych. Lecz za to pierwsze z nich dozwalają na pewien szereg modyfikacyj w zastosowaniu zasady dynamicznej i dlatego wspomniane tylko co warunki można zmieniać w rozmaity sposób, zależnie od wzajemnego położenia induktora, magnesów i zewnętrznego obwodu.

W maszynach dynamicznych pożyteczną pracę stanowią procesy, zachodzące w obwodzie zewnętrznym, np. palenie lamp, lub zjawiska elektrotypiczne. Otóż w celu scharakteryzowania maszyny podaje się jej tak zw. *effekt elektryczny* w zewnętrznym obwodzie,- który zwykle wyraża się w wolt-amperach. Porównawszy efekt ten z całkowitą ilością pracy, jaką należy zużyć w ciągu sekundy do obracania maszyny, otrzymujemy stosunek, będący bezpośrednią miarą jej wartości.

Otóż wyżej opisana maszyna Gramme'a posiada budowę tak doskonałą, że pomimo wielu poczynionych w niej zmian, należy do najwydajniejszych i najpraktyczniejszych maszyn dy-

namicznych. Budują ją w różny sposób i nadają jej rozmaitą wielkość. Podczas gdy w dawniejszych maszynach wspomniany tylko co stosunek wynosił 60 do 65%, to w nowszych podniósł się on do 80%.

Oprócz maszyny Gramme'a istnieje jeszcze bardzo wiele innych, jak Siemens'a, Brush'a, Edisona, Westona i t. d. a dokładne ich opisanie wymagałoby osobnego dzieła. Nie możemy zbytnio rozszerzać się nad tym opisem, powiemy tylko, że żadna z nich w porównaniu z zasadą dynamiczną Siemens'a, lub pierścieniem Gramme'a, nie może poszczycić się wprowadzeniem czegoś istotnie nowego. Zalety poszczególnych maszyn polegają na starannem i zasadniczo dokładnem wykończeniu.

Wszystkie dynamiczne maszyny dają, przy szybkiem obracaniu induktora, prądy o nader znacznej sile elektromotrycznej. W celu otrzymania bardzo szybkich obrotów, maszyny te wprawia się w ruch za pomocą motoru parowego, gazowego, albo też wodnego, przyczem jego koło rozpędowe jest połączone bezpośrednio, lub za pośrednictwem transmisyi z tarczą, przymocowaną do maszyny dynamicznej. Niekiedy znów ta ostatnia jest tak zbudowaną, że jej oś stanowi jednocześnie oś poruszającej maszyny parowej.

Silne prądy maszyn dynamicznych znalazły liczne zastosowania w technice. Szczególniej przy oświetleniu elektrycznem, przenoszeniu elektryczności i elektrochemii, które wymagają potężnych prądów, maszyny dynamiczne oddają niezmierne usługi.

Praca wydana na ruch maszyny w każdą sekundę musi być większą od całkowitego efektu w jej obwodzie zewnętrznym, albowiem po pierwsze dany motor ma do przezwyciężenia mechaniczne tarcie oddzielnych części maszyny, po drugie dość znaczna część pracy zamienia się natychmiast w ciepło.

W nowszych maszynach przecięciowo 85—90% zużytej pracy mogą być spożytkowane jako energia elektryczna w obwodzie zewnętrznym.

W elementach galwanicznych elektrod ujemny, cynk, rozpuszcza się zawsze w kwasie. Każda ilość energii elektrycznej, otrzymana w zamkniętym elemencie galwanicznym, powstaje

dzięki spaleniu równoważnej ilości cynku w kwasie siarczanym. Natomiast w maszynach dynamicznych prądy elektryczne powstają wskutek obrotu induktora, to jest dzięki pracy wydanej na ruch maszyny. Jeżeli obrót odbywa się za pomocą motoru gazowego, albo parowego, wtedy prądy są wytwarzane pośrednio kosztem spalania gazu oświetlającego, lub węgla. Można nawet porównać koszt wytwarzania prądów za pomocą elementów galwanicznych z kosztem ich otrzymania za pośrednictwem maszyn dynamicznych, poruszanych przez motor parowy, lub gazowy. Przypuśćmy mianowicie, że cała elektryczność z maszyny dynamicznej, oraz z elementu galwanicznego zamieniają się, wskutek oporu, w ciepło Joule'a i że następnie porównywujemy ze sobą te ilości ciepła i koszt ich wytworzenia. Kilog. cynku spalony całkowicie daje 550 ciepłostek. Otóż przyjmijmy, że ciepło to zamienia się całkowicie w elektryczność, co w gruncie jest prawie zupełnie słuszne. Kilogram węgla daje przy spaleniu 8000 ciepłostek, z których tylko 480 zużywa się istotnie w maszynie parowej, z tych zaś około 10% idzie na przezwyciężenie tarcia oraz na nieprodukcyjne ogrzanie, podczas gdy 90% a więc około 430 ciepłostek zamienia się w elektryczność. Widzimy tedy, że kilog. cynku daje za pośrednictwem elektryczności ilość energii odpowiadającą 550 ciepłostkom, kilog. zaś węgla ilość równą tylko 430 ciepłost. Lecz za to cena cynku jest prawie 15 razy większą od ceny węgla tak, że wytworzenie danej ilości energii elektrycznej przez spalenie węgla kosztuje około 13 razy mniej, niż przez spalenie cynku. Okoliczność ta znakomicie podnosi wartość maszyn dynamicznych w technice, w porównaniu z elementami galwanicznemi.

§ 2. Akumulatory. Transformatory.

Jednocześnie z udoskonaleniem maszyn dynamicznych pewne działania prądu elektrycznego nabrały nader wielkiego znaczenia, wtedy dopiero bowiem pozwoliły one rozstrzygnąć, a przynajmniej przedsięwziąć rozwiązanie takich zadań technicznych, które przy dawniejszych środkach zupełnie były nierozwiązalne. Najważniejsze z nich są: przenoszenie siły, a ra-

czej pracy na wielką odległość oraz nagromadzanie i zachowywanie pracy do późniejszego użytku. To ostatnie szczególniej, stanowiące przez długi czas słynne zadanie techniki, zostało rozwiązane za pomocą elektryczności; odnośna zaś zasada jest zupełnie odmienną od zasad innych sposobów rozstrzygnięcia tego ważnego problematu.

Gdy prąd elektryczny przepuszczamy przez naczynie rozkładowe, woltametr, w którem znajduje się rozcieńczony kwas siarczany, wtedy, jak wiemy, elektrody np. platynowe polaryzują się (patrz str. 1026). Na elektrodzie njemnym osadza się wodór, na dodatnim tlen i elektrody tak zmienione wzajemnie działają na siebie elektromotrycznie. Panuje na nich różnica napięć i jeżeli łączy się je zewnętrznym drutem, wtedy przez ten zamknięty obwód płynie prąd *spolaryzowany*. W ten sposób główny prąd elektryczny, przepuszczony przez naczynie rozkładowe, zamienia je poniekąd w element galwaniczny. Jeżeli jedna blacha platynowa jest całkowicie pokryta wodorem, druga zaś tlenem, wtedy taki element, jak każdy inny, posiada pewną siłę elektromotryczną, równą sumie energii rozdziału pomiędzy obydwiema różnemi blachami i kwasem siarczanym. Naczynie rozkładowe tak spolaryzowane nazywa się *wtórnym elementem;* tutaj blacha pokryta wodorem jest dodatnią. Gdy łączymy obydwie blachy ze sobą, wtedy wtórny prąd płynie przez wtórny element i obwód zewnętrzny w kierunku przeciwnym kierunkowi, w jakim płynął główny prąd.

Z tego wynika najprzód, że gdy element główny i naczynie rozkładowe są połączone ze sobą, wtedy prądy z obydwóch płyną w drucie łącznym przeciwko sobie i starają się znieść wzajemnie. Dalej siła elektromotryczna elementu głównego musi conajmniej być tak wielką, jak siła zupełnie spolaryzowanego elementu wtórnego, ażeby mogła je całkowicie spolaryzować. Dopóki bowiem siła elektromotryczna elementu głównego leży poniżej tej granicy, naczynie rozkładowe nie może być zupełnie spolaryzowane, gdyż wtedy prądy całkowicie znoszą się wzajemnie. Innemi słowy, chcąc wytworzyć element wtórny, należy mieć element główny o sile elektromotrycznej, conajmniej

równej najwyższej sile elektromotrycznej, jaką może osiągnąć element wtórny.

Otóż wyobraźmy sobie gotowy element wtórny, którego związek z głównym prądem został przerwany. Gdy tylko jego obwód jest zamknięty, przepływa przezeń prąd i wywiera wpływ elektrolityczny na kwas siarczany. Z tego ostatniego wydziela się wodór na elektrodzie pokrytym tlenem, oraz tlen na elektrodzie pokrytym wodorem. A więc wskutek prądu zmniejsza się polaryzacya elektrodów. Siła elektromotryczna, i wraz z nią prąd słabną, a wreszcie ustają, gdy cały wodór z jednego elektrodu i cały tlen z drugiego dają znów wodę. W samej rzeczy prąd spolaryzowany wogóle słabnie bardzo szybko, w ciągu sekund, albo minut. Lecz gdy naładowanie wtórnego elementu trwa przez długi czas, wtedy wodór, respect. tlen wydziela się nietylko na powierzchni platynowych elektrodów, lecz przenika do nich także głębiej tak, że gdy element zostaje zamknięty, elektryczna różnica elektrodów trwa dłużej.

Stosuje się to nietylko do wypadku elektrodów platynowych, zanurzonych w kwasie siarczanym i spolaryzowanych przez prąd. Wszędzie, gdzie jakaś ciecz pomiędzy dwoma jednakowemi, lub niejednakowemi elektrodami ulega elektrolizie, powstaje prąd spolaryzowany, jeżeli tylko oba elektrody wskutek polaryzacyi stają się wzajemnie różne pod względem elektrycznym. Przy polaryzacyi zwykłego naczynia, w którem rozkłada się woda, nie zachodzi prawdopodobnie żadna chemiczna zmiana w platynowych elektrodach, naładowują się one jedynie gazami. Pomimo to siła elektromotryczna prądu spolaryzowanego wynosi przytem około 2,7 woltów. Można już naprzód przypuścić, że w naczyniu rozkładowem, gdzie wskutek elektrolizy elektrody w istocie zmieniają się *chemicznie*, działanie jest silniejsze. Rzecz oczywista, że przyjmujemy przytem, iż substancye pojawiające się na elektrodach dzięki elektrolizie są dobremi przewodnikami elektryczności, w przeciwnym bowiem razie wewnętrzny opór elementu stałby się bardzo wielkim, a więc prąd byłby nader słabym.

Gaston Planté, po wykonaniu licznych i starannych do-

świadczeń, pierwszy zbudował dobry element wtórny. Znalazł on mianowicie, że ołów nadaje się szczególnie do takich elementów. Zanurzał on dwie blachy ołowiane w rozcieńczonym kwasie siarczanym. Przy przepuszczaniu prądu przez taki układ, kwas siarczany ($SO_4\ H_2$) rozkłada się na wodór (H_2) oraz na związek SO_4, z którego ołów zaraz odejmuje jeden atom tlenu. Każde dwa atomy tlenu łączą się z jednym atomem ołowiu i dają dwutlenek ołowiu ($Pb\ O_2$), pozostały zaś bezwodnik siarczany (SO_3) przyciąga wodę z roztworu i daje znów kwas siarczany. W rezultacie tedy na elektrodzie ołowianym, który jest połączony z ujemnym biegunem głównej bateryi, wydziela się swobodny wodór, podczas gdy na elektrodzie dodatnim tworzy się dwutlenek ołowiu. Jeżeli ujemny elektrod był już nieco utleniony (wskutek znajdowania się na powietrzu lub czegobądź innego), wtedy wytwarzający się na nim wodór zabiera ten tlen, redukując przez to elektrod i zamieniając go w czysty metaliczny ołów. Po zupełnem więc spolaryzowaniu układ powyższy zamienia się w element galwaniczny, złożony z dwutlenku ołowiu, rozcieńczonego kwasu siarczanego i ołowiu.

Doświadczenia pokazują, że siła elektromotryczna takiego elementu jest równa 2 woltom. Gdy zaś elektrod ołowiany jest jeszcze pokryty wodorem, wtedy mamy element: dwutlenek ołowiu, kwas siarczany, wodór, którego siła elektromotryczna wynosi 2,2 do 2,4 woltów.

Gdy element taki jest zamknięty, prąd płynący przezeń, oraz przez obwód zewnętrzny rozkłada znów kwas siarczany, przyczem na dwutlenku ołowiu osadza się wodór, na czystym zaś ołowiu—tlen. Przez to dwutlenek ołowiu zostaje zredukowany na tlenek, czysty zaś ołów utlenia się. Prąd ustaje, gdy obydwie blachy zamieniają się w tlenek ołowiu. Całkowita ilość wytworzonego dwutlenku ołowiu zależy od siły i czasu trwania głównego prądu, a więc od ilości elektryczności, jaka podczas naładowywania wtórnego elementu przeszła doń od tego prądu. Całkowita ilość elektryczności, jaką wogóle jest w stanie dać element wtórny, nie może być większa, lecz co najwyżej równa ilości elektryczności dostarczonej przez prąd ładujący.

Największy ładunek, jaki mieć może element wtórny nazywa się jego *pojemnością;* zależy on od ilości zmienionego ołowiu, a więc od rodzaju i wagi elementu.

W celu możliwego zmniejszenia oporu wewnętrznego w elemencie wtórnym, należy koniecznie obydwie blachy zbliżyć jak najwięcej ku sobie. Oprócz tego, ażeby ułatwić jak najdokładniejsze tworzenie się dwutlenku ołowiu, trzeba możliwie powiększyć powierzchnię ołowianą. Dlatego też Planté umieścił dwie długie i szerokie blachy ołowiane jednę na drugiej i odosobnił je wzajemnie za pomocą dwóch cienkich i wąskich pasków kauczukowych. Następnie zwinął je tak, jak pokazuje fig. 593, przez co utworzyły one walec, przytrzymywany u góry przez gumę w kształcie krzyża. Na obydwóch blachach wi-

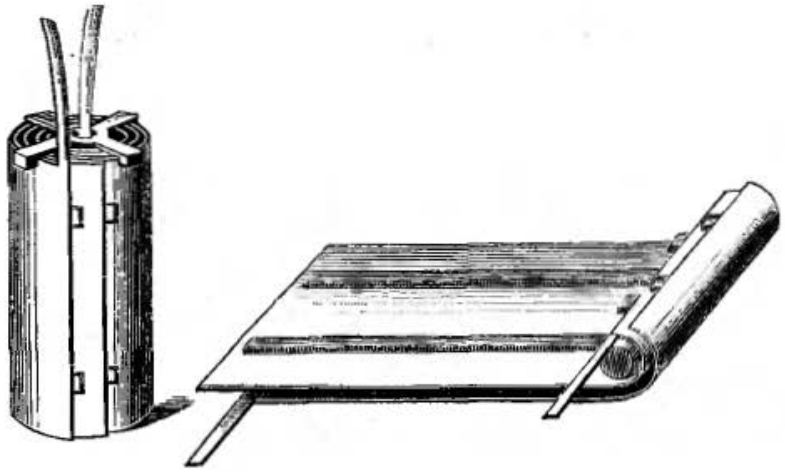


Fig. 593. Blachy ołowiane do elementu Plantég'o.

dzimy jeszcze wystające paski ołowiane, służące za bieguny. Walec ów umieszcza się w szklanem naczyniu, napełnionem rozcieńczonym kwasem siarczanym i zamyka pokrywką gumową, przez którą przechodzą elektrody. Figura 594 przedstawia właśnie taki element.

Mając większą ilość podobnych elementów wtórnych, można np. połączyć ze sobą wszystkie blachy wewnętrzne oraz wszystkie zewnętrzne i jednocześnie naładować za pomocą bateryi, której siła elektromotryczna jest większa od siły jednego z tych elementów. Można je zatem naładować za pośrednictwem

np. dwóch ogniw Bunsena i jeżeli prąd przepuszcza się dość długo, to każdy z wtórnych elementów osiąga swe maximum. Jeżeli zaś łączymy elementy w szereg, wtedy siły elektromotryczne dodają się. Jeżeli więc posiadamy np. 50 elementów, to przez połączenie ich w szereg otrzymujemy bateryę, której siła elektromotryczna jest 50 razy większa, niż w każdym oddzielnym elemencie, a więc wynosi około 100 woltów. Przez to można z łatwością zamieniać elektryczność o słabem napięciu w elektryczność o napięciu nader wysokiem, co też Planté uskutecznił w prosty sposób za pomocą komutatora. Fig. 595 przedstawia podobną bateryę Planté'go Wszystkie elektrody od utlenionych blach ołowianych znajdują się w jednym szeregu, wszystkie zaś elektrody od czystych blach ołowianych tworzą szereg drugi, równoległy do tamtego. Drewniany walec *CC*, który można obracać, jest zaopatrzony z dwóch stron na całej swej długości w paski metalowe; gdy te ostatnie sty-

Fig. 594. Element Planté'go.

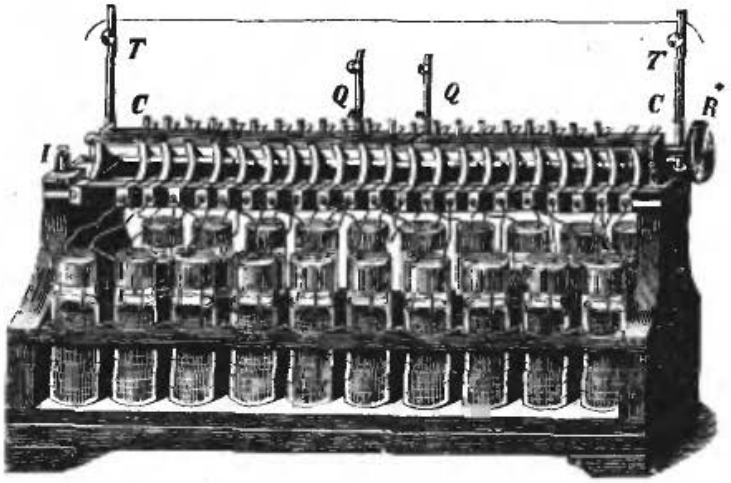


Fig. 595. Baterya Planté'go.

kają się z obydwoma szeregami elektrodów, wtedy wszystkie elementy są połączone na powierzchnię. Oprócz tego na walcu znajduje się tyle sztyftów metalowych, wiele jest elementów w bateryi. Gdy za pośrednictwem guzika *B* obracamy walec

na ćwierć obrotu, wtedy oba końce każdego sztyftu dotykają różnoimiennych biegunów dwóch elementów, przez co następuje połączenie w szereg.

A więc za pomocą bateryj wtórnych można w danym obwodzie wytworzyć prąd o wysokiem natężeniu w wypadku, gdzie baterya główna dałaby prąd o natężeniu znacznie słabszem. Rzecz oczywista, że na całkowitej ilości energii nic się wtedy nie wygrywa, gdyż ulega ona tylko innemu rozmieszczeniu. Całkowita energia (iloczyn z natężenia, siły elektromotrycznej i czasu trwania ładunku), oddana podczas ładunku przez bateryę główną bateryi wtórnej, może w najlepszym wypadku napowrót być oddana przez tę ostatnią. Jeżeli przez użycie bateryi wtórnej natężenie prądu i siła elektromotryczna stają się większe, za to czas trwania jego jest mniejszy, niż dla prądu głównego. W powyższy sposób Planté, używając wielkich bateryi wtórnych, wywołał najsilniejsze działania elektryczne.

Dobry element Planté'go jest dość trudno zbudować, wymaga on bowiem kłopotliwych przygotowań, zanim osiągnie właściwą sobie pojemność. Lecz gdy już został naładowany, to jest gdy jego ołowiane elektrody są zmienione chemicznie, wtedy po połączeniu ich otrzymujemy w każdym czasie prąd elektryczny. Dopóki trwa zmiana chemiczna elektrodów, dopóty element zachowuje tę własność dawania prądu, owa zmiana zaś przy niezamkniętym elemencie istnieje przez pewien przeciąg czasu. Otóż, jak widzimy, pewna ilość elektryczności użyta do naładowania elementu Planté'go, może być w ten sposób zachowaną przez jakiś czas. Elektryczność jest nagromadzona w elemencie pod postacią zmiany chemicznej i po upływie pewnego czasu może znów być zeń wydobytą. Element wtórny jest więc jakby magazynem dla danej ilości elektryczności i dlatego zowie się on także *akumulatorem*.

Element Planté'go został ulepszony przez Faure'a, który otoczył oba elektrody ołowiane miazgą, przygotowaną z wody i minii (czerwony tlennik ołowiu). Podczas naładowywania elementu związek ten na elektrodzie dodatnim zamienia się całkowite w dwutlenek ołowiu, na elektrodzie zaś ujemnym, gdzie

wydziela się wodór, ulega redukcyi na czysty ołów. Dzięki temu, że wspomniany związek jest sproszkowany, gazy mogą przenikać także do wnętrza, zmiana chemiczna odbywa się szybko i element prędko osiąga maximum pojemności.

Potrzeba było wielu badań nad przebiegiem procesów w akumulatorach, zanim udało się tak je zbudować, ażeby mogły istotnie znaleść zastosowanie w technice na wielką skalę.

Ilość elektryczności, jaka może być nagromadzona w akumulatorze zależy oczywiście od jego wielkości. Ważniejsze jednak jest pytanie, wiele z nagromadzonej energii elektrycznej daje się następnie spożytkować przy wyładowaniu. Stosunek oddanej energii do nagromadzonej zowie się *efektem pożytecznym* akumulatora i jest tem większy, im lepiej przygotowany jest element. Otóż liczne starania, przedsięwzięte w celu ulepszenia tych przyrządów oraz powiększenia ich wydajności i wytrzymałości, stopniowo doprowadziły do tego, że obecnie można z łatwością otrzymać napowrót 80—90% nagromadzonej w akumulatorze pracy. Rozmaite zaś formy urządzenia, nadawane akumulatorom, polegają w istocie swej na sposobie, podanym przez Planté'go, albo Faure'a.

Najbardziej rozpowszechnione, szczególnie w Niemczech, są tudor-akumulatory, odznaczające się wielką wydajnością i wytrzymałością. Ołowiane płyty tych elementów są zbudowane podług sposobu Planté'go, z tą różnicą, że nie są płaskie, lecz zaopatrzone w poziome rowki. Urządzenie tych płyt trwa dwa do trzech miesięcy, przyczem blachy dodatnie pokrywają się warstwą dwutlenku ołowiu, grubości $^1/_2$ milimetra. Do długiego użytku warstwa ta byłaby niewystarczającą, lecz w miarę użycia, płyty przy każdym ładunku formują się dalej same przez się tak, że tylko na pierwszy rok należy je pokryć dostatecznie silną i skutecznie działającą warstwą.

Dopiero w ostatnich latach akumulatory zostały o tyle udoskonalone pod względem technicznym, że zaczęto ich używać na wielką skalę. Szczególnie ważne jest to, że wytrzymałość ich trwa obecnie lata całe, podczas gdy dawniej stawały się bezużyteczne po kilku tygodniach, lub miesiącach. Należy jednak

dodać, że cena akumulatorów jest bardzo wysoka, a że przytem składają się z ołowiu, przeto są nader ciężkie. Oprócz tego zajmują wiele miejsca. Naprzykład baterya, której napięcie ma być równe 100 do 110 woltom (do czego potrzeba około 60 akumulatorów) i która ma dawać prądy, równe 30 amperom w ciągu pięciu godzin, zajmuje cały, średniej wielkości pokój. Dlatego też mogą one tylko tam być stosowane, gdzie jest dużo swobodnej przestrzeni.

Z powodu wielkiej wagi są one głównie używane do machinacyj stałych, nie ruszanych z miejsca, w rzadkich zaś wypadkach stosuje się je także tam, gdzie istnieje ruch postępowy. Przy wszelkich zastosowaniach akumulatorów musi przedewszystkiem istnieć urządzenie, umożliwiające szybkie i łatwe ich połączenie, albo z maszyną dynamiczną, któraby je mogła naładować, albo też z danemi przyrządami, jak np. z lampą żarową lub łukową i t. p., którym mają oddać swój prąd. Dalej muszą znajdować się przy nich przyrządy mierzące natężenie i napięcie prądu zarówno przy naładowywaniu, jak i wyładowywaniu. Wreszcie tam, gdzie chodzi o utrzymanie stałego napięcia na końcach bateryi z akumulatorów (pomimo stopniowego jego osłabienia w każdym oddzielnym elemencie), znajduje się jeszcze osobny przyrząd, który wsuwa i wysuwa nowe elementy.

Akumulatory są zawsze korzystne wtedy, gdy mogą służyć do nagromadzenia pracy, która bez tego przepadłaby zupełnie. Np. w fabrykach, gdzie działają wielkie motory parowe, można do tych ostatnich dołączyć maszynę dynamiczną, bez uszczerbku dla właściwego celu motoru. Za pomocą maszyny dynamicznej można naładować wtórną bateryę, która z kolei wieczorem służy do wytwarzania światła elektrycznego. W ten sposób fabryka jest oświetlona, że tak powiemy, przez odpadki siły, czynnej w ciągu dnia. Podobnie w centralnych stacyach dla oświetlenia elektrycznego akumulatory zostają naładowane w dzień, wieczorem zaś i w nocy zwracają nagromadzoną w nich elektryczność.

Wykonano także szereg dość udatnych prób w celu oświe-

tlenia elektrycznością pociągów kolei żelaznej za pomocą akumulatorów. Dopóki kolej jest w ruchu, lokomotywa obraca maszynę dynamiczną i wytwarza przez jej prądy światło elektryczne łukowe, lub żarowe. Lecz z chwilą zatrzymania pociągu prądy te, a więc i oświetlenie, ustałyby. Otóż wtedy właśnie występuje na jaw znaczenie akumulatora. W czasie biegu dynamiczna maszyna, niezależnie od wytwarzania światła, ładuje także bateryę wtórną i gdy kolej zatrzymuje się, prąd z akumulatorów, za pośrednictwem automatycznie działającego przyrządu, dochodzi do lamp i powoduje dalsze ich palenie.

Zastanawiano się także nad tem, czy nie możnaby za pomocą akumulatorów spożytkować niektórych sił przyrody, nieprawidłowo działających. Myślano o tem, ażeby siłę wiatru, albo spadającego deszczu użyć do poruszania maszyn dynamicznych za pośrednictwem wiatraków, lub stosownie zbudowanych, pochyłych dachów. Maszyny dynamiczne miały następnie służyć do naładowania akumulatorów, te ostatnie zaś stanowiłyby, że tak powiemy, magazyny dla nagromadzonej pracy, którą możnaby zużyć w dowolnym czasie. W zasadzie myśl ta, której urzeczywistnienie stanowiłoby wspaniały postęp na drodze sposobów użytkowania ze sił przyrody, jest zupełnie słuszna. W praktyce nie wykonano jej dotychczas dlatego, że oczekiwane w przyszłości dopiero wyczerpanie się węgla kamiennego jeszcze nas obecnie do tego nie zmusza.

Jak zobaczymy później, maszyny dynamiczne służą nietylko do wytwarzania prądów elektrycznych przez ruch; używa się ich także w ten sposób, że same zostają wprawione w ruch przez prądy elektryczne i następnie wykonywują pracę. Otóż i do takiego użytku maszyn dynamicznych można zastosować akumulatory. W danym wypadku chodzi o to, ażeby do maszyny dynamicznej wprowadzić prądy o wielkiem natężeniu, któreby ją wprawiły w ruch, wskutek czego mogłaby ona następnie wykonać znaczną pracę. Zwykle używa się do tego prądów z innej maszyny dynamicznej, lecz można także uciec się do pomocy silnych prądów z akumulatorów. W razie gdy elektryczność ma służyć do poruszania wozów, wtedy jest bar-

dzo korzystnie, jeżeli źródło siły znajduje się na jednym z nich. Wówczas bowiem nie potrzeba urządzać przewodnictwa dla prądu, gdyż wóz zawiera w sobie daną siłę. W niektórych miastach tramwaje poruszają się dzięki działaniu wiezionych razem z nimi akumulatorów. Oś maszyny dynamicznej jest połączona z kołami wozu tramwajowego w sposób, który opiszemy przy kolejach elektrycznych, samą zaś maszynę wprawiają w ruch prądy, dostarczane przez akumulator. Gdy po kilku godzinach energia jego zostaje wyczerpaną, wtedy na stacyi zastępują go innym, świeżo naładowanym. Nie zabiera to podobno więcej czasu, jak przeprząg koni.

Podobne koleje z akumulatorami przedstawiają jednak pewne niewygody; po pierwsze elementy, wskutek wstrząśnień spowodowanych jazdą, psują się łatwo, po drugie stanowią one znaczny balast z powodu swej wielkiej wagi. Niewygody te starano się usunąć przez budowę specyalnie lekkich i trwałych akumulatorów tak, że obecnie w niektórych miastach, jak np. w Hamburgu, Brukseli, kursują prawidłowo tramwaje elektryczne.

Akumulatory znalazły także zastosowanie przy statkach. Statek elektryczny „Volta“ przebył, przy spokojnem morzu, drogę od Dover de Calais. Siemens i Halske puścili na Spreę statek elektryczny, zaopatrzony w 80 akumulatorów, których każde naładowanie wystarczało na 3 do 4 godzin jazdy. Statek mógł zabrać 30 osób i był w stanie przebyć $1\frac{1}{2}$ mili w ciągu godziny.

W końcu wspomnimy o jednej jeszcze próbie zastosowania akumulatorów. Myślano mianowicie o tem, ażeby maszyn dynamicznych, zasilanych przez takie przyrządy, użyć do poruszania balonów powietrznych. Tissandier sądził, że ciężar maszyny dynamicznej wraz z potrzebnemi silnemi akumulatorami mógłby być o wiele mniejszy od ciężaru równoznacznej maszyny parowej, jaka ewentualnie mogłaby służyć za motor dla balonu, nie mówiąc już o zapasie węgla wymaganym przez ten ostatni oraz o niebezpieczeństwie pożaru, jaki łatwo mógłby wzniecić. To też Tissandier przedsięwziął odnośne próby, naj-

przód na małą, później na wielką skalę. Zbudował on mały balon, w którym umieścił niewielki model maszyny dynamicznej Siemens'a i jeden akumulator (razem około 1,5 kilogr. wagi). Balon zaopatrzony w ster i szrubę poruszał się w spokojnem powietrzu dokładnie w kierunku, wskazywanym przez ster. Później Tissandier poszedł jeszcze dalej i zbudował balon w kształcie wielkiego cygara, w którem umieścił cięższą nieco niż poprzednio maszynę dynamiczną, oraz bateryę z 34 elementów. Maszyna ta wprawiała w ruch szrubę balonu, którym można było z łatwością kierować i który nawet walczył zwycięzko z wiatrem szybkości trzech metrów.

Nad tym samym przedmiotem pracowali także Renard i Krebs; im też po raz pierwszy udało się przez kierowanie balonem odbyć kompletną podróż okrężną. Balon zawierał maszynę dynamiczną oraz bateryę, która dostarczała jej prądu. Osiągnęli oni działalność równą 10 koniom parowym [1]), w ciągu godziny i balon posiadał prędkość 6 metrów. Pomimo jednak tych dość udatnych prób, dana kwestya znajduje się dopiero w zaraniu swego rozwiązania. W każdym jednak razie nowsza elektrotechnika wniosła w dziedzinę areonautyki nieznane przedtem pomysły, które z czasem, być może, pozwolą na całkiem dokładne urzeczywistnienie myśli o dowolnem kierowaniu balonami.

Przejdźmy teraz do opisu tak zw. *transformatorów*, których zadanie polega na tem, że zamieniają prądy elektryczne o wysokiem napięciu i słabem natężeniu w prądy o nieznacznem napięciu oraz wielkiem natężeniu i naodwrót.

Wiemy, że każdy prąd elektryczny posiada pewien efekt, czyli, że w każdą sekundę może wykonać pewną pracę, którą mierzy się iloczynem z jego siły elektromotrycznej i natężenia. Jeżeli pierwsza jest wyrażona w woltach, drugie zaś w amperach, wtedy efekt ów wyraża się w wolt×amperach. Praca zaś, jaką prąd może wykonać w danym czasie, jest równa temu iloczynowi, pomnożonemu przez czas, czyli jest równa całkowitej energii, jaka w tym czasie zawarta była w obwodzie.

Otóż całkowitej energii prądu, albo też energii w ciągu

[1]) Koń parowy 75 kilogrametrów.

każdej sekundy, czyli efektu, nie można przy danych warunkach zmienić. Można natomiast tak zmieniać każdy z dwóch czynników efektu, to jest napięcie, albo natężenie, ażeby iloczyn ich pozostał ten sam. Naprzykład prąd o napięciu równem 1000 woltom i natężeniu równem $^1/_2$ ampera, posiada taki sam efekt, jak prąd o napięciu 2 woltów, lecz natężeniu 250 amperów.

Widzimy tedy, że w *zasadzie* można powiększać napięcie prądu kosztem jego natężenia, lub też to ostatnie kosztem napięcia. Zachodzi tedy pytanie, czy i w jaki sposób można tego dokonać w praktyce, oraz czy przemiana ta, albo transformacya posiada jakie zastosowanie?

Ażeby odrazu odpowiedzieć na to drugie pytanie, nadmienimy, że pożytek transformatorów polega głównie na tem, iż pozwalają korzystać z jednej z najważniejszych własności elektryczności, a mianowicie z jej zdolności przenoszenia się na dowolnie wielką odległość.

