

# POGLĄDY I TEORYE FIZYKI WSPÓŁCZESNEJ

[RUCHY WIDOCZNE I NIEWIDOCZNE]

---

SZEREG ODCZYTÓW WYGŁOSZONYCH

PRZEZ

**H. A. LORENTZA**

Prof. Uniwersytetu w Lejdzie,

Z UPOWAŻNIENIA AUTORA PRZEŁOŻYŁ

**Dr. ST. TOLŁOCZKO**

DOCENT UNIWER. JAGIELLOŃSKIEGO

---

WARSZAWA

NAKŁADEM KSIĘGARNI E. WENDE I SP.

1904

POGLĄDY I TEORYE  
FIZYKI WSPÓŁCZESNEJ

# POGLĄDY I TEORYE FIZYKI WSPÓŁCZESNEJ

[RUCHY WIDOCZNE I NIEWIDOCZNE]

SZEREG ODCZYTÓW WYGŁOSZONYCH

PRZEZ

H. A. LORENTZA

Prof. Uniwersytetu w Lejdzie,

Z UPOWAŻNIENIA AUTORA PRZEŁOŻYŁ

Dr. ST. TOŁŁOCZKO

DOCENT UNIWER. JAGIELLOŃSKIEGO



---

WARSZAWA

NAKŁADEM KSIĘGARNI E. WENDE I SP.

1904

897

KRAKÓW. — Druk W. L. ANCEZYCA I SPÓŁKI.

9.31/58/18



## Przedmowa tłumacza.

---

Przystępując do przekładu na język polski odczytów prof. H. A. Lorentza, wydanych w języku niemieckim pod tytułem «Sichtbare und Unsichtbare Bewegungen», miałem na względzie potrzeby naszego piśmiennictwa, ubogiego w zakresie literatury popularno-naukowej. — Powaga i autorytet naukowy autora dają dostateczną rękojmię co do zalet książki. Treść jej odpowiada w zupełności potrzebom doby obecnej, jest bowiem wyrazem najnowszych poglądów i teoryj fizyki współczesnej. Forma wykładów, popularno-odczytowa, łączy w sobie zalety ścisłości naukowej z przystępnością wyłożenia. Jest to rzecz teoretyczna, lecz opracowana najbardziej elementarnie; dla nie-specyjalistów — interesująca ze względu na treść, dla specjalistów — ze względu na umiejętność przedstawienia najbardziej zawiłych kwestyj w formie przystępnej szerszym kołom czytelników.

Tytuł wydania niemieckiego tłumaczy doskonale punkt ciężkości wykładu. Podstawę teoryj

fizycznych stanowią zasady mechaniki. Autor rozwija je najpierw na przykładach ruchu prostego i krzywodroźnego, następnie zastosowuje do ruchów drgających w zjawiskach głosowych i świetlnych, i dalej do ruchów cząsteczkowych w zjawiskach cieplnych i elektrycznych. W ten sposób przebiega cały obszar fizyki, wystawiając na plan pierwszy mechanizm zjawiska. Ostatni tylko wykład jest poświęcony powtórnemu opanowaniu całego materiału na podstawie zasady o zachowaniu energii.

*Dr. St. Tolłoczko.*

## WYKŁAD I.

### Ruchy prostolinijne.

---

Szanowni Słuchacze! Otrzymawszy od zarządu Towarzystwa «Matschappij tot nut van't Algemeen» zaproszenie do wygłoszenia szeregu wykładów z dziedziny fizyki, chętnie przystałem na to, miałem bowiem nadzieję, że uda mi się z całokształtu nowoczesnej nauki przedstawić Szanownym Panom to, co im wynagrodzić może włożoną przytem pracę. W zamiarze moim nie leżało i nie może leżeć jednak, by obraz, który roztoczyć pragnę, stanął w całej swej pełni, musiałbym bowiem przedstawić go z odległości uniemożliwiającej dokładne rozpatrzenie szczegółów. Pewny przytem jestem, że wynikająca z tej przyczyny powierzchowność wykładu byłaby również i przez Panów niechętnie widziana. Nie chcę również gonić za tem, by za wszelką cenę zwrócić uwagę jedynie na zjawiska i poglądy najbardziej efektywne i bijące dziś w oczy. Wielką wprawdzie jest pokusa, by uwzględnić przede wszystkim najnow-

sze odkrycia i teorye i wyłożyć wielkie zagadnienia ogólne, lub te praktyczne zastosowania, z których epoka nasza więcej niż jakakolwiek dawniejsza szczycić się może — a jednak nawet dla niej nie chciałbym narazić się na to, że tylko połowicznie może zostanie zrozumiany. Więc wolę zakreślić skromniejszy program wykładu. — Jeżeli Panowie życzyście sobie zdobyć pogląd na istotę fizycznych rozważań i teoryi, to musicie całkowicie wniknąć w treść zagadnień, któremi tu zajmować się będziemy. Zagadnienia te ze względu na czas, którym rozporządzamy, muszą być proste, mimo to postaram się dobrać je tak, by były godne uwagi Panów.

W myśl tego programu musimy wyjść od właściwego początku. Początkiem tym jest dla fizyki mechanika, t. j. nauka o zjawiskach ruchu, nauka już sama w sobie i sama przez się bardzo obszerna, poczęści wskutek ogromu objętego przez nią obszaru, poczęści wskutek wielostronności metod, któremi się posługuje. Obejmuje ona wszelkie ruchy, jakie dokoła nas spostrzegamy, a więc spadek ciał, ruch wód, wiatry, czyli ruchy atmosfery. Jest dla nas mistrzynią w budowie maszyn, dających możność rozwinąć potężne siły, albo wykonać delikatną robotę mechaniczną. Wybiega również wysoko ponad ziemię, w przestwory gwiazd i planet, jako mechanika niebieska (*«mécanique céleste»*), i w ruchu tych światów znajduje pole swej

pracy, — pole, na którem najbardziej wypróbowała swej mocy i zdobyła świetne wawrzyny. A wreszcie wchodzi w świat niewidzialny, świat najmniejszych cząsteczek materji i stawia nam prawa drgań głosowych i świetlnych oraz tych ukrytych ruchów, w których odnajdujemy istotę ciepła i innych jeszcze zjawisk.

Metodami jej są metody matematyczne, posługuje się ona bowiem stale miarą i liczbą. Korzysta ona z wszelkich środków pomocniczych matematyki, by w tej prawie chaotycznej mnogości zjawisk przyjąć naszej zdolności myślowej w pomoc, i żał jej tylko, że matematyka większych usług dziś jeszcze oddać jej nie może.

Możnaby stąd wyciągnąć wniosek, że trzeba koniecznie być dobrym matematykiem, by z tego wszystkiego, o czem mówić mamy, cokolwiekbyś zrozumieć. Tak jednak zgoła nie jest. Podstawy mechaniki są bardzo proste, a twórcy jej pierwsi: Galileusz, Huygens, Newton, nader często posługiwali się rachunkami tego rodzaju, że każdy przy pewnej cierpliwości może z łatwością za nimi podążać. Zresztą, rzecz oczywista, że w razie, gdy spostrzeżemy, że ta lub inna kwestya matematycznie daje się opanować, możemy jej opracowanie pozostawić zawodowemu matematykowi i jego wynikom dać zupełną wiarę, podobnie jak to uczynilibyśmy, gdybyśmy stali przed zagadnieniem obrachowania kątów trójkąta ze znanych wiel-

kości boków, mamy bowiem przeświadczenie, że rachunek ten da się z łatwością wykonać, choćbyśmy sami może nie mogli temu podolać.