Jeżeli np. maszyna dynamiczna wytwarza w miejscu *A* prąd elektryczny, który ma zasilać dajmy na to lampę łukową w miejscu *B*, dość odległem od pierwszego, wtedy *A* i *B* muszą być połączone dwoma przewodnikami, z których jeden służy dla prądu idącego do *B*, drugi zaś dla prądu powracającego. Otóż prąd płynący w tym przewodniku musi wytwarzać ciepło (na zasadzie prawa Joule'a), które jest zupełnie nieprodukcyjne i na które zużywa się część energii, dostarczanej przez motor parowy, wprawiający w ruch maszynę dynamiczną. Ilość ciepła oddana w każdą sekundę jest równa oporowi przewodnika pomnożonemu przez kwadrat z natężenia prądu. Widzimy tedy, że im większe, przy danym przewodniku, jest natężenie prądu, tem większa (i to jeszcze w stosunku kwadratowym) jest bezużytecznie wytworzona ilość ciepła, a więc także nieprodukcyjnie wydana praca. Należy koniecznie starać się o to, ażeby ta stracona energia nie przekraczała pewnego określonego procentu całkowitej energii. Można to osiągnąć najprzód przez *zmniejszenie oporu przewodnika*, ciepło bowiem Joule'a jest tem mniejsze, im nieznaczniejszy jest opór. Zasada ta, teoretycznie zupełnie słuszna, napotyka jednak w praktyce na pewną

trudność. Wiadomo nam mianowicie, że chcąc przy tej samej długości zmniejszyć opór przewodnika, należy powiększyć jego grubość. Przy użyciu np. przewodników miedzianych, trzeba brać coraz to grubsze druty, a nawet pręty, przez co wreszcie wydatek na miedź tak wzrasta, iż dorównywa cenie energii, jaką stracilibyśmy przy mniejszem przecięciu drutów. Wtedy oczywiście powiększanie grubości przewodnika niema znaczenia. Dodać należy, że granica ta występuje już przy odległości dwóch stacyi równej 1000—1500 metrom.

Pozostaje jeszcze drugi sposób zmniejszenia straty energii przez wytwarzanie ciepła, a mianowicie *osłabienie natężenia prądu.* Ponieważ jednak na stacyi odbierającej potrzeba prądu o pewnem natężeniu, to zdawałoby się, że nie można tak dowolnie osłabiać tego ostatniego. Otóż tutaj właśnie występuje na jaw pożytek transformatorów. Można dowolnie osłabić natężenie prądu w przewodniku i na stacyi odbierającej przetworzyć go znów w prąd o silnem natężeniu. Ponieważ dalej przybywający prąd ma mieć słabe natężenie, to napięcie jego musi być wysokie. Jednem słowem *rola transformatora na stacyi, do której prąd przybywa, polega na tem, ażeby jego wysokie napięcie zredukować do nizkiego i ażeby natomiast spotęgować nieznaczne jego natężenie.*

Lecz nawet w miejscu wytwarzania prąd nie jest zwykle bezpośrednio otrzymywany w takim stanie, ażeby mógł być przesłany na wielką odległość; przeciwnie, posiada on wtedy zbyt słabe napięcie, gdyż maszyny o bardzo wysokiem napięciu niechętnie są budowane. Wówczas należy prąd przed wysłaniem doprowadzić do stanu odpowiednio wysokiego napięcia i na stacyi odbierającej znów go przetransformować.

To zadanie przekształcania energii prądu elektrycznego spełniają, jakkolwiek niezupełnie dokładnie, przyrządy indukcyjne opisane w poprzednim rozdziale (patrz str. 1063). Widzieliśmy tam, że siła elektromotryczna, napięcie prądu wtórnego zależy od natężenia głównego prądu, od liczby zwojów na wtórnej cewce i od szybkości zmian w prądzie głównym. Wynika z tego, że mając dany zmienny prąd indukujący, można

przez zmianę liczby zwojów w cewce indukowanej nadać wtórnemu prądowi dowolnie wysokie napięcie. Chcąc np. ażeby wtórny prąd posiadał wyższe napięcie od głównego, należy powiększyć liczbę zwojów indukowanych względnie do indukujących. W ten sam sposób można prądowi głównemu nadać wyższe napięcie, niż wtórnemu i wreszcie można napięcie obydwóch uczynić jednakowem. Stosunek liczby głównych zwojów do liczby zwojów wtórnych zowie się *spółczynnikiem przekształcenia* transformatora.

Jeżeli spółczynnik ten jest większy od 1, mamy więcej zwojów głównych niż wtórnych, wskutek czego prąd o wyższem napięciu zostaje przetworzony w prąd o napięciu niższem.

Gdy spółczynnik ów jest mniejszy od 1, wtedy jest więcej wtórnych zwojów, niż głównych i z prądu o niższem napięciu wytwarza się prąd o napięciu wyższem. Ten wypadek ma miejsce przy przyrządach indukcyjnych. Wreszcie gdy spółczynnik ten jest równy 1, wtedy prąd główny i wtórny mają jednakowe napięcie.

W ostatnim wypadku nie ma właściwie żadnej przemiany energii elektrycznej. Lecz właśnie transformatory tego rodzaju najprzód były budowane. Gaulard i Gibbs pierwsi wykazali, za pomocą podobnych przyrządów, rolę prądów o wysokiem napięciu przy przesyłaniu elektryczności.

Jednem z najważniejszych zadań każdego transformatora jest to, ażeby dokonywał przemiany energii elektrycznej bez wielkich strat. Innemi słowy, energia oddawana przez zwoje wtórne zewnętrznemu obwodowi nie powinna być o wiele mniejsza, a w idealnym wypadku powinna być równa energii w zawoju głównym. Powiadamy w idealnym, zupełnie równemi bowiem nie można ich uczynić i stratę pewną koniecznie ponieść musimy Po pierwsze zarówno w głównej, jak i we wtórnej spiralnej pojawia się ciepło Joule'a, które wytwarza się kosztem doprowadzonej energii i jest bezużyteczne dla czynności transformatora. Po drugie w samem jądrze żelaznem, umieszczonem wewnątrz spiralnych, wytwarzają się pewne prądy, pochłaniające część energii. Wreszcie po trzecie przy peryodycznie zmie-

niających się siłach magnetyzujących, oporność żelaza, czyli siła koercytywna musi być przezwyciężona to w jednym, to w drugim kierunku, na co również traci się część pierwotnej energii.

Wskutek tych wszystkich strat efekt, jaki można otrzymać z wtórnej spiralnej, jest z konieczności mniejszy od efektu dostarczonego głównej. Stosunek tych dwóch efektów wyrażamy jako wydajność transformatora. Np. transformatory Gaularda i Gibbs'a posiadały wydajność równą 85%, innemi słowy z efektu w głównej spiralnej można było na końcach wtórnej otrzymać i zużytkować 85%.

W nowszych transformatorach wydajność dochodzi do 96%, to znaczy, że przez przemianę energii elektrycznej traci się jedynie 4%.

Jeżeli w transformatorze za jądro żelazne służy pręt, bądź masywny, bądź utworzony z drutów, wtedy po namagnesowaniu posiada on dwa bieguny. Podczas zmian w jego magnetyzmie wywiera on swe działanie indukujące we wszystkich kierunkach. Otóż końcowe powierzchnie pręta nie są otoczone zwojami, wskutek czego siły indukcyjne, działające w tych kierunkach, nie są spożytkowane. Dlatego też Zipernowsky, Déri i Bláthy użyli nie pręta z dwoma biegunami, lecz pierścienia żelaznego, który owinęli obydwoma drutami. Taki pierścień nie posiada swobodnych biegunów po namagnesowaniu, lecz przy zmianie magnetyzmu działa zupełnie tak samo indukująco, jak każdy magnes o biegunach.

Figura 596 przedstawia taki transformator. Pośrodku widzimy pierścień ze zwojami głównemi (ciemne) i wtórnemi (jasne). Jest on umieszczony na podstawie z drzewa, na pokrywie której znajdują się dwie szruby kleszczowe dla przewodników głównych i trzy dla wtórnych. Mianowicie oba końce wtórnego zawoju dochodzą do dwóch kleszczów, a oprócz tego środek dochodzi do trzeciego kleszcza. Można wówczas użyć zarówno wszystkie zwoje transformatora, jak i połowę tylko.

We wszystkich transformatorach izolacya pomiędzy głównemi i wtórnemi zwojami musi być jaknajdokładniejsza, w przeciwnym bowiem razie przy tak wysokich napięciach po-

czynają przeskakiwać iskry i może nastąpić utrata elektryczności oraz pewne niebezpieczeństwo. Dlatego też na izolacyę zwraca się szczególną uwagę.

W najnowszych czasach zbudowano transformatory, których zadaniem jest zredukować pierwotne napięcie, równe 30000, a nawet 40000 woltom, do napięcia 50 lub 100 woltów. W celu urządzenia możliwie doskonałej izolacyi, niezbędnej przy tak wysokiem napięciu, umieszczono cały transformator w skrzyni, napełnionej olejem, który przenika przez wszystkie pory i izoluje znakomicie. Przyrządy te noszą też nazwę olejnych transformatorów.

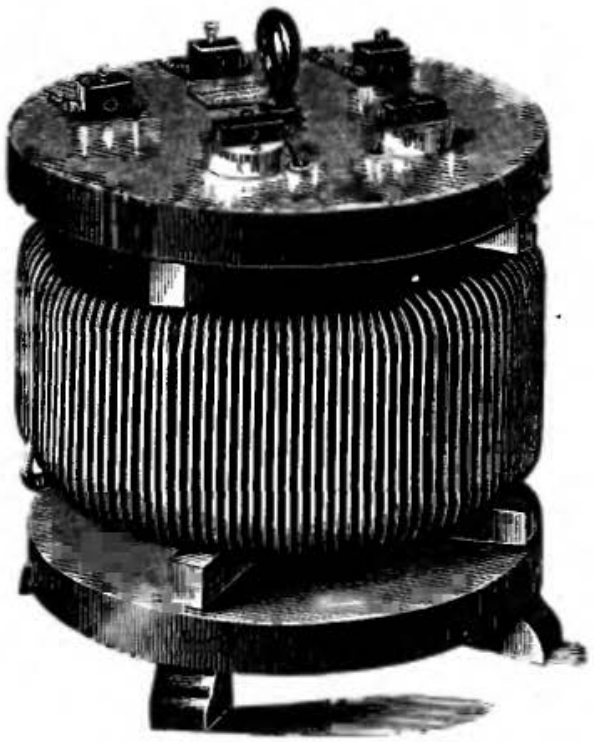


Fig. 596. Transformator bezbiegunowy.

W transformatorach, budowanych przez firmę Ganz i Sp., traci się wskutek ciepła Joule'a w obu zawojach jedynie 2% energii. Nadają im różną wielkość tak, że efekt ich dosięga mocy 1 do 20 koni parowych, przyczem wydajność w największych aparatach dochodzi do 96,8%, w najmniejszych zaś do 89,4%.

Widzimy tedy, że transformatory pozwalają nam korzystać ze zmiennych prądów oraz modyfikować dowolnie każdy z dwóch czynników, od których zależy ich efekt. Ponieważ możemy z łatwością otrzymywać prądy zmienne o wysokiem napięciu i następnie je transformować, przeto użytkujemy ze wszystkich korzyści, jakie prąd o takiem napięciu i słabem natężeniu przedstawia przy przesyłaniu elektryczności.

Próbowano także zbudować transformatory dla prądów stałych. Lecz było to możliwe tylko wtedy, gdy główny prąd

o wysokiem napięciu wprawiał w ruch maszynę dynamiczną i gdy następnie za jej pomocą wytwarzano prąd o nizkiem napięciu. Tutaj nie ma więc tej głównej korzyści, jaką przedstawiają transformatory o prądach zmiennych, a mianowicie, że nie wymagają wcale doglądania, gdyż nie zawierają żadnej ruchomej części. Natomiast transformatory o prądach stałych wymagałyby ciągłego pilnowania. Pod względem więc możności przesyłania energii elektrycznej, prąd zmienny łatwiej dający się przekształcić, ma większe znaczenie, niż prąd stały, który natomiast jest korzystniejszy w innych dziedzinach elektrotechniki.

§ 3. Światło elektryczne łukowe i żarowe.

Potrzeba wprowadzenia światła elektrycznego była jednym z najgłówniejszych bodźców do rozwoju elektrotechniki w początku ósmego dziesiątka bieżącego wieku. Światło to wytwarzano od dawna w pracowniach, do wykładów i doświadczeń, niekiedy także do specyalnych celów i nie cofano się nawet przed użyciem kłopotliwych i drogich bateryj galwanicznych. Lecz gdy zaczęto myśleć o tem, ażeby światło elektryczne użyć do oświetlenia ulic, placów i t. p. wtedy należało przedewszystkiem starać się o wygodniejszy i tańszy sposób otrzymania prądu. To było jedną z głównych przyczyn, że technicy z tak szczególnym zapałem zajęli się wytwarzaniem prądów elektrycznych przez bezpośrednie zużycie pracy, a rezultatem tych starań były maszyny dynamoelektryczne.

Widzieliśmy już wyżej (patrz str. 1003), że łukowe światło elektryczne powstaje wtedy, gdy silny prąd elektryczny płynie przez niewielką warstwę powietrza, oddzielającą od siebie dwa węgle. Powiedzieliśmy tam również, że w łuku świetlnym powstaje przeciwdziałająca siła elektromotryczna, dość znaczna i równa około 40 woltom. Z tego powodu siła elektromotryczna prądu, który ma wytworzyć światło elektryczne, musi być o tyle znaczna, ażeby była w stanie przezwyciężyć tę przeciwniczkę oraz opór węgli i powietrza, innemi słowy powinna wynosić

o wiele więcej, niż 40 woltów, np. 45—55 wolt. To nie wystarcza jednak, gdyż i natężenie prądu musi być nader wielkie, albowiem ogrzanie danej części przewodnika, przez którą płynie prąd, zależy także bezpośrednio od natężenia i to w stosunku kwadratowym. Wspominaliśmy że Davy, chcąc mieć potężne źródło elektryczności do wytwarzania łuku świetlnego, użył bateryę z 2000 elementów. Obecnie zaś w tym samym celu używamy maszyny dynamiczne, które dają, jak wiemy, prądy o znacznem napięciu i wielkiem natężeniu.

Otóż gdy prąd płynie przez warstwę powietrza pomiędzy owemi dwoma węglami, wtedy te ostatnie spalają się stopniowo, przytem węgiel dodatni szybciej, niż ujemny. Przyjmowaliśmy dotychczas, że jeden z węgli jest połączony z dodatnim, drugi zaś z ujemnym biegunem bateryi, lub maszyny dynamicznej o stałym prądzie. Lecz światło elektryczne można także wytworzyć za pomocą szybko zmieniających się prądów, gdyż podług prawa Joule'a ogrzanie elektrodów zależy od kwadratu z natężenia prądu. A więc przy tych samych warunkach zewnętrznych wysokość temperatury nie zmienia się, gdy dodatni prąd płynie przez elektrod to w jednym, to w drugim kierunku. Ponieważ ilość światła, jaką promieniują elektrody, zależy bezpośrednio od stopnia ogrzania, przeto prądy zmienne równie dobrze nadają się do wytwarzania łukowego światła elektrycznego, jak i prądy stałe. Okoliczność, że prądy z maszyn dynamicznych, zarówno stałe jak i zmienne, nie są ciągłe, lecz składają się z wielkiej liczby oddzielnych prądów (mających jednakowy albo zmienny kierunek), szybko płynących jedne za drugimi, nie wpływa wcale na łuk świetlny, jeżeli tylko następują one po sobie z dostatecznie wielką prędkością. W rzeczywistości zaś ta ostatnia może być tak znaczna i przerwy pomiędzy oddzielnymi prądami tak małe, że razem czynią wrażenie jedynego tylko prądu. W krótkim odstępie czasu pomiędzy dwoma prądami światło nie może zgasnąć, gdyż temperatura nie spada tak szybko i oko, które, jak czytelnik wie dobrze, nie oddziela bardzo szybko następujących po sobie wrażeń, nie odróżnia też odnośnych peryodycznych zmian w sile

światła. Powtarzamy, że stosuje się to zarówno do prądów stałych, jak i zmiennych.

Istnieje natomiast pod innym względem różnica w świetle elektrycznem, zależnie od tego, czy do jego wytworzenia użyto prądy zmienne lub stałe. Jeżeli przez węgle płynie prąd o stałym kierunku, wtedy dodatni węgiel spala się prawie dwa razy szybciej, niż ujemny i na pierwszym powstaje świecące zagłębienie, czyli krater. W lampach elektrycznych o prądzie stałym, dodatni węgiel znajduje się zawsze ponad ujemnym, tworząc pewnego rodzaju reflektor, odbijający promienie świetlne ku dołowi. Fig. 548 (patrz wyżej, str. 1005) przedstawia właśnie końce węgli w ten sposób umieszczonych. Światło nie rozchodzi się wówczas jednostajnie we wszystkie strony, lecz jest odrzucane więcej na dół. Przy użyciu zaś prądów zmiennych, każdy z dwóch węgli stanowi kolejno to elektrod dodatni, to ujemny. Wskutek tego oba spalają się z jednakową prędkością, nie tworzy się żaden krater i węgle zachowują swój pierwotny zaostrzony kształt (fig. 597). W tym wypadku światło promieniuje jednostajnie we wszystkich kierunkach, o ile nie przeszkadzają temu same węgle.

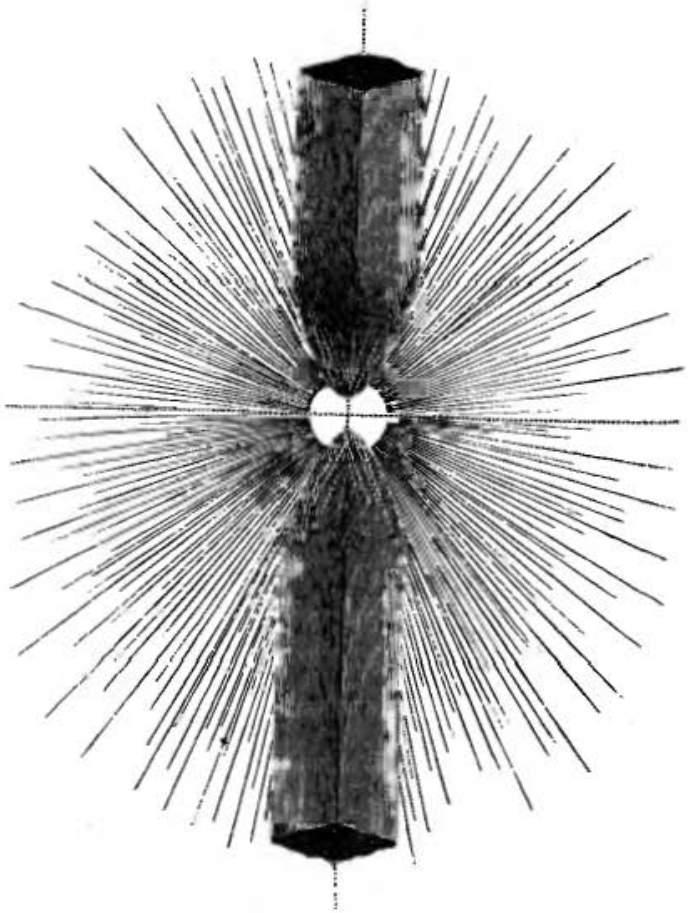


Fig. 597. Końce węgli przy przepuszczeniu prądu zmiennego.

Gdy światło elektryczne nie jest otoczone kloszem, wtedy natężenie jego może przedstawiać nader znaczne różnice, zależnie od kierunku w jakim wpada ono do oka

albo do przyrządu mierniczego. Okazało się np. przy badaniu lampy, zasilanej przez prąd stały, że natężenie jej światła, padającego w poziomym kierunku, było pięć razy mniejsze od natężenia jej światła, obserwowanego pod kątem 60° do poziomu. Dlatego też światło elektryczne otrzymywane za pomocą prądów stałych należy zawsze umieszczać tak wysoko, ażeby promienie padały na oświetloną powierzchnię pod pewnym oznaczonym kątem. Przy użyciu kloszów różnice, o których mowa, nieco maleją.

Jasność światła elektrycznego oceniamy przez porównanie go z innemi świecącemi ciałami, co stanowi, jak wiemy, zadanie fotometryi (patrz w księdze o świetle str. 414—416). W celu oznaczenia jednostki światła, z którą możnaby porównać natężenie wszystkich innych źródeł świetlnych, próbowano różnych sposobów, należy zaś dodać, że pracowali nad tem najwybitniejsi uczeni. Na kongresie w Paryżu w roku 1884 za jednostkę białego światła przyjęto światło promieniowane przez powierzchnię 1 kwadr. centymetra stopionej, czystej platyny przy temperaturze krzepnienia. Ponieważ jednostka ta jest zbyt wielka, przeto za podstawę do pomiarów przyjęto natężenie świecy, równe tylko dwudziestej części tej jednostki; świeca ta zowie się *decymalną*. Natężenie jej jest prawie równe natężeniu świecy parafinowej o średnicy 20 milim. i której płomień posiada wysokość 50 milimetr.; tę ostatnią świecę nazywano dotychczas *normalną*. Ażeby dać czytelnikowi pojęcie o jej natężeniu dodamy, że zwykły uliczny płomień gazowy posiada jasność około 16 świec normalnych.

Jasność światła elektrycznego zależy oczywiście od *natężenia prądu*, płynącego przez węgle. Dzięki temu można ją zmieniać w nader szerokich granicach, od natężenia kilku set świec do natężenia wielu dziesiątków tysięcy świec. Oprócz tego natężenie świetlne lampy elektrycznej zależy także od *długości łuku świetlnego*, to jest od wielkości przestrzeni oddzielającej oba węgle. Mianowicie przy powiększeniu odległości między końcami węgli opór lampy wzrasta, gdy zaś prąd pozostaje ten sam, całkowita ilość wytworzonego ciepła i światła proporcyo-

nalna, jak wiemy, do kwadratu z natężenia prądu oraz do oporu, również wzrasta. Lecz gdy węgle są zbyt oddalone od siebie, wtedy światło staje się niespokojnem i często gaśnie; jest to prawie granica, przy której bieg prądu ustaje. Dlatego też w praktyce długość łuku świetlnego powinna być dobrana stosownie do natężenia prądu, który ma zasilać lampę. Gdy ono jest równe 5 do 8 amperom, wtedy łuk nie powinien przenosić 1 do 2 mm.; przy natężeniu 8 do 10 amperów może dosięgnąć 3 milim., przy natężeniu zaś 20 amp. dosięga długości 4—5 milim.

Lecz jeżeli nawet z początku odległość pomiędzy węglami jest odpowiednią do natężenia prądu, to w miarę ich spalania powiększa się ona ustawicznie i w końcu musi nadejść moment, gdy prąd nie jest w stanie przezwyciężyć oporu warstwy powietrza, a wtedy bieg jego i wraz z nim światło elektryczne ustają.

Najpierwszym tedy warunkiem możności korzystania w praktyce ze światła elektrycznego było uruchomienie węgli, innemi słowy obmyślenie *regulatora*, któryby ciągle sprowadzał wzajemną ich odległość do żądanej wielkości. Oprócz ustawicznego zbliżania ku sobie dwóch węgli, regulator ma jeszcze inną czynność do spełnienia. Mianowicie natężenie prądu, wytwarzającego światło elektryczne, nie jest ciągle jednakowe, a to z powodu nieuniknionych nieprawidłowości w biegu maszyny dynamicznej. Należało więc baczyć na to, ażeby podczas osłabienia prądu odległość węgli zmniejszała się i ażeby przeciwnie podczas jego wzmocnienia malała. Regulatory odpowiadające tym wymaganiom stanowią właściwe *lampy elektryczne*. Tak subtelna regulacya byłaby niemożliwą, gdyby jej nie dopomagał sam prąd. Ten ostatni słabnąc, musi sam przez się zbliżyć wzajemnie węgle, gdy zaś ulega wzmocnieniu, powinien je oddalić od siebie; w taki sposób odległość między niemi pozostaje ta sama. Co do konieczności zbliżania węgli, wywołanej przez ich spalanie, to stanowi ona zadanie pod względem mechanicznym dość łatwe do rozwiązania. Potrzeba tylko dolny węgiel stale umocować, górnemu zaś umożliwić powolny ruch tak, ażeby ustawicznie spadał przez własny swój ciężar;

zadanie regulatora polega wtedy na tem, że nie dozwala mu opaść zbyt nizko.

Najprostszym środkiem do regulowania łuku świetlnego okazał się elektromagnes. Jeżeli prąd, mający wytworzyć światło, biegnie wokoło jądra z miękiego żelaza, wtedy jądro to stanowi mechanizm, który może powodować silniejszy lub słabszy ruch, zależnie od natężenia prądu. Albowiem przy innych warunkach niezmienionych, wielkość przyciągania elektromagnesu zależy bezpośrednio od natężenia prądu płynącego przez jego zwoje. Należy więc naprzeciwko biegunów elektromagnesu umieścić kotwicę z miękkiego żelaza, która może się obracać, a w miarę natężenia prądu otrzymamy słabszy, lub silniejszy jej ruch. Ruch kotwicy można następnie przenieść za pomocą kół i zębów na jeden z węgli. Jeżeli odległość między węglami jest za mała, a więc natężenie prądu zbyt wielkie, wtedy magnes przyciąga kotwicę i wówczas za pośrednictwem kół i prętów zębatych może oddalać od siebie węgle, dopóki opór i natężenie prądu nie staną się znów normalne. Gdyby jednak przyciąganiu elektromagnesu nie przeciwdziałała żadna siła, wtedy obracająca się kotwica zostałaby możliwie daleko przezeń przyciągniętą. Siłę taką przedstawia np. sprężyna, starająca się pociągnąć kotwicę w górę wówczas, gdy magnes ciągnie ją na dół. Przy pewnem określonem położeniu kotwicy istnieje równowaga pomiędzy przyciąganiem magnesu i sprężyny. Każde wzmocnienie natężenia prądu potęguje siłę magnesu, który ściąga kotwicę i powiększa napięcie sprężyny. Wskutek opuszczenia się kotwicy, węgle oddalają się od siebie, przez co prąd, a więc i elektromagnes słabną, przyciąganie sprężyny przeważa i kotwica oraz węgle powracają do pierwotnego, normalnego położenia.

Podług tych zasad ogólnych Foucault-Dubosq zbudował pierwszą lampę elektryczną, obecnie jeszcze niekiedy używaną. Jest ona, podobnie jak lampa Serrin'a, dość skomplikowana. Natomiast przy budowie nowszych lamp dąży się do możliwie prostego ich urządzenia. Jako przykład tego rodzaju może służyć lampa Hefner-Alteneck'a, często używana, szczególniej w laboratoryach i szematycznie przedstawiona na fig. 598.

W każdej elektrycznej lampie należy odróżniać część regulującą elektryczną i mechaniczną. Pierwsza, jak powiedzieliśmy, składa się z elektromagnesu E, który może przyciągać kotwicę A, mocno połączoną z dźwignią p. Szruba s naciąga sprężynę przeciwdziałającą przyciąganiu, wywieranemu na kotwicę.

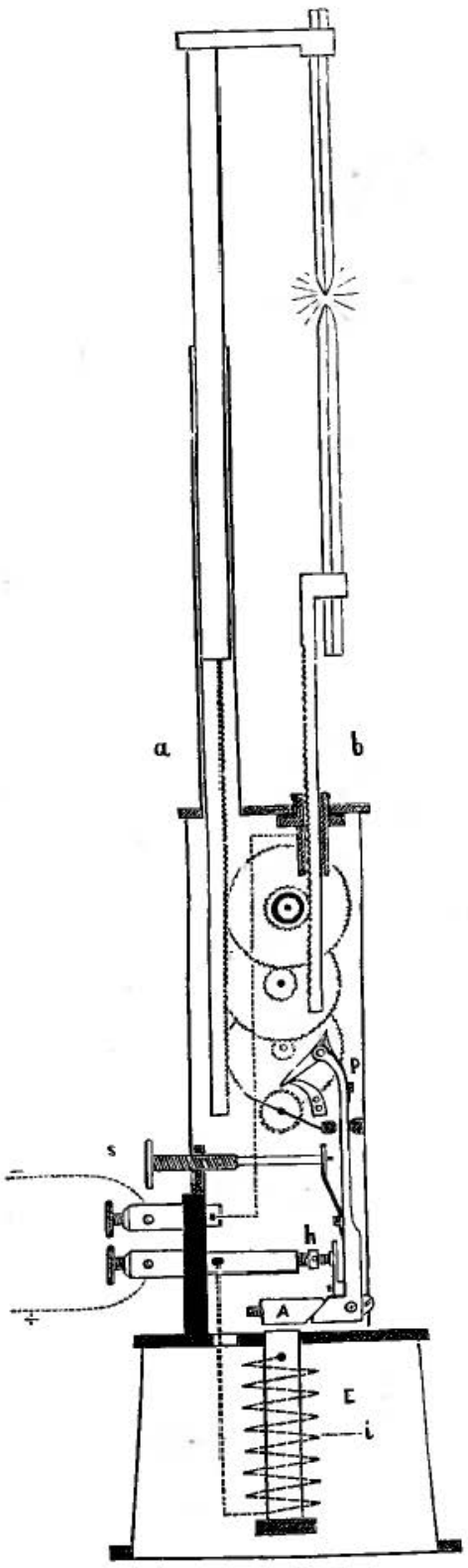


Fig. 598. Szemat lampy Hefner-Alteneck'a.

Część mechaniczna regulatora składa się z trzech kół i dwóch prętów zębatych, do których są przymocowane oba węgle. Pręt podtrzymujący górny węgiel wchodzi pomiędzy zęby górnego koła, ten zaś, który podtrzymuje węgiel dolny—pomiędzy zęby koła mniejszego, osadzonego na tej samej osi. Drugie i trzecie koło przenosi ruch na najmniejsze dolne koło, w które wchodzi dźwignia p. System kół jest wprawiany w ruch przez sprężynę zegarową. Przez to oba węgle zbliżają się wzajemnie aż do zetknięcia. Lecz oto prąd rozpoczyna swój bieg i płynie przez elektromagnes, oraz rusztowanie przyrządu do górnego węgla, ztąd do dolnego i wraca napowrót do maszyny (po linii kropkowanej). Silny prąd magnetyzuje E, przez co kotwica A zostaje przyciągnięta, dźwignia p zaczepia o ma-

łe koło, które nieco się obraca i rozsuwa węgle. Jednocześnie w miejscu h następuje wtedy bezpośrednie zetknięcie tak, że prąd nie biegnie już wokoło elektromagnesu E. Kotwica zostaje oswobodzoną, dźwignia p wychodzi z małego koła i węgle znów zbliżają się ku sobie. Wskutek tego A ponownie ulega przyciąganiu i powtarza się to samo, co wyżej, przez to zaś łuk świetlny posiada stale jednakową długość.

Lecz opisany tylko co regulator elektryczny można użyć jedynie w specyalnych wypadkach. Każda taka lampa funkcyonuje należycie pod warunkiem, że tylko ona jedna znajduje się w obwodzie maszyny. Widzieliśmy bowiem, że regulacya odbywa się w taki sposób, iż podczas osłabienia prądu węgle zbliżają się ku sobie, podczas wzmocnienia zaś jego oddalają wzajemnie, obojętną przytem jest rzeczą, zkąd pochodzą te osłabienia i wzmocnienia prądu. Przyczyną ich mogą być procesy zachodzące w samej lampie, lub też spalenie się węgli i t. p., lecz źródłem ich może także być nieprawidłowy bieg maszyny. Otóż gdy w jednym obwodzie znajduje się więcej, niż jedna lampa, wtedy powyższy sposób regulowania traci swe znaczenie. Niedogodność ta występuje już nawet przy szeregu złożonym z dwóch lamp. Przypuśćmy, że jedna pali się prawidłowo, w drugiej zaś węgle oddaliły się zanadto od siebie. Wówczas regulator zbliży ku sobie węgle w drugiej lampie, a więc wzmocni cały prąd, wskutek czego regulator w pierwszej lampie pocznie działać i oddali wzajemnie jej węgle. Obecnie znów druga lampa pali się, być może prawidłowo, za to pierwsza pali się źle. Jeszcze gorzej się dzieje, gdy więcej niż dwie lampy znajdują się w jednym obwodzie. Przez długi czas nie można było zatem za pomocą jednej maszyny podtrzymać palenia wielu lamp w jednym obwodzie dlatego, że uregulowanie jednej wpływało ujemnie na wszystkie pozostałe.

Ta pozorna niemożebność podziału światła elektrycznego stanowiła w historyi odnośnej gałęzi techniki kryzys, który szczęśliwie ominięto dzięki równie prostemu, jak znakomitemu pomysłowi inżyniera Jabłoczkowa (w roku 1876). Zwrócił on uwagę na to, że do utrzymania końców węgli na stałej odległo-

ści nie potrzeba wcale tak skomplikowanych i niepewnych mechanizmów, jak wyżej opisany. Nie należy tylko umieszczać węgli jednego nad drugim, gdyż wtedy wskutek spalania odległość pomiędzy niemi ciągle wzrasta, lecz przeciwnie trzeba je ustawić obok siebie i silnie umocować. Wtedy odległość pomiędzy ich końcami jest raz na zawsze oznaczona i zachowuje stale swą wielkość, jeżeli tylko dba się o to, ażeby węgle opalały się jednakowo. Otóż Jabłoczkow umieścił obok siebie dwa cienkie pręciki węglowe w odległości około 3 milimetrów i przestrzeń między niemi wypełnił łatwo topliwą, izolującą substancyą. Taki układ zowie się *świecą Jabłoczkowa;* widzimy ją przedstawioną na fig. 599. Pręciki węglowe, mające 200 milim. długości i 4 milim. w średnicy, są oddzielone warstwą pośrednią, na rysunku białą. Każdy z węgli jest połączony z rękawem mosiężnym, do którego za pomocą szrub kleszczowych dochodzi drut przewodni. Międzywęglowa substancya izolująca służy do tego, ażeby łuk świetlny tworzył się jedynie pomiędzy górnemi końcami węgli, a składa się ona zwykle z gipsu, lub kaolinu. Wskutek gorąca od łuku świetlnego substancya ta topi się wolno i pozwala spalać się węglom. I tutaj pojawiła się trudność, lecz usunięto ją z łatwością. Mianowicie gdy prąd zostaje doprowadzony do węgli, wtedy z początku łuk świetlny wcale nie może powstać, gdyż węgle nie stykają się. W celu ominięcia tej przeszkody Jabłoczkow umieścił pomiędzy górnemi końcami obu węgli cienką blaszkę grafitu. Prąd przechodzi przez nią, topiąc ją, jednocześnie zaś węgle poczynają się żarzyć i wkrótce pojawia się łuk, który trwa nieprzerwanie i schodzi coraz niżej, dopóki węgle nie zużyją się. Substancya izolująca znacznie przytem potęguje światło, gdyż cząstki jej rozżarzają się. Przypuszcza się tutaj zawsze, że oba węgle spalają się jednakowo szybko. Lecz wiemy z powyższego, że tak nie jest w wypadku, gdy świecę zasilają prądy stałe, wówczas bowiem węgiel dodatni spala się prawie dwa razy prędzej, niż ujemny. Z tego powodu okazała się konieczność użycia w danym razie prądów zmiennych, gdyż przez to oba węgle, jeżeli tylko są jednakowo grube, zużywa ją się zupełnie jednakowo

Świece Jabłoczkowa dozwalają na dość wielki podział światła. Ponieważ odległość pomiędzy węglami nie zmienia się, przeto natężenie prądu w całym obwodzie pozostaje to samo, jeżeli tylko wahania w liczbie obrotów maszyny są nieznaczne. Można wtedy włączyć w obwód szereg świec tak, że prąd płynie od pierwszej do drugiej, od drugiej do trzeciej i t. d. Odkrycie Jabłoczkowa, tak proste w pomyśle i wykonaniu, zostało zaraz zastosowane w praktyce. W Paryżu świecami jego oświetlono wiele ulic i gmachów i im właściwie należy głównie zawdzięczać szybkie rozpowszechnienie światła elektrycznego. Pomimo to przedstawiały one jeszcze wiele złych stron, najważniejszą zaś było światło migocące, niemiłej czerwonawo-niebieskiej barwy, która pochodziła od domieszek substancyi międzywęglowej.