Zjawiska, które zajmą nas dzisiejszego wieczora, są jedne z najprostszych. Będziemy mówili tylko o ruchu wzdłuż linii prostej i o warunkach, w jakich ruch ten się odbywa. — Przykładów ruchu tego rodzaju znamy wiele i sposób wyrażania się, że ruch taki spowodowany jest przez siłę, działającą przez czas pewien, także nie jest Panom obcy. Popychamy albo ciągniemy np. sanki po lodzie, — wywieramy wtedy, jak zwykliśmy mówić, siłę w kierunku ruchu. W innych znowu przypadkach, powiadamy, że siła wywarta na ciało znajdujące się w ruchu, pochodzi nie od nas, lecz od jakiegoś innego przedmiotu. Gdy np. ciągniemy sanki za pomocą sznura, to istotnie sanki ulegają ciągnięciu bezpośrednio tylko od sznura, gdy bowiem sznur jest nieco napięty, stara się on sam ściągnąć i wywiera na sanki pewną siłę, którą nazywamy napięciem sznura. Tak samo jedno ciało może cisnąć albo uderzać drugie. Uprzytomnijmy sobie np. działanie pary wodnej, która wprowadza w ruch tłok maszyny parowej, albo działanie strumienia wody na łopatki koła wodnego, albo też rolę, jaką odgrywa młotek, którym popędzamy kulę krokietową, a będziemy mieli przykłady tego, co nazywamy ciśnieniem, uderzeniem. W innych przypadkach widzimy znowu,



że jedno ciało pociąga za sobą drugie siłą, skierowaną nie prostopadle do powierzchni zetknięcia się obu ciał, lecz działającą w samej powierzchni zetknięcia. Gdy np. pociągniemy ciężką bryłę, leżącą na powierzchni stołu, to może się zdarzyć, że jednocześnie bryła pociągnie za sobą i stół, o ile ten dość łatwo w ruch wprowadzić się daje. Siła, która w przypadku tym w grę wchodzi, nazywa się tarcie.

Wszystkie powyższe przykłady są nadzwyczaj

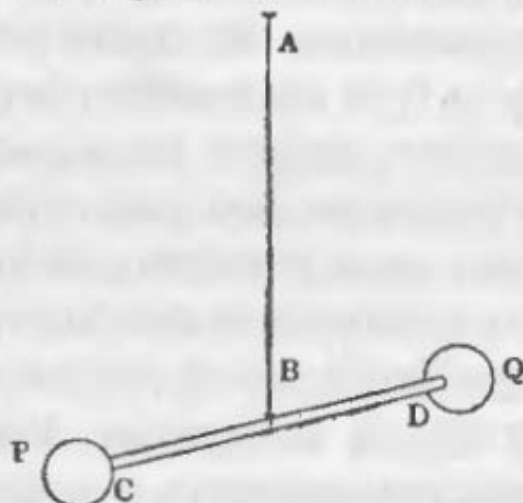


Fig. 1.

proste, ale tylko na pierwszy rzut oka: przy głębszem rozważeniu i zastanowieniu się stajemy niejednokrotnie wobec zagadki. Znamy również i inne zjawiska, które robią na nas odrazu wrażenie czegoś, co wydaje się nam obce i tajemnicze. Oto magnes, który trzymam w ręku, pociąga ku sobie żelazną kulę  $P$ , utwierdzoną na końcu pręta  $CD$ , zawieszonego pionowo na nitce  $AB$ , jak to uwidocznia fig. 1. Zdaje się, jakoby jakaś niewidzialna

nić była napięta pomiędzy kulą żelazną a magneszem, i niema fizyka, któryby wątpił, że pomiędzy obu temi ciałami w rzeczywistości musi istnieć jakieś ciało pośredniczące, pewien ośrodek, jak je zwykliśmy nazywać, który w zjawisku powyższem w grę wchodzi.

Jest również rzeczą oczywistą, że ośrodek ten, to ciało pośredniczące, nie działałoby w ten sposób na kulę żelazną, gdyby stan jego przez wpływ obecnego tu magnesu nie uległ pewnej zmianie. Łatwo też zrozumieć, o ile trudniej było zdobyć pewną wiedzę o tych zmianach środowiska, aniżeli np. wyjaśnić sprawę napięcia sznura, pociągającego za sobą przymocowane doń ciało. Nie będziemy jednak zagłębiać się w tę kwestyę, w każdym razie będziemy usprawiedliwieni w danym przypadku, jeżeli obraz przyciągania żelaza przez magnes przyjmujemy po prostu za analogiczny do obrazu, jaki widzimy w napiętym sznurze.

Z siłami przyciągania i odpychania spotykamy się w naturze bardzo często. Możemy np. pręt *CD*, figura poprzeczna, zastąpić magnesem tegoż kształtu i wykazać, że pomiędzy końcami jego, czyli tak zwanymi biegunami, a trzymanym przeze mnie w ręku drugim magnesem, istotnie ma miejsce zjawisko przyciągania, względnie odpychania. Możemy nawet pręt *CD* wymienić na pręt z jakiegokolwiek innego metalu i również wykazać, że końce jego ulegną przyciąganiu w razie, gdy do



nich zbliżymy potarty o jedwab pręt szklany, który tarcie tem został naelektryzowany. Możemy doświadczenie to z równem powodzeniem powtórzyć i wtedy, gdy zamiast szklanego prętu weźmiemy do ręki laskę laku, lub żywicy, potarłszy je uprzednio kawałkiem sukna, lub futra. Wreszcie mógłbym wykazać, że szkło i lak, które służyły nam do powyższych obserwacji, aczkolwiek jednakowo oddziaływały na pręt metalowy, nie są naelektryzowane jednakowo. Zauważmy np. na nitce  $AB$  zamiast magnesu potarty pręt szklany, a przekonamy się, że pręt ten będzie odpychany przez trzymany w ręku i również naelektryzowany drugi pręt szklany, — natomiast przyciągany przez naelektryzowaną laskę laku.

We wszystkich tych przypadkach możemy poczynić też same uwagi, jakie nastroczały się nam wobec działania magnesu na żelazo. A nawet toż samo powinniśmy wywnioskować i o tej sile, która powoduje spadek ciał na ziemi, t. j. o sile ciężenia, czyli przyciągającej sile ziemi.

Gdyśmy w ten sposób poznali cały szereg sił, musimy wybrać dla dalszych rozważań pewne punkty wyjścia — pewne prawa natury. Zapytajmy się najpierw, co się dzieje z ciałem, gdy nań wogóle żadna siła nie działa? Oczywiście pozostanie ono w spoczynku, o ile w stanie tym było uprzednio. Jeżeli jednak ciało już znajdowało się w ruchu, zachowa ono ten ruch niezmiennie, to

znaczy będzie i dalej poruszało się po linii prostej i przytem tak, że w równych przeciągach czasu przebędzie równe drogi. A więc np., gdy w pierwszą sekundę przebiegnie ciało 15 cm, przebiegnie w każdą następną również tyle, a w każde pół sekundy 7·5 cm, w każdą dziesiątą część tejże 1·5 cm i t. d.

Musimy sobie jasno zdać sprawę z tego, że prawo powyższe zostało wysnute ze spostrzeżeń, aczkolwiek nigdy nie zdołamy wykonać doświadczenia tak, by w czasie ruchu ciała żadna nań siła nie działała. Potrąćmy np. młotkiem leżącą na poziomym stole kulę. Oczywiście przyczyną poruszenia się kuli jest siła, działająca podczas zetknięcia młotka z kulą, o niej jednak chwilowo nie myślimy. Zwróćmy uwagę naszą jedynie na ruch potrąconej kuli już po uderzeniu młotka. Widzimy, że kula toczy się po linii prostej, a więc pierwsza część powyższego prawa sprawdza się istotnie. Inaczej jednak jest z kwestyą, czy rzeczywiście w każdą następną sekundę ciało przebiega taką samą ilość centymetrów, co i w pierwszą. Widzimy przeciwnie: — przebyte w następnych sekundach drogi maleją i po pewnym czasie kula się zatrzymuje.

Zdaje się jednak, że niema potrzeby szeroko rozwodzić się nad tem, jak sprawa ta przedstawia się w istocie. Każdy z nas wie przecie dobrze, że ruch ciała ustaje tem szybciej, im powierzchnia obu



ciał, t. j. w danym wypadku stołu i kuli, jest bardziej szorstka, mniej wygładzona. Stąd też łatwy i naturalnie nastroczający się wniosek, że to zwolnienie ruchu należy przypisać sile, która występuje wskutek chropowatości powierzchni i działa w kierunku przeciwnym ruchowi ciała, a więc raz powstały ruch nigdyby nie ustał, gdybyśmy mogli tę przeciwdziałającą siłę, to tarcie, przez zupełne wygładzenie powierzchni całkowicie usunąć. A wtedy nasze prawo o zachowaniu ruchu znalazłoby zupełne potwierdzenie, trzeba tylko wypełnić w zupełności warunki, o których w prawie tem jest mowa.