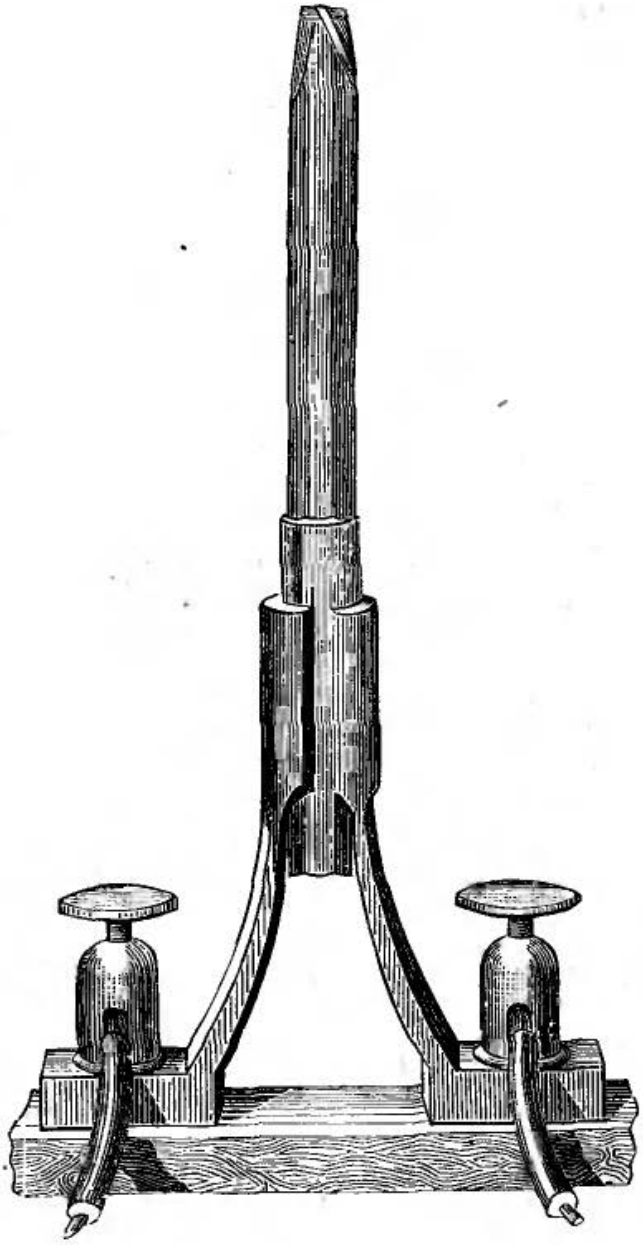


Fig. 599. Swieca Jabłoczkowa.

Z powodu tych niedokładności w urządzeniu świec, zaczęto poszukiwać innych sposobów podziału światła elektrycznego i wreszcie w roku 1878 udało się, za pomocą metody już da-

wniej stosowanej, wynaleść lampę, która w znacznym stopniu pozwoliła cel ów osiągnąć (Lontin, Mersanne, Fontaine). W lampie wyżej opisanej regulator elektryczny jest włączony *bezpośrednio w obwód głównego prądu*, przez co ulega wpływowi wszelkich zmian, zachodzących zewnątrz jego własnej lampy; dlatego też jest szkodliwy i bezużyteczny dla pozostałych lamp, włączonych w ten sam obwód.

Podobny regulator można zatem stosować tylko do takiej lampy, która sama jedna pali się w danym obwodzie. Figura 600 przedstawia szematycznie bieg prądu w danym wypadku: sunie on od maszyny *M*, przez regulator *R* i węgle *K K* napowrót do miejsca, zkąd wyszedł. Wszelka zmiana w oporze łuku świetlnego, oraz wahania prądu wywołują jednostajne działanie regulatora.

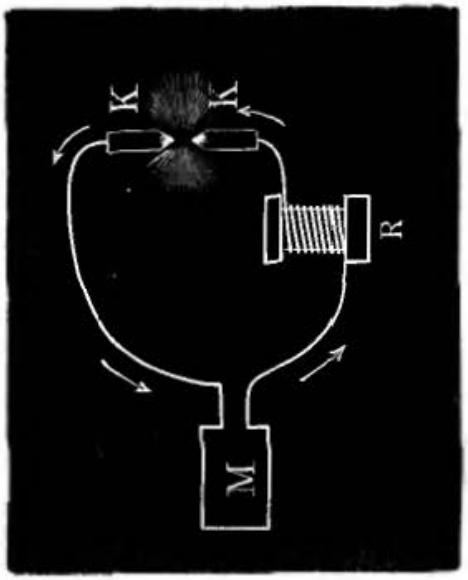


Fig 600. Szemat prądu w regulatorze na obwodzie głównym.

Jeżeli natomiast prąd wchodzący do lampy zostaje — według nowo wprowadzonej zasady — rozgałęziony tak, że regulator nie leży w głównym obwodzie, wtedy warunki są o wiele korzystniejsze. Szemat podobnie rozgałęzionego prądu, podaje fig. 601, gdzie prąd od maszyny *M* biegnie aż do punktów *a* i *b;* tutaj rozgałęzia się i sunie z jednej strony przez węgle *KK*, z drugiej zaś przez regulator. Ponieważ natężenie prądu w obydwóch gałęziach jest odwrotnie proporcyonalne do ich oporu, to im większy jest opór łuku świetlnego, tem większe jest natężenie prądu w gałęzi obejmującej regulator. Ten ostatni

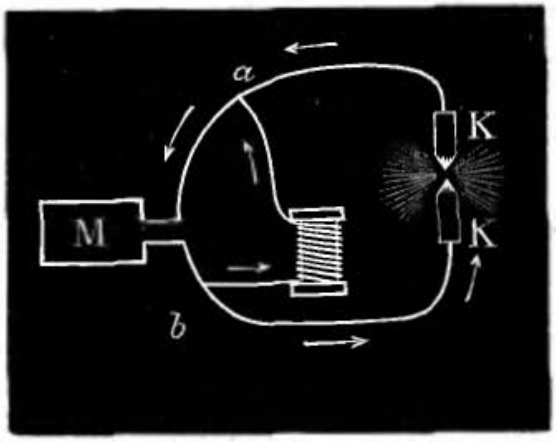


Fig. 601. Szemat prądu w regulatorze na obwodzie bocznym.

może wówczas działać silniej i zbliżyć ku sobie węgle. Tutaj więc nie zależy tak bardzo na tem, jak silny w istocie jest prąd, wchodzący do obydwóch gałęzi, albowiem regulator działa głównie pod wpływem procesów, zachodzących w jego własnej lampie. Zewnętrzne wahania prądu zmieniają jednakowo natężenie w obydwóch gałęziach, wpływają tedy na regulacyę o wiele mniej, niż w poprzednim układzie. Lecz nawet z tak urządzonemi lampami nie można utworzyć liczniejszego szeregu w jednym i tym samym obwodzie, gdyż, jak powiadamy, wpływ zewnętrznych wahań prądu, zależnych np. od zmian w oporze innej lampy, jest wprawdzie osłabiony, ale niezupełnie usunięty.

Zupełną niezależność wielu lamp złączonych w jednym obwodzie osiągnięto dopiero dzięki urządzeniu wprowadzonemu przez Hefner-Altenek'a. Pomimo, że uległo wielu późniejszym zmianom i ulepszeniom, ono w istocie po raz pierwszy umożliwiło doskonałefunkcyonowanie wielu lamp w jednym obwodzie. Jest to tak zwana *lampa dyfferencyalna*, w której prąd z maszyny również się rozgałęzia. Na jednej gałęzi znajdują się węgle, na drugiej zaś przyrząd regulujący. Główna jednak zmiana polega na tem, że i na pierwszej gałęzi, to jest tej, która obejmuje węgle, znajduje się przyrząd regulujący, przeciwdziałający tamtemu. Stosunek natężeń prądu w obydwóch gałęziach jest odwrotny do ich oporu. Otóż oba regulatory są tak urządzone, że wzmocnienie prądu w tej gałęzi, na której nie ma węgli, powoduje zbliżenie wzajemne tych ostatnich, wzmocnienie zaś w gałęzi obejmującej węgle, wpływa na ich oddalenie. Gdy więc łuk świetlny, a więc i jego opór są zbyt wielkie, wtedy natężenie prądu w pierwszej gałęzi wzrasta i przez to węgle zostają zbliżone ku sobie. Jeżeli przeciwnie, łuk jest za mały, a więc gdy natężenie prądu w gałęzi z węglami wzmaga się, wtedy węgle te zostają oddalone i łuk znów powraca do normalnej długości. Przy takim sposobie regulowania natężenie prądu w zewnętrznym obwodzie nie ulega wpływowi danej lampy, gdyż węgle jej przedstawiają zawsze normalny opór, inaczej mówiąc, procesy zachodzące w jednej lampie, nie pociągają za sobą wiadomych następstw dla pozostałych lamp. Brak miejsca nie pozwala nam

rozpisywać się obszerniej o szczegółach całego urządzenia lampy dyfferencyalnej, powiemy tylko, że podczas gdy część mechaniczna jest nieco skomplikowana, to część elektryczna regulatora jest dość prosta. Jeden z węgli jest przymocowany do sztaby żelaznej, która może przesuwać się w górę i na dół wewnątrz solenoidu, po którym biegnie prąd, regulujący położenie węgli i długość łuku. W użyciu cały aparat regulujący jest zamknięty w metalowym futerale, węgle zaś są otoczone kloszem z mlecznego szkła, pokrytym siatką drucianą. Wszystkie prawie lampy dotychczas zbudowane, należą do jednego z wyżej opisanych typów. Część elektryczna regulatora różni się w nich mało, natomiast część mechaniczna przedstawia ogromne różnice, w bliższe objaśnienie których nie możemy jednak tutaj się wdawać. Zaznaczymy tylko jeszcze wkrótkości wielkie korzyści, jakie osiągamy ze światła elektrycznego w porównaniu z gazowem. Przedewszystkiem należy wspomnieć o braku wszelkiego prawie niebezpieczeństwa przy użyciu takiego światła, następnie o wielkiej łatwości, z jaką można otrzymać światło tak jasne, że żadne inne porównać się z niem nie da. Pod względem blasku i barwy, światło elektryczne zbliża się najbardziej do dziennego. Wreszcie przedstawia ono jeszcze tę nader ważną dla nas korzyść, szczególniej w miejscach, gdzie naraz zbiera się wiele osób, że wcale nie psuje powietrza, podczas gdy światło gazowe napełnia je szkodliwemi, a nawet trującemi gazami i oprócz tego wytwarza dużo ciepła, co w wielu wypadkach nie jest rzeczą pożądaną. Łukowe światło elektryczne uznano obecnie za bezwarunkowo najlepszy środek do otrzymania wspaniałego oświetlenia.

Lecz jeżeli jest ono niezaprzeczenie korzystnem przy oświetleniu ulic, placów oraz wogóle większych przestrzeni, to nie nadaje się do użycia w domach prywatnych, w pokojach, gdzie zbyt silne źródła światła nie są wcale potrzebne. Nie udało się zaś uczynić łukowego światła elektrycznego tak słabem, ażeby mogło służyć jako światło pokojowe, albowiem długość łuku musiałaby wtedy być tak niezmiernie mała, że dokładne regulowanie światła stałoby się niemożliwe.

Należało tedy inaczej zastosować daną zasadę, co też uczynił Edison (patrz także str. 999). Wprawdzie pomysł jego co do tak zwanego *żarowego światła elektrycznego* znany był jeszcze przed nim, a nawet poczęści był wykonany, lecz próby te nie miały wielkiego praktycznego rezultatu. Dopiero znakomite i usilne starania Edisona pozwoliły otrzymać żarowe światło umożliwiające nieskończony prawie podział.

Polega ono na odmiennem zastosowaniu tej samej zasady fizycznej, z którą spotkaliśmy się przy świetle łukowem. W obu razach ciało, przez które przepływa prąd, ogrzewa się i poczyna świecić. Lecz w świetle łukowem jest to warstwa powietrza, oddzielająca dwa węgle, w świetle zaś żarowem jest to nieprzerwany przewodnik. Wiemy, że przy tem samem natężeniu prądu ogrzanie przewodnika jest tem znaczniejsze, im większy jest jego opór. Gdy wytworzone ciepło jest dostatecznie wysokie, wtedy przewodnik zaczyna żarzyć się, a jeżeli jest topliwy, to nawet stapia się pod wpływem prądu. Fakty te znane były oddawna, próbowano też użyć do oświetleń cienkie rozżarzone druty metalowe, szczególniej platynowe, lecz tutaj właśnie niebezpieczeństwo stopienia było nader wielkie. Gdy tylko prąd stawał się zbyt silnym, wtedy rozżarzony drut platynowy stapiał się i światło ustawało. Najlepszym tedy materyałem w danym wypadku okazał się węgiel, który, jak wiadomo, nie topi się przy żadnej ze znanych nam dotychczas wysokich temperatur. Lecz rozżarzony węgiel łączy się z tlenem powietrza, szybko się spala i dlatego chcąc go użyć do oświetlenia, należy starannie usunąć powietrze z jego otoczenia. Innemi słowy potrzeba umieścić węgiel w szklanem naczyniu, z którego powietrze zostało usunięte. Oprócz tego pręciki węglowe muszą być o tyle cienkie, ażeby mogły rozżarzyć się, lecz ażeby przytem nie straciły swej wytrzymałości. Zasługą jest Edisona, że on pierwszy przygotował nadzwyczaj cienkie pręciki węglowe wielce wytrzymałe. Figura 602 przedstawia jego lampę. Końce węglowego pręcika, nieco zgrubiałe, są połączone z grubszemi również końcami cienkich drutów platynowych, które przechodzą przez szkło i doprowadzają prąd do

węgli. W celu umożliwienia łatwego i dokładnego dopływu prądu, każda lampa Edisona jest zaopatrzona w metalowy gwint szrubowy, za pomocą którego można ją przyszrubować do podstawy. Koniec jednego drucika platynowego dochodzi z boku do gwintu, drugi zaś do dna samej lampy, gdzie kończy się blaszką metalową. Oba końce są wzajemnie odosobnione za pośrednictwem gipsu. W podstawie, czyli w oprawie lampy, jest wycięta odpowiednia mutra szrubowa, do której dochodzi jeden drut przewodni od maszyny, na dnie zaś oprawy znajduje się odosobniona sprężynka metalowa, z którą jest połączony drugi drut od maszyny. Po przyszrubowaniu lampy do oprawy, jej blaszka metalowa na dnie przyciska sprężynkę i powoduje bardzo dokładne zetknięcie, przez co prąd ma zapewnioną drogę. Chcąc zgasić lampę, należy wysunąć ją tylko nieco z podstawy, wówczas bowiem zetknięcie na dnie lampy ulega przerwaniu i prąd przestaje płynąć.

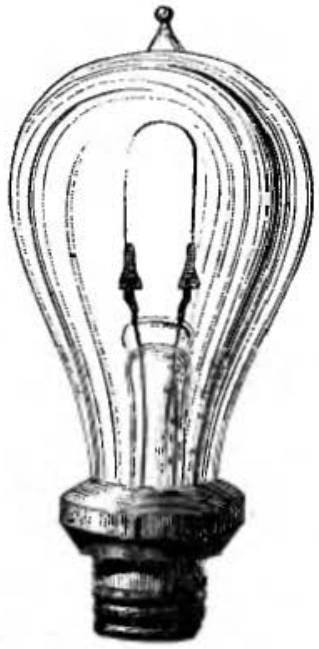


Fig. 602. Lampa Edisona.

Należy jeszcze dodać w tem miejscu, że od czasu wprowadzenia żarowego światła elektrycznego, sposoby przygotowywania węgli zostały wielce udoskonalone.

Co do podstawy lampy oraz sposobu jej połączenia z właściwą lampą, to istnieją tutaj rozmaite urządzenia, lecz wszędzie chodzi głównie o to, ażeby zetknięcie było możliwie dokładne. W żarowej lampie Siemens'a końce drutów platynowych dochodzą z jednej strony do czapeczki mosiężnej, z drugiej do dolnej blaszki metalowej, całą zaś lampę umieszcza się na podstawie w taki sposób, że następuje podwójne (boczne i dolne) zetknięcie. W innych lampach Siemens'a trzon, podobnie jak w lampach Edisona, jest u dołu zamknięty przez gwint szrubo-

wy, z którym połączono jeden z drutów platynowych, podczas gdy drugi oddzielnie dochodzi do dna.

Jasność lamp zależy od natężenia prądu oraz od oporu pręcika węglowego. Ponieważ opór węgli zmniejsza się znacznie wskutek ich ogrzania, to opór lampy rozżarzonej do białości jest około 2 razy mniejszy, niż wtedy, gdy ona jest zimna.

Za pomocą prądów o rozmaitem natężeniu, można z każdej lampy stworzyć dowolnie silne źródło światła. Lecz prąd elektryczny, płynąc przez węgle, rozpyla je, a działanie to jest tem silniejsze i lampa tem łatwiej zostaje uszkodzona, im potężniejszy jest prąd. Albowiem wówczas następuje chwila, że węgiel łamie się w miejscu, gdzie jest najcieńszy. Dlatego zbyt silny prąd szkodzi każdej lampie, istnieje też dla niej pewne określone natężenie, przy którem z jednej strony nie jest narażona na niebezpieczeństwo zniszczenia, z drugiej zaś posiada odpowiednią jasność. Naprzykład jedna z lamp Siemens'a przedstawia w stanie gorąca opór, równy 175 ohmom. Gdy przez nią przechodzi prąd o natężeniu 0,57 amperów, wtedy pali się ona prawidłowo i wydaje światło odpowiadające 16 świecom.

Ponieważ na końcach każdej lampy panuje pewne napięcie, wyrażone w woltach i ponieważ oprócz tego przepływa przez nią prąd o natężeniu równem określonej ilości amperów, to w każdej palącej się lampie istnieje jakiś efekt, innemi słowy w każdej sekundzie pewna ilość pracy zużywa się na doprowadzenie lampy do stanu świecenia. Efekt w lampie, a więc praca zużyta w ciągu sekundy, jest równa iloczynowi z ilości woltów i amperów. Przez to efekt mierzy się za pomocą jednostki, którą nazywaliśmy dotychczas wolt-amperem, lecz którą obecnie oznaczają zwykle mianem *watta*. Jeden watt jest równy $^1/_{736}$ konia parowego i przez to można efekt w danej części obwodu wyrazić w koniach parowych. Naprzykład wyżej wspomniana lampa Siemens'a, wymagająca przy napięciu 100 woltów, prądu o natężeniu 0,57 amperów do normalnego palenia, posiada przytem efekt równy 57 woltom. Innemi słowy prawidłowo paląca się lampa zużywa $^1/_{736} \times 57 = {}^{57}/_{736}$, a więc około $^1/_{13}$ działalności, albo mocy konia parowego. Za pośrednictwem tedy mocy,

równej jednemu koniowi parowemu można podtrzymać działanie 13 podobnych lamp. Ponieważ lampa przy zużyciu 57 woltów daje światło o natężeniu równem 16 świecom normalnym, to na każdą świecę zużywa się $^{57}/_{16}=3{,}5$ woltów. Wogóle wszystkie lampy żarowe, które, jak zaraz zobaczymy, stanowią równoległe odgałęzienia, potrzebują 3 do 3,5 woltów na każdą jednostkę jasności, równą normalnej świecy. To nieznaczne zapotrzebowanie pracy jest rezultatem racyonalnego sposobu przygotowywania węgla. Wkrótce po wprowadzeniu żarowego światła było ono daleko większe, gdyż jedna lampa odpowiadająca 16 świecom, zużywała nie 50 do 60 woltów, jak obecnie, lecz 80 a nawet więcej.

Lampy dające światło o bardzo wysokiem natężeniu są korzystniejsze od tych, które dają światło o małem, albo średniem natężeniu, pierwsze bowiem zużywają mniej pracy na każdą świecę normalną. Pomimo to jednak lampy o wielkiem natężeniu świetlnem w niewielu tylko wypadkach dają się z pożytkiem zastosować i do wytworzenia np. światła, odpowiadającego 500 świecom, lepsza jest lampa łukowa.

W celu zasilania większej ilości lamp wzajemnie niezależnych przez jednę i tę samą maszynę dynamiczną, Edison obmyślił nader prosty sposób ich połączenia, przez co uczynił światło żarowe dostępnem dla wszystkich wymagań praktycznych. Odnośne urządzenia stanowią właśnie najgłówniejszą i najoryginalniejszą część prac jego w dziedzinie oświetlenia sposobem żarowym. Połączył on mianowicie lampy tak, jak wskazuje fig. 603, gdzie *M* wyobraża maszynę, liczby zaś 1, 2, 3 do 10 lampy. Te ostatnie stanowią, jak widzimy, równoległe odgałę-

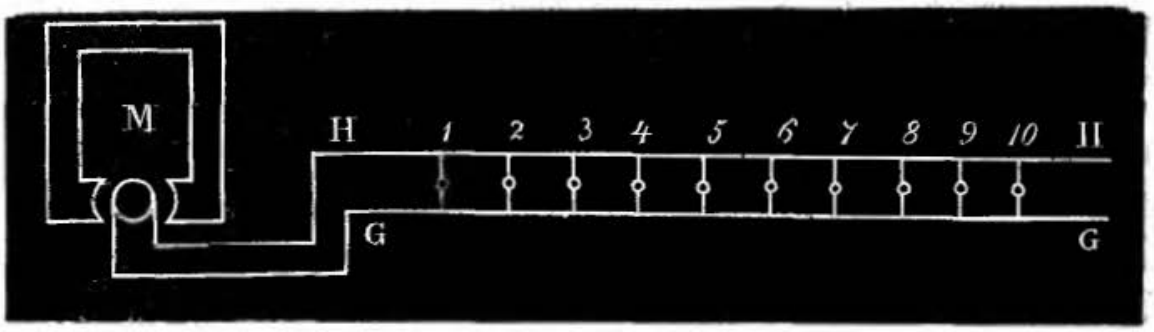


Fig. 603. Połączenie lamp żarowych podane przez Edisona.

zienia pomiędzy doprowadzającym i odprowadzającym prąd główny drutem. Przez takie połączenie lamp, opór całkowity zewnętrznego obwodu jest mniejszy od oporu każdej lampy, wziętej oddzielnie. Jeżeli druty łączne (które mogą wszakże być dowolnie grube) przedstawiają nader mały opór, wtedy całkowity opór zewnętrzny przy 10 np. lampach, z których każda ma opór 200 ohmów, wynosi jedynie $^{200}/_{10}=20$ ohmów, przy 40 lampach tylko $^{200}/_{40}=5$ ohmów, przy 1000 lampach tylko $^{200}/_{1000}=0{,}2$ ohma. Lecz przez każdą lampę płynie tylko odnoga prądu, która musi być o tyle silna, ażeby mogła ją doprowadzić do normalnego świecenia. Jeżeli druty łączne wszystkich lamp są tak grube, że opór ich może być pominięty, wtedy na końcach każdej lampy panuje to samo napięcie. Wówczas można to sobie szematycznie wyobrazić tak, jak wskazuje fig. 604. Z końców *p* i *q* wychodzą wszystkie lampy (na rysunku jest ich pięć), które posiadają jednakowe napięcie, a mianowicie takie, jakie panuje pomiędzy *p* i *q*. Ażeby wszystkie lampy paliły się zawsze jednakowo, potrzeba tylko utrzymać napięcie to na stałej wysokości. Jeżeli opór przewodników *H* i *G* (fig. 603), wychodzących z kleszczów maszyny jest bardzo mały, to dla normalnego palenia potrzeba jedynie, ażeby napięcie przy kleszczach maszyny posiadało zawsze stałą wartość.

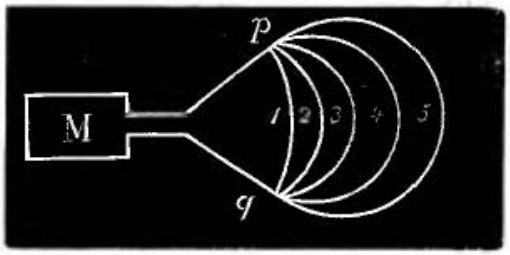


Fig. 604. Szemat objaśniający bliżej poprzednie połączenie.

Otóż dopóki w obwodzie pali się ciągle ta sama ilość lamp, napięcie przy kleszczach maszyny jest samo przez się stałe, jeżeli tylko liczba obrotów się nie zmienia. Lecz gdy pewna ilość lamp zostanie wycofana, albo włączona w obwód, wtedy opór zewnętrznego obwodu zmieni się i wraz z nim także napięcie kleszczowe w maszynie. Należy tedy starać się, ażeby to ostatnie znów sprowadzić do właściwej miary. Edison osiągnął to za pomocą obmyślonego przez siebie regulatora, składającego się z oporów, które mogą być naprzemian włączane lub

wycofywane z obwodu. W celu obserwowania napięcia, kleszcze maszyny są stale połączone z odpowiednim przyrządem mierniczym (woltmetrem). Przy takim sposobie regulowania jest koniecznie potrzebna osoba, któraby ciągle obserwowała woltmetr i odpowiednio do jego wskazówek wycofywała lub włączała opory.

Dla domów prywatnych np., zaopatrzonych w 50 do 60 lamp oraz wogóle dla urządzeń na małą skalę, dla których potrzeba sprowadzać osobną maszynę, oświetlenie sposobem Edisona jest nieco za kosztowne. Jest ono wówczas nietylko droższe od oświetlenia gazowego, lecz jest także kłopotliwsze, wymaga bowiem osobnej służby dla maszyny. Przez zastosowanie akumulatorów, naładowywanych od czasu do czasu, można się obejść bez własnej służby, lecz wydatki wtedy są jeszcze większe. Lecz za to oświetlenie żarowe jest bardzo odpowiednie dla wielkich hotelów, fabryk, lokalów publicznych, nie ustępuje bowiem wówcza gazowemu nawet pod względem kosztów utrzymania. Należy dodać jeszcze, że co do oświetlenia domów prywatnych, Edison pierwszy powziął myśl urządzenia centralnych stacyj, wysyłających prąd do domów, podobnie jak przy oświetleniu gazowem wielkie gazometry dostarczają im gazu. Od owego czasu urządzono takie stacye w wielu mniejszych i większych miastach.

§ 4. Elektryczne przenoszenie siły.

Widzieliśmy w poprzednim paragrafie, że oświetlenie elektryczne stanowiło potężny bodziec do rozwoju elektrotechniki oraz że potrzeba taniego sposobu wytwarzania silnych prądów doprowadziła do budowy coraz doskonalszych maszyn magneto- i dynamoelektrycznych. Wkrótce jednak okazała się możność zastosowania prądów do celów, których znaczenie zdaje się być o wiele ważniejszem, niż znaczenie światła elektrycznego. Próbowano mianowicie użyć prądy do wytwarzania ruchu mechanicznego, a więc do wykonywania pracy i to właśnie zadanie oznaczamy jako elektryczne przenoszenie siły.

Każda maszyna magneto lub dynamo-elektryczna może być użyta w sposób dwojaki. Jeżeli induktor jej obraca się przed biegunami magnesu, wtedy powstają w niej prądy indukcyjne, co właśnie stanowi pierwotny cel podobnych maszyn. Lecz gdy z drugiej strony przez zwoje drutu na induktorze płynie prąd elektryczny, wtedy magnesy działają na ten ostatni i pod wpływem tego induktor musi się poruszać. Przy przepuszczaniu tedy prądu przez zwoje induktora i magnesów, pierwszy musi się obracać w kierunku ściśle określonym, zależnym od kierunku prądu oraz od położenia biegunów magnesu.

Od dawna już próbowano zastosować te działania elektromagnetyczne do wykonywania pracy. Jacobi w Petersburgu umieścił podobną maszynę, zdolną do wytwarzania ruchu za pośrednictwem prądów elektrycznych, na statku, którego koło połączył z osią obracającego się induktora, samą zaś maszynę wprawił w ruch za pomocą wielkiej bateryi galwanicznej. Statek poruszał się po Newie z umiarkowaną prędkością. Podobny jednak sposób zastosowania elektryczności do wykonywania pracy nie może być korzystnym, albowiem w bateryach musimy spalać cynk, widzieliśmy zaś wyżej, że wytworzenie danej ilości energii elektrycznej (od której zależy wszak pożyteczna praca), przez spalenie cynku kosztuje 13 razy drożej, niż jej wytworzenie przez spalenie węgla. W razie gdyby elektryczność można było otrzymywać tylko przez rozpuszczanie cynku, byłoby bezwarunkowo korzystniej stosować w danym wypadku parę.

Wiemy jednakże, że istnieją jeszcze inne źródła prądów elektrycznych. W maszynach dynamicznych powstają one przez bezpośrednie zużycie pracy, przyczem koszta ich wytworzenia są względnie nieznaczne, a siła ich może wówczas być tak wielką, że i praca przez nie wykonana sowicie opłaci się pod względem ekonomicznym.

W danym więc razie zużywa się najprzód pracę, wykonywaną np. przez motor parowy, na wytworzenie prądów elektrycznych w maszynie dynamicznej; prądy te za pośrednictwem drutów przewodnich dochodzą następnie do drugiej maszyny

dynamicznej, którą wprawiają w ruch obrotowy. Otóż ta druga maszyna, będąc w czasie ruchu połączona za pomocą pasów i kół zębatych z jakimkolwiek bądź motorem, z kolei wykonywa pracę. Zdawałoby się tedy, że nie odnosimy tutaj żadnej korzyści. Motor parowy mógłby wszak bezpośrednio wykonać żądaną pracę; pocóż więc wytwarza najprzód elektryczność? Oto dlatego, że w ten sposób bywają osiągane pewne cele, których na innej drodze wcaleby osiągnąć nie zdołano. Po pierwsze elektryczność można z łatwością przesyłać na znaczne odległości, wskutek czego obydwie maszyny dynamiczne, to jest wytwarzająca prąd i wykonywująca pracę, mogą znajdować się dowolnie daleko od siebie, a co zatem idzie, można wytwarzać prądy tam, gdzie siła jest tania i za pośrednictwem elektryczności wykonywać pracę w miejscu, gdzie ona jest drogą. Po drugie prądy elektryczne mogą być dowolnie rozgałęzione, dzięki czemu siła danej maszyny może za pośrednictwem elektryczności być podzielona i przeniesiona na dowolną ilość mniejszych narzędzi pracy, co przy bezpośredniem użyciu siły nie zawsze jest możliwe.

Elektryczne więc przenoszenie siły, tylko co opisane, wymaga całego szeregu maszyn. Po pierwsze jest potrzebny motor, np. parowy lub gazowy, któryby dostarczał siły; może to także być koło pędzone przez wodę, albo wiatr. Ruch tego motoru przenosi się następnie na maszynę dynamiczną, w której praca mechaniczna przetwarza się w elektryczność i która zowie się maszyną główną. Prądy zostają przesłane do drugiej maszyny dynamicznej, czyli wtórnej, która zaczyna wskutek tego obracać się i wykonywa pracę. Widzimy tedy, że najistotniejszą częścią jest wtórna maszyna dynamiczna, obojętną zaś jest okoliczność, skąd pochodzi prąd jej dostarczany. Można go mieć bezpośrednio z głównej maszyny dynamicznej lub też z akumulatorów, albo z bateryj galwanicznych; wreszcie mogą go dostarczać centralne stacye do wytwarzania elektryczności (patrz poprzedni paragraf). W ostatnim wypadku istnieje wprawdzie także główna maszyna dynamiczna, lecz tutaj nie

bierzemy jej pod uwagę dlatego, że oprócz do wykonywania pracy służy ona jeszcze do oświetlenia.

Powiedzieliśmy już, że główna korzyść z takiego przenoszenia polega na tem, że pewna siła może być spożytkowaną w miejscu wielce od jej źródła oddalonem. Zasada ta powinna znaleść zastosowanie szczególniej tam, gdzie chodzi o siły wodne. Energia wodospadów i wogóle bieżącej wody, ofiarowana nam przez naturę w niewyczerpanej prawie obfitości, może być doskonale użytą do poruszania maszyn. Gdyby nawet przy elektrycznem przenoszeniu siły na wielką odległość tracono 50%, to i tak w niektórych wypadkach może ono okazać się jeszcze wielce korzystnem, gdyż pozwala spożytkować taką naturalną siłę, która bez tego byłaby dla nas całkowicie straconą.