Łatwiej, aniżeli w ruchu prostolinijnym, możemy obserwować na ciałach wirujących, jak długo trwać może ruch, gdy tarcie albo inne pokonywane przeszkody staną się dostatecznie małe. Już zwykły stożek, wirujący na swym wierzchołku dookoła osi, zachowuje ruch ten bardzo długo, a obrót ziemi dookoła osi ulega tylko niezmiernie małym zmianom. Można dokładnie z astronomicznych pomiarów wyliczyć, że czas obrotu ziemi dookoła osi, wynoszący 24 godz., w przeciągu jednego stulecia z całą pewnością nie uległ zmianie (przyrostowi) o  $\frac{1}{100}$  sek. Gdyby jednak kiedykolwiek choćby najdrobniejsza zmiana została zaobserwowana, byłoby to dowodem, że istnieć musi pewna przeszkoda, którą należałoby wyjaśnić.

By módz dalej rozważać ruch prostolinijny,

a mianowicie ten, który znamionuje równość dróg, przebytych w równych odstępach czasu, a więc ruch odbywający się bez udziału siły, musimy się zapoznać z pewnymi terminami. Otóż ruch taki zwiemy ruchem prostolinijnym jednostajnym, i powiadamy, że jest on tem szybszy, im dłuższą drogę przebywa ciało w określonym czasie. Jako miarę szybkości obieramy drogę przebywaną w 1 sek. Mówimy więc w powyższym przykładzie o kuli, toczącej się po stole, że początkowa jej szybkość wynosi 15 cm.

Dalsze prawa ruchu uczą nas, jak wielkiej szybkości nabywa ciało w tych lub innych warunkach. Wyprowadźmy prawa te również doświadczalnie. Wprawdzie nie mam zamiaru wykonywać odpowiednich doświadczeń w rzeczywistości, lecz przecie z łatwością możemy je sobie wyobrazić. W ten sposób nawet jesteśmy w możności doświadczenia nasze otoczyć warunkami najbardziej korzystnymi i usunąć w zupełności te wpływy, które w rzeczywistem wykonaniu doświadczenia byłyby dlań szkodliwe. Można być pewnym, że, gdyby twierdzenia, które zaraz wygłoszę, nie były prawdziwe, to ich błędność stałaby się zaraz widoczna przy uważniejszym rozważeniu zjawisk rzeczywistych.

Zacznijmy więc od pomiaru siły, działającej na ciało, która to siła, rzecz jasna, może być większa lub mniejsza. Do tego celu koniecznie



wybrana być musi jednostka siły, podobnie jak dla pomiaru długości i czasu trzeba mieć koniecznie jednostkę długości, jednostkę czasu. Jak tego wyboru dokonać, o to chwilowo się nie rozchodzi. Najprościej byłoby, jako jednostkę siły, wybrać siłę, z jaką ziemia przyciąga jakikolwiek przedmiot, np. kawałek mosiądzu określonej wielkości, a więc poprostu ciężar tego kawałka metalu. Wyobraźmy sobie, że mamy cały szereg podobnych kawałków mosiądzu, z których każdy jest równy tej jednostce ciężaru. Następnie potrzebny jest koniecznie pewien przyrząd mierniczy. W tym celu weźmijmy spiralnie skręcony sprężysty drut metalowy, t. j. drut posiadający tę własność, że po rozciągnięciu, pozostawiony samemu sobie, powraca do pierwotnego stanu.

Sprężynę taką, — widzimy ją np. w każdej wadze sprężynowej, powszechnie w życiu domowem używanej — należy przedewszystkiem skalibrować, t. j. opatrzyć odpowiednią podziałką. Uskuteczniwszy to łatwo zawieszając na haku sprężyny kolejno jeden, dwa, trzy i t. d. ciężarki jednostkowe i znacząc na odpowiedniej tabliczce każdorazowe wydłużenie sprężyny. Gdy więc sprężyna w ten sposób będzie skalibrowana, możemy z jej wydłużenia, spowodowanego np. siłą ręki, wywnioskować o wielkości siły użytej — i nie tylko wtenczas, gdy drugi koniec sprężyny jest zaczepiony o przedmiot nieruchomy, ale równie dobrze i wtedy

gdy sprężynę zaczepimy jednym końcem o przedmiot ruchomy i będziemy go pociągali w kierunku poziomym, trzymając ręką za przeciwny koniec sprężyny. Tym razem również w każdej chwili ruchu możemy o wielkości użytej siły wnioskować z wydłużenia sprężyny. Na tej samej zasadzie oparty jest przyrząd zwany dynamometrem, którym np. możemy zmierzyć użytą przez konia siłę podczas ciągnięcia wozu, tylko w przyrządzie tym sprężyna jest znacznie twardsza i ma inny nieco kształt.

A teraz powróćmy do doświadczeń, jakie w myśli mamy wykonać, i do praw, które z tych doświadczeń wyprowadzić zamierzamy. Są one następujące.

I. Dajmy pewnej stałej sile działać na jedno i to samo ciało, raz krótko, drugi zaś raz — przez czas dłuższy. Z chwilą, gdy działanie siły ustaje, ciało poddane jej działaniu posuwa się dalej ruchem jednostajnym. Zmierzymy szybkość tego ruchu, a więc szybkość, którą ciało nabyło przez działanie siły. Okaże się, że szybkość ta jest proporcjonalna do czasu, w którym siła wywierała swe działanie na ciało. Jeżeli np. pewna siła, działając w ciągu jednej sekundy, nadała ciału szybkość  $q$  cm na sekundę, to taż sama siła, działając na ciało 3, albo 5, albo 8·5 sek. nada

mu szybkość 3  $q$ , względnie 5  $q$ , względnie 8.5  $q$  cm na sekundę.

W powyższem doświadczeniu wyobrażaliśmy sobie, że szybkość poruszającego się ciała zaczęliśmy mierzyć od chwili, gdy działanie siły ustało. W takim przypadku pomiar szybkości jest łatwy. Ale już i w każdej chwili działania siły ciału temu właściwa jest pewna szybkość. Wyobraźmy sobie, że pewna siła działa na ciało w ciągu 2 sek. i poddane jej działaniu ciało z końcem tych dwóch sekund nabyło szybkości 2  $q$  cm. Ciało to w chwili, gdy siła działała tylko 1 sek., a więc z końcem pierwszej sekundy, miało szybkość  $q$  cm. Szybkość tę ( $q$  cm) ciało zachowałoby następnie, gdyby działanie siły ustało w owej chwili i szybkość tę moglibyśmy z łatwością zmierzyć. Gdy jednak działanie siły po skończonej pierwszej sekundzie nie ustało, wtedy pomiar szybkości będzie o wiele trudniejszy, gdyż podczas pomiaru szybkość mierzona ulega ciągłej zmianie. W myśli jednak wykonać go możemy. Możemy sobie wyobrazić, że podczas trwania ruchu jesteśmy w stanie uchwycić przeciąg czasu bardzo krótki, jedną dziesiątą, jedną setną sekundy, albo, gdyby nawet w tym krótkim przeciągu czasu stan ruchu jeszcze znacznie się zmieniał, nawet jedną milionową część sekundy. Jest to nam potrzebne, by się przekonać, jaką drogę w tym krótkim przeciągu czasu ciało przebiec zdolało, a następnie wywnioskować, ileby



centymetrów przebiegło w ciągu pełnej sekundy, poruszając się tak samo, jak w ciągu tego drobnego ułamka sekundy. W ten sposób uzyskamy miarę szybkości w każdym momencie ruchu dla przypadku, gdy ruch nie jest jednostajny, lecz dowolnie zmienny. Przytem spostrzegamy, że szybkość ruchu przy działaniu siły stałej niezmienniej wzrasta stopniowo, a mianowicie proporcjonalnie do czasu działania. Uwzględniając ten rezultat obserwacyi, mówimy w tym przypadku o ruchu jednostajnie przyspieszonym. Ruch taki powstać musi zawsze, gdy siła działająca nie ulega zmianie. Jeżelibyśmy więc np. ze stałą siłą pchali sanki po lodzie, moglibyśmy im nadać dowolną szybkość, gdyby nie było wcale przeszkód ruchu i gdybyśmy mogli sami pędzić dość szybko.