Lecz oto inna jeszcze dziedzina, gdzie zastosowano elektryczne przenoszenie siły. Wszelkie maszyny bywają wprawiane w ruch głównie za pomocą motorów parowych, opalanych węglem. Otóż ten ostatni przewożą z kopalni do miejsca jego przeznaczenia. Jeżeli więc koszta tego przewozu przewyższają stratę energii, ponoszoną wskutek przenoszenia siły, to opłaca się spalić węgiel na miejscu, w wielkich maszynach parowych i następnie przenieść wytworzoną energię tam, gdzie ona jest potrzebną.

Dalej w wielu wypadkach jest korzystnie przenosić dany czynnik, jeżeli chodzi o zasilanie nim szeregu mniejszych maszyn, leżących od siebie na znacznej odległości. Doświadczenie pokazało, że wydatek na węgiel dla małych maszyn o mocy niewielu koni parowych, jest względnie dwa razy większy, niż dla większych motorów o mocy 50—100 koni parowych. Jeżeli więc zamiast szeregu małych motorów, zbudujemy jeden większy, którego siłę będzie można podzielić za pośrednictwem elektryczności, wtedy zaoszczędzimy na kosztach utrzymania i urządzenia. Najważniejszem jednak zastosowaniem w omawianym tutaj kierunku jest to, które umożliwia istnienie małych motorów o mocy mniejszej niż ½ konia parowego. Takich właśnie motorów na małą skalę brakuje drobniejszemu przemysłowi, który wskutek tego cierpi, znajdując się w niekorzy-

stnych warunkach w porównaniu z wielkim przemysłem. Otóż przez wprowadzenie prądów elektrycznych, wytwarzanych w centralnych stacyach i wysyłanych we wszystkie strony, drobny przemysł posiada motory o mocy $^1/_{10}$ konia parowego, w których zapotrzebowanie elektryczności jest ustosunkowane do wykonywanej pracy.

Przypuśćmy tedy, że opisane wyżej działanie, polegające na elektrycznem przenoszeniu siły, znajduje się w pełnym biegu. Istnieją wówczas dwie maszyny dynamiczne, połączone dowolnym przewodnikiem; jednej z nich ustawicznie dostarcza energii np. motor parowy, podczas gdy druga ciągle wykonywa pożyteczną pracę, a więc dajmy na to wydobywa wodę z rowu. Zobaczmy tedy, jaki jest stosunek pracy zużytej, czyli wydanej, do pracy pożytecznej. Obydwie maszyny mają przytem pewną prędkość, przez cały zaś przewodnik i maszyny płynie prąd o określonem natężeniu.

Całkowita praca, jaka w ciągu każdej sekundy przechodzi z motoru parowego na główną maszynę zużywa się na następujące działania: po pierwsze przezwycięża ona w niej tarcie, po drugie zaś wytwarza w niej pewne prądy, które zamieniając się w ciepło są dla właściwego celu tak samo bezużyteczne, jak i tarcie. Po trzecie wytwarza ona w głównej maszynie siłę elektromotryczną, która pcha prąd przez cały obwód oraz do maszyny wtórnej. Całkowity efekt tego prądu jest równy owej sile elektromotrycznej, pomnożonej przez natężenie prądu, można go zaś wyrazić w wattach, jeżeli pierwsza jest wyrażona w woltach, drugie zaś w amperach. Lecz z całego tego efektu pewna część w samej głównej maszynie zamienia się w ciepło Joule'a i efekt, oddawany przez nią zewnętrznemu obwodowi, oraz wtórnej maszynie, jest nieco mniejszy. Na co efekt w zewnętrznym obwodzie zostanie zużyty, to zależy od danego urządzenia, od przewodników i t. p. Ewentualnie można go całkowicie użyć w sposób pożyteczny. Stosunek tego zewnętrznego efektu do wydanej pracy możnaby nazwać *wydajnością głównej maszyny*. Efekt w całkowitym zewnętrznym obwodzie zużywa się w części na ogrzanie przewodnika pomiędzy główną i wtór-

ną maszyną, w części zaś zostaje pochłonięty przez samą maszynę wtórną. Istotnie ważną dla przenoszenia siły jest jedynie ta druga część. Z jednej strony zużywa się ona bezpożytecznie na przezwyciężenie tarcia oraz na ogrzanie drutów we wtórnej maszynie, z drugiej zaś wykonywa pożyteczną pracę, wymaganą od tej ostatniej. Podobnie, jak przy maszynie głównej, tak i tutaj stosunek pożytecznej pracy wtórnej maszyny do całkowitego pochłoniętego przez nią efektu, nazywamy *wydajnością wtórnej maszyny.*

Wreszcie stosunek całkowitej pożytecznej pracy, wykonanej przez wtórną maszynę do całkowitej pracy pochłoniętej przez maszynę główną oznaczamy jako *efekt pożyteczny całego przenoszenia siły.*

W celu dokładniejszego wytłomaczenia powyższych stosunków przytoczymy przykład przeniesienia siły. W Kriegsteten w Szwajcaryi, istnieje pewna siła wodna, którą za pośrednictwem elektryczności przenoszą do Soloturnu, odległego o 8 kilometrów. W Kriegsteten znajdują się dwie połączone ze sobą maszyny główne, w Soloturnie zaś dwie maszyny wtórne. Obydwie stacye są połączone drutem miedzianym grubości 6 milim. Próba wykazała, że cała praca przeniesiona w ciągu sekundy przez ową siłę wodną na główną maszynę dorównywała mocy 30,85 koni parowych. W całym obwodzie natężenie prądu wynosiło 11,474 amperów, napięcie zaś przy kleszczach głównej maszyny było równe 1753,3 woltom. Efekt w całym zewnętrznym obwodzie wynosił $1753{,}3 \times 11{,}474$ wattów (wolt-amperów). Ponieważ jeden watt jest równy $^1/_{736}$ konia parowego, to efekt ów dorównywał mocy 27,36 koni parowych. Z tego wynika, że wydajność głównych maszyn wynosi $^{27 \cdot 36}/_{30 \cdot 85} = 0{,}88$. Innemi słowy 88% pracy, przeniesionej na pierwszą maszynę, przechodzi do zewnętrznego obwodu, pozostałe zaś 12% zamieniają się w bezpożyteczne ciepło. Napięcie przy kleszczach drugiej maszyny wynosiło 1655,9 woltów, a więc efekt w niej zawarty był równy $1655{,}9 \times 11{,}420$ wattom, to jest 25,71 koniom parowym. (Natężenie w drugiej maszynie było nieco słabszem, gdyż izolacya przewodników nie była doskonałą). W drutach przewodnich ginęła więc moc $27{,}36 - 25{,}71 = 1{,}65$ koni

parowych i zamieniała się w ciepło Joule'a. Okazało się, że cała praca pożyteczna, wykonywana w każdą sekundę przez drugą maszynę, była równa działalności 23,21 koni parowych tak, że z całego pochłoniętego przez nią efektu, równego 25,71 koniom parowym 2,50 szło na przezwyciężenie tarcia i wytworzenie ciepła we wtórnej maszynie. Wydajność zatem tej ostatniej maszyny wynosi $^{23\cdot21}/_{25\cdot71}=0{,}903$. A więc wtórna maszyna zamienia 90,3% wprowadzonej do niej energii elektrycznej w mechaniczną pożyteczną pracę. Wreszcie efekt pożyteczny całego przeniesienia siły jest równy, jak wiemy, stosunkowi odzyskanej napowrót pożytecznej pracy 23,21 koni parowych do całkowitej zużytej pracy, równej 30,85 koniom parowym, a więc wynosi $^{2321}/_{3085}=0{,}752$. Widzimy tedy, że 75,2% całkowitej pracy przenosi się na odległość 8 kilometrów, gdzie znów mogą być korzystnie zużyte.

Świetny ten rezultat, który o wiele przewyższył wszystkie znane do tego czasu rezultaty przenoszenia siły, zawdzięczyć należy odpowiednio zbudowanym maszynom. Dowodzi on, że przy sprzyjających warunkach nawet na linii, której długość przenosi milę, traci się nie więcej nad 25% pracy.

Bardzo ważnem jest pytanie, jaki wpływ na pożyteczny efekt przeniesienia siły wywiera *odległość* obydwóch maszyn? Im bardziej są one od siebie oddalone, tem dłuższe muszą być druty, które je łączą. Prąd płynąc w drutach przewodnich ogrzewa je, a ogrzanie to jest proporcyonalne do ich oporu, a więc przy innych warunkach jednakowych jest tem większe, im dłuższe są owe druty. Ponieważ ogrzanie odbywa się kosztem efektu w zewnętrznym obwodzie, to wpływa ono bezpośrednio na zmniejszenie pożytecznej pracy, wykonywanej przez wtórną maszynę. Wogóle efekt pożyteczny zależy od dobroci obydwóch maszyn, to jest od ich wydajności. Ta ostatnia we wszystkich nowszych maszynach dochodzi do 85—90%, a nawet więcej, a więc jest dość wysoka. Po drugie efekt zależy od stosunku napięć kleszczowych we wtórnej i głównej maszynie i jest tem wyższy, im większy jest ten stosunek (który najwyżej może być równy jedności). Chodzi więc o to, ażeby uczy-

nić go możliwie wielkim. Otóż napięcie przy kleszczach wtórnej maszyny jest zawsze o tyle mniejsze od tegoż napięcia w maszynie głównej, ile wynosi strata, zużyta na przezwyciężenie oporu przewodnika. Jeżeli zatem druty przewodnie są bardzo długie, to istnieją dwa sposoby, ażeby pomimo to stosunek napięć w obydwóch maszynach zbliżyć możliwie do 1. Jeden z nich polega na tem, że przewodnikom nadaje się wielką średnicę, przez to bowiem opór całego przewodu znów maleje; lecz sposób ten jest mało praktycznym, gdyż wymaga wielkiego nakładu.

Drugi sposób polega na tem, ażeby wogóle napięcie kleszczowe w obydwóch maszynach uczynić bardzo wysokiem, wówczas bowiem osłabienie napięcia w drodze od jednej do drugiej wynosi o wiele mniej, niż przy napięciach słabych.

Francuski inżynier Marcel Deprez pierwszy wypowiedział pogląd, że prądy zastosowane do elektrycznego przenoszenia siły na wielką odległość muszą posiadać bardzo wysokie napięcie; on również dowodził, że przez odpowiednią budowę maszyn o wysokiem napięciu można przenosić znaczną siłę na wszelką odległość.

We wszystkich poprzednich wypadkach przyjmowaliśmy, że obydwie maszyny, to jest główna i wtórna, dają prądy o stałym kierunku. Otóż przez długi czas aż do początku roku 1889 sądzono, że maszyny o prądach zmiennych nie mogą spełniać powyższej roli przy przetwarzaniu i wykonywaniu pracy. Zdawało się, że pod tym właśnie względem pożytek z prądów zmiennych jest daleko mniejszy, niż z prądów stałych. Możnaby wprawdzie prądy zmienne przetwarzać w stałe za pomocą komutatora, przez to jednak znikłaby główna zaleta maszyn o prądach zmiennych, a mianowicie, że nie potrzebują komutatorów. W ostatnich dopiero latach udało się zbudować motory o prądach zmiennych, które pracują z taką samą prawie korzyścią, co motory o prądzie stałym. Z motorów takich najbardziej znany jest następujący.

Pomyślany przez Zipernowsky'ego, Déri'ego i Blathy'ego posiada on ściśle określoną, stałą liczbę obrotów, która nie zmie-

nia się nawet podczas wykonywania pracy. Właściwie mówiąc motor wówczas dopiero wykonywa ją, gdy liczba ta jest osiągnięta. Motory tego rodzaju noszą nazwę synchronicznych. W maszynie o prądzie zmiennym idące po sobie bieguny magnesu, pobudzane przez oddzielny prąd, posiadają naprzemian przeciwny magnetyzm. Gdy przez cewki zbroi przebiega prąd zmienny i gdy cała zbroja jest ruchoma, wówczas przy danym kierunku przybywającego prądu cewki zbroi są wprawdzie przyciągane przez cewki magnetyczne i nieco się obracają, lecz przy następnym, przeciwnie skierowanym prądzie, są popychane napowrót. Jedynie gdy prędkość kotwicy jest tak znaczną, że po pierwszym impulsie prądu każda cewka zbroi zajmuje względem następnego bieguna magnesu takie same położenie, jakie przedtem zajmowała względem pierwszego, obraca się ona dalej. W celu dokładniejszego zrozumienia tego, wyobraźmy sobie dwa następujące po sobie bieguny magnetyczne N i S i cewkę drucianą C. Ta ostatnia znajduje się przed N. Przesyłamy przez nią momentalny prąd, dajmy na to w dodatnim kierunku, a wówczas porusza się ona aż do N i ewentualnie jeszcze dalej. Zaraz potem jest ona wystawiona na przeciwny impuls prądu i jeżeli wskutek poprzedniego obrotu zbliżyła się o tyle do S, o ile przedtem zbliżona była do N, to obecnie dalej się obraca.

Gdy synchronizm został raz osiągnięty, trwa on nadal sam przez się i maszyna przy stałej liczbie obrotów może wykonywać pracę. W motorze wyżej wspomnianym nie obraca się zbroja, lecz magnesy, prąd zaś dla tych ostatnich, który nie powinien zmieniać swego kierunku, wytwarza się za pośrednictwem komutatora ze zmiennego prądu, wchodzącego do motoru. W tym celu połączenie jest przeprowadzone w sposób szematycznie przedstawiony na figurze 605, gdzie A wyobraża nieruchomą cewkę kotwicy, M jeden z elektromagnesów i C komutator. W komutatorze jasne części są połączone pomiędzy sobą, oraz z punktem 2, miejsca zaś zacienione są również połączone ze sobą i z punktem 1. Prąd przybywa z przewodnika L przez szczotkę B_2, przechodzi przez M i przez szczotkę B_1 powraca

do przewodnika. Równolegle do tego jest włączona cewka *A*. Dopóki synchronizm przy obracaniu nie jest osiągnięty, prąd odwraca się w *A* i w *M* i magnesy obracają się szybcej, aż wreszcie następuje synchronizm. Wówczas prąd magnesu zachowuje stały kierunek i następujące po sobie przeciwne bieguny są obracane ciągle w tą samą stronę przez następujące po sobie przeciwne cewki.

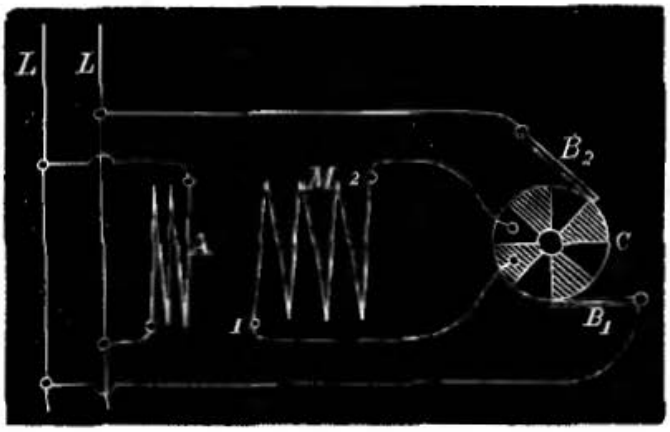


Fig. 605. Szemat połączenia w motorze o zmiennym prądzie.

Motory o zmiennym prądzie przedstawiają pewne złe strony. Po pierwsze zanim synchroniczny bieg ich jest osiągnięty, powstają bardzo silne iskry przy komutatorze, co przyczynia się do ich prędkiego zniszczenia, po drugie motor staje, gdy tylko ma wykonać pracę większą od tej, dla której został zbudowany. Co do innych szczegółów, to doświadczenia wykazały, że wydajność motorów o zmiennych prądach dochodzi do 85%, a nawet 88%, to znaczy, że tyle procentów wprowadzonej do nich energii elektrycznej zamienia się w pracę mechaniczną.

Wogóle jednak przenoszenie siły na większą odległość jest jeszcze mało stosowane. Nawet dla nieznacznych odległości odnośne urządzenia są względną rzadkością, wymagają bowiem, jak widzieliśmy, oprócz motoru (parowego, gazowego, turbiny) jeszcze osobnych maszyn dynamicznych, to jest głównej i wtórnej. Wymienimy tutaj jeden jeszcze przykład. Fabryka chemiczna w Greenwich korzysta za pomocą elektryczności z siły wodospadu, oddalonego od fabryki o 137 metrów. Wprawia on w ruch turbinę, która z kolei porusza maszynę dynamiczną Siemens'a. Od tej ostatniej biegną dwa druty miedziane aż do samej fabryki, gdzie znajduje się druga maszyna Siemens'a, któ-

rej oś jest połączona za pomocą rzemieni z piłą, tokarnią, oraz z maszyną do świdrowania. Przyrządy te są więc pośrednio poruszane przez siłę wodną. W inny jaki sposób trudnoby zaiste było spożytkować siłę wodospadu, w miejscu oddalonem od niego o 137 metrów.

Często zdarza się, że maszyna parowa, która nie zmienia swego miejsca, ma wprawić w ruch pewną ilość maszyn dość znacznie oddalonych od niej. Wówczas przenoszenie za pomocą pasów skórzanych byłoby nieco kłopotliwe. W pewnym zakładzie w Paryżu znajduje się w suterynie motor parowy, który wprawia w ruch daną ilość maszyn do szycia, umieszczonych w wyższych piętrach gmachu. Otóż przenoszenie siły odbywa się tutaj w sposób nader prosty, to jest za pomocą elektryczności. Obok motoru parowego stoi główna maszyna dynamicza, od której biegną dwa druty aż do górnego piętra, gdzie wtórna maszyna, wprawiona w ruch przez prąd, obraca walec i porusza wszystkie maszyny do szycia.

O wiele ważniejszem i rozleglejszem od poprzedniego jest zastosowanie elektryczności do *podziału pracy*. Wspomnieliśmy już, że z tem łączy się kwestya niezmiernej wagi ekonomicznej, a mianowicie dostarczenie wielu motorom mniejszych lub większych zasobów sił, potrzebnych w przemyśle. Elektryczność wytworzona w wielkich centralnych stacyach, bądź za pomocą maszyny, bądź czynnika naturalnego (wodospadu), służy następnie jako pośredniczka przy podziale siły. Zadanie to w ostatnich czasach ogromnie zajmowało i dotychczas jeszcze zajmuje umysły techników. Polega ono na tem, ażeby prąd z jednej wielkiej maszyny dynamicznej przeprowadzić do całego szeregu mniejszych maszyn, z których każda wykonywa określoną pracę. Podział ten powinien być tak uskuteczniony, ażeby dana maszyna nie przeszkadzała pozostałym, oraz ażeby można było wstrzymać jej działanie bez naruszenia biegu innych maszyn. Widzimy, że zadanie to jest analogiczne do tego, z jakiem spotkaliśmy się przy lampach żarowych. Tam również chodziło o to, ażeby lampy uczynić niezależnemi jedne od drugich, ażeby módz jednocześnie zgasić 100 lub 200 z nich bez

naruszenia światła pozostałych lamp. Zadanie to Edison rozwiązał w ten sposób, że wszystkie lampy żarowe połączył równolegle i tak uregulował maszynę dynamiczną, że przy kleszczach jej panowało stałe napięcie. Dokładnie tak samo Deprez rozwiązał powyższe zadanie o elektrycznym podziale.

W układzie Deprez'a wszystkie wtórne maszyny, wykonywujące pracę w różnych miejscach, są włączone równolegle w jeden i ten sam obwód, wychodzący z głównej maszyny.

Ilość pracy, jaką w ciągu sekundy może wykonać każda maszyna wtórna, jest równa iloczynowi z jej napięcia kleszczowego i istniejącego w niej natężenia prądu. Przy niezmiennem owem napięciu, natężenie prądu zależy tylko od oporu samej maszyny oraz oporów regulujących. Jeżeli tedy cały układ będzie tak urządzony, że niezależnie od procesów zachodzących w obwodzie, napięcie kleszczowe na końcach każdej wtórnej maszyny pozostanie jednakowem, to każdy motor będzie zupełnie niezależny od pozostałych. Jeżeli wszystkie wtórne maszyny są połączone równolegle i jeżeli przytem główne druty przewodnie przedstawiają nader mały opór, to zadanie powyższe sprowadza się do tego, ażeby główna maszyna posiadała stałe napięcie kleszczowe, niezależnie od oporu w obwodzie zewnętrznym. Przy odpowiedniem uregulowaniu tego napięcia można zatem dokładnie rozwiązać zadanie o podziale prądu i włączyć w obwód dowolną ilość wtórnych maszyn, czyli motorów. Role tych ostatnich są bardzo rozległe. Naprzykład przy maszynach do szycia widzimy jeden z mniejszych takich motorów (fig. 606), umieszczony po lewej stronie pod stolikiem; ruch jego przenosi się za pomocą sznura skórzanego na oś maszyny szyjącej. Opory regulujące znajdują się w skrzynce i mogą być włączane, albo wycofywane przez poruszanie pedałem. Nieco większe motory są często używane przy wentylatorach, które zwykle bywają bezpośrednio osadzane na osi motoru. Przy mocy równej $^1/_8$ do $^1/_4$ konia parowego można wprawiać w ruch wentylatory, które w ciągu godziny wentylują 1400 metrów sześciennych powietrza.

Większe motory znalazły najróżnorodniejsze zastosowania

w fabrykach, gdzie służą zarówno do poruszania maszyn wszelkiego rodzaju, jak i rozmaitych oddzielnych części. Korzyści ich polegają na natychmiastowej gotowości do użycia, braku niebezpieczeństwa, niewielkiej przestrzeni jaką zajmują, oraz

Fig. 606. Maszyna do szycia o motorze elektrycznym.

na taniości urządzenia w porównaniu z wydatkami na mniejszy motor gazowy lub parowy. Wreszcie nie należy zapominać i o tej ważnej korzyści, że zużycie siły jest w nich ustosunkowane do wykonywanej pracy, gdyż przy stałem napięciu kleszczowem efekt zależy jedynie od natężenia prądu, które można dowolnie regulować. Na wystawie elektrycznej w Paryżu, Deprez po raz pierwszy wprawił w ruch 27 różnych przyrządów

za pomocą jednej głównej maszyny. Wszystkie wtórne maszyny dynamiczne owych przyrządów były włączone w obwód głównej maszyny. W ten sposób centralna stacya wprawiała w ruch maszynę do krajania metali i drzewa, dwie maszyny do szycia, prasę drukarską, tokarnie, piły i t. p., które były wzajemnie niezależne; wiele z nich można było jednocześnie puścić w bieg lub wycofać z obwodu bez naruszenia czynności pozostałych przyrządów.

Od tego czasu elektromotory rozpowszechniły się w dość szerokim zakresie. W Bostonie istnieje kilkaset takich motorów o mocy równej $^1/_2$ do 15 koni parowych, które działają w najrozmaitszych gałęziach przemysłu, mianowicie w drukarniach, warsztatach zegarmistrzowskich i krawieckich, fabrykach obuwia i przyrządów muzycznych. Podobnie w Genewie turbina obraca maszynę główną, której prąd wysyłają do 175 elektromotorów o mocy $^1/_2$ do 70 koni parowych. Od wodospadu Niagary rozchodzi się siła odpowiadająca mocy 15000 koni parowych; za pośrednictwem elektryczności podzielono ją na wiele mniejszych, które działają w poblizkich miejscach, jak np. w Buffalo, odległego o 32 kilometry.

Elektryczne przenoszenie i podział siły mają wielkie znaczenie w kopalniach, z powodu wszelkiego braku niebezpieczeństwa oraz łatwości, z jaką można dane motory łączyć z przewodnikami. Tutaj służą one do poruszania pomp, wentylatorów i świdrów. Powiedzieliśmy już, że ów podział siły w połączeniu z jej przenoszeniem, stanowią jedno z najważniejszych zadań elektrotechniki. Rozwiązanie jego pociągnie za sobą szybkie wprowadzenie pracy maszynowej w małym przemyśle, w którym dotychczas panowała praca ręczna. Nie opłaci się utrzymywać osobny motor dla maszyny do krajania metali, wymagającej $^1/_{20}$ konia parowego, gdyż byłoby to za kosztowne. Lecz jeżeli przez proste odgałęzienie i użycie małego motoru dynamicznego siła może być z łatwością wprowadzona do domu, to w większości wypadków należy oddać maszynie pierwszeństwo przed pracą ręczną. Szczególnie zaś przyszłość zadania o elektrycznem przenoszeniu i podziale siły zależy od spożytko-

wania takich czynników przyrody, jak wodospady. Wszelka miejscowość niezbyt oddalona od siły wodnej mogłaby wówczas z niej korzystać, podczas gdy obecnie jedynie fabryki bezpośrednio nad wodą położone mogą posługiwać się tem taniem źródłem siły.

Obecnie opiszemy inne znów zastosowanie elektryczności, a mianowicie *koleje i tramwaje elektryczne*. Oto ich zasada: ponieważ wtórna maszyna dynamiczna obraca się pod wpływem prądu, to należy tylko oś jej połączyć z kołami, które mogą się poruszać naprzód, a otrzymamy postępowy ich ruch. Na tej zasadzie polegają koleje elektryczne, po raz pierwszy przedstawione na wystawie przemysłowej w Berlinie (1879). Obecnie istnieją one już w kilku miastach Europy, w Ameryce zaś usunęły zupełnie konie, nawet na najdłuższych liniach tramwajowych.

Każdy elektryczny wagon kolejowy lub tramwajowy zawiera w dolnej swej części wtórną maszynę dynamiczną, czyli motor, którego oś jest połączona z kołami wagonu i którego ruch przenosi się na te ostatnie za pomocą rzemieni, powrozów lub kół zębatych. Do maszyny tej wprowadza się prąd z głównej maszyny dynamicznej, umieszczonej gdziebądź w pobliżu, obok wielkiego motoru parowego, z którego czerpie potrzebną siłę. Przy kolei elektrycznej, po raz pierwszy urządzonej, prąd z głównej maszyny dochodził do wtórnej przez dodatkową szynę środkową, leżącą pomiędzy dwiema zewnętrznemi szynami, po których przesuwały się koła wagonu. Z szyny tej prąd przechodził do maszyny dynamicznej, przebiegał przez druty induktora i elektromagnesów, następnie przez koła wagonu dosięgał zewnętrznych szyn i powracał do głównej maszyny. Wkrótce jednak pokazało się, że jedynie w specyalnych wypadkach szyny mogą służyć jako przewodniczki prądu. Mianowicie przy wilgotnem powietrzu, gdy pomiędzy szynami leży śnieg, środkowa i zewnętrzne szyny są połączone ze sobą przewodnikiem i prąd we wtórnej maszynie dynamicznej jest zbyt osłabiony. Dlatego starano się wymyślić inny, pewniejszy i korzystniejszy sposób doprowadzania prądu do wagonu. W miarę rozwoju

kolei elektrycznej wynajdywano różne środki, mające na celu dostarczanie jej elektryczności. Siemens i Halske przepuszczali prąd przez drut, zawieszony obok szyn; po drucie przesuwał się mały wagonik, ułatwiający zetknięcie i połączony za pomocą przewodnika z wtórną maszyną. Figury 607 i 608 przedstawiają podobny wagon w podłużnem i poprzecznem przecięciu.

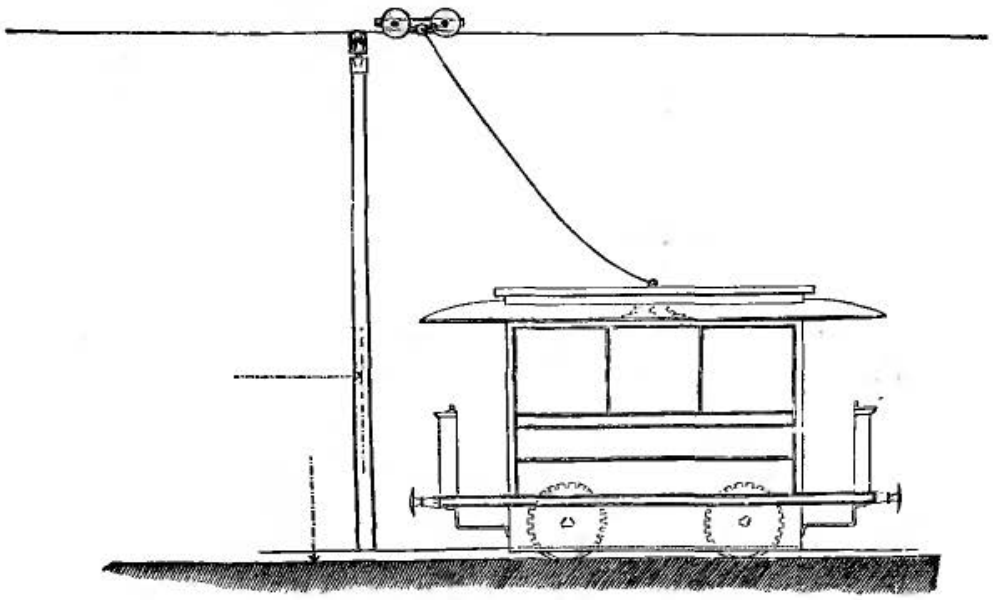


Fig. 607. Wagon elektryczny w podłużnem przecięciu.

Ów wagonik, umożliwiający zetknięcie, jest bardzo lekki i przesuwa się wraz z elektrycznym wagonem tramwajowym, któremu ustawicznie dostarcza prądu.

Jednakowoż i ten sposób okazał się niezupełnie zadawalniającym. Na zagięciach i skrzyżowaniach drogi ów wagonik łatwo zeskakuje z drutu i prąd przerywa się. Podobnie gdy w czasie mrozu drut pokrywa się szronem lub rdzą, zetknięcie staje się niedokładne. Z tych powodów inne koleje urządzono odmiennie, a mianowicie wagonik ów posuwa się wzdłuż rur rynienkowatych. Taka elektryczna lokomotywa działa np. w kopalniach węgla kamiennego, położonych niedaleko Drezna; ciągnie ona za sobą 10 wagonów o wadze 8 tonn, z prędkością 3 metrów na sekundę.

Przy innych tramwajach elektrycznych druty przewodnie

są umieszczone pod ziemią, w kanałach znajdujących się pod szynami. W pewnych odstępach prąd z tych przewodników rozgałęzia się i przechodzi do drutów, leżących pośrodku drogi i stykających się z wagonem przez otwór w grobli ulicznej. Oczywiście, że taki sposób podziemnego układania przewodników jest o wiele droższy od nadziemnego i dlatego dotychczas mało bywa stosowany.

Widzimy, że opisane wyżej koleje wymagają oddzielnych przewodników do przesyłania elektryczności z centralnych stacyj. Lecz zamiast tego można wozić z sobą źródło elektryczności, używając akumulatorów do poruszania maszyny dynamicznej. Naprzykład w Berlinie, Brukseli, Hamburgu zastąpiono w ten sposób pracę konia przez elektryczność. Naładowany akumulator umieszczony w wagonie wprawia w ruch maszynę dynamiczną, która z kolei porusza koła powozu. Oczywiście, że niekorzystnie jest wozić z sobą wszędzie ciężki akumulator, lecz w zamian nie trzeba urządzać żadnego przewodnictwa. Od czasu, jak akumulatory zostały udoskonalone, użycie ich opłaci się być może więcej, niż posługiwanie się końmi, jakkolwiek najlepsze z owych przyrządów są właśnie najcięższe.

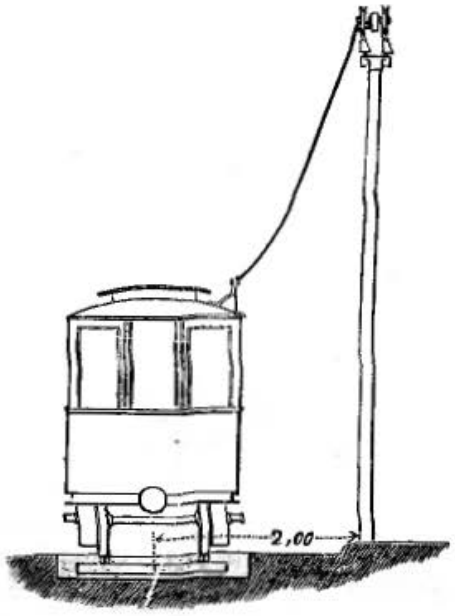


Fig. 608. Wagon elektryczny w poprzecznem przecięciu.

Koleje elektryczne, korzystne dla komunikacyi miejskiej, są niemi również i na dłuższych liniach komunikacyjnych, pomimo, że wogóle nie mogą współzawodniczyć z parochodami. Ponieważ jednak każdy oddzielny wagon elektrycznych kolei posiada osobny motor, czyli stanowi sam przez się lokomotywę, to nadają się one daleko lepiej do ruchu pojedyńczych wozów,

niż do ruchu masowego. Szybko następujące po sobie, oddzielne wagony, zawierające ograniczoną liczbę osób, wchodzą stopniowo w użycie na dłuższych także liniach, a w tym właśnie wypadku kolej elektryczna przewyższa parową.