A więc z powyższego rozumowania wynika, że miarodajną wielkością działania siły jest szybkość, którą ta siła w ciągu jednej sekundy pewnemu ciału nadać jest w stanie i którą dołącza się do szybkości, jaką ciało już uprzednio posiadało. Nazywamy stale tę, uzyskaną przez ciało w ciągu jednej sekundy szybkość, — przyspieszeniem.

II. Poddajmy teraz to samo ciało i zawsze na ten sam przeciąg czasu działaniu sił różnej wielkości. Znajdziemy wtedy, że nabyte przez ciało szybkości będą proporcjonalne do działają-

cych każdorazowo sił. Stąd więc wniosek: przyspieszenie jest proporcjonalne do wielkości działającej siły.

III. Wreszcie rozpatrzmy przypadek, gdy jedna i ta sama siła kolejno działa na różne ciała. Ciała te wybierzmy początkowo z tego samego materiału np. z żelaza, niech tylko mają one różną objętość, a więc różnią się ilością zawartej materii. Niech jedno ciało będzie np. trzy razy większe od drugiego. Wtedy spostrzeżemy, że przyspieszenie pierwszego będzie trzecią częścią przyspieszenia ciała trzy razy mniejszego. Gdyby ilości materii tych ciał stały w stosunku 4 do 7, wtedy ich przyspieszenia miałyby się do siebie jak 7 do 4. Wogóle mówimy więc: przyspieszenia, wywołane przez tę samą siłę, znajdują się w stosunku odwrotnym do ilości materii ciał czyli do ich mas. Zamiast zwrotu «ilość materii» używamy wyrazu «masa» zawsze wtedy, gdy chcemy zaznaczyć, czy dane ciało da się w ruch wprowadzić z większą lub mniejszą trudnością.

Należy też jeszcze porównać ciała z niejednakowego materiału. Punktem wyjścia będzie dla nas spostrzeżenie, że w tem samym miejscu wszystkie ciała spadają jednakowo szybko, o czem łatwo przekonać się można z obserwacji nad wa-

hadłem <sup>1)</sup>. Wahadło w swej najprostszej formie składa się, jak wiemy, z kulki *C*, zawieszanej na nitce w punkcie *A* (fig. 2). Gdy podniesiemy kulkę w górę, np. do punktu *B*, i następnie puścimy swobodnie, spadać ona będzie po łuku *BC* w dół, następnie podniesie się po przeciwnej stronie do tej samej wysokości, którą miała w punkcie *B*, poczem znów zawróci wstecz i w ten sposób wahać się będzie tam

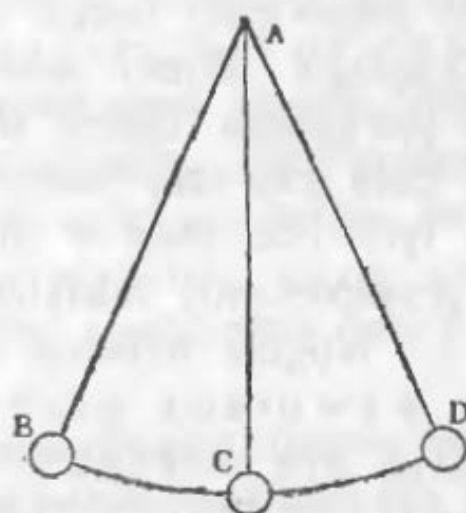


Fig. 2.

i z powrotem; przytem na przebycie drogi z *B* do *C*, a potem z *C* i *D* i znowu *D* do *C* i t. d. zużywa się zawsze ten sam przeciąg czasu. Okazuje się nadto, że dwa wahadła z różnych ciał sporządzone, ale o tej samej długości nici, wykonywują swe wahania w dokładnie jednakowych przecią-

---

<sup>1)</sup> O ile w grę tu nie wchodzi opór powietrza.

gach czasu. Stąd wnioskujemy, że różne ciała spadają po łuku  $BC$  z tą samą szybkością. Możemy być pewni, że to samo działaoby się i przy swobodnem spadaniu ciał, o ile tylko opór powietrza nie wywierałby tu zbyt wielkiego wpływu.

Wyobraźmy więc sobie, że mamy dwa jednakowo ciężkie kawałeczki żelaza i ołowiu. O tem z łatwością przekonać się możemy za pomocą wagi. Dajmy tym ciałom spadać. Spadając, otrzymają one to samo przyspieszenie, a fakt, że ciała te są jednakowo ciężkie, a więc jednakowo mocno są przyciągane przez ziemię, dowodzi nam, że otrzymały one równe przyspieszenia wskutek działania równych sił. W takim razie jednak i inne siły, o ile są sobie równe, — np. gdy je za pomocą spiralnej sprężyny w poziomym kierunku na ciało wyrzucić zechcemy, — ciałom o tym samym ciężarze nadadzą równe przyspieszenia. W samej rzeczy, ciągnijmy każde z obu powyżej wymienionych ciał siłą równającą się np.  $\frac{1}{8}$  ich ciężaru, a spostrzeżemy, że jak w jednym tak i w drugim przypadku nabyte przyspieszenie będzie stanowczo jedną trzecią częścią przyspieszenia nadanego tym ciałom siłą ciężkości. Wogóle mówiąc, możemy dwa ciała o jednakowym ciężarze jednakowo łatwo w ruch wprowadzić. Fakt ten wyrażamy tem, że przypisujemy ciałom takim równość mas. Gdy teraz, nie zmieniając kawałka żelaza, zastąpimy dawny kawałek ołowiu innym, dwa razy większym (cięż-

szym), wtedy, rzecz oczywista, dawna siła nada nowemu kawałkowi ołowiu przyspieszenie o połowę mniejsze od przyspieszenia, jakie otrzyma kawałek żelaza. Leży więc jak na dłoni wniosek, że większy kawałek ołowiu ma masę dwa razy większą, aniżeli dawny kawałek żelaza, i jeżeli porównamy teraz oba różnorodne ciała, to znowu dojdziemy do wniosku, że przyspieszenie jest odwrotnie proporcjonalne do masy ciał. W ten sposób przekonaliśmy się, że prawo to znajduje ogólne potwierdzenie, a jednocześnie też doszliśmy do przeświadczenia, że zapomocą ważenia porównać możemy masę dwu ciał.

Wpływ wielkości masy objawia się w bardzo wielkiej ilości zjawisk. Wpada on w oczy np. w ruchu wahadłowym. Gdybyśmy np. do kuli wahadła przywiesić mogli coś, co samo nie podlega działaniu siły ciężkości, wtedy wskutek zwiększenia masy ruch na drodze  $BC$  odbywałby się powolniej, a więc i czas tego ruchu, a zatem i okres całego wahnienia stałby się dłuższy.

Ciała jednak, któreby nie podlegało sile ciężkości, znaleźć nie możemy, a więc powyżej pomyslane doświadczenie w rzeczywistości nie da się wykonać. Możemy jednak wykonać inne doświadczenie, które w istocie rzeczy na to samo wychodzi. Niech wahadło, z którym mamy robić doświadczenie, składa się z mocnego pręta, który osadzony jest na osi, przechodzącej przez jego



punkt środkowy. Na dolnym końcu tego pręta zawiesimy pewien ciężar. Wahadło to ma pewien określony czas wahnienia, gdy jednak na obu jego końcach zawiesimy równe dodatkowe ciężarki, a więc w równych oddaleniach od punktu obrotu, zauważymy, że okres jego wahanja wzrasta. Tutaj wpływ siły ciężkości na dodany ciężarek górny zniweczony został przeciwdziałaniem równego ciężarka dolnego, a więc zwolnienie szybkości ruchu całego wahadła powstało jedynie wskutek tego, że obecnie zwiększona masa wahadła w ruch wprowadzona została.

Jak wiadomo, struny fortepianu, wydające tony najniższe, zwykle są owinięte cieńkim drutem. Robi się to w tym jedynie celu, by powiększyć masę ciała drgającego, a więc, by ilość wahnien (drgnień) na sekundę zmniejszyć, co właśnie jest konieczne do otrzymania tonów niskich.

Wynikiem wpływu masy jest także zjawisko następujące. Gdy będziemy wypuszczali z tegoż samego naczynia przez ten sam otwór powietrze, albo gaz świetlny pod działaniem tej samej nadwyżki ciśnienia, to spostrzeżemy, że powietrze wypływać będzie mniej szybko, aniżeli gaz świetlny, ponieważ pewna objętość gazu świetlnego ma mniejszą masę, niż taka sama objętość powietrza, a więc ta sama siła poruszać będzie gaz świetlny szybciej, aniżeli powietrze.

Powyższe przykłady z łatwością dadzą się uzu-



pełnić wieloma innymi, my jednak powróćmy lepiej teraz do praw samych i postarajmy się wyrazić je w bardziej skróconej formie, mianowicie w formie wzoru matematycznego. Jednocześnie umówmy się używać nadal jedynie ściśle określonych jednostek. Nawiasem dodać tu muszę, że dla postępu nauki wogóle okazało się bardzo korzystne zastosowanie dla różnych fizycznych wielkości jednostek, które stoją do siebie w pewnym związku i które teraz u wszystkich fizyków w powszechnem są użyciu. Ustalenie takich jednostek, a szczególnie jednostek elektrycznych i magnetycznych, omawiane było niejednokrotnie w ubiegłym stuleciu na licznych międzynarodowych zjazdach i kongresach.

W badaniach naukowych używa się obecnie prawie bez wyjątku układu: centymetr-gram-sekunda [*C. G. S.*]. Jednostką długości jest centymetr [cm], jednostką czasu — sekunda [sek] jednostką masy — gram [g], t. j. masa jaką przedstawia sześcienny centymetr ( $\text{cm}^3$ ) wody w temperaturze  $4^{\circ}$  Celsiusa [C]. Jednostkę siły wyprowadzamy z powyższych jednostek. W tym celu wyobraźmy sobie siłę, której wielkość jest tak dobrana, że działając na masę jednego grama, nadaje mu ona przyspieszenie 1, to znaczy w 1 sek. nadaje szybkość 1 cm. Taka siła ma być jednostką sił. Nazywamy ją dyną.

Wzór, który mamy teraz wyprowadzić, otrzy-

muje się w następujący bardzo prosty sposób. Wiemy już, że siła jednej dyny (1 dyna), działając na masę jednego grama (1 g), nadaje mu przyspieszenie 1. Jeżeli jednak siła będzie równą nie 1 dynie, ale  $K$  dynom, a masa pozostanie ta sama t. j. 1 g, wtedy przyspieszenie stanie się  $K$  razy większe i oczywiście wyrazi się liczbą  $K$ . A teraz zastąpmy masę 1 g masą  $m$  razy większą; pociągnie to za sobą zmniejszenie przyspieszenia  $m$  razy. Rzecz więc prosta, przyspieszenie obliczy się jako iloraz:

$$q = \frac{K}{m}$$

Wzór ten wyraża się słowami jak następuje: liczbę ( $q$ ), którą wyrażamy przyspieszenie, znajdujemy, dzieląc liczbę ( $K$ ), wyrażającą siłę, przez liczbę ( $m$ ), wyrażającą masę. Naturalnie, że wzór ten da się również przedstawić równaniem:

$$K = mq$$

które również łatwo słowami wypowiedzieć możemy.

Pozwoliłem sobie wzory te wypisać dlatego, ponieważ dają one nam niejednokrotnie możliwość rozwiązać proste zagadnienia bez straty słów wielu.

Jako przykład rozważmy spadanie ciał. Doświadczenie uczy, że swobodny spadek ciał, o ile w grę nie wchodzi tu opór powietrza, odbywa się ruchem jednostajnie przyspieszonym, a wielkość przyspieszenia w tym wypadku wynosi np. w Leidzie 981 jednostek układu *C. G. S.* W innych miej-

scowościach ziemi jest ono albo nieco większe, albo też mniejsze. Zastosujmy więc nasz wzór ostatni do spadku ciała, którego masa wynosi 1 g, wtedy  $m = 1$ , a  $g = 981$ , czyli  $K = 981$  dyn. Siła, która powoduje ten ruch jest jednak tem, co my nazywamy ciężarem masy jednego grama. Jest to więc siła równa 981 dyn, albo jedna dyna jest  $\frac{1}{981}$  częścią ciężaru gramowego, t. j. wynosi nieco więcej ponad ciężar jednego miligrama.

Tu wypada mi jeszcze dodać pewną uwagę. Z faktu, że spadek ciała jest przypadkiem ruchu jednostajnie przyspieszonego, należy wnosić, że podczas spadania siła pozostaje niezmienna. A więc ziemia przyciąga pewne ciało z jednaką siłą również wtedy, gdy rozpoczyna ono swój ruch, jak i wtedy, gdy ciało przebyło już pewną część swej drogi<sup>1)</sup>. Dalej możemy teraz z łatwością wyrachować, jaką szybkość nabędzie ciało w pewnym przeciągu czasu i jak daleko w tym czasie zajdzie. Oznaczmy — jak to jest w powszechnem użyciu — liczbę 981 literą  $g$ . W czasie więc jednej sekundy, spadające ciało nabędzie szybkość  $g$ , i ponieważ szybkość wzrasta proporcjonalnie do czasu, więc

---

<sup>1)</sup> Nie uwzględniamy tu nadzwyczaj małego przyrostu tej siły, jaki istotnie ma miejsce, gdy ciało do ziemi się przybliża. Właściwie więc ruch nie jest całkowicie jednostajnie przyspieszony, ale odstępstwo na tak małych przestrzeniach jest znikomo małe.

po  $t$  sekundach, licząc od początku ruchu, nabyta szybkość wynosić będzie  $gt$  cm na 1 sek. Oznaczamy ją literą  $v$ , wtedy będziemy mieli wzór:

$$v = gt.$$

Również łatwo daje się obliczyć ilość centymetrów, które ciało, spadając w ciągu  $t$  sek, przebyło. Szybkość, jak widzimy, w okresie spadania wzrosła od 0 do  $v$  centymetrów. Można z łatwością na podstawie pewnego matematycznego rozważania dowieść, że ciało, poruszające się ruchem jednostajnie przyspieszonym, tak samo daleko zajdzie, jak zaszłoby w tym samym okresie czasu z szybkością stałą, pośrednią pomiędzy końcową a początkową szybkością istotnego ruchu, innemi słowy, z szybkością, którą przewyższa końcowa szybkość o tyleż, o ile ta przewyższa szybkość początkową. Ta pośrednia szybkość w naszym wypadku wynosi:  $\frac{v}{2}$ , a droga, którą ciało poruszające się z tą szybkością przebyłoby w ciągu  $t$  sek., oblicza się z iloczynu:  $\frac{v}{2} \cdot t$  cm. Biorąc pod uwagę powyżej wyprowadzony wzór dla  $v$ , otrzymujemy wzór na drogę:

$$h = \frac{gt}{2} \cdot t = \frac{g}{2} \cdot t^2$$

Gdyby np. ciało spadało w ciągu 6 sek., to obliczona według otrzymanego wzoru droga wyniesie:

$$h = \frac{981}{2} \cdot 6^2 = 17600 \text{ cm.}$$

Nie jest także rzeczą trudną zdać sobie sprawę z ruchu ciała, które z pewną początkową szybkością zostało prostopadłe wyrzucone w górę. Gdy podczas spadania szybkość w każdą sekundę wzrasta o wielkość  $g$ , w obecnym przypadku musi maleć o taką samą wielkość. Mamy wtedy ruch jednostajnie opóźniony. Jeżeli szybkość początkowa wynosiła  $v$ , znajdziemy z łatwością<sup>1)</sup>, że wysokość, do której ciało zdoła się wznieść, wyniesie wtedy:

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

a szybkość, z jaką ciało spadnie z powrotem na dół, będzie ściśle równą początkowej szybkości rzutu.