Podział elektryczności daje się również zastosować do przewożenia towarów. Uczeni angielscy: Jenkin, Ayorton i Perry wypracowali i poczęści praktycznie wykonali odnośny system, wychodząc z założenia, że skoro elektryczność tak zasadniczo różni się pod względem swych działań od pary, to i przewóz ciężarów za pośrednictwem elektryczności musi inaczej być urządzony, niż przewóz za pomocą pary. Kolej parowa z wielką korzyścią posługuje się silną lokomotywą, do której przyczepione są liczne wagony z ogromnym ciężarem. Gdyby zechciano każdy podobny wagon zaopatrzyć w małą lokomotywę, byłoby to bardzo niepraktyczne. Natomiast elektryczność daje się bez wielkich strat podzielić i wprowadzić do całego szeregu mniejszych maszyn, z których każda wykonywa wówczas nieznaczną jedynie pracę. Jeżeli zatem przy użyciu pary centralizacya jest konieczna, to przy użyciu elektryczności podział nie jest bez korzyści. W razie gdy chodzi o oddzielne przesłanie wielkiej ilości mniejszych pakietów, wówczas osiągamy znaczne korzyści pod względem budowy samej kolei. Ciężko ładowny pociąg kolei żelaznej, złożony z wielu wagonów, wymaga starannie zbudowanej drogi, zaopatrzonej w szyny. Lecz przesyłki 200 kilogr. można z łatwością dokonać w powietrzu za pomocą niezbyt grubej drucianej liny. To właśnie stanowi zasadę wspomnianego wyżej systemu. W praktyce wykonano go po raz pierwszy w Anglii, w Glynde (Sussex), na gruncie lorda Hampden. Figura 609 przedstawia ogólny wygląd takiej linni transportowej. W odległościach 20 metrów stoją słupy, na których są zawieszone dwa druty stalowe grubości 19 milimetrów, jeden przeznaczony do odjazdu, drugi do przyjazdu. Przewodnictwo jest tak urządzone, że na jednej linii oddziały pierwszy, trzeci, piąty (oddzielone słupami) są połączone z dodatnim biegunem maszyny, oddziały zaś drugi, czwarty, szósty z biegunem ujemnym, podczas gdy na drugiej linii jest odwrotnie. Jedna lo-

komotywa *M* ciągnie zawsze za sobą 5 wagonów, z ostatnim zaś wagonem *N* jest ona połączona drutem miedzianym. Długość takiego pociągu, to jest lokomotywy z pięcioma wagonami, jest zawsze nieco większa od odległości słupów, przez co loko-

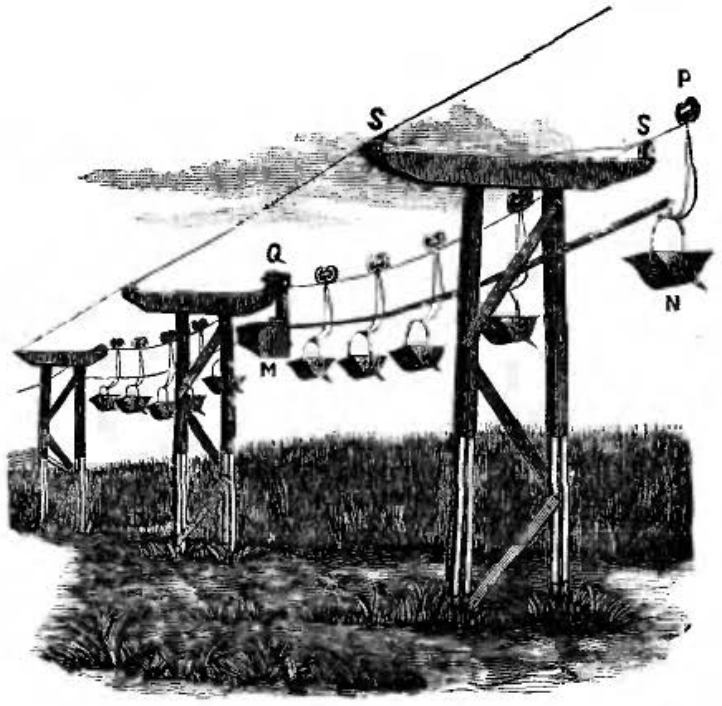


Fig. 609. Linia do przesyłania małych ciężarów za pośrednictwem elektryczności.

motywa znajduje się na oddziale dodatnim wówczas, gdy ostatni wagon siedzi jeszcze na oddziale ujemnym i naodwrót. Podczas więc gdy np. dodatni prąd przechodzi bezpośrednio z liny drucianej do lokomotywy (motoru), płynie on przed drut miedziany do ostatniego wagonu *N* i ztąd z powrotem do maszyny. Wskutek tego motor się obraca i maszyna z przyczepionemi do niej wagonami porusza się dalej, dzięki tarciu, po linie drucianej. Oprócz 5 wagonów, które lokomotywa ciągnie za sobą, pcha ona jeszcze przed sobą 5 wagonów, czyli że na każde 10 wagonów potrzebną jest jedna lokomotywa.

Zadanie podobnej linii polega na przesyłaniu takich materyałów, jak piasek, ruda, glinka; ruch odbywa się na znacznej przestrzeni, lecz z umiarkowaną prędkością. Nie potrzeba do tego kupować ziemi; mosty, groble i t. p. są zbyteczne, wyniosłości (oczywiście nieznaczne) nie stanowią przeszkody i oprócz

tego wysyłka nie wymaga wielkiego dozoru. Podług obliczeń Perry'ego, koszta przesyłki 1 centnara na 1 milę przy takim sposobie przewożenia albo przy posługiwaniu się wozami są do siebie w stosunku 25 do 100. Być może, że i to zastosowanie elektryczności, oparte na przenoszeniu siły, ma przyszłość przed sobą.

§ 5. Elektrotypia, czyli galwanoplastyka. Otrzymywanie metali w stanie czystym.

Opisane w jednym z poprzednich rozdziałów działanie prądu elektrycznego, polegające na tem, że przy przejściu przez ciekły przewodnik prąd rozkłada go, zwróciło w roku 1837 bliższą uwagę techników. Starano się je zastosować do pokrywania powierzchni ciał warstwą metalową, co też dało impuls do rozwoju elektrotypii, czyli *galwanoplastyki*, to jest sztuki dokonywania tego za pomocą galwanizmu. Od owego czasu stała się ona ważną gałęzią przemysłu i wciągnęła w zakres swój liczne inne zadania.

Wiemy, że roztwór soli metalicznej, np. siarczanu miedzi, rozkłada się pod wpływem prądu elektrycznego, przyczem metal osadza się na elektrodzie ujemnym, pozostała zaś reszta, zawierająca kwas, na dodatnim. Jeżeli elektrod dodatni jest zrobiony z tego samego metalu, który znajduje się w rozpuszczonej soli, to na każdy jego równoważnik osadzony na elektrodzie ujemnym, rozpuszcza się równoważnik tegoż metalu z elektrodu dodatniego. Dzięki temu ciecz jest zawsze jednakowo stężona i na elektrodzie dodatnim zachodzi rozpuszczanie metalu, na ujemnym zaś jego osadzanie. W ten sposób elektrod ujemny pokrywa się warstwą metalu, zależnie zaś od rodzaju użytej soli, otrzymujemy przedmioty powleczone miedzią, niklem, złotem, srebrem, cyną, platyną. Nie wszystkie jednak sole metaliczne nadają się w równym stopniu do wytwarzania danych osadów; doświadczenie pokazało, że pewne sole są szczególnie korzystne w jednym wypadku, inne zaś w drugim. Oprócz tego na pię-

kno osadu wpływa niemało stężenie cieczy, z której metal ma być wydzielony, czyli tak zwanej kąpieli.

W elektrotypii odróżniamy dwa zadania. Jedno z nich polega na tem, ażeby dany przedmiot powlec mniej lub więcej cienką warstwą metaliczną, np. złota, *któraby silnie doń przylegała.* W drugim razie chodzi o pokrycie takich np. przedmiotów, jak gipsowe figury, grubszą warstwą metalu, *którą możnaby następnie odjąć.* W ostatnim wypadku otrzymuje się odlew danego przedmiotu i to stanowi właściwą galwanoplastykę. Dwa te zadania różnią się tylko pod względem celu, do którego dążą, lecz sposób ich rozwiązania za pomocą galwanizmu jest jeden i ten sam.

Gdy chodzi o trwałe powleczenie warstwą galwanoplastyczną jakiego ciała przewodzącego, zwykle metalu, wówczas należy przedewszystkiem starannie oczyścić jego powierzchnię, co niekiedy osiągamy na drodze chemicznej przez zanurzenie w kwasie, w innych zaś razach przez mechaniczne tarcie. Po oczyszczeniu umieszcza się dane przedmioty, a więc łyżki, widelce, noże i t. p. w kąpieli srebrnej, przedstawionej na fig. 610. W wysokiem szklanem naczyniu znajduje się pośrodku pierścień mosiężny, oparty o brzeg naczynia za pomocą czterech pręcików; na nim wiszą te wszystkie przedmioty, które mają być posrebrzone i on też łączy je z ujemnym elektrodem bateryi. Elektrod dodatni jest w danym wypadku reprezentowany przez srebrną blachę, zwiniętą w walec i stojącą pośrodku kąpieli. Kąpiel przy posrebrzaniu składa się zroz-

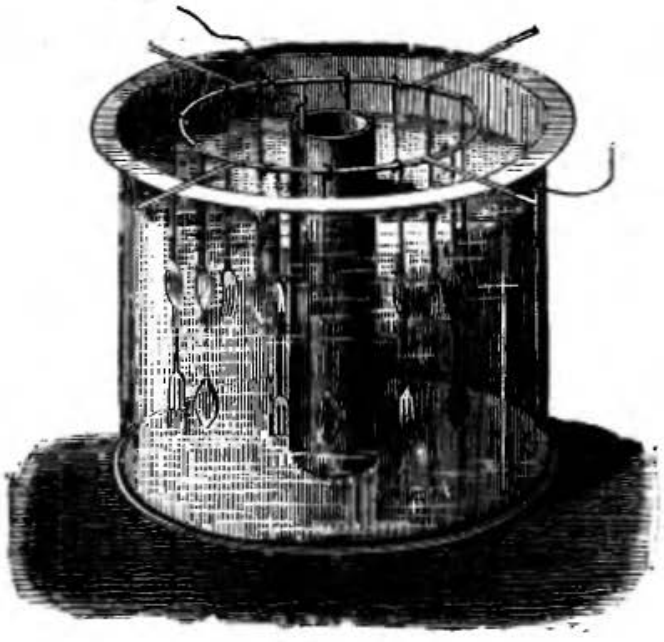


Fig. 610. Kąpiel do elektotypii.

tworu cyanku potasu w wodzie z dodatkiem rozpuszczalnej soli srebrnej, np. azotanu srebra.

Przedmioty stanowiące elektrod ujemny pokrywają się wówczas warstwą srebra, zupełnie dokładnie przystosowaną do ich kształtu i tem grubszą, im dłużej prąd przepływał przez kąpiel. Odwracanie od czasu do czasu danych przedmiotów przyczynia się do ujednostajnienia warstwy.

Podobnie urządzane są kąpiele, służące do pokrywania innemi metalami. Gdy chodzi o miedź, używa się zwykle roztworu siarczanu miedzi, albo cyanku miedzi i potasu, do pozłacania zaś nadaje się najlepiej cyanek złota i potasu. W nowszych czasach nauczono się również niklować, co jest szczególnie korzystne, gdy chodzi o przedmioty żelazne, albowiem warstwa niklu chroni je od rdzewienia. Nawet przedmioty mosiężne bywają obecnie bardzo często niklowane. Jako najodpowiedniejszą kąpiel polecają tę, która na 20 litrów wody zawiera 500 gramów kwasu pruskiego oraz 1 kilogr. siarczanu niklu i amonu.

Dawniej do robót elektrotypicznych używano zawsze elementów galwanicznych, lecz od czasu udoskonalenia maszyn dynamicznych i w tej także dziedzinie elektrotechniki nastąpił przewrót. Można oczywiście każdą maszynę o stałych prądach zostosować do galwanoplastyki. Kąpiele odnośne są to zwykle tak znaczne ilości cieczy, że opór ich jest prawie żaden i dlatego potrzeba wprawdzie maszyny o silnym prądzie, lecz o niewielkiej sile elektromotrycznej. W tym celu Siemens i Halske zbudowali maszynę, przedstawiającą jedynie około 0,007 ohma wewnętrznego oporu (induktor i zwoje magnesu razem wzięte). Opór tak nieznaczny otrzymali przez to, że magnesów nie owijali drutem, lecz grubemi miedzianemi prętami; walec induktora również obłożony był takimi prętami. Te ostatnie wzajemnie odosobniono za pomocą azbestu, czyli ciała niepalnego. Maszyna owa posiada jedynie bardzo małą siłę elektromotryczną, równą około 3 woltom, lecz natężenie prądu może być doprowadzone do 800 amperów, co dla celów czysto elektrotypicznych nie jest nawet konieczne.

Przy podobnych robotach, dokonywanych za pomocą maszyny dynamicznej, chodzi głównie o to, ażeby jeden z biegunów, to jest ten, który połączono z przedmiotami, mającemi uledz galwanoplastyce, pozostał zawsze ujemnym, innemi słowy, ażeby biegunowość elektromagnesów nie uległa podczas biegu odwróceniu. Przy zwykłem jednak połączeniu pierścienia, magnesów i kąpieli, odwrócenie takie może z łatwością nastąpić. Podczas elektrolizy występuje zawsze polaryzacya, a więc zjawia się prąd, przeciwdziałający prądowi maszyny. Przy normalnej prędkości jej siła elektromotryczna przezwycięża siłę prądu polaryzacyi i prąd maszyny płynie przez kąpiel w określonym kierunku. Lecz gdy w czasie biegu prędkość maszyny nagle się zmniejsza, np. z powodu chwilowo działającej przeszkody w motorze, wówczas prąd polaryzacyi bierze górę. Przez maszynę biegnie prąd o kierunku przeciwnym i bieguny elektromagnesu zostają odwrócone. Gdy następnie maszyna dynamiczna rozpoczyna znów prawidłowy swój bieg, bieguny elektromagnesów pozostają odwrócone, gdyż maszyna taka wzmacnia wszakże jedynie dany magnetyzm. Prąd jej ma więc kierunek przeciwny poprzedniemu i biegun ujemny staje się dodatnim. Wskutek tego wszystkie osady na przedmiotach zanurzonych w kąpieli ulegają ponownemu rozpuszczeniu.

Niebezpieczeństwa tego można uniknąć za pomocą odpowiedniego włączenia elektromagnesów, przy którem przez zwoje ich przebiega jedynie odgałęzienie głównego prądu. Wówczas kierunek prądu wokoło elektromagnesów jest stały, niezależnie od tego, czy prąd maszyny, czy też prąd polaryzacyi ma przewagę. Niechaj E_1 i E_2 (fig. 611) wyobrażają dwa elementy niejednakowej siły, połączone za pomocą przewodników. Przy a i b widzimy odgałęzienie W. Otóż jeżeli E_1 jest silniejszy od E_2 i dodatni prąd płynie od E_1 przez a do E_2, wtedy a posiada potencyał dodatni, b ujemny i w W prąd płynie w kierunku strzałki. Gdy przeciwnie E_2 jest silniejszy od E_1, wtedy prąd pomiędzy E_1 i E_2 biegnie w kierunku przeciwnym, od E_2 przez a do E_1. A więc i w tym razie a znów posiada potencyał dodatni, b ujemny i prąd w W płynie jak poprzednio w kierunku strzałek.

Szemat ten z łatwością daje się zastosować do połączenia naczynia elektrolitycznego z taką maszyną dynamiczną, w której elektromagnesy są zasilane przez odgałęzienie prądu. Zamiast E_2 należy wyobrazić sobie pierścień maszyny dynamicznej, zamiast zaś E_1 kąpiel. Bez względu na to, czy siła elektromotryczna pierścienia, czy też naczynia bierze przewagę, w drucie W biegnącym tutaj wokoło magnesów prąd płynie zawsze w jednym kierunku.

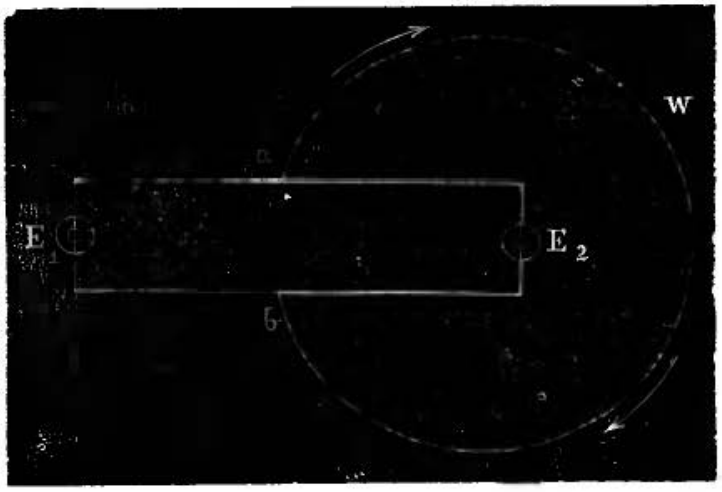


Fig. 611. Szemat objaśniający bieg odgałęzienia prądu wokoło magnesu.

Otóż takie silne prądy umożliwiają szybkie osadzanie na powierzchni ciał grubych warstw metalowych, które przy pewnej staranności mogą być tak jednostajne, że uwydatniają najdelikatniejsze nawet kontury przedmiotów. Jeżeli osad galwaniczny ma stale przylegać do przedmiotu, co przy złoceniu, srebrzeniu i niklowaniu jest prawie zawsze pożądane, wówczas powierzchnia jego musi być doskonale czysta, gdyż najlżejszy chociażby ślad tłuszczu na niej powoduje łatwe odpadnięcie osadu. Przedmioty mające uledz elektrotypii muszą zawsze być przewodnikami, stanowią bowiem ujemny elektrod, pogrążony w cieczy. Najłatwiej tedy jest wytwarzać osady elektrotypiczne na metalach. Lecz i nieprzewodniki można pokryć warstwą galwanoplastyczną. jeżeli tylko powierzchnia ich jest przewodzącą, czyli wyrażając się technicznie, zmetalizowaną, w tym celu zaś najlepiej potrzeć ją delikatnym proszkiem grafitu. Grafit jest przewodnikiem elektryczności, a użyty w postaci nadzwyczaj subtelnego proszku, przylega do przedmiotów, szczególnie gdy powierzchnia ich nie jest zupełnie gładka. W ten sposób można zamienić na przewodniki medaliony i figury gipsowe,

drewniane, alabastrowe i marmurowe. Gdy zaś chodzi o przedmioty ze szkła, porcelany, kości słoniowej i t. p. do których grafit nie przylega, wówczas należy je uprzednio powlec cienką warstewką pokostu i po wysuszeniu pokryć proszkiem grafitu.

W wielu razach, a mianowicie gdy dane przedmioty są bardzo delikatne, jak np. owoce i kwiaty, grafit nie daje się zastosować; wówczas można je powlec cienką warstwą przewodzącą za pomocą procesu chemicznego. Należy przedmiot polać roztworem soli metalicznej i następnie przez redukcyę wydzielić z niej metal, który pod postacią bardzo cienkiej warstewki osiada na powierzchni przedmiotu. Często używa się do tego azotanu srebra, który w wodzie rozpuszcza się z łatwością, o wiele zaś trudniej w alkoholu. Roztworem tym pokrywa się dane przedmioty i wystawia na działanie promieni słonecznych; srebro wydziela się wówczas z roztworu pod postacią nader delikatnego, czarnego proszku, który osiada na powierzchni.

W podobny sposób każdy przedmiot daje się pokryć warstwą, którą następnie można odjąć z łatwością. Ten właśnie cel mamy na widoku, gdy chodzi o przedmioty nie metalowe, z których chcemy otrzymać tak zwany *odlew*. Po większej części bywa on wykonywany z miedzi. Dany przedmiot zmetalizowany umieszcza się, jako elektrod ujemny, w rotworze siarczanu miedzi, gdy zaś warstwa miedzi osadzona elektrotypicznie na przedmiocie dochodzi do pewnej grubości, wówczas daje się odjąć z łatwością. Obecnie otrzymuje się odciski miedziane z dzieł sztuki, figur gipsowych, medali i monet. Nawet z fotografij można mieć podobne kopie miedziane. Kliszę Daguerre'a polewa się najprzód bardzo rozcieńczonym roztworem cyanku potasu; następnie obmywa i zawiesza w kąpieli. Pod wpływem słabego prądu, działającego przez 5 do 8 godzin, na kliszy osadza się warstwa miedzi, którą można odjąć nożem i na której najdrobniejsze nawet szczegóły fotografii wiernie są odtworzone. Oczywiście wypukłe miejsca fotografiii są na odcisku wklęsłe i naodwrót, innemi słowy otrzymujemy obraz negatywny, można jednak z niego znów zdjąć kopię elektrotypiczną, która już stanowi obraz pozytywny.

Elektrotypiczny sposób odtwarzania jest obecnie stosowany prawie wyłącznie do reprodukcyi stalorytów i drzeworytów. Drzeworyt np. zostaje uszkodzony, jeżeli bardzo często służy do otrzymywania odcisków i dlatego po uprzedniem zmetalizowaniu go grafitem zdejmuje się zeń dowolną ilość kliszy galwanicznych, z których dopiero tworzą się odciski. Tak samo postępuje się często z drukiem i pismem; po złożeniu, przygotowuje się z nich najprzód klisze elektrotypiczne i z klisz tych zdejmuje odciski.

Podczas więc gdy na ujemnym elektrodzie osadza się metal z roztworu, na dodatnim ulega on rozpuszczeniu. Ten właśnie ostatni fakt również znalazł zastosowanie w technice. Jeżeli mianowicie pewne części dodatniego elektrodu pokryjemy jakąś substancyą odosobniającą, np. lakiem lub woskiem, wówczas nie będą się one rozpuszczały podczas przepływu prądu. Gołe natomiast części ulegną stopniowemu rozpuszczeniu i powstaną w tych miejscach zagłębienia, pokryte natomiast części zachowają poziom pierwotny. Można tedy cały elektrod dodatni pokryć woskiem, zrobić na nim pewien rysunek, który obnaża metal i wystawić na działanie prądu. Otrzymamy wówczas rysunek wyżłobiony na metalu. Albo też możemy rysunek pokryć woskiem, pozostałą zaś powierzchnię elektrodu pozostawić swobodną i wtedy po przepuszczeniu prądu otrzymamy na niej rysunek wypukły.

Opisana tylko co gałęź przemysłu, polegająca na pewnem działaniu prądu elektrycznego, datuje już oddawna. Od czasu zaś udoskonalenia maszyn dynamicznych, które pozwalają w tani i wygodny sposób otrzymać nader silne prądy, elektryczności przypadła w udziale inna jeszcze rola, również oparta na elektrolizie. Służy ona mianowicie do wydzielania metali z ich chemicznych związków, albo z naturalnych mięszanin z innemi ciałami. W tym kierunku elektryczność bywa głównie stosowana do otrzymywania *miedzi* z tak zw. czarnomiedzi resp. miedziaka oraz *glinu* i *magnezu* z ich soli.

Czystą miedź otrzymuje się obecnie w następujący sposób: Zanieczyszczony metal zanurza się jako elektrod dodatni w ką-

pieli z siarczanu miedzi, za ujemny zaś służy cienka blacha czystej miedzi. Nieczysta miedź rozpuszcza się w kwasie siarczanym, który zbiera się na niej dzięki elektrolizie, czysta zaś miedź wydziela się na elektrodzie ujemnym, jeżeli tylko natężenie prądu jest odpowiednio dobrane. Na każdy kwadratowy metr powierzchni elektrodu liczy się 20—40 amperów. Domieszki zanieczyszczające z dodatniego elektrodu przechodzą poczęści do roztworu siarczanu miedzi, poczęści zaś osiadają na dnie. W pewnej hucie znajduje się szereg *wielkich maszyn* dynamicznych Siemens'a, z których każda wysyła prąd do 10 lub 12 wanien. W każdej wannie osadza się w ciągu 24 godzin *około pół centnara czystej miedzi, czyli że jedna maszyna* dostarcza dziennie 5—6 centnarów tego metalu. Do tego potrzeba mocy równej 8—10 koniom parowym.

Przy *powyższem zastosowaniu prądu* galwanicznego elektrody zanurzone w kąpieli są z tego samego metalu, to jest miedziane, lecz jeden z nich zawiera obce domieszki. Im więcej jest tych domieszek, tem silniejszy jest prąd polaryzacyi, przeciwdziałający prądowi maszyny dynamicznej i tem więcej zużywa się pracy na jego przezwyciężenie. Zastosowanie więc owo tem mniej się opłaca, im więcej zanieczyszczona jest miedź. Najkorzystniejsze jest ono wówczas, gdy surowa ruda zawiera nie więcej nad $\frac{1}{2}\%$ domieszek.

Glin i magnez otrzymuje się przez działanie prądu na odpowiednie sole w stanie stopionym, a więc przy wysokiej temperaturze.

W ostatnich latach sposób otrzymania czystego glinu nabrał szczególnego znaczenia z *powodu jego cennych dla nas* własności, które pewnym zapaleńcom pozwalają nawet przewidywać czas, gdy wyprze on zupełnie żelazo. Również aliaże glinu *z miedzią i cynkiem, czyli tak zwane bronzy glinowe,* posiadają ważne własności. Boguski otrzymał bronz glinowy sposobem pyro-elektrolitycznym, to jest w stopiony kryolit zanurzał miedź, jako jeden biegun i przez masę stopioną przepuszczał prąd z maszyny dynamicznej; wówczas z kryolitu wydzielał się glin, który zaraz aliażował się z miedzią i dawał bronz gli-

nowy. W analogiczny sposób można otrzymać aliaż glinu z mosiądzem lub żelazem, albo też czysty glin. Dzięki podobnym metodom, cena glinu zmniejszyła się w ostatnich latach w stosunku 240 do 30 na jeden kilogram.

§ 6. Telegrafy.

Elektryczność posiada dwie głównie własności, które czynią ją szczególnie odpowiednią do przesyłania wiadomości na wielką odległość. Pierwszą z nich jest nadzwyczajna prędkość, z jaką rozprzestrzenia się w przewodniku, a jakkolwiek nie posiadamy zgodnych pod tym względem cyfr, to jednak wszystkie dotychczasowe pomiary zgadzają się co do tego, że elektryczność prawie momentalnie przebiega wszelkie nasze od ległości na ziemi. Druga ważna własność polega na tem, że elektryczny prąd biegnie tylko po zakreślonej drodze, to jest jedynie wzdłuż przewodnika. Pod tym względem prąd elektryczny posiada pierwszeństwo przed światłem, które jedynie może z nim współzawodniczyć co do prędkości rozprzestrzeniania się. Światło rozchodzi się w powietrzu i nie przenika przez metale, natomiast prąd elektryczny wymaga ciał przewodzących, metali i wcale lub też nader nieznacznie przenika do otaczającego powietrza. Oprócz tego światło biegnie jedynie po zupełnie prostych drogach, podczas gdy elektryczność sunie po drogach najbardziej nawet krzywych.

Ponieważ tedy elektryczność wywiera wpływ tak różnorodny, to można z danego punktu wywoływać za jej pośrednictwem pewne działanie w miejscach oddalonych i przez to dawać jakieś umówione znaki.

Pierwsze próby telegraficznego przesyłania wiadomości, były bardzo mozolne, gdyż dla każdej oddzielnej litery używano osobnego drutu. Dopiero gdy dzięki Gauss'owi zrozumiano, że wszystkie nasze litery można wyrazić za pomocą nader nieznacznej liczby znaków, telegraf mógł być zastosowany na szerszą skalę w życiu praktycznem.

Obecnie telegrafia posługuje się prawie wyłącznie działa-

niem elektromagnetycznem, które daje się zastosować w rozmaity sposób. *Można np. z danego miejsca puszczać prąd przez* drut przewodni do odległej stacyi, gdzie tenże prąd przechodzi przez zwoje multyplikatora i powoduje zboczenie igły magnesowej. Wysyłając prądy o różnym kierunku i natężeniu, otrzymuje się zboczenia w jedną lub drugą stronę, słabsze albo silniejsze, co już stanowi środek do dawania pewnych znaków. Za pomocą kilku zasadniczych znaków można utworzyć cały alfabet. Na tem właśnie są oparte *telegrafy z igłą*, które obecnie są szczególnie używane na liniach podmorskich. W innych znów telegrafach prąd idący od jednej stacyi do drugiej służy tylko do regulowania istniejących już ruchów. Naprzykład w *telegrafie ze wskazówką* ta ostatnia posuwa się po cyferblacie, na którym nakreślone są wszystkie litery i cyfry, pod wpływem działania przyrządu zegarowego, prąd zaś powoduje jedynie zatrzymanie wskazówki w tych miejscach, gdzie znajdują się litery, które mają być zatelegrafowane. Jest on więc wygodny z tego względu, że nie wymaga *osobnego pisma, lecz za to, podobnie jak te*legraf z igłą, daje znaki przejściowe, niedługotrwałe , przez co pewne pomyłki nie łatwo mogą być kontrolowane. Okoliczność ta została usunięta w tych telegrafach, które dają trwałe znaki, czyli w *telegrafach drukujących*, albo *piszących*. Tutaj przyrząd składa się głównie z elektromagnesu, który przyciąga kotwicę na dłuższy lub krótszy przeciąg czasu. Przy niektórych z nich potrzebna jest znajomość osobnego pisma, inaczej mówiąc do telegrafowania i odczytywania depesz wymagane jest odpowiednie przygotowanie. Unika się tego w telegrafach, które bezpośrednio drukują telegrafowane wyrazy, a więc pozostawiają trwałe i odrazu czytelne znaki. Wreszcie istnieją jeszcze *telegrafy elektrochemiczne*, które same przenoszą dalej pismo wysyłających depesze.

Przy wszelkiem urządzeniu telegraficznem, gdzie dwie stacye są połączone ze sobą, na każdej z nich musi znajdować się przyrząd wysyłający depeszę, a więc dający znaki oraz przyrząd, który odbiera depeszę, czyli tak zwany receptor. Oprócz tego, przewodnictwo pomiędzy obydwiema stacyami musi być

urządzone w pewien określony sposób. Wreszcie ażeby dana stacya mogła komunikować z wielu innemi stacyami, potrzebne są przyrządy ułatwiające rozmaite połączenia.

Zasługa zbudowania telegrafu nie należy wyłącznie do żadnego z wynalazców. Lesage (Genewa 1774), Lomond (Paryż 1787) i Ronalds (Londyn 1816) wynaleźli sposób przesyłania znaków po drutach, na jednym końcu których rozchodziły się kulki bzowe w chwili, gdy drugi koniec ładowano elektrycznością. Cavallo (Londyn 1795) przesyłał przez druty iskry z butelki lejdejskiej według pewnego planu. Ampère (Paryż 1821) zwrócił uwagę, że galwanometr umieszczony na znacznej odległości od bateryi może służyć do przesyłania znaków. Cooke i Wheatstone (Londyn 1837) wprowadzili telegraf z igłą, Henry (New-York 1831) spożytkował przyciąganie elektromagnesu do przesyłania znaków w ten sposób, że ruch kotwicy wywoływał pewne dźwięki, mające określone znaczenie. Morse (New-York 1837) wynalazł telegraf, w którym przyciąganie kotwicy pozostawia znaki w kształcie kresek lub kropek na przesuwającym się pasku papierowym. Steinheil (Monachium 1837) odkrył, że zamiast drutu powrotnego można użyć ziemi, łącząc ją za pomocą tak zw. płyt ziemnych, wkopanych w ziemię. Dalej pracowali w tym kierunku Gintl, Stearns, Stark, Edison i Hughes [1]).

Różne te telegrafy zostały w nowszych czasach prawie zupełnie usunięte przez piszący telegraf Morse'a oraz przez telegraf Hughes'a, drukujący czcionkami i dlatego zajmiemy się głównie ich opisem.

W telegrafie Morse'a pewne znaki otrzymuje się dzięki zamykaniu prądu, który przepływa przez obydwie, połączone ze sobą stacye. Gdy mianowicie prąd jest zamknięty, na stacyi odbierającej poczyna działać elektromagnes, który przyciąga kotwicę, ta ostatnia zaś wyciska znaki na papierze za pomocą przytwierdzonego do niej sztyfcika. A więc na stacyi wysyłającej depeszę musi znajdować się baterya galwaniczna oraz przyrząd, umożliwiający dowolne otwieranie i zamykanie prądu,

---

[1]) Thompson, Elektryczność i magnetyzm, tłom. Boguski.

płynącego po drutach telegraficznych. Przyrząd taki, zwany *kluczem*, jest przedstawiony na fig. 612 w postaci, wyszłej już wprawdzie z użycia, lecz nadającej się doskonale do objaśnienia rzeczy. Metalowy drążek *h* oparty ruchomo o słupek *b*, styka

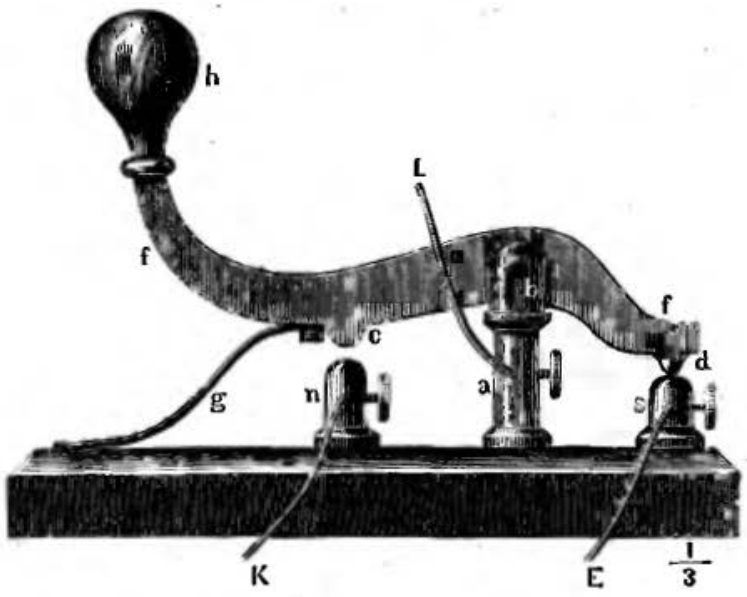


Fig. 612. Klucz Morse'a.

się w pewnem położeniu jednym swym końcem *d* z częścią *s*, podczas gdy *c* wisi swobodnie w powietrzu. Gdy natomiast przyciśniemy klucz, wówczas *c* spoczywa na *n* i *d* jest oddzielone od *s*. Na każdej stacyi znajduje się podobny klucz. Przewodni drut *L* pomiędzy dwiema stacyami jest przytwierdzony w obydwóch kluczach do środkowego słupka *a*, część *n* łączy się na każdej stacyi z jednym biegunem *K* bateryi, *s* zaś jest połączona z ziemią *E*. Drugi biegun bateryi również jest z ziemią połączony.

Gdy na obydwóch stacyach klucze zajmują wskazane na rysunku położenie, wtedy przez linię nie przebiega wcale prąd, jest on bowiem przerwany przy *n*. Lecz gdy na jednej stacyi przyciśniemy klucz, wówczas prąd płynie od bieguna *K* przez *n*, *c*, *a*, ku linii *L* i przybywa na drugą stacyę do miejsca *a*. Na drugiej stacyi klucz jest otwarty, wskutek czego prąd płynie tam przez *a*, *d* i *s* do ziemi, która stanowi łącznik z drugim biegunem bateryi na pierwszej stacyi:

W ten sposób możemy za pomocą klucza zamykać lub przerywać prąd, biegnący od jednej stacyi do drugiej. Prąd ten może powodować różne działania elektromagnetyczne. Jeżeli, jak np. w telegrafie Morse'a, ma on pobudzać elektromagnes, wtedy w obwód prowadzący od *s* do ziemi, należy na każdej stacyi włączyć elektromagnes, a otrzymamy żądane połączenie. Albowiem gdy klucz *h* na pierwszej stacyi jest przyciśnięty, a więc gdy ze stacyi tej wysyłamy depeszę, wtedy prąd płynie od jednego bieguna bateryi przez *K*, *n*, *c*, oraz linię *L* do klucza na drugiej stacyi, tam przez *a*, *d*, *s* biegnie wokoło elektromagnesu i następnie spływa ku płycie ziemnej. Z ziemi prąd powraca do pierwszej stacyi. Przy takiem połączeniu elektromagnes na drugiej stacyi jest pobudzany przez prąd, który przychodzi z pierwszej stacyi, jednocześnie zaś przez elektromagnes tej ostatniej nie biegnie żaden prąd. Podobnie przez pociśnięcie klucza na drugiej stacyi można pobudzić elektromagnes na pierwszej stacyi, nie wpłynąwszy przez to wcale na tamten elektromagnes.

Otóż te oddzielne prądy pobudzające elektromagnes służą do dawania pewnych znaków, co odbywa się za pośrednictwem następującego przyrządu. Prąd przybywa do zwojów elektromagnesu *M M* (fig. 613). Ponad końcami jąder jego znajduje się żelazna kotwica *K K* na drążku *H*, który na zewnętrznym swym końcu *L* zaopatrzony jest w ostrze. Przy każdem poruszeniu w tył kotwicy, ostrze wznosi się do góry i wyciska na przesuwającym się przed niem pasku papierowym jakiś znak. Jeżeli prąd trwa bardzo krótko, magnes jest tylko chwilowo pobudzony i momentalnie również przyciąga kotwicę; wówczas ostrze kreśli na papierze *punkt*. Gdy prąd trwa nieco dłużej, przed ostrzem przesuwa się większy kawałek papieru i na nim pojawia się *kreska*. Otóż z kropek tych i kresek utworzony jest cały alfabet Morse'a. Ażeby magnes nie przyciągnął kotwicy aż do zetknięcia, przed jądrami jego umieszczony jest słupek *E*, o który drążek *H* uderza zanim jeszcze kotwica może się z niemi zetknąć. Widzimy tedy w jak w prosty sposób otrzymuje

się znaki w przyrządzie piszącym Morse'a. Pasek papierowy jest nawinięty na koło, z którego następnie przez szczelinę pomiędzy dwoma kawałkami mosiądzu *ll* zesuwa się między dwa walce, leżące jeden na drugim. Górny walec, poruszany jedno-

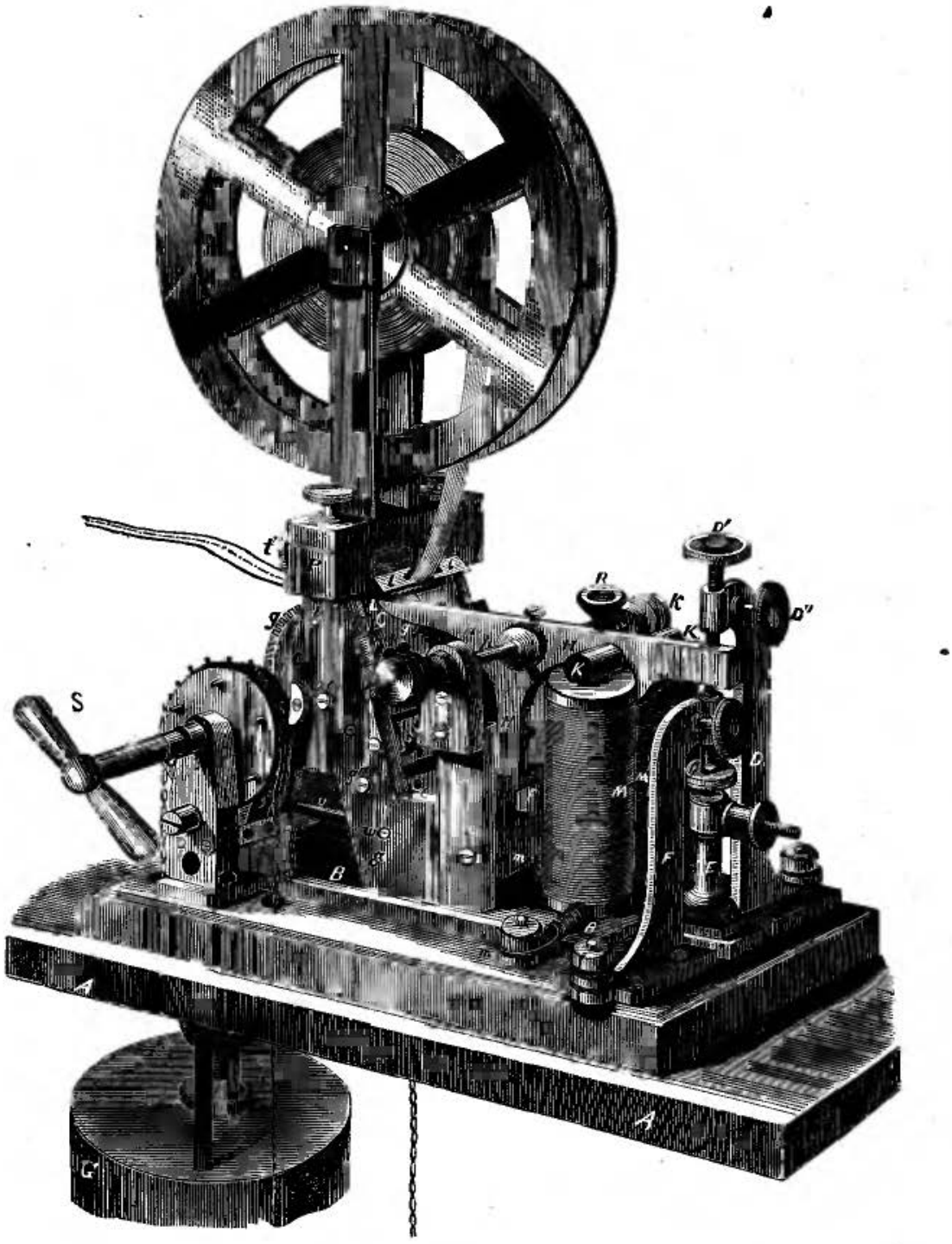


Fig 613. Przyrząd piszący w telegrafie Morse'a.

stajnie przez przyrząd zegarowy, pociąga za sobą, przez tarcie, dolny walec wraz z paskiem papierowym. Ruch ciężaru *G*, zawieszonego na łańcuchu przerzuconym przez blok, udziela się za pośrednictwem systemu kół zębatych górnemu walcowi i wprawia go w obrót. Klucz *S* służy do wciągania ciężaru, gdy ten opuścił się zanadto. W zasadzie i w użyciu przyrząd piszący Morse'a jest nadzwyczaj prosty i jedynie układ kół nadaje mu postać nieco bardziej złożoną.

Jeżeli więc dane dwie stacye są zaopatrzone w klucz, bateryę i przyrząd piszący, wówczas mogą one porozumiewać się ze sobą telegraficznie. I tutaj jednak okazała się pewna trudność. Oto elektromagnesy przyrządu piszącego wymagają silnego prądu, ażeby mogły dostatecznie przyciągnąć kotwicę. Lecz przy znacznej odległości dwóch stacyj opór drutów jest tak wielki, że w celu popudzenia elektromagnesu na stacyi odbierającej musianoby użyć bardzo silnej bateryi na stacyi wysyłającej.

Otóż Wheatstone obmyślił znakomity sposób usunięcia tej trudności. Mianowicie prąd biegnący wzdłuż linii, to jest drutów przewodnich, nie pobudza bezpośrednio elektromagnesu w przyrządzie Morse'a, lecz wzbudza inny magnes, którego kotwica już przy nader słabym ruchu zamyka osobny prąd, wprawiający w działanie tenże przyrząd. Taki aparat nosi nazwę *przenośnika* (relais). Jego elektromagnes *M* (fig. 614), otoczony bardzo wielką ilością zwojów cienkiego drutu, pobudzony nawet przez słaby prąd z odległej stacyi, przyciąga nieco kotwicę *K*. Przy najlżejszym zaś ruchu kotwica ta przyciska koniec *R* i zamyka prąd z osobnej bateryi na stacyi odbierającej. Prąd ten płynie w przenośniku od *g*, przez słup *D* i kotwicę *K*; jeżeli zaś *K* spoczywa na *R*, to biegnie dalej przez *R* i *C* do kleszcza *p* i następnie przez przyrząd Morse'a powraca do bateryi. Gdy prąd na linii ustaje, sprężyna *F* podnosi znów kotwicę *K* i oddala ją od *R*.

Przy użyciu przenośnika każda stacya musi posiadać dwie oddzielne baterye: jedną liniową przeznaczoną do wysyłania prądu na drugą stacyę i drugą miejscową dla przyrządu Morse'a.

Figura 615 przedstawia szematycznie połączenie dwóch stacyj z przenośnikami. Tutaj *L B* oznacza bateryę liniową, *O B* ba-

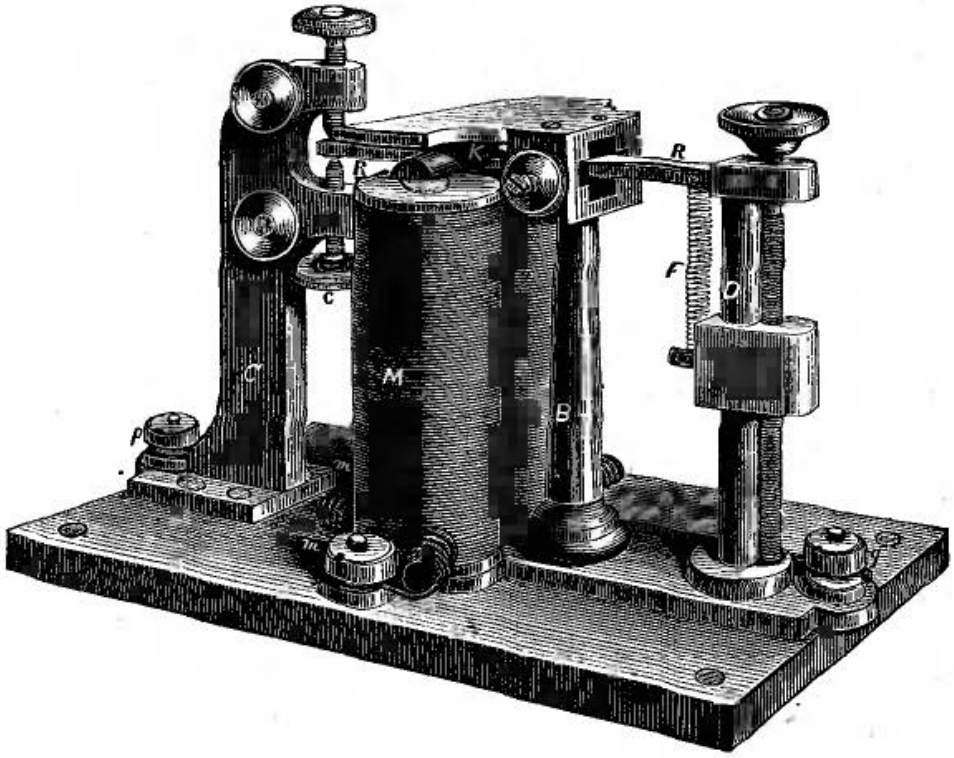


Fig. 614. Przenośnik.

teryę miejscową, *S c h r* piszący aparat Morse'a, *R* przenośnik, *T* klucz, *P* płyty ziemne. Jeżeli na stacyi II klucz jest przyciśnięty, a więc gdy telegrafujemy, wówczas prąd płynie od jednego bieguna bateryi liniowej II przez klucz II i linię *L* do klucza I. Ztąd biegnie wokoło przenośnika *R* do płyty ziemnej *P* i przez ziemię powraca do stacyi wysyłającej. Jednocześnie zaś wskutek pobudzenia przenośnika prąd bateryi miejscowej zostaje zamknięty i przyrząd piszący poczyna działać.

Przenośnik jest najczulszym przyrządem w telegrafii, pobudzanym przez bardzo słabe nawet prądy, przybywające z daleka. W chwili gdy prąd ustaje, *kotwica jego powinna być natychmiast* oswobodzona, jeżeli znaki w przyrządzie Morse'a mają być bardzo wyraźne. Pod tym jednak względem opisany przenośnik *pozostawia wiele do życzenia*, gdyż kotwica jego powraca do położenia równowagi pod wpływem sprężyny. Ta ostatnia musi działać (szczególniej przy szybkiem telegrafowa-

niu) z wielką dokładnością, co w praktyce trudno osiągnąć. Oprócz tego na przenośnik wpływa prąd silniejszy, lub słabszy, albowiem telegrafują z mniejszej lub większej odległości i dlatego sprężyna nie może być zawsze jednakowo napięta.

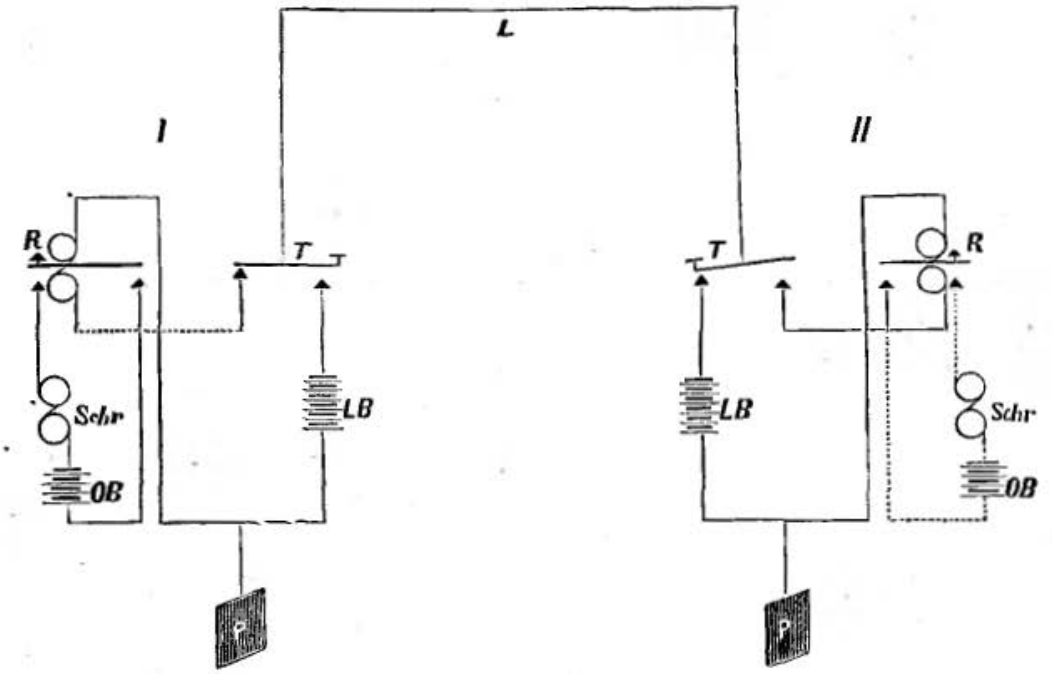


Fig. 615. Szemat połączenia dwóch stacyj, na których znajdują się przenośniki.

Brakowi temu starano się zapobiedz w różny sposób, usunięto go zaś zupełnie przez przenośnik bez sprężyny, w którym prąd liniowy nie wzbudza magnetyzmu, lecz wzmacnia albo osłabia istniejące już bieguny magnetyczne. Jest to przenośnik polarny. Stalowy magnes *Ab* (fig. 616) zgięty pod kątem prostym, ma swój biegun południowy w *aa'* biegun zaś północny w *b*. Na tym ostatnim są osadzone dwa jądra z miękiego żelaza owinięte drutem, które również stają się północno magnetycznemi. Biegun południowy *aa'* nieco wycięty podtrzymuje długi drążek *Cd* z miękiego żelaza, który może nieco obracać się wokoło pionowej osi; jest on południowo magnetyczny. Jeżeli przez zwoje drutów nie przepływa prąd, wówczas drążek zajmuje między dwoma biegunami północnemi położenie równowagi. Lecz oto prąd bateryi liniowej na stacyi odbierającej biegnie najprzód przez główną spiralną, na którą nawinięta jest

spiralna wtórna, połączona ze zwojami przenośnika. Gdy tylko prąd liniowy poczyna swój bieg, we wtórnej spiralnej zostaje wzbudzony prąd, który przez chwilę płynie w takim kierunku wokoło jąder magnesu, że jedno z nich, np. E staje się silniej północno-magnetycznem, drugie zaś E słabiej północno-magnetycznem, a być może nawet południowo-magnetycznem. Wskutek tego biegun E przyciąga drążek $C\,d$, którego ostrze d zamyka prąd miejscowy. Gdy zaś prąd liniowy jest przerwany, prąd wtórny płynie przez zwoje w kierunku odwrotnym, przez co E' staje się silniej, E słabiej północno-magnetycznem; drążek ulega przyciąganiu ze strony E' i prąd miejscowy jest otwarty. W ten sposób przenośnik działa bez sprężyny i ruch kotwicy dokładnie i pewnie przystosowuje się do zamknięć i przerw prądu. Istnieje jeszcze cały szereg przenośników odmiennej budowy, lecz zasada ich w gruncie jest ta sama.

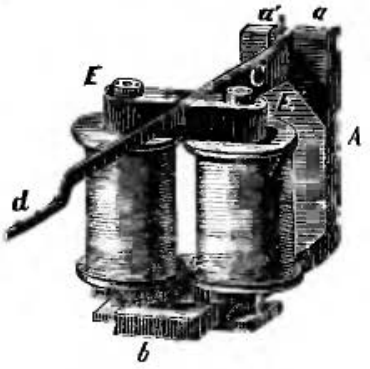


Fig. 616. Przenośnik polarny.

Kreskowy i kropkowy alfabet Morse'a jest następujący:

a . —	j . — — —	s . . .	1 . — — — —
ä . — . —	k — . —	t —	2 . . — — —
b — . . .	l . — . .	u . . —	3 . . . — —
c — . — .	m — —	ü . . — —	4 . . . . —
d — . .	n — .	v . . . —	5 . . . .
e .	o — — —	w . — —	6 — . . . .
f . . — .	ö — — — .	x — . . —	7 — — . . .
g — — .	p . — — .	y — . — —	8 — — — . .
h	q — — . —	z — — . .	9 — — — — .
i . .	r . — .	ch — — — —	0 — — — — — .

Ponieważ wyżej opisany przyrząd piszący Morse'a dawał znaki niedostatecznie wyraźne, to starano się je zabarwić i w tym celu zmieniono go o tyle, że ruch kotwicy podnosi w górę małe kółko umoczone w atramencie, które wyciska ślady na pasku papierowym.

Telegraf Morse'a przedstawia tę złą stronę, że wymaga

osobnego pisma, przez co nietylko należy wyuczyć się specyalnie telegrafowania i odczytywania depesz, lecz także przepisać je na zwykły język. Powoduje to stratę czasu, która szczególniej w telegrafii powinna być o ile możności unikaną. Oprócz tego przy takim sposobie telegrafowania łatwo zachodzą pomyłki, gdyż oddzielne pociśnięcia klucza szybko przemijają i nie mogą być kontrolowane.

Wprawny telegrafista może przyrządem tym zadepeszować około 100 znaków w ciągu minuty. Ponieważ jedna litera przecięciowo jest złożona z 3—4 znaków, to może on w ciągu minuty zatelegrafować około 25—35 liter. Otóż to nie wystarczało. W celu umożliwienia szybszego i wygodniejszego wysyłania depesz i otrzymywania ich odrazu w druku, starano się zbudować telegrafy o odmiennej, niż powyższa budowie. Z przyrządów tych największe uznanie pozyskał sobie telegraf Hughes'a, drukujący czcionkami i dający znaki pięć razy szybciej, niż aparat Morse'a. Pierwszy raz został on użyty we Francyi, na linii pomiędzy Paryżem a Lyonem (w roku 1866). Zasada jego jest następująca: Każdy przyrząd jest zaopatrzony w koło, na którem znajdują się litery, cyfry i znaki pisarskie i które bezustannie się obraca. Ruch tych kół na stacyi wysyłającej i odbierającej musi być równoczesny, innemi słowy muszą one obracać się z jednakową prędkością i zawsze zajmować jednakie położenia. Tę równoczesność otrzymuje się za pośrednictwem regulatora. Potrzeba jedynie, ażeby w chwili, gdy telegrafowana litera koła zajmuje najniższe miejsce, papier podniósł się do góry, wówczas bowiem litera ta zostaje wydrukowaną. Osiąga się to za pomocą elektromagnesu, pobudzanego przez przybywający prąd. W celu ułatwienia odpowiedniej czynności, telegraf Hughes'a posiada klawiaturę, na oddzielnych klawiszach której wypisane są litery, cyfry i znaki; przy naciśnięciu stosownego klawisza prąd biegnie ku odległej stacyi. Przytem całe to urządzenie jest tego rodzaju, że prąd może być wysłany jedynie w chwili (albo krótko przedtem), gdy mająca się wydrukować litera na kole zajęła najniższe miejsce. Wogóle tedy każdy telegraf drukujący składa się z *systemu kół*, który

wprawia w ruch *koło z czcionkami* oraz należące do niego przyrządy, z *elektromagnesu* i *klawiatury* wraz z całem urządzeniem do zamykania prądu.

Szybkość koła z czcionkami jest nader znaczna, dochodzi bowiem do 100 i 120 obrotów na minutę. Pomimo wielkiej komplikacyi przyrządu, działa on bardzo dokładnie, gdyż zawiera cały szereg różnych dodatkowych części, za pomocą których sam bieg swój reguluje. Przed każdem wysłaniem depeszy telegrafiści powinni przekonać się, czy oba koła z czcionkami poruszają się równocześnie, co można skonstatować przez kilkakrotne pociśnięcie tego samego klawisza — w przeciwnym zaś razie należy odpowiednio uregulować mechanizm ruchu.

Obecnie w telegrafii posługują się powszechnie przyrządami Morse'a i Hughes'a, dawniejsze bowiem telegrafy z igłą i wskazówką zupełnie prawie wyszły z użycia. Inny rodzaj telegrafów ma na celu telegrafowanie danego rękopisu, a nawet rysunków, co osiąga się za pomocą działania chemicznego. Lecz przyrządy te nie mają jeszcze wielkiego znaczenia praktycznego, pomimo że zajmowało się niemi wielu wynalazców. Zasadę ich zrozumie czytelnik z fig. 617. Na każdej stacyi znajduje się płyta metalowa. Na stacyi wysyłającej pisze się depeszę na płycie jakimś nieprzewodzącym roztworem żywicy, na stacyi odbierającej płyta jest pokryta papierem, nasyconym roztworem żółtej soli Gmelina. Na obydwóch stacyach przyrządy zegarowe wprawiają w ruch dokładnie jednoczesny dwa sztyfty, które kreślą na płytach równoległe, blisko siebie leżące linie. Dopóki sztyft na pierwszej stacyi dotyka przewodzącego metalu, dopóty prąd z bateryi biegnie przez linię do sztyftu na stacyi drugiej i rozkłada tam żółtą sól, z której powstaje błękit pruski. Dzięki temu na tamtejszym papierze pojawiają się błękitne kreski. Lecz z chwilą, gdy sztyft na pierwszej stacyi przesuwa się po nieprzewodzących literach, bieg prądu wzdłuż linii jest wstrzymany i papier na drugiej stacyi pozostaje białym. Na stacyi odbierającej depesza wypisuje się tedy białemi zgłoskami na błękitnem tle. W tym telegrafiie wielką trudność stanowi otrzymanie współczesnego ruchu dwóch sztyftów, który w da-

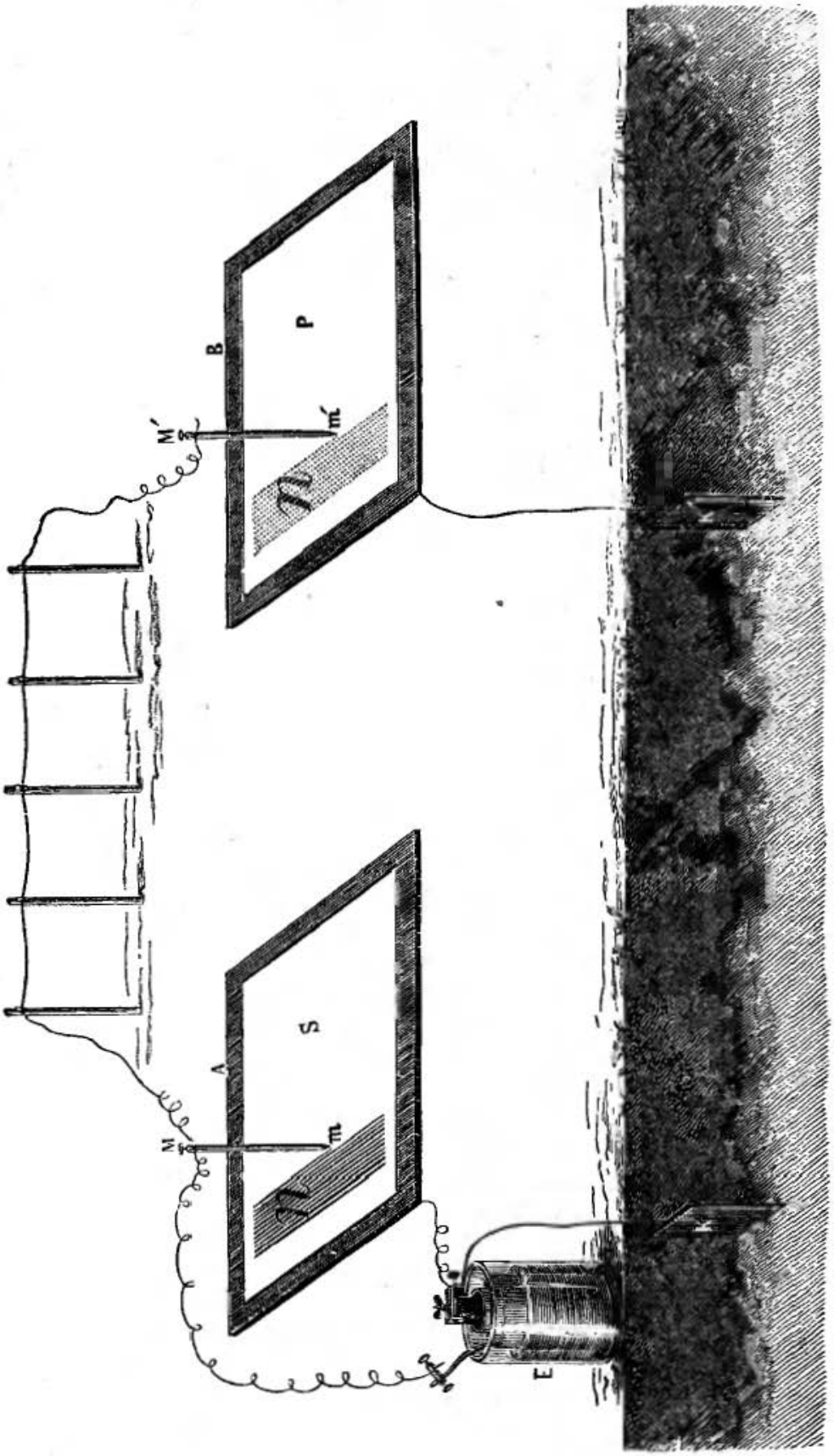


Fig. 617. Telegraf koplujący.

nym razie nie może być regulowany przez sam prąd. Z tego powodu telegraf ów, najlepiej odpowiadający właściwemu celowi telegrafii, nie znalazł jeszcze szerszego zastosowania.

W telegrafii wzajemne połączenie wielu stacyi stanowi ważne zadanie. Pomiędzy dwiema danemi stacyami, które chcą telegrafować do siebie, znajdują się zwykle stacye pośrednie; oprócz tego na głównych stacyach potrzeba często zmieniać kierunek prądu. Wszelkie odnośne urządzenia i przepisy wychodzą po za zakres niniejszego dzieła; zawarte są one w specyalnych pracach dotyczących telegrafii.

Dwie stacye lądowe mogą być połączone ze sobą w sposób powietrzny, lub podziemny. Dla linii powietrznych używa się drutu z żelaza albo z bronzu krzemowego, mającego 4—6 milim. w średnicy, oczywiście drut musi być dobrym przewodnikiem i należycie odosobnionym. W tym celu w punktach podparcia stoją słupy drewniane, druty zaś nawija się na dzwonki porcelanowe.

O wiele trudniejsze jest podziemne połączenie dwóch stacyj, wówczas bowiem druty muszą być umieszczone w wilgotnej ziemi, albo w wodzie i w celu dokładnego ich odosobnienia oraz uchronienia od psucia, należy je pokryć substancyą izolującą i dostatecznie oporną. Do tego służą *liny* telegraficzne, które dopiero po przezwyciężeniu wielkich trudności udało się przygotować w stanie, odpowiadającym śmiałemu pomysłowi telegrafii podmorskiej. Liny takie są zbudowane z drutów czysto miedzianych, wciśniętych w powłokę gutaperkową (fig. 618); liczba takich powłok w jednej linie dochodzi zazwyczaj do siedmiu. Następnie idą dwie warstwy konopne, otoczone rękawem z dru-

Fig. 618. Lina telegraficzna.

tów żelaznych, powleczonych cynkiem, albo też pokryte powłoką ołowianą i wreszcie warstwa asfaltu, okręcona raz jeszcze konopiami.

Telegrafia podmorska, o której już w roku 1843 myślał Wheatstone, została urzeczywistnioną o wiele później. Wprawdzie jeszcze w roku 1852 założono linę podmorską pomiędzy Anglią i Irlandyą, lecz była to odległość niezbyt znaczna. Dopiero w roku 1866 po wielu nieudatnych próbach urządzono telegraf podmorski z Europy do Ameryki, przez ocean Atlantycki. Jeszcze w roku 1857 zaczęto od próby połączenia liną Irlandyi z Ameryką, lecz już po kilku dniach lina zerwała się w odległości kilkudziesięciu mil od brzegu. W rok potem przedsięwzięto nowe próby, przyczem starano się skorzystać z poprzedniego doświadczenia, lecz jedna lina znów zerwała się, druga zaś uległa uszkodzeniu. W końcu, po jednej jeszcze nieudatnej próbie, założono w roku 1866 nową linę podmorską, która pomimo pewnych uszkodzeń przetrwała aż do obecnych czasów. W krótkim czasie przeprowadzono szereg lin przez ocean Wielki oraz inne morza i połączono w ten sposób wszystkie części cywilizowanego świata.

Telegrafia podmorska spotkała się z początku z nieprzewidzianemi trudnościami, niezależnemi zupełnie od przeszkód przy zakładaniu. Okazało się mianowicie, że podobna lina, złożona z wewnętrznych drutów miedzianych i zewnętrznych żelaznych oraz z pośredniej warstwy izolującej, działa jak kondensator. Wskutek tego na takim drucie połączonym z jednym biegunem bateryi, zbiera się bardzo wiele elektryczności, gdyż pojemność kondensatora (dzięki obecności izolującej powłoki) jest nader wielka. Przez to następuje z jednej strony zjawisko wyładowania, z drugiej zaś znaczne opóźnienie prądu, z czego dla telegrafii wynikają wielkie trudności. Albowiem gdy z pierwszej stacyi lina jest naładowana i następnie przy telegrafowaniu bateryа zostaje chwilowo oddaloną od liny, a więc gdy ta ostatnia jest połączona z ziemią, nagromadzona elektryczność spływa przez przyrządy w kierunku przeciwnym do ziemi. Powstaje wówczas tak zw. prąd powrotny. Jeżeli druga stacya jest odo-

sobniona, cała elektryczność spływa do ziemi przez pierwszą. Po każdym tedy prądzie telegraficznym, przez przyrządy biegnie prąd o kierunku przeciwnym, powodujący niepożądaną, a zatem szkodliwą ich czynność. Starano się w rozmaity sposób zniweczyć wpływ owego prądu powrotnego. W telegrafii podmorskiej cel ten osiąga się częściowo przez to, że przy każdorazowem otwarciu prądu telegraficznego puszcza się przez linie prąd z osobnej bateryi, który paraliżuje prąd powrotny. Dla znacznych podmorskich odległości używa się obecnie kondensatorów, które pozwalają osiągnąć ten sam skutek. Mianowicie na stacyi odbierającej naładowuje się jedną zbroję wielkiego kondensatora, *którego druga zbroja jest połączona z liną*. Przez to elektryczność jednoimienna jest w odpowiedni sposób przepuszczana przez linę. Gdy prąd telegraficzny ustaje, elektryczność liny łączy się z przeciwną elektrycznością połączonej z nią zbroi kondensatora, podczas gdy z drugiej zbroi prąd poprostu spływa do ziemi.