---

1) Przypisek tłumacza. — Wysokość będzie równa drodze, odbytej przez ciało ruchem jednostajnym pionowo w górę, pomniejszonej o drogę odbytą w tym samym czasie ruchem jednostajnie przyspieszonym pionowo w dół, t. j.

$$h = vt - \frac{gt^2}{2}.$$

Ponieważ przytem w punkcie najwyższym szybkość podnoszenia się w górę  $v$  stanie się równą nabytej w czasie  $t$  szybkości spadania  $gt$ , przeto:  $v = gt$ , skąd  $t = \frac{v}{g}$ , i podstawiając we wzór dla  $h$ , znajdujemy:

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$



Siła ciężkości, czyli siła przyciągająca ziemi, na prawdę zasługuje na to, żeśmy się nią nieco obszerniej zajęli, a to dlatego przedewszystkiem, że jest to siła istotnie powszechna. Wszystkie ciała stałe płynne i gazowe, które dokoła siebie spostrzegamy, podlegają bezustannemu jej działaniu. Mam tu np. na jednym ramieniu wagi zawieszony balon szklany, z którego uprzednio wypompowałem za pomocą pompy ssącej większą część zawartego w niej powietrza. Ciężarkami, umieszczonymi na przeciwnej szalce, doprowadziłem wagę do równowagi. A teraz otwieram kurek, zamykający dostęp powietrza do wnętrza balonu, i pozwalam powietrzu dostać się z zewnątrz. W tej chwili równowaga na wadze znika i widzimy, że balon jest teraz cięższy, niż poprzednio. W ten sposób przekonał się, że ziemia przyciąga powietrze tak samo jak i inne ciała i dlatego właśnie nie może swej atmosfery utracić.

Nadzwyczaj znamienity jest także i ten fakt, że całkowity ciężar ciała pozostaje niezmienny, chociażby stan tego ciała uległ zmianie. To też całkowity ciężar pewnej ilości wody, a więc siła, z jaką ta ilość przyciągana jest przez ziemię, nie ulegnie najmniejszej zmianie wtedy, gdy wodę tę ogrzejemy, albo wymrozimy, albo też całkowicie w zamkniętym naczyniu przemienimy w parę. Gdy kawałek miedzi rozpuścimy w kwasie azotowym i otrzymamy roztwór zielono-niebieskawej barwy,



możemy być również pewni, że całkowity ciężar użytej do rozpuszczenia miedzi i kwasu wynosił dokładnie tyle, ile wynosi całkowity ciężar otrzymanego roztworu wraz z ciężarem gazu, który podczas reakcyi uszedł z naczynia. Fakty te są wyrazem jednego z najdonioślejszych praw natury, prawa o niezmienności ciężaru, czyli o zachowaniu materyi, które przed 100 laty z górą było poraz pierwszy wypowiedziane przez Lavoisier'a, a następnie stwierdzone szeregiem najdokładniejszych pomiarów.

Zjawiska tego rodzaju, jak przytoczone powyżej, dają bardzo wiele do myślenia. Jedną z naturalnych potrzeb naszego ducha jest bezsprzecznie dążenie do wyszukania w mnogości i zmienności zewnętrznych objawów świata czegoś, co pozostaje stale niezmiennie. Tej potrzebie ducha bez wątpienia zawdzięczają swe powstanie teorye cząsteczkowa i atomistyczna. Już filozofowie starożytni wypowiadali przekonanie, że ciała, które dokoła siebie spostrzegamy, tylko pozornie wypełniają całkowicie zajętą przestrzeń, w rzeczywistości jednak składają się z ogromnej ilości oddzielnych, nadzwyczaj małych i wskutek tego oddzielnie niewidzialnych cząsteczek. Cząsteczki te są mniej lub więcej od siebie oddalone, niekiedy są znowu z sobą w ten lub inny sposób stale związane, albo znowu przeciwnie mają większą swobodę w ruchach względem siebie. Pomimo jednak

najróżnorodniejszego ugrupowania wzajemnego zasadnicze własności tych cząsteczek są stałe i niezmiennie. Nowożytny rozwój nauk przyrodniczych stwierdza nieustannie, jak myśl ta była i jest w skutkach swych owocna. Według powyższego poglądu wyobrażamy sobie kawałek lodu, ciekłą wodę i parę wodną — jako układ tych samych drobnych cząsteczek (molekuł). Stopienie, a bardziej jeszcze wyparowanie rozluźnia tylko związek, w jakim cząsteczki te były w stanie lodu.

Obserwując otrzymany powyżej roztwór miedzi w kwasie azotowym, nie widzimy w nim żadnej z tych własności, którą posiadał użyty kawałek miedzi, a mimo to twierdzimy stanowczo, że powstały płyn zawsze jednak zawiera cząsteczki, które uprzednio tworzyły kawałek metalu, tylko obecnie weszły one w pewne połączenie z cząsteczkami tworzącymi kwas azotowy. Kiedy najdrobniejsze te cząsteczki zwać będziemy cząsteczkami<sup>1)</sup> a kiedy atomami, nad tem na razie nie będziemy się zastanawiali. Tylko jeszcze na jedno zwrócę uwagę, mianowicie na to, że niezmiennosc ciężaru staje się zrozumiała jedynie wtedy, gdy się przyjmie, że każda, nawet najdro-

---

<sup>1)</sup> Przypisek tłumacza. — Pozorna tautologia zawarta w tem zdaniu jest wynikiem usunięcia z terminologii naukowej wyrazu «drobina» używanego w Galicyi, który najlepiej oddaje treść ścisłych pojęć, złączanych dla chemika i fizyka z mechanicznymi teoriami materyi.

bniejsza cząstka materii posiada swój własny niezmienny ciężar. Wydaje się przecież naturalnem, że pewna ilość kul w pudełku nie zmieni swego ciężaru całkowitego, jeżeli pudełko to wstrząśniemy i przez to zmienimy ich położenie względem siebie.

Najmniejsze cząstki przypisuje atomistyczna teoria rozmaitym pierwiastkom chemicznym, z których składają się wszystkie pozostałe ciała. Nie jesteśmy w stanie ani jednego z tych pierwiastków przemienić w drugi, np. miedź ani jakikolwiek inny metal nie da się w żaden sposób przeobrazić na złoto, o czem marzyli dawni alchemicy. Z drugiej strony jednak to, że wszystkie ciała spadają z jednakową chyżością, wskazuje, iż atomy najróżnorodniejszych pierwiastków nie są przecie pod każdym względem różne, że przeciwnie pierwiastki posiadają pewne podobieństwo, którego jednak niestety dotychczasowymi badaniami pochwycić nie zdołaliśmy jeszcze.

A teraz na chwilę rozstańmy się z siłą ciężkości. Wyprowadzone powyżej wzory znajdują zastosowanie także w przypadku innego rodzaju sił. Przypuśćmy np., że siła, z jaką ten oto magnes przyciąga kulę żelazną (fig. 1) z oddalenia 10 cm wynosi 35 dyn. Niech masa tej kuli będzie równa 150 g. Na podstawie tych danych możemy wyrachować, że siła magnesu — w przypuszczeniu, że on trwale pozostaje w tem samym oddaleniu

od kuli — działając w ciągu 1 sek, jest w stanie nadać kuli szybkość  $\frac{35}{150} = 0.233..$  cm na sekundę. Rachunek tego rodzaju możemy przeprowadzić i w wielu innych podobnych przypadkach.

W powyżej wyłożonych prawach o działaniu sił jest jeszcze coś, co osobno na podkreślenie zasługuje. Szybkość, jaką pewna siła nadaje ciału, zależy

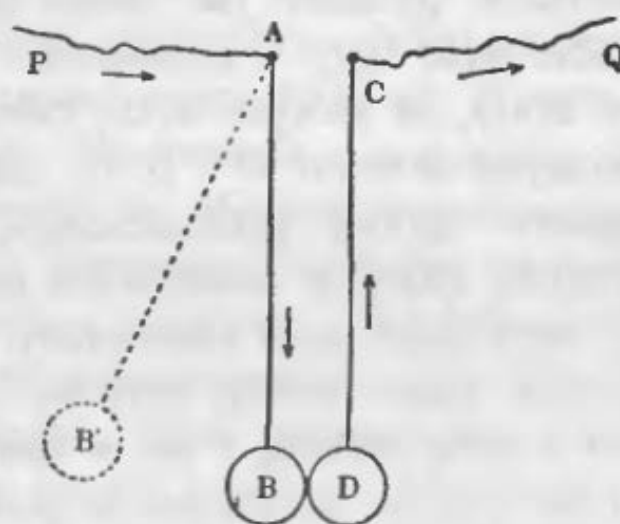


Fig. 3.

także i od czasu, podczas którego siła ta działa. Zbliźmy np. nasz magnes na chwilę tylko do kuli żelaznej, wiszącej na pręcie  $CD$  (fig. 1), a kula ledwie się poruszy. Jeżeli chcemy przesunąć ją znacznie, musimy pozwolić sile przyciągania działać przez czas dłuższy.

Jest rzeczą widoczną, że w przypadku, gdy wszystkie inne wielkości są znane, można będzie z obserwowanego działania pewnej siły obliczyć

czas, przez który siła ta działała. Żeby dać tego przykład, pomyślmy sobie następujące doświadczenie. Zawieszam na drutach metalowych, umocowanych w punktach  $A$  i  $C$ , jak to wskazuje fig. 3, mosiężne kule  $B$  i  $D$ . Gdy teraz podniosę kulę  $B$ , np. do wysokości  $B'$  i następnie puszcę swobodnie, natenczas, jak widoczna, kula  $D$  zostanie wprowadzona w ruch, a natomiast zatrzyma się kula  $B$ . Zachodzi pytanie, jak długo przy tem uderzeniu obie kule były w zetknięciu. W punktach  $A$  i  $C$  druty, na których wiszą kule, złączone są z miedzianymi drutami  $P$  i  $Q$ , te zaś wychodzą z biegunów ogniwa galwanicznego, t. j. takiego przyrządu, który w metalowych przewodnikach może wytworzyć prąd elektryczny. Prąd ten przebiega druty tylko wtedy, gdy się metalowe kule  $B$  i  $D$  z sobą stykają, i np. w kierunku, zaznaczonym na rysunku strzałkami. W punktach zetknięcia kul, przechodzi on z jednej kuli na drugą. Prąd znika, skoro tylko kule odskoczą od siebie. Żeby istnienie prądu łatwo można obserwować, prąd galwaniczny przechodzi jeszcze przez przyrząd zwany galwanometrem, który ustawiamy nieruchomo na ściennej półce. W galwanometrze na delikatnej niteczce wisi maleńka sztabka magesowa w ten sam sposób, w jaki zawieszony jest pręt magnetyczny  $CD$  na rysunku figury 1. Na tym dużym magesie, zarówno jak i na igle kompasu, widzimy z łatwością, jak po wychyleniu



z położenia równowagi magnes poczyną wahać się w obie strony. Że ruchy te można porównać z ruchami wahadła, leży jak na dłoni, chociaż siły które tu ciało z powrotem do położenia równowagi sprowadzają, są zgoła innej natury. W wahadle siłą tą jest siła ciężkości, w sztabce magnesu zaś występują siły, które działają na jego bieguny i o których przypuszczamy, że pochodzą od ziemi, jako od wielkiego kulistego magnesu. Za daleko zaszlibyśmy jednak, gdybyśmy chcieli na tem miejscu bliżej roztrząsać naturę tych sił. Zresztą nie jest to konieczne. Porównanie z wahadłem dla celów naszych wystarcza. Możemy wahadło wyprowadzić z położenia równowagi, działając na kulę wahadła siłą skierowaną poziomo. Podobnie jesteśmy też w stanie igłę galwanometru z jej położenia równowagi wychylić, jeżeli odpowiednio dobraną siłą podziałamy na jej bieguny. Siły takie powstają właśnie wtedy, gdy przez miedziany drut, umieszczony w przyrządzie, w pobliżu jego igły magnetycznej przebiega prąd elektryczny. Na tem właśnie polega stosowanie tego przyrządu. W naszym doświadczeniu mamy przytem do czynienia z prądem istniejącym bardzo krótko. Trwa on mianowicie tylko tak długo, jak długo stykają się z sobą kule *B* i *D*. W tak krótkim przeciągu czasu sztabka magnesu nie zdąży wychylić się dość widocznie z położenia równowagi. Możemy powiedzieć, że prąd nagle nadaje igłę pewną szybkość i z tą szyb-

kością wychyla się ona wtedy o pewien kąt, zupełnie podobnie, jak to czyni wahadło, które, wyprowadzone z równowagi, w bok odskakuje.

Siły, wywarte przez prąd elektryczny na bieguny magnesu, nadają mu szybkość tem mniejszą im króciej działały. Ponieważ zaś z szybkością tą zmniejsza się też i kąt wychylenia, to widoczna, że wielkość tego kąta pozwala nam wyliczyć czas, w przeciągu którego kule  $B$  i  $D$  pozostawały z sobą w zetknięciu.

Ażeby ruch igły magnesowej, umieszczonej wewnątrz galwanometru, zrobić widocznym, posługujemy się środkiem pomocniczym, który w wielu podobnych przypadkach znajduje zastosowanie. Na końcu igły umocowujemy maleńkie, lekkie zwierciadełko, na które z tej oto lampy rzucamy wiązkę promieni świetlnych. Zwierciadło odbija promienie na ekran i w ten sposób wywołana na nim plamka świetlna przesuwą się po linii poziomej z chwilą, gdy magnes wraz z zwierciadłem zostaje w ruch wprowadzony.

Położenie, w którym obecnie widzimy plamkę świetlną, odpowiada położeniu równowagi. W chwili, gdy, przybliżając scyzoryk ku igle galwanometru, igłę tę w ruch wprowadzimy, spostrzegamy na ekranie wahnięcia naszej plamki. Zaczekajmy, aż plamka się zatrzyma, a wtedy rozpoczniemy doświadczenie. Spuśćmy kulę  $B$  z wysokości  $B'$  (fig. 3) na kulę  $D$  i postarajmy się, by po odskocze-

niu kula  $D$  nie spadła z powrotem na kulę  $B$ . Jednocześnie zwróćmy baczną za każdym razem uwagę, jak daleko (o ile podziałek) plamka świetlna na ekranie odchyliła się od swego położenia równowagi. Gdy doświadczenie to powtórzymy dwa razy z tą tylko różnicą, że za pierwszym razem mniej, drugi zaś raz więcej odchyliny kulę  $B$ , przekonamy się, że i wychylenia galwanometru nie będą równe i mianowicie, za drugim razem wychylenie będzie znacznie mniejsze. Stąd wyprowadzamy oczywisty wniosek, że uderzenie dwóch kul trwa tem krócej, im większa jest szybkość, z jaką jedna kula uderza o drugą.

W opisanem doświadczeniu jedynie porównaliśmy z sobą dwa przypadki, gdybyśmy jednak wszystko to, co w doświadczeniu tem w grę wchodzi, zmierzili i gdybyśmy nieco więcej mechaniki i rachunku matematycznego zastosować tu mogli, wtedy byłibyśmy w stanie z wyników każdego oddzielnego doświadczenia obliczyć, jak długo w doświadczeniu tem trwało każdorazowe zderzenie. Wszystko to, cobyśmy w powyższy sposób (doświadczalny) znaleźli, moglibyśmy także i na drodze teoretycznej dokładnie wyliczyć, a mianowicie z wysokości, z której kula  $B$  spada, z jej rozmiarów i własności metalu, z którego jest zrobiona. Jeden z największych fizyków, który w naszych czasach żył i działał, Henryk Hertz, w jednej ze swych godnych podziwu prac wskazał, jak taki rachunek

przeprowadzić należy. Z wzorów, przez niego wyprowadzonych, obliczyłem, że w przypadku, gdy kulę  $B$  puścimy z wysokości 12 cm, czas trwania uderzenia wyniesie 0.0002 sek.