Telegrafia podmorska wymagała tedy zupełnie innego urządzenia przyrządów. Zresztą w telegrafii transatlantyckiej używają częściowo telegrafu z igłą dlatego, ażeby można było pracować przy najsłabszych nawet prądach. Te ostatnie są przepuszczane przez zwoje bardzo czułego multyplikatora, zboczenia zaś obserwuje się przez lunetę. Do tego używa się prawie wyłącznie galwanometr zwierciadłowy Wiliama Thomsona, przyczem zboczenia w jedną i w drugą stronę stanowią dwa znaki zasadnicze, z których składa się alfabet, albo też ten ostatni tworzy się na podstawie zboczeń w jednym tylko kierunku, lecz niejednakowo wielkich (15^0 i 25^0). Ze wspomnianych powodów można przez liny zatelegrafować tylko 12 znaków w ciągu minuty, podczas gdy przyrząd Morse'a pozwala w tym samym czasie przesłać 100 znaków.

Nowsza elektrotechnika, polegająca głównie na rozwoju maszyn dynamicznych, poczyna obecnie wywierać także pewien wpływ na telegrafię. A mianowicie wielkie baterye, używane w tej gałęzi techniki i złożone z tysięcy elementów zaczynają ustępować miejsca akumulatorom, które wymagają bardzo ma-

łego dozoru, a przytem przedstawiają wysoką siłę elektromotryczną i nieznaczny opór. W niektórych urzędach telegraficznych zastąpienie bateryj przez akumulatory dało bardzo dobre rezultaty i należy przypuścić, że ogólne ich rozpowszechnienie w telegrafii wpłynie znacznie na ułatwienie pewnych odnośnych czynności w tej dziedzinie.

§ 7. Telefon i mikrofon.

Telegraf, jak widzieliśmy, umożliwia wprawdzie porozumiewanie się osób, znajdujących się w dowolnej odległości, lecz potrzebuje do tego pośredników, które zamieniają wyrazy na znaki telegraficzne, a następnie znaki te na wyrazy. Otóż ograniczenie to usunięto przez wynalezienie *telefonu*, który przenosi w dal same wyrazy.

Telefon w tej postaci, jaką obecnie posiada, należy do najważniejszych środków porozumiewania się i przedstawia jeden z najbardziej genialnie pomyślanych przyrządów, znanych w fizyce. Zasługuje on tem więcej na uwagę, że budowa jego jest nader prosta i oparta na prawach przyrody, oddawna znanych i stosowanych. Wynalazcą telefonu jest Graham Bell. Wprawdzie i przedtem próbowano za pośrednictwem elektryczności przesyłać dźwięki na odległość, a nawet w roku 1860 Reis zbudował telefon, przenoszący drogą elektryczną wyrazy i tony, lecz praktyczne rezultaty poczęto osiągać dopiero z chwilą dokonania prostego wynalazku Bell'a.

Zadanie polegało na elektrycznem przeniesieniu dźwięków i wyrazów na większą odległość. Ponieważ dźwięki są to drgania ciała dźwięczącego, czyli stanowią pewien określony rodzaj ruchu, jest to więc specyalny wypadek ogólnego zadania przenoszenia ruchu za pomocą elektryczności. W danem miejscu (stacyi) ciało zostaje wprawione w ruch drgający, który następnie wytwarza prądy elektryczne. Prądy te biegną na drugą stacyę i tam powodują ponownie ruch drgający, czyli wywołują dźwięki; energia elektryczna przetwarza się napowrót w energię ruchu.

Sposób rozwiązania przez Bell'a owego problematu możemy w zasadzie zrozumieć z następującego szematu. Na każdej stacyi znajduje się stalowy magnes, okręcony drutem (fig. 619). Obydwie cewki druciane są połączone ze sobą w jeden zamknięty obwód. Przed każdym z tych trwałych magnesów znajduje

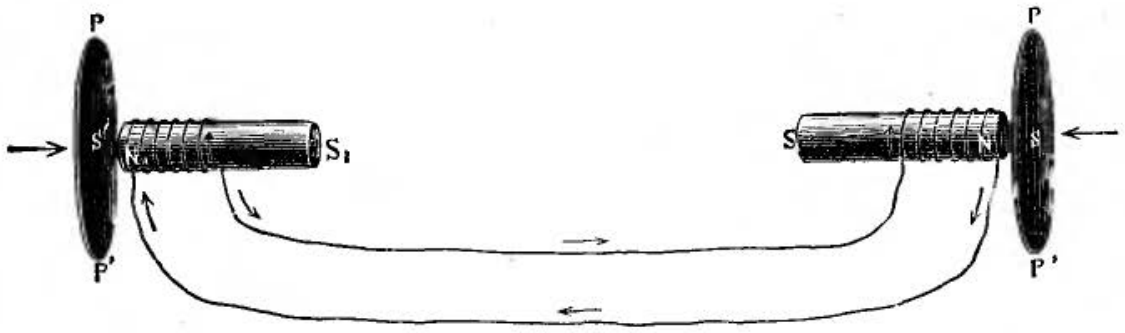


Fig. 619. Szemat telefonu Bell'a.

się w niewielkiej odległości cienka blaszka z miękiego żelaza, przymocowana na brzegu. Dzięki blizkości magnesów blaszki te również się magnetyzują. Z chwilą gdy jedna z nich zbliża się nieco do swego magnesu, działa ona indukująco na zwoje jego drutu i wytwarza w nim prąd o pewnym określonym kierunku. Prąd ten biegnie przez linię aż do magnesu na drugiej stacyi, opływa go w odpowiednim kierunku i wzmacnia jego magnetyzm. Silniejszy wskutek tego magnes przyciąga znajdującą się przed nim blaszkę żelazną, która poczyna wykonywać ten sam ruch, co blaszka na pierwszej stacyi. To samo ma miejsce, gdy pierwsza blaszka oddala się nieco od swego magnesu, wówczas bowiem pod wpływem powstałego prądu indukcyjnego druga blaszka również się oddala.

Otóż dokładnie według tego szematu jest urządzony telefon Grahama Bell'a, przedstawiony w przecięciu na fig. 620. W drewnianej oprawie znajduje się magnes *N S*, którego północny biegun jest okręcony nader cienkim i delikatnym drutem *D*. Tuż nad nim, lecz nie dotykając go, znajduje się cienka blaszka *C* z miękiego żelaza, której brzeg jest przymocowany w *P P*. Pokrywka przyrządu posiada otwór, obnażający środek blaszki,

przez który można mówić i śpiewać do wnętrza. Każdy dźwięk wprawia blaszkę w drgania, które za pośrednictwem elektryczności rozprzestrzeniają się po drucie aż do odległej stacyi, gdzie wywołują takie same drgania, czyli dźwięk. Fig. 621 przedstawia zewnętrzny wygląd telefonu Bell'a. Do kleszczów u dołu wprowadza się druty przewodnie, łączące ze sobą dwie stacye.

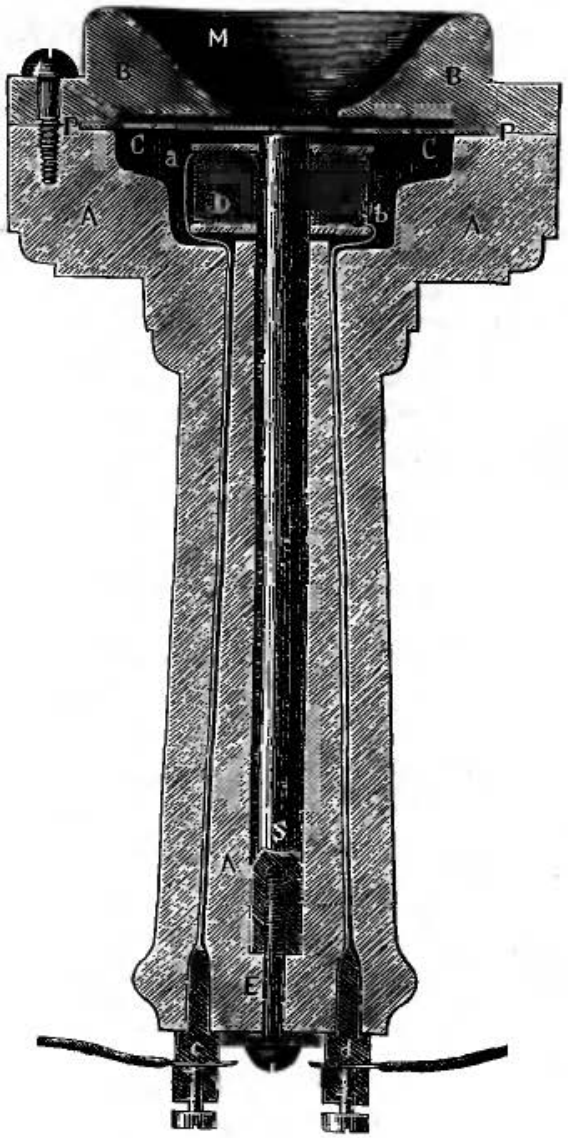


Fig 620. Telefon Grahama Bell'a (w przecięciu).

Wiemy z księgi o dźwięku, że w tonie odróżniamy wysokość, natężenie i barwę. Otóż telefon przenosi wszystkie te cechy. Wysokość tonu zależy wszak od liczby drgań, wykonanych przez blaszkę w ciągu określonego czasu, np. w sekundę. Każdy taki drgający ruch wytwarza odpowiedni prąd tak, że ilość prądów indukcyjnych jest dokładnie równa liczbie drgań. Natężenie zaś wymówionego lub odśpiewanego przed telefonem dźwięku wpływa na słabsze lub silniejsze przegięcie blaszki: ton mocniejszy bardziej zbliża ją lub oddala od magnesu, wskutek czego prądy indukcyjne są silniejsze. Telefon przejmuje tedy dokładnie wszelkie zmiany w wysokości i natężeniu tonu, wygłoszonego przed nim. Lecz nie dość tego. Istnieje jeszcze, jak powiedzieliśmy, trzecia cecha charakteryzująca ton, a mianowicie barwa. Głos ludzki posiada inną bar-

wę, aniżeli np. głos skrzypiec, lub fortepianu. Czytelnik przypomina sobie, że barwa zależy od tego, iż na dany dźwięk składają się nietylko drgania jednego rodzaju, warunkujące ton zasadniczy, lecz także cały szereg drgań, dające nadtony. W danym dźwięku może być mniej lub więcej takich nadtonów, przyczem są one względnie słabsze, albo silniejsze od innych, niektórych zaś brak zupełnie. Otóż te wszystkie okoliczności warunkują rozmaitą barwę dźwięków; one także udzielają się telefonowi. Albowiem gdy cząstka drga w pewien skomplikowany sposób, silniej lub słabiej, szybciej albo wolniej, wówczas i prądy elektryczne zmieniają się odpowiednio do tego rodzaju drgań, wskutek czego blaszka telefoniczna na stacyi odbierającej musi powtarzać te same złożone drgania. Te ostatnie udzielają się otaczającemu powietrzu i na wymienionej stacyi słyszymy dźwięki i wyrazy, mające tę samą wysokość oraz barwę i odpowiednie natężenie.

Fig. 621. Telefon Grahama Bell'a (widok zewnętrzny).

Powiadamy odpowiednie natężenie, gdyż z konieczności musi ono być o wiele mniejsze na stacyi odbierającej, niż na wysyłającej. Energia ruchu cząstek powietrza, wprawionych w drgania, udziela się przedewszystkiem blaszce żelaznej, przez co znaczna część jéj zostaje straconą. Dalej przy przemianie energii mechanicznej w elektryczną, tej ostatniej zaś w energię ruchu, następuje nowa strata. Ztąd właśnie pochodzi, że dźwięk przybywający na stacyę posiada o wiele słabsze natężenie, niż dźwięk wysyłany, pod warunkiem, że nie istnieją specyalne środki do jego ponownego wzmocnienia.

Pomimo tylu strat, telefon Bell'a przenosi głos i mowę wcale wyraźnie. Telefony na stacyi wysyłającej i odbierającej są zupełnie jednakowe tak, że każdy z nich służy jednocześnie jako wysyłacz i odbieracz dźwięków. Im większą jest odległość dwóch stacyj, tem znaczniejszy jest opór drutów przewodnich,

a więc tem słabsze natężenie prądu oraz działanie telefonu. Z tego powodu telefonem Bell'a można posługiwać się tylko przy niezbyt wielkiej odległości, równej kilkuset metrom i nawet wówczas wydaje on dość ciche dźwięki. Niemniej przeto telefon Bella dowiódł w sposób niezbity możliwości przenoszenia dźwięku za pośrednictwem elektryczności i następnie chodziło już jedynie o sposoby wzmocnienia tego działania. Wkrótce też pręt magnetyczny zastąpiono silnym magnesem w podkowę, którego bieguny są ściśle zbliżone do siebie i w taki sposób okręcone drutem, że wytwarzane w nich jednocześnie prądy przeciwne wzmacniają się wzajemnie. Magnes ten jest przymocowany u dołu do delikatnej szruby, która pozwala oddalać go lub zbliżać do blaszki żelaznej, co daje możność otrzymania silniejszych działań. Telefony w ten sposób udoskonalone odznaczają się silnem natężeniem dźwięku i pozwalają rozmawiać na odległości o wiele większej, niż pierwotne telefony Bell'a. Zresztą telefon ten, również jak i telefon Bell'a, należy bezpośrednio przyłożyć do ucha.

Powiedzieliśmy, że w opisanem, również jak i w innych niewymienionych przez nas urządzeniach telefonicznych, mowa oraz słyszenie odbywają się za pośrednictwem dwóch zupełnie jednakowych przyrządów. Energia dźwięku wprowadzona do jednego telefonu przetwarza się w inne postacie energii, ażeby w końcu znów zamienić się w energię dźwięku, przyczem poniesione straty z konieczności osłabiają znacznie tę ostatnią.

Otóż gdyby można było do układu dwóch telefonów doprowadzić zzewnątrz jaką bądź energię, np. elektryczną energię prądu galwanicznego, wówczas straty owe mogłyby być wyrównane, a przynajmniej zmniejszone. Zadanie to stało się możliwem dzięki wynalezieniu *mikrofonu*, którego dokonał Hughes. W telefonie chodzi jedynie o to, ażeby wydawane dźwięki powodowały peryodyczne wahania w natężeniu prądu, któreby następnie za pomocą magnesów przetwarzały się w ruchy peryodyczne. Lecz w zwykłym telefonie wymówione wyrazy nietylko wywołują *zmiany* w natężeniu prądu, lecz wytwarzają same prądy, co oczywiście jest zbyteczne. Mając odrazu prąd goto-

wy, np. z elementu galwanicznego, można za pośrednictwem wyrazów i tonów wywoływać jedynie *wahania prądu*, które następnie za pomocą telefonu przeistaczają się w dźwięki. Otóż Hughes otrzymał takie peryodyczne wahania dzięki zastosowaniu tak zwanego *swobodnego zetknięcia* między pręcikami węgla.

Wiadomo, że węgiel przedstawia bardzo wielki opór przy przejściu elektryczności, który jednak zmienia się znacznie pod wpływem ciśnienia. Otóż pomysł Hughesa polega na tem, ażeby dwa pręciki węglowe włączone w jeden obwód i z początku dokładnie zetknięte ze sobą, ściślej lub swobodniej stykały się pod wpływem drgań dźwiękowych, przez co natężenie prądu w tym obwodzie musi ulegać znacznym wahaniom. Można z łatwością pokazać, że przez nader nieznaczne zmiany we wzajemnem ciśnieniu na siebie dwóch węgli, otrzymuje się bardzo silne wahania prądu, które powodują głośne dźwięki telefoniczne. Fig. 622 przedstawia odnośne urządzenie. Z elementu

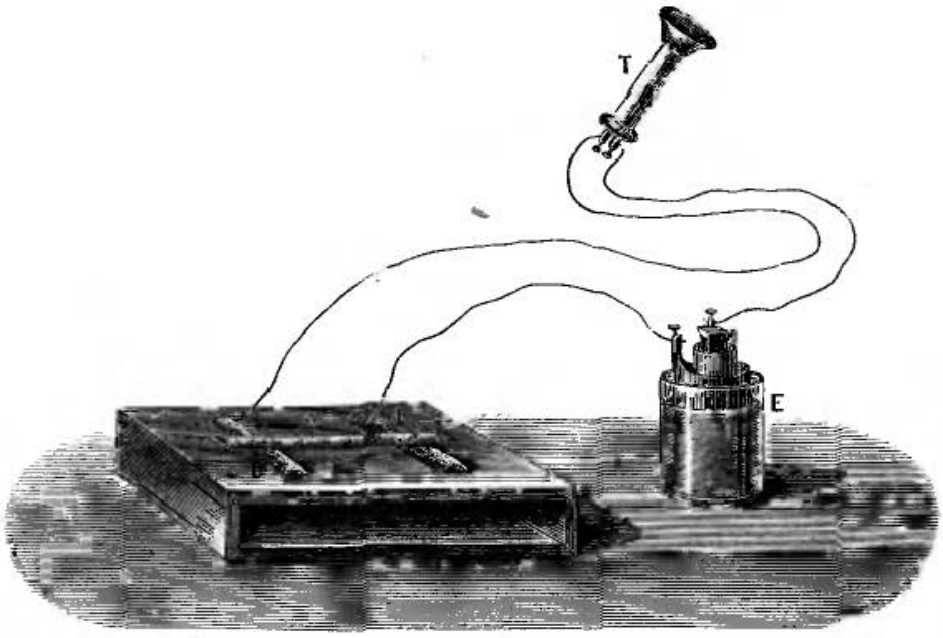


Fig. 621. Swobodnie zetknięte węgle włączone w obwód prądu.

E biegnie prąd przez węgiel *b*, następnie przez leżący na nim węgiel *c* do drugiego węgla *b*, przebiega zwoje telefonu i powraca do elementu. Dopóki pręcik *c* leży na pręciku *b* zupełnie

spokojnie, dopóty nic nie słychać, gdyż natężenie prądu pozostaje niezmienione. Lecz najlżejsze nawet poruszenie pręcika *c*, spowodowane chociażby przez ruch muchy chodzącej po skrzynce *A*, wywołuje natychmiast bardzo znaczne wahania prądu, wskutek czego magnes telefonu ulega wzmocnieniu i osłabieniu, w samym zaś telefonie słychać głośny szmer. Otóż przyrząd taki, złożony z pary swobodnie zetkniętych węgli, przytwierdzonych do cienkiej deseczki, która drga pod wpływem fal dźwiękowych, nazywamy *mikrofonem*.

Jest to więc prosty środek do wywoływania w telefonie znacznych wahań prądu. Należy tylko prąd galwaniczny z elementu przepuścić przez telefon i mikrofon i następnie mówić przed tym ostatnim, a telefon odtworzy dane dźwięki znacznie wzmocnione. A więc układ Hughes'a różni się pod dwoma względami od układu Bell'a. Jak już powiedzieliśmy, w telefonie Bell'a przyrządy do mówienia i słyszenia są zupełnie jednakowe. W układzie zaś Hughes'a wysyłaczem dźwięków nie jest telefon, lecz mikrofon. Druga różnica polega na tem, że w telefonie Bell'a element galwaniczny jest zbyteczny. Mowa wzbudza w pierwszym telefonie prądy indukcyjne, które wywołują czynność drugiego telefonu, gdy natomiast w telefonie Hughes'a mowa wzmacnia jedynie lub osłabia natężenie istniejącego już prądu.

Opisany układ można zmienić w pewien sposób, bardzo ważny pod względem rezultatu. Przyjęliśmy mianowicie, że prąd z elementu na stacyi wysyłającej płynie przez mikrofon tej stacyi, następnie przez linię do drugiej stacyi, gdzie przebiega telefon znajdujący się tamże i powraca przez linię do pierwszej stacyi. A więc przez telefon na stacyi odbierającej biegnie zawsze prąd z elementu na stacyi wysyłającej. Otóż można telefon wycofać z obwodu tego prądu i przez wahania jego wzbudzić w cewce indukcyjnej oddzielne prądy, które przepuszcza się przez telefon. Główna korzyść z podobnej modyfikacyi polega na tem, że połączenie wielu stacyj daje się wówczas uskutecznić w sposób bardzo prosty.

Przy takim układzie prąd na pierwszej stacyi płynie z ele-

mentu przez mikrofon i następnie przez główną cewkę indukcyjną na tej samej stacyi powraca do elementu. Wokoło głównej cewki indukcyjnej, lecz oddzielona od niej, biegnie wtórna cewka, w której wzbudzają się prądy i która łączy się za pomocą linii z telefonem drugiej stacyi.

Ponieważ na danej stacyi trzeba ewentualnie mówić i słuchać, *to na każdej musi znajdować się mikrofon i telefon.* Na każdej także stacyi przy powyższem urządzeniu są potrzebne dwie cewki, to jest główna i wtórna.

Pierwszy mikrofon Hughes'a składał się poprostu z deseczki rezonansowej, do której przymocowane były dwa kawałki węgla, jeden u góry, drugi u dołu. *Węgle te posiadały małe* zagłębienia, w które luźno wchodził pręcik węglowy. Słowa wymawiane w blizkości deseczki powodowały odpowiednie drgania węgli, przez co słowa te były słyszane w telefonie drugiej stacyi. Nie potrzeba nawet było przytem zbytnio natężać głos, należało jedynie mówić w zwykły sposób i nawet w pewnem oddaleniu od mikrofonu, a dźwięk przenosił się na odległość kilku mil.

Ów prosty mikrofon węglowy Hughes'a uległ później rozmaitym zmianom w budowie i obecnie odróżniamy dwie główne jego postacie, a mianowicie taką, gdzie istnieje tylko jedno swobodne zetknięcie pomiędzy węglami oraz taką, gdzie zetknięć takich jest wiele. Pierwszy rodzaj mikrofonów oddaje dokładniej barwę dźwięków, drugi zaś jest prostszy i dlatego bywa po większej części używany w zakładach na większą skalę. Należy w tem miejscu zwrócić uwagę, że najgłówniejszym warunkiem doskonałości mikrofonu jest dobroć użytych węgli istnieją też rozmaite sposoby możliwie odpowiedniego ich przygotowania, które stanowią tajemnicę odnośnych fabryk. W zasadzie *każdy mikrofon może przenosić mowę tak, ażeby była* dostatecznie głośną i słyszalną. Albowiem energia, która z danej bateryi przechodzi do obwodu, może być tak znaczną, że nietylko wyrównywa straty poniesione przy przemianie energii dźwiękowej w elektryczną i naodwrót, lecz jeszcze wzmacnia same dźwięki. Należy tedy jedynie przepuszczać przez mikro-

fon silne prądy. Lecz pomimo całej słuszności w zasadzie, rada ta nie jest wykonalną w praktyce. Silne prądy wywołują w miejscu zetknięcia iskry, które są wprawdzie niewidoczne, lecz powodują odrywanie się cząstek węgla i zmieniają przez to sposób zetknięcia. Otóż właśnie niezmienność i dokładność zetknięcia jest najważniejszym warunkiem dobrego działania mikrofonu. Dlatego mikrofony bywają zwykle zasilane przez słabe prądy z 1—2 elementów Leclanché'go.

Wolnemi od tych braków są udoskonalone mikrofony-telefony, czyli wysyłacze (transmiter), które nietylko głośno, lecz wyraźnie oddają mowę wraz z jej modulacyami. Ulepszenie polega na tem, że jeden z węgli nie składa się z pojedyńczego kawałka, lecz jest zrobiony z proszku węglowego, zawartego w torebce gumowej. Do niego przylega drugi, stały węgiel. Prawdopodobnie proszek ten przejmuje lepiej rozmaite drgania, przez co dokładniej oddaje różne odcienia głosu i prócz tego sposób zetknięcia nie zmienia się pod wpływem silnych prądów. Fig 623 przedstawia podobny mikrofon w przecięciu. Dźwięk przez mundsztuk *S* dochodzi do błony *D* i wprawia ją w drgania. Na błonie tej znajduje się pierścień z filcu, pośrodku zaś widzimy przymocowaną rurkę gumową *G*. Przestrzeń między niemi jest wypełniona proszkiem węglowym *A*. Przyrząd ten pobudzają do działania 4—6 elementów Leclanché'go; jak powiedzieliśmy, pozwala on w dużym pokoju słyszeć mowę wyraźnie i głośno.

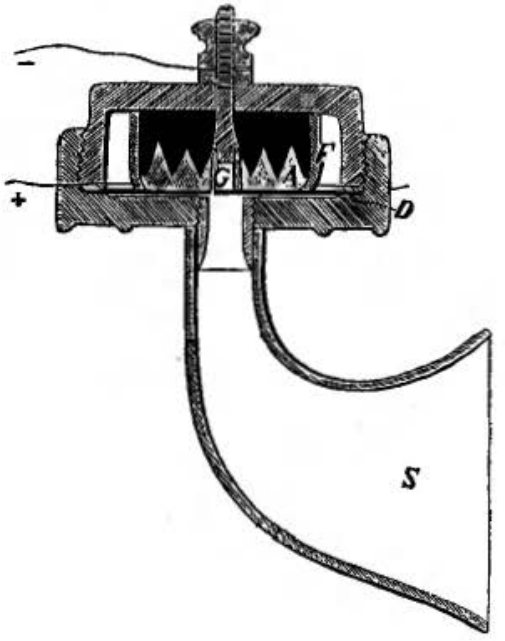


Fig. 623. Wysyłacz węglowy (transmiter w przecięciu).

Przy zastosowanin mikrofonu, dwa różne przyrządy służą do mówienia i słyszenia. Dla nieznacznych odległości wzmocnienie wahań prądu przez mikrofon nie jest konieczne,

gdyż za pomocą dobrze zbudowanych telefonów słychać wówczas bardzo wyraźnie, nawet gdy mówi się bezpośrednio do tych przyrządów. Chcąc jednak rozmawiać na większej odległości, dochodzącej do kilku tysięcy metrów, potrzeba koniecznie uciec się do pomocy mikrofonu, który zresztą chętnie bywa używany i na mniejszych dystansach, gdyż wówczas mówienie i słyszenie staje się mniej męczącem. W tym razie każda stacya musi posiadać telefon i mikrofon oraz element dla tego ostatniego. Sposób połączenia jest taki, że na każdej stacyi element jest zamknięty przez odnośny mikrofon i główną spiralną, telefony zaś na obydwóch stacyach są połączone ze sobą i drut przewodni biegnie spiralnie na każdej z nich wokoło spiralnej mikrofonu. Zresztą przewodnik powrotny nie potrzebuje koniecznie być z drutu, albowiem na mocy odkrycia, dokonanego przez Steinheila, zamiast drutu powrotnego, można użyć ziemi, łącząc ją za pomocą płyt ziemnych. Jeden koniec każdej wtórnej spiralnej łączy się z telefonem, drugi z ziemią i wówczas jest potrzebny jeden tylko drut pomiędzy dwiema stacyami, przez co oszczędza się na materyałach i kosztach urządzenia.

Do obwodu z mikrofonem używa się zwykle elementów Leclanché'go, które są dostatecznie silne i wytrzymałe, a przytem tanie. Gdy telefon i mikrofon nie są w danej chwili w użyciu, należy prąd otworzyć, ażeby element nie wyczerpywał się daremnie. Do tego służy odpowiedni automatyczny przyrząd. Gdy mianowicie telefon po ukończeniu rozmowy zawieszamy na haku, już przez to samo przerywamy prąd, gdyż telefon własnym swym ciężarem ściąga na dół ramię drążka i powoduje lukę w obwodzie prądu od ogniwa do mikrofonu. Po zdjęciu telefonu z haka, ramię drążka opuszcza się i obwód znów jest zamknięty.

Z chwilą, gdy telefon stał się jednym ze środków porozumiewania, okazała się potrzeba obmyślenia sposobu do dawania pewnego sygnału. Wogóle wymawiane wyrazy wtedy dopiero są słyszane na stacyi odbierającej, gdy trzymamy telefon przed uchem. Ponieważ te telefony, które są pobudzane przez mikrofon, wymagają elementu galwanicznego, przeto starano się

zbudować taki przyrząd sygnałowy, któryby mógł być wprawiany w ruch przez małą bateryę galwaniczną. Dlatego w większości wypadków używa się obecnie dzwonków elektrycznych. Na stacyi wysyłającej przyciskamy klawisz, przez co zamykamy obwód prądu, w który włączony jest dzwonek na drugiej stacyi. To właśnie stanowi sygnał; często w ten sam sposób nadchodzi odpowiedź, że urzędnik jest gotów do rozpoczęcia rozmowy.

Z początku telefon wzbudzał nader wielkie nadzieje co do zakresu swych zastosowań. Myślano nawet, że gdy zostanie o tyle udoskonalony, iż będzie nawet na znacznej odległości przenosił mowę zupełnie wyraźnie, wówczas wyprze on poniekąd telegraf. Lecz okazało się, że telefon jest przyrządem niezmiernie czułym i błąd jego polega nie na tem, iż za mało jest wrażliwy na drobne zmiany, lecz że przeciwnie zanadto na nie oddziaływa. Nietylko słabe drgania błony, wywołane przez mowę i powodujące słabe prądy elektryczne, pobudzają telefon do działania; wszelkie inne naruszenie równowagi elektrycznej sprawia ten sam rezultat. Z tego powodu nie można bez pewnych szkodliwych następstw umieszczać linij telefonicznych obok telegraficznych w razie, gdy na tych ostatnich panuje większy ruch; oczywiście nie można również myśleć o posługiwaniu się drutami telegraficznemi do komunikacyi telefonicznej. Każda bowiem depesza, przesyłana przez drut telegraficzny i polegająca, jak wiemy, na kolejnem otwieraniu i zamykaniu prądu, wzbudza w biegnącym obok drucie telefonicznym szereg prądów i telefon poczyna dźwięczyć. Gdy trzymamy blizko ucha telefon, którego linia leży obok linii telegraficznej, możemy słyszeć dokładnie, jak telegrafują i kto pojmuje znaczenie oddzielnych telegraficznych przerw i zamknięć prądu, ten może słyszeć i rozumieć treść odnośnej depeszy. Dlatego z początku telefon odgrywał względem telegrafu nie rolę współzawodniczącą, lecz dopełniającą. Zaczęto posługiwać się nim w obrębie samych miast w celu porozumiewania się mieszkańców i tutaj telefon oddaje niezmierny pożytek. Dopiero w ostatnich czasach udało

się urządzić komunikacyę telefoniczną pomiędzy oddzielnemi miastami, bardziej oddalonemi.

Komunikacya telefoniczna wewnątrz miasta wymaga, przy większej liczbie abonentów, istnienia stacyi centralnej, która umożliwia porozumiewanie się ze sobą wszystkich biorących w niej udział. W przeciwnym bowiem razie pomiędzy każdymi dwoma abonentami musiałby istnieć przewodnik telefoniczny co, pomijając nawet wydatki, byłoby niemożliwe ze względu na mnóstwo drutów, jakie biegłyby wówczas nad domami.

Dlatego też od każdego abonenta biegnie tylko jeden drut telefoniczny do stacyi centralnej, gdzie na dany znak łączą telefonicznie dwie osoby, życzące w danej chwili porozumieć się ze sobą. Itnieją najrozmaitsze sposoby takiego łączenia, jednym zaś z bardzo rozpowszechnionych jest następujący. Na stacyi centralnej znajduje się szereg szafek, z których każda zawiera przyrządy dla 50 abonentów; każdy z nich ma swój elektromagnes bezpośrednio połączony z linią, idącą od danego abonenta. Z drugiej strony elektromagnes ten, za pomocą zgiętej dźwigni, może być połączony z ziemią. W chwili, gdy abonent przyciska klawisze, a więc włącza w obwód swą bateryę sygnałową, prąd biegnie przez elektromagnes, kotwica zostaje przyciągnięta i powoduje opadnięcie klapy. Po za klapą znajduje się numer abonenta tak, że na stacyi centralnej wiedzą zaraz, kto chce mówić. Każdej klapie odpowiada otwór oznaczony jakimś numerem. W otwór ten, w który wchodzi wspomniana dźwignia, urzędnik wprowadza ostrze metalowe, stanowiące jeden koniec przewodniego sznura, skręconego z drutów metalowych. Przez to podnosi on w górę dźwignię i przerywa połączenie z ziemią. Drugi koniec sznura metalowego posiada podobne ostrze, które wprowadza się do otworu, należącego do innego elektromagnesu; wówczas dwaj abonenci są połączeni i mogą rozmawiać ze sobą. Urzędnik posiada swój osobny telefon, który za pośrednictwem przewodniego sznura z ostrzem może być połączony z każdym uczestnikiem. Dzięki temu wie on, jakie połączenie jest w danej chwili pożądane i przez dzwonienie przywołuje odnośnego abonenta.

Opisana szafka zawiera w górnej swej części 50 elektromagnesów z klapami. Pod niemi znajduje się 50 otworów, po jednym dla każdego elektromagnesu, zatyczki zaś wiszą u stolika szafki, pod którym znajduje się skrzynka z bateryą.

W podobny sposób są urządzone inne stacye wewnątrz miast, dzięki zaś ich prostocie, telefon w krótkim stosunkowo czasie zyskał sobie nadzwyczaj szerokie rozpowszechnienie i stał się niezbędnym prawie środkiem porozumiewania. Za to zbudowanie linij telefonicznych pomiędzy oddzielnemi miastami napotkało z początku na wielkie trudności. Wspomnieliśmy już, że gdy linia taka biegła w pobliżu drutów telegraficznych, prądy telegrafujące działały indukująco na telefon i wszelkie porozumienie było niemożliwe. Trudność tę starał się z początku usunąć pewien belgijski fizyk, van Rysselberghe. Zbudował on przyrząd, za pomocą którego *nagłe* przerwy i zamknięcia prądów telegrafujących stają się *stopniowemi* i wówczas nie działają na telefon. Sposób ten zastosowano na kilku liniach. Lecz istnieje jeszcze inny prostszy i pewniejszy środek, który obecnie bywa powszechnie używany i który polega na tem, że dane dwa miasta łączy się nie za pomocą jednego tylko drutu, lecz drutów podwójnych. Jeden biegnie tam, drugi napowrót i przez to telefony stają się prawie niewrażliwe na wpływy zewnętrzne. Gdy mianowicie w jednym drucie z zewnątrz zostaje wzbudzony prąd, wtedy jednocześnie z tej samej przyczyny w drugim biegnącym obok drucie powstaje prąd bezwzględnie w tymże kierunku. Dwa te prądy płyną we wspomnianych dwóch drutach przeciwko sobie i znoszą się wzajemnie, telefon zaś nic na tem nie cierpi. Na każdej stacyi oba końce wtórnej spiralnej telefonu są połączone z dwiema liniami (a więc jeden z końców nie jest połączony z ziemią). Przy takiej podwójnej, czyli pętlicowatej linii można za pośrednictwem zwykłych drutów telegraficznych telefonować na odległość kilkuset kilometrów. Lecz przy większych odległościach okazało się, że przewodniki żelazne nie odpowiadają już powyższemu celowi, gdyż dźwięki zacierają się i osłabiają. Łatwo to zrozumiemy, gdy zważymy, że opór jest wówczas znaczny i że osłabia prąd.

Ta okoliczność jednak odgrywa rolę drugorzędną, główną zaś przyczyną jest następująca. Ponieważ prądy telefoniczne są zmienne, to przy każdej zmianie prądu w przewodniku (linii) powstaje extra-prąd, który osłabia prąd pierwotny i zmienia jego cechę. Otóż ów extra-prąd jest tem silniejszy, im dłuższa jest linia i oprócz tego w drucie żelaznym jest on około 300 razy większy, niż w drucie miedzianym. To właśnie stanowi główną przyczynę osłabienia prądu na dłuższej linii telefonicznej. Z tego wynikałoby, że za pośrednictwem przewodnika miedzianego lub bronzowego można telefonować o wiele dalej, niż za pomocą przewodnika żelaznego i w istocie wniosek ten potwierdziło doświadczenie. Na mocy tego w Ameryce połączono linią telefoniczną miasta oddalone od siebie o 1200 kilometrów. W starym świecie linie takie istnieją np. pomiędzy Wrocławiem i Hamburgiem (650 kilom.), Pragą i Budapesztem (przeszło 600 kilom.), w ostatnich zaś latach urządzono komunikacyę telefoniczną pomiędzy Londynem (przez Paryż) i Marsylią, jedną z najdłuższych w Europie.

Obecnie pozostaje nam jeszcze wspomnieć o telefonach, zbudowanych na innych podstawach, niż dotychczas wymienione. Telefon (odbieracz) wspomniany wyżej, polega na przyciąganiu blaszki żelaznej przez magnes. Ten ostatni wzmacniany lub osłabiany przez powstałe prądy indukcyjne, wywiera silniejsze, albo słabsze przyciąganie na blaszkę i wprawia ją w drgania. Zupełnie to samo osiągnął Dolbear bez magnesu, jedynie przez zwykłe elektryczne przyciąganie dwóch blaszek metalowych. Fig. 624 przedstawia telefon Dolbear'a w przecięciu. Składa się on z dwóch cienkich krążków metalowych, umieszczonych naprzeciwko siebie i wzajemnie odosobnionych. Tylny krążek jest połączony z jednym końcem wtórnej cewki indukcyjnej, przedni zaś z drugim jej końcem. A więc wtórny obwód prądu nie jest zamknięty. Gdy, wskutek mowy w pobliżu mikrofonu, we wtórnej spiralnej powstają prądy indukcyjne, jeden krążek naładowuje się dodatnią, drugi zaś ujemną elektrycznością i obadwa przyciągają się według prawa Coulomba. Wielkość przyciągania zależy od różnicy potencyału panującego na nich, jest

ono zatem większe lub mniejsze, zależnie od wahań prądu w głównej spiralnej. Przez to przedni krążek, którego tylko brzeg jest przymocowany, zostaje wprawiony w drgania, te zaś udzielają się powietrzu jako dźwięk. Środek tylnego krążka jest osadzony na końcu szruby metalowej *B*. Za pomocą telefonu Dolbear'a otrzymuje się bardzo głośne dźwięki, pod warunkiem, że główna baterya jest dostatecznie silna, w przeciwnym bowiem razie wytworzona ilość elektryczności nie jest w stanie wywołać ruchu krążków.

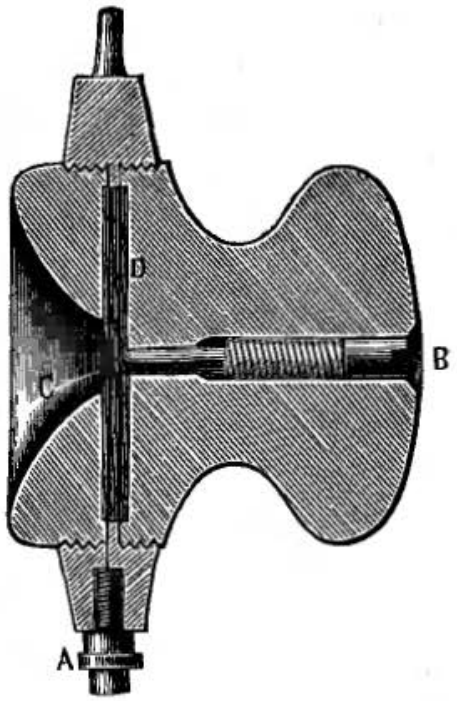


Fig. 624. Telefon Dolbear'a w przecięciu.

Edison również obmyślił telefon, działający zupełnie bez magnesu. Gdy metalowy elektrod przesuwa się po papierze powleczonym zwilgoconą solą metaliczną, wówczas przeciwstawia się temu pewien opór, pochodzący od tarcia. Lecz gdy przez papier przechodzi prąd, przyczem przesuwający się metal służy jako elektrod ujemny, wtedy na tym ostatnim z wilgotnej soli wydziela się metal i tarcie zmniejsza się, gdyż następuje zetknięcie dwóch metali. Przy kolejnem otwieraniu i zamykaniu prądu powstaje naprzemian silniejsze lub słabsze tarcie, odpowiednio do wahań prądu. Otóż zasadę tę Edison zastosował do budowy swego telefonu (odbieracza). Na stacyi odbierającej obraca się cylinder *cc* (fig. 625) ze zwilgoconej kredy, do którego dotyka ostrze platynowe *p*, mocno połączone ze sprężystym krążkiem *dd*. Z chwilą gdy przez miejsce zetknięcia przechodzą wtórne prądy, tarcie zmniejsza się i ostrze oraz krążek zaczynają drgać prawidłowo. Przyrząd ten, częściowo używany w Ameryce i Anglii, Edison nazwał *elektromotorografem*. Ażeby uniknąć kłopotliwego zwilżania cylindra kredowego, Edison nasyca go,

przy wysokiem ciśnieniu, alkalicznym roztworem fosforanu sodu, który przyciąga z powietrza dostateczną ilość wilgoci.

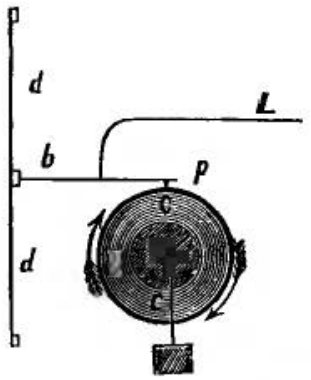


Fig. 625. Odbieracz Edisona.

Telefon służy nietylko do przenoszenia wyrazów i tonów na większą odległość. Dzięki swej czułości oddaje on także usługi w innych dziedzinach, poczęści mających charakter czysto naukowy. Szczególniej przy prądach zmiennych, telefon zastępuje najczulsze galwanoskopy i często bywa w tym wypadku używany.

Telefon znalazł bardzo ważne zastosowanie w wadze indukcyjnej Hughes'a oraz w przyrządach opartych na niej. Waga ta pozwala mierzyć najmniejsze nawet różnice działań indukcyjnych. Przyrząd ten składa się z dwóch drewnianych cylindrów, na których są osadzone po dwie cewki druciane. Obydwie górne cewki są połączone z bateryą i mikrofonem, dwie zaś dolne z telefonem. Miara drutów i sposób połączenia są tego rodzaju, że wahania prądu w mikrofonie wywołują w obydwóch cewkach dla prądu telefonicznego wahania wprost przeciwne tak, że niezależnie od wielkości wahań mikrofonu, telefon pozostaje w spoczynku. Lecz gdy do jednego z cylindrów wrzucimy np. kawałek metalu, wówczas wskutek działania prądu mikrofonicznego powstaną w nim prądy indukcyjne, które wywołają w obwodzie telefonicznym chwilowe prądy indukcyjne. Przez to równowaga w obydwóch cewkach telefonicznych zostanie naruszoną i telefon pocznie dźwięczyć. Jeżeli np. do jednego cylindra wrzucimy pewną monetę, do drugiego zaś monetę, której waga nie jest dokładnie równa wadze tamtej, albo która nie jest dokładnie zrobiona z tego samego metalu, wtedy telefon wskaże te różnice. Waga indukcyjna pozwala tedy odkryć istnienie metalu nawet wówczas, kiedy go się nie widzi, co pociąga za sobą wiele ważnych zastosowań. Naprzykład za pomocą przyrządu podobnego do wagi indukcyjnej można odnaleść siedlisko kuli w postrzelonem ciele ludzkiem, z którego łatwiej ją wówczas wydobyć. Można

sobie również wyobrazić, że waga indukcyjna będzie kiedyś służyła do wykazywania złota lub srebra w ziemi.

Z powyższego opisu widzimy, że ciągły postęp nauk przyrodniczych, oparty na sumiennem i ścisłem badaniu praw natury, pozwala urzeczywistnić takie pomysły, które dawniej uważano za niedościgłe twory wyobraźni. Wobec dalszego postępu tych nauk, a szczególniej w obec olbrzymiego rozwoju elektrotechniki nie możemy nawet przewidzieć, co przyszłość najbliższa przyniesie nam pod tym względem.

ROZDZIAŁ VI.

Elektryczność atmosferyczna.

§ 1. Błyskawica i piorun. Piorunochron. Zorza północna.

Już w roku 1698 Wall wypowiedział zdanie, że iskra elektryczna i towarzyszący jej szmer odpowiadają zjawiskom błyskawicy i grzmotu. Lecz dowodów na to dostarczył dopiero Franklin (1752), który już przedtem poczynił wiele ważnych odkryć w dziedzinie elektryczności. Wpadł on na szczęśliwy pomysł sprowadzenia na ziemię elektryczności, nagromadzonej w chmurach. Sądził on mianowicie, że ostrze metalowe, umieszczone wysoko, wsysa niejako tę elektryczność. Pierwsze swe próby wykonał on z latawcem, puszczonym w powietrze wówczas, gdy niebo pokryte było chmurami, które pozwalały spodziewać się pewnych zjawisk elektrycznych. Z początku wiele chmur przeszło bez żadnego wpływu, lecz w końcu włókna sznura poczęły jeżyć się i usłyszano szmer. Ośmielony tem Franklin potrzymał palec przed końcem sznura i zobaczył przeskakującą iskrę, za którą poszło wiele innych. Podobne doświadczenia wykonał także de Romas (1757), który do sznura dołączył na całej długości drut metalowy, przez co otrzymał iskry zadziwiającej wielkości.

Doświadczenia te pokazują, że błyskawica jest potężną iskrą elektryczną, burza zaś jest to proces, podczas którego wchodzą w grę ogromne zasoby energii elektrycznej. Lecz nawet przy pogodnem niebie i spokojnem powietrzu, zachodzą w atmosferze zjawiska elektryczne. Badano je systematycznie i prawidłowo w ciągu kilkudziesięciu lat i badania te wykazały, że normalny stan atmosfery jest dodatnio elektryczny oraz że potencyał zmienia się zależnie od czasu, miejsca i składu atmosfery. Chmury, deszcz, śnieg, grad i w ogóle wszelkie nagromadzenie znaczniejszych mas wodnych w atmosferze powoduje w większości wypadków obniżenie potencyału. Codziennie występują dwa *minima* i dwa *maxima*. Pierwsze minimum wypada o 5—7½ rano, pierwsze maximum o 7—9½ rano; drugie minimum jest o 2½—4½ po południu, drugie maximum o 6½—9½ wieczorem. W lecie pierwsze minimum i maximum wypadają wcześniej, drugie minimum i maximum później, niż podczas innych pór roku. Pierwsze minimum i maximum są o wiele wyraźniejsze, niż drugie. Roczne minimum wypada w lecie, roczne maximum w zimie.

Zachodzi obecnie pytanie, jak należy rozumieć wskazania elektroskopu? Otóż pierwotnie przypuszczano, że samo powietrze jest naładowane elektrycznością i że część tego ładunku udziela się elektroskopowi. Lecz staranne doświadczenia wykazały, że jest rzeczą nader wątpliwą, czy w ogóle czyste, suche powietrze może naładować się elektrycznością. Już w początku bieżącego stulecia znany był pogląd, że ładunki elektroskopu stanowią jedynie rezultat indukcyi. Gdy mianowicie elektroskop, który na pewnej wysokości był wystawiony na działanie powietrza i połączony z ziemią, a więc który był sprowadzony do potencyału zero, odosobnimy i wzniesiemy wyżej, wówczas wykaże on tamże, przy normalnej pogodzie, elektryczność dodatnią, to jest wyższy potencyał. Lecz gdy przeciwnie elektroskop, umieszczony wysoko, będzie najprzód połączony z ziemią i następnie szybko opuszczony, wtedy wykaże on ładunek odjemny.

Pomiary elektryczności atmosferycznej są właściwie pomiarami różnicy potencyału pomiędzy pewnym punktem powierzchni ziemi i innym punktem leżącym nad nią. Górne warstwy atmosfery są naładowane dodatnią elektrycznością, powierzchnia ziemi jest naładowana odjemną, warstwa zaś gęstszego powietrza pomiędzy niemi działa podobnie, jak szkło w butelce lejdejskiej i utrzymuje rozdział obu przeciwnych ładunków. Powietrze ma tem wyższy potencyał, im wyżej znajduje się punkt badany. Cavallo znalazł więcej elektryczności tuż nad kopułą katedry Ś-go Pawła, niż u podstawy tego budynku. Thomson i Joule znaleźli, że w Aberdeen potencyał powiększa się o 1,3 wolta przy wzniesieniu na 1 centymetr [1]).

Wiele dowodów przemawia za tem, że elektryczność nie stanowi przyczyny pewnych zjawisk towarzyszących burzy, jak np. wyprzedzającego ją wichru, chmur i t. p., lecz że przeciwnie zjawiska elektryczne są skutkiem tych ostatnich. Jedną z przyczyn, wpływających na znaczne powiększeuie różnicy potencyałów pomiędzy chmurami i ziemią oraz pomiędzy samemi chmurami jest *łączenie się małych cząstek wody w większe krople.* Małe kuleczki wody zawieszone w chmurach, które następnie łączą się w krople, mają według pomiarów różnych autorów taką średnicę, że gdy np. milion kulek tworzy jedną kroplę, wówczas pojemność ich maleje do $^1/_{10000}$, potencyał zaś wzrasta w tym samym stosunku. Jedną także z przyczyn nader wielkich różnic potencyału jest, według teoryi jednocześnie prawie ogłoszonej przez Luvini'ego (Turyn) i Sohnke'go (Jena), tarcie wody o lód, wytwarzające elektryczność. Podług Faraday'a mianowicie, woda staje się przytem odjemnie, lód zaś dodatnio elektrycznym. Teorya ta głosi dalej, że dodatnio naelektryzowane kryształki lodowe pozostają zawieszone w wyższych warstwach atmosfery, odjemnie zaś naelektryzowane powietrze, zawierające wodę, opada na dół. Przy dalszych jednak swych wywodach teorya ta napotyka na wielkie trudności.

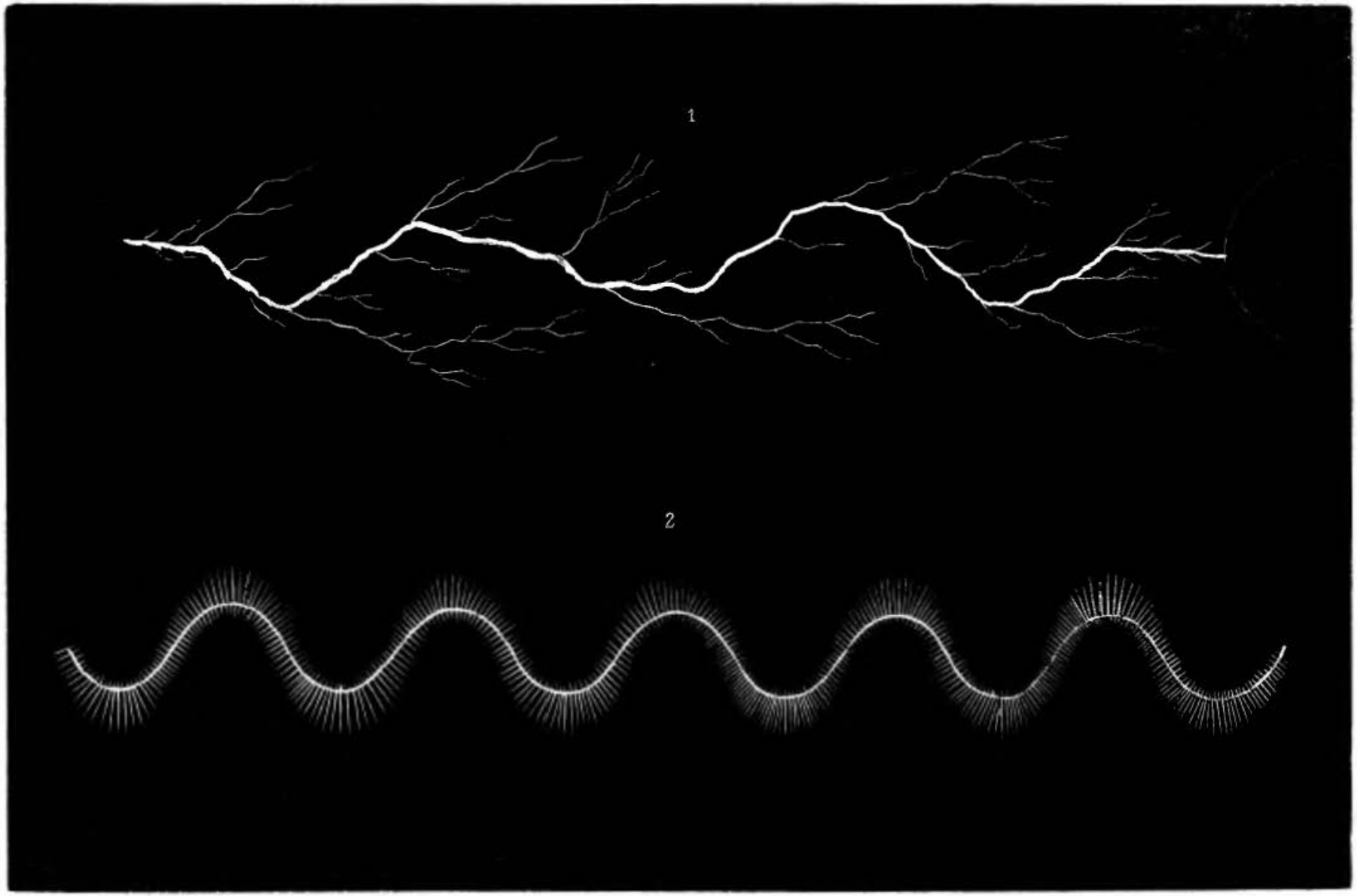
---

[1]) Thompson, Elektryczność i magnetyzm, tłom. J. Boguski.

Błyskawica posiada w ogóle własności iskry elektrycznej i trwa nadzwyczaj krótko. Droga zwykłej błyskawicy jest *zygzakowata* i nierzadko także rozgałęziona. Często opisywane błyskawice *kuliste*, w formie kul ognistych, stanowią zjawisko dotychczas jeszcze nieobjaśnione; poruszają się one powoli i gwałtownie pękają, w ogóle zaś zdarzają się nader rzadko. Błyskawice *płomieniste*, czyli takie, które na podobieństwo pożaru odrazu oświecają wielką przestrzeń, są prawdopodobnie odbiciem od chmur zwykłych błyskawic, powstających w innych miejscach. Widzimy je często w nocy i jeżeli przytem nie słychać żadnego grzmotu, to znaczy, że są odbiciem burzy bardzo od nas dalekiej, wówczas nazywamy je letniemi, albo upałowemi.

Grzmot powstaje wskutek drgań gwałtownie wstrząśniętego powietrza. Światło jest widoczne jednocześnie na całej drodze błyskawicy i na całej przestrzeni powstaje jednocześnie huk; ponieważ jednak dźwięk rozchodzi się wolniej od światła, to wcześniej widzimy błyskawicę, niż słyszymy grzmot. Przypuśćmy, że obserwator znajduje się blizko miejsca, gdzie zaczyna się błyskawica, mająca 3 kilom. długości; otóż grzmot z drugiego bardziej oddalonego jej końca dojdzie do niego o 9 sekund później, niż z końca bliżej położonego dlatego, że dźwięk przebywa w ciągu sekundy tylko $^1/_3$ kilometra. Obserwator słyszy tedy nie pojedyńczy, chwilowy huk, lecz zależnie od długości błyskawicy i położenia swego względem jej drogi, odbiera wrażenie toczącego się z łoskotem grzmotu, które bywa wzmacniane i przedłużane przez echo między ziemią i chmurami, szczególnie w górach. Odległość burzy, a dokładniej mówiąc odległość najbliższego miejsca błyskawicy, otrzymujemy w kilometrach, dzieląc przez 3 czas pomiędzy ujrzeniem błyskawicy i początkiem grzmotu, wyrażony w sekundach.

Gdy chmura elektryczna wisi nad ziemią, wtedy odpycha ona elektryczność jednoimienną, przyciąga zaś różnoimienną, ta ostatnia zbiera się przeważnie we wszystkich przewodnikach i półprzewodnikach, które mniej lub więcej wystają po nad ziemię.



Tabl. II. **Kształt wyładowań elektrycznych** według **Van Marum'a.**

Дозв. Ценз. Варшава, 9 Марта 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Wyższa Szkoła Nauczycielska
Biblioteka
Siedlce

Stopniowe wyładowanie chmury elektrycznej, albo jej przesunięcie się wywołuje stopniowy także zanik elektryczności nagromadzonej w ten sposób, lecz gdy wyładowanie chmury względem innej jest nagłe, wtedy następuje tak zw. *uderzenie zwrotne*, również zależne od indukcyi. Przedmioty znajdujące się w pobliżu naładowanego przewodnika otrzymują ładunek przeciwnego rodzaju, który przy nagłem wyładowaniu przewodnika zostaje oswobodzony i może nagle zbiedz do ziemi lub do innych ciał otaczających. Dla tego właśnie, osoby stojące w pobliżu miejsca, gdzie uderzył piorun, mogą doznać wstrząśnienia, zależnego od zwrotnego uderzenia.

Lecz gdy chmura elektryczna znajduje się blizko i ładunek wywołany przez nią w danym przedmiocie na ziemi jest dostatecznie silny, wówczas błyskawica przeskakuje bezpośrednio pomiędzy niemi. Wszystko co wznosi się ponad płaszczyznę jest szczególnie narażone na uderzenie piorunu; ztąd pochodzi, że zwierzęta tak często padają na polu. Należy jednak zauważyć, że niekiedy jesteśmy bezpieczniejsi w miejscu wysokiem, lecz położonem nad nieprzewodzącą ziemią, niż w miejscu nizkiem o gruncie dobrze przewodzącym.

Drzewa są dobremi przewodnikami, między innemi dzięki krążącym w nich sokom i gdy chmura brzemienna burzą przeciąga nad niemi, wtedy nagromadza się w nich wiele elektryczności. Słusznie też powiadają, że drzewa przyciągają błyskawicę i dla tego nie należy podczas burzy stawać pod niemi. Liczba osób nawiedzonych przez piorun jest dość znaczną. W samej Francyi w ciągu niespełna trzydziestu lat 6714 ludzi doznało uderzenia piorunu, z tych zaś 2238 padło trupem, przyczem nader znaczna część zawdzięcza śmierć swą staniu pod drzewami.

Działanie elektryczności atmosferycznej na budynki, złożone w ogóle z metali, kamieni i drzewa, jest bardzo rozmaite, odpowiednio do niejednakowego przewodnictwa tych materyałów. Piorun uderza przeważnie w lepsze przewodniki, bez względu na to, czy są swobodne, czy też ukryte pod złemi przewodnikami.

Te budynki są szczególnie wystawione na niebezpieczeństwo piorunu, które zawierają w swem wnętrzu większe masy metalowe połączone z ziemią (rury gazowe lub wodociągowe). Metalowe dachy, albo rynny mogą wprawdzie działać przyciągająco na błyskawicę, lecz o ile odgrywają rolę piorunochronów, o tyle zmniejszają niebezpieczeństwo.

Mechaniczne działanie piorunu jest wogóle bardzo gwałtowne. Gdy wpada do pokoju, przewraca i rozbija meble, wyrywa ze ścian i odrzuca daleko różne przedmioty. W drzewach pozostawia głębokie ślady, wyżłabia w nich szerokie i długie szczeliny, odrywa korę i wióry, które zostają odrzucone na znaczną odległość; często także u podstawy drzewa widać otwór, przez który elektryczność zbiegła do ziemi.

Działanie cieplikowe piorunu objawia się mniejszem lub większem podwyższeniem temperatury. Gdy uderza w słomiany dach, suche drzewo, powoduje zwęglenie, częściej nawet spalenie tych substancyj; metale nawiedzone przezeń silnie się ogrzewają, topią lub ulatniają. Częste uderzenia piorunów na wysokich górach pozostawiają widoczne ślady stopienia skał.

Zasługa pomysłu zabezpieczania własności od szkód powyższych za pomocą piorunochronu należy się Franklinowi. Projekt jego, ażeby za pośrednictwem zaostrzonych prętów metalowych sprowadzić na ziemię elektryczność chmur, został po raz pierwszy urzeczywistniony w Paryżu przez Delibard'a i Delor'a (1752). Pierwszy zaś właściwy piorunochron w Europie został zbudowany w Morawii w roku 1754.

Piorunochron składa się z metalowego przewodnika o odpowiedniem przecięciu, łączącego ziemię z ostrzem, umieszczonem na budynku, który chcemy zabezpieczyć od uderzenia. Dobry piorunochron powinien odpowiadać następującym warunkom. Ostrze jego powinno wystawać ponad wszystko oraz musi być zrobione z metalu, który nie utlenia się, przewodzi dobrze i posiada wysoki punkt topliwości. Dalej przewodnik pomiędzy wierzchołkiem i częścią znajdującą się w ziemi powinien być nieprzerwany i odznaczać się odpowiedniem przewodnictwem.

Wszelkie metalowe części budynku powinne być połączone grubemi drutami z głównym przewodnikiem. Dolny koniec tego ostatniego musi być połączony z ziemią w sposób możliwie dokładny i nie przedstawiający oporu.

Najważniejszym z tych warunków jest doskonała ciągłość przewodnika pomiędzy wierzchołkiem i ziemią, mniej zaś ważnym jest kształt wierzchołka. Jeżeli jest tępy, utrudnia wyładowanie elektryczności wywołanej przez obecność chmury, a więc utrudnia także zmniejszanie się różnicy potencyału. Łatwiej więc co prawda w danym razie o uderzenie piorunu, niż przy ostrym wierzchołku, lecz piorun biegnie wzdłuż przewodnika i nie szkodzi samemu budynkowi. Gdy natomiast przewodnik jest przerwany, albo gdy połączenie z ziemią jest niedostateczne, wtedy piorun również może uderzyć, lecz przejdzie on przytem na inne poboczne przewodniki i wywoła takie same spustoszenia, jak gdyby piorunochronu wcale nie było.

Więcej nawet, piorunochron taki jest bardzo niebezpieczny nawet wówczas, gdy piorun nie uderza, albowiem jeżeli w jakiemkolwiek bądź miejscu przewodnika nagromadza się dużo elektryczności, wtedy przeskakuje boczna iskra, mogąca zniszczyć lub zapalić dany przedmiot. W roku 1753 profesor Richman w Petersburgu został zabity przez iskrę z piorunochronu, który został przerwany w celach doświadczalnych.

Szczególną, jak powiedzieliśmy, uwagę należy zwrócić na połączenie piorunochronu z ziemią. Na każde dwa lub trzy zaostrzone wierzchołki, których ilość, jakoteż i wysokość powinny być w pewnym stosunku do wielkości i budowy danego gmachu, liczy się jedną płytę ziemną miedzianą, albo żelazną. Ściana płyty powinna mieć wielkość 1 kw. m. jeżeli jest zanurzona w wodzie gruntowej, przy zanurzeniu zaś w wilgotnej ziemi powinna mieć 2 kw. m. W braku płyt można użyć prętów metalowych, mających 1 kw. centym. w przecięciu i conajmniej 5 m. długości, które zanurza się poziomo w wodzie gruntowej.

Pozostaje nam jeszcze pomówić o pewnem zjawisku elektrycznego pochodzenia, a mianowicie o *zorzy północnej*. W naszych

okolicach zdarza się ono rzadko, natomiast w północnych częściach Europy, Azyi i Ameryki zorzę północną często widzieć można. Również na południowej półkuli marynarze obserwowali światło, zwane tam *zorzą południową*; zdaje się też, że zorze północne i południowe występują często jednocześnie.

Pod europejskiemi szerokościami zorza przedstawia się jako układ z wielu smug bladego światła, które rozchodzą się promienisto na kształt wachlarza i mają niewyraźne kontury; niekiedy posiadają one czerwoną, albo inną jaką barwę. Podczas zjawiska tego oraz niedługo przed niem, igła magnesowa jest bardzo niespokojna, telegraficzne przewodniki wykazują prądy elektryczne, jak w czasie gwałtownych burz. Wysokość zorzy północnej oceniono wprzódy na 100 przeszło mil, lecz nowsze badania wykazały, że szczególniej w okolicach biegunowych zorza występuje w niższych warstwach powietrza.

Wysoko na północy układ smug świetlnych jest inny i zorza przedstawia się, jako długa wstęga, utkana z promieni, która zwija się i fałduje nakształt chorągwi poruszanej przez wiatr (patrz tablica p. t. Zorza północna).

Co do przyczyn pojawiania się zorzy północnej, to De la Rive uważa ją za elektryczne zjawisko świetlne w przestrzeni o rozrzedzonem powietrzu. Dzięki ustawicznemu parowaniu wody morskiej w okolicach zwrotnikowych, powietrze otrzymuje znaczną ilość elektryczności dodatniej, podczas gdy ziemia zachowuje elektryczność odjemną. Dodatnio naelektryzowane pary wodne zostają zaniesione przez prąd równikowy w wyższych warstwach powietrznych do biegunów, gdzie ulegają zneutralizowaniu przez elektryczność odjemną. To wyładowanie elektryczności powoduje światło w rozrzedzonem powietrzu, podobnie jak w rurkach Geissler'a. Za teoryą tą przemawiają obserwacye nad wysokością zórz w okolicach różnej szerokości geograficznej, następnie dane o szmerach towarzyszących nizkim zorzom północnym, jakoteż wrażenie silnego zapachu ozonu odczute przez aeronautę Rollin'a, który w roku 1870 w Norwegii znajdował się pośród świecących promieni zorzy północnej. Dalej z teoryą De la Rive'a zgadzają się prądy elektryczne linii

w Lit. „Zofija" B. A. Bukaty królewska.

Do str. 1194.

I. Zorza północna

obserwowana w Bossekop 19 stycznia 1839 r. o godz. 7, m. 40 wieczorem.

telegraficznych, biegnących z północy na południe i odgrywających rolę pobocznych przewodników dla dodatniej elektryczności, płynącej na południe.

Jeżeli jednak światło zorzy północnej ma takie same pochodzenie, jak światło powstające w rozrzedzonem powietrzu podczas wyładowania elektrycznego, to widmo zorzy powinno zgadzać się z widmem iskry elektrycznej w takiem powietrzu. Lecz zgodność taka nie istnieje. Widmo zorzy północnej zawiera czerwoną i zieloną linię oraz ślady prążka w części niebieskiej. Z drugiej jednak strony staranne badania każą przypuszczać, że jeżeli zjawiska świetlne zorzy północnej są natury elektrycznej, to muszą odpowiadać tak nizkiej temperaturze, przy której nie można obserwować widma rozżarzonych gazów w rurkach Geissler'a. Widmo zorzy północnej jest widmem rozrzedzonego powietrza zupełnie innego rzędu, niż widmo w rurkach Geissler'a.

Można mianowicie wykazać, że liczba rozżarzonych, świecących cząstek powietrza w rurce Geissler'a jest nadzwyczaj małą w stosunku do liczby leżących po za sobą świecących cząstek powietrza w zorzy północnej. Gdy pomimo to obydwie przedstawiają się jednakowo jasno, wynika z tego, że ostatnie muszą być znacznie mniej ogrzane, w przeciwnym bowiem razie światło zorzy północnej powinnoby było być o wiele jaśniejsze, niż jest w istocie. Otóż przy tak różnej temperaturze ciała wysyłającego światło, nietylko jego natężenie, lecz także i długość fali, czyli barwa, są inne.

A więc elektryczna teorya zorzy północnej posiada wiele danych za sobą, a prawdopodobieństwo jej potwierdziły jeszcze doświadczenia Lemströma, który w latach 1871, oraz 1882—84 dowiódł, że specyalna postać zorzy północnej, pojawiająca się w okolicach biegunowych w czasie zimy, jest pochodzenia elektrycznego. Umieścił on na wzgórzu siatkę drucianą, opatrzoną licznemi ostrzami skierowanemi w górę; następnie odosobnił ten przyrząd i połączył drutem telegraficznym z galwanometrem stojącym u podnóża góry. Spostrzegł on prądy elektryczne

i jednocześnie nad przyrządem wznosiły się żółtawo-białe promienie światła, przypominającego zorzę, w którem za pomocą spektroskopu można było dostrzedz charakterystyczną dla zorzy północnej linię pomiędzy liniami Fraunhofera D i E [1]).

KONIEC.

[1]) Müller — Pouillet. Lehrbuch der Physik, III Band.

Wyższa Szkoła Rolnicza biblioteka w Olsztynie