Z tego krótkiego czasu trwania uderzenia możemy wyciągnąć jeszcze jeden bardzo znamienny wniosek. Kula  $B$ , spadając z wysokości 2 cm, nabyła szybkość 150 cm na sekundę<sup>1)</sup> i oddała ją prawie całkowicie kuli  $D$ , naturalnie wskutek tego, że wywarła ona na kulę  $D$  pewną siłę. Zachodzi pytanie, jak wielka była ta siła? Działała ona na kulę  $D$  w ciągu 0.0002 sek. i w tym przeciągu czasu nadała kuli  $D$  szybkość 150 cm. Gdyby działanie trwało pełną 1 sekundę, nabyta przez kulę szybkość wyniosłaby  $150/0.0002$ , czyli 750.000 cm. Ponieważ przytem kula ta miała masę 800 g, a więc działająca siła musiała wynosić  $800 \times 750000$  czyli 600.000.000 dyn, (str. 23), co odpowiada ciężarowi mniej więcej 600 kilogramów.

Wyniku tego nie należy jednak pojmować w ten sposób, jakoby siła działająca w ciągu całego czasu zetknięcia obu kul stale posiadała wielkość 600 kg. Gdy jedno ciało wywiera ciśnienie na drugie, wtedy w związku z tem stoi fakt, że miejsce ze-

---

1) Co obliczamy z łatwością ze wzoru  $h = \frac{v^2}{2g}$  str. 26.

tknięcia obu ciał ulega spłaszczeniu, a następnie dąży do przywrócenia swego pierwotnego kształtu. To spłaszczenie miejsca zetknięcia w pierwszej chwili, rzecz oczywista, nie istnieje jeszcze. Ono narasta stopniowo i znika tak samo w ostatniej chwili zderzenia. Dlatego też siła uderzenia początkowo także musi wzrastać a potem maleć. Powyżej wyrachowana liczba jest jedynie wartością średnią, z czego oczywiście wynika, że w chwili największego odkształcenia (spłaszczenia) obu ciał siła ta musiała być o wiele znaczniejsza. W tym momencie uderzenia odkształcenie obu kul było takie, jakie obserwowalibyśmy, gdyby ta maksymalna siła uderzenia trwale przyciskała oba ciała ku sobie.

Na zakończenie tej pierwszej części naszych rozważań chcę jeszcze zwrócić uwagę Panów na wybitne znaczenie oporów, t.j. sił, które zawsze występują podczas objawów ruchu, a od których myśmy nasze, w myśli przeprowadzone doświadczenie, w zupełności uwolnili. Wskutek tarcia pomiędzy dwoma ślizgającymi się albo toczącymi ciałami, albo pomiędzy dwiema przesuwającymi warstwami jakiegokolwiek ciecży lub gazu, może w krótszym lub dłuższym czasie nastąpić zupełny zanik ruchu. Także bardzo często zdarzyć się może, że opór przeszkodzi powstaniu ruchu, np. kiedy jakieś ciało spoczywa na niezbyt pochyłej, a mocno



chropowatej powierzchni. Zdaje mi się, że będzie rzeczą zbyteczną tłumaczyć, jak odmiennie wyglądałby świat cały, gdyby wogóle opory nie istniały, gdybyśmy więc np. zmuszeni byli poruszać się po powierzchniach zwierciadlanych, gdyby żadne ciało nie mogło spokojnie pozostać na stole, — ponieważ on nigdy nie jest dokładnie poziomym, — gdyby żaden cyklon nie mógł nigdy ustać i gdyby w każdym pokoju stałe panował nieznośny pogłos, ponieważ raz wywołane drgania głosowe bezustannie od ścian odrzucane nigdyby ustać nie mogły.

Wskutek tarcia ciało może zachować ruch prostoliniowy jednostajny jedynie wtedy, gdy bezustannie podczas ruchu ciała w kierunku ruchu działa pewna siła. Wskutek codziennego doświadczenia oswoiiliśmy się z faktem tym do tego stopnia, że wymaga to pewnego wysiłku, by uprzytomnić sobie warunki, któreśmy przy wyprowadzaniu praw ruchu założyli. Przypomnijmy sobie przykład z sankami, od którego zaczęliśmy nasze rozważania. Początkowo nadajemy sankom bezwątpienia ruch przyśpieszony. Gdy już jednak pewna szybkość została nadana, wtedy opór, wynikający z nierówności powierzchni zetknięcia, staje się dokładnie równy sile działającej. Wtedy mamy do czynienia z dwiema siłami, działającymi w wprost przeciwnym kierunku, z siłami, które się wzajemnie znoszą. A to wychodzi

na to samo, jakby żadna siła wogóle nie działała i przy bliższem rozważaniu całe zjawisko jest zupełnie zgodne z tem zasadniczem prawem mechaniki, t. j. które powiada, że, skoro niema siły, nabyta szybkość ciała nie ulega żadnej zmianie.

## WYKŁAD II.

### Ruchy krzywolinijne.

---

Dzisiejszy wieczór poświęcić mamy rozważaniu ruchów krzywolinijnych. Z natury rzeczy będziemy tu mieli do czynienia ze zjawiskami bardziej złożonemi, aniżeli w przypadku ruchu prostoliniowego, którym zajmowaliśmy się w przeważnej części poprzedniego wykładu. Szybkość ruchu może i w tym razie pozostać niezmienną, albo też wzrastać lub opadać, oprócz tego jednak wchodzić tu będzie w grę ciągła nieustająca zmiana kierunku ruchu. Ta okoliczność pociąga za sobą nowe prawo, uzupełniające uprzednio przez nas poznane prawa dla ruchu prostoliniowego. Ma ono mianowicie wyjaśnić nam, jaki związek zachodzi pomiędzy zmianą kierunku ruchu, a siłą działającą na ciało. Postarajmy się prawo to wyprowadzić na podstawie pewnego bardzo prostego zjawiska, które każdy z nas niejednokrotnie obserwował. Podrzućmy piłkę pionowo do góry i następnie, nie ruszając się z miej-

sca, pochwycimy ją ręką. Przy pewnej wprawie uczynić to samo potrafimy także i w biegu. Podrzucając tym razem piłkę takim samym ruchem ręki, jak poprzednio, nieco później wprawdzie, lecz pochwycimy ją również, aczkolwiek jednocześnie posunęliśmy się nieco naprzód. Piłka podczas ruchu do góry i na dół posunęła się naprzód w kierunku poziomym dokładnie o tyle, o ile i myśmy, biegnąc, posunęli się w tym samym kierunku. By to zdziałać, nie wykonaliśmy tu zgoła nic więcej ponad to, cośmy uczynili, gdyśmy podrzucali piłkę, stojąc nieruchomo na miejscu.

Zamiast podrzucać piłkę w biegu, możemy z tym samym skutkiem wykonać powyższe doświadczenie na posuwającym się z jednostajną szybkością statku parowym. Wyobraźmy sobie, że jesteśmy w kajucie, a okna na zewnątrz są zasłonięte; wtedy możemy wogóle nie zdawać sobie nawet sprawy z tego, że się posuwamy naprzód. Ruch podrzuconej w górę piłki również nie zdradzi posuwania się statku w kierunku poziomym. Możemy więc badać ruch piłki tak, jak gdyby okręt stał nieruchomo na miejscu. Gdybyśmy np. zechcieli przekonać się, jakie drogi przebiega piłka w kierunku pionowym w kolejno po sobie następujących odstępach czasu, stwierdzilibyśmy ten sam rezultat zarówno w kajucie statku stojącego, jak i płynącego. W ostatnim wypadku jednak pionowa droga piłki bierze udział w ruchu okrętu, — posuwa się wraz z okrę-

tem naprzód. To nas upoważnia do następującego wniosku.

Gdy pionowa linia, po której podnosi się i następnie spada podrzucone do góry ciało, sama posuwa się jednostajnym ruchem w kierunku poziomym, ruch ciała po tej linii jest dokładnie ten sam, co i w przypadku linii nieruchomej.

Załączona fig. 4 ma nam wykazać, jaki jest istotny ruch piłki w przypadku posuwania się linii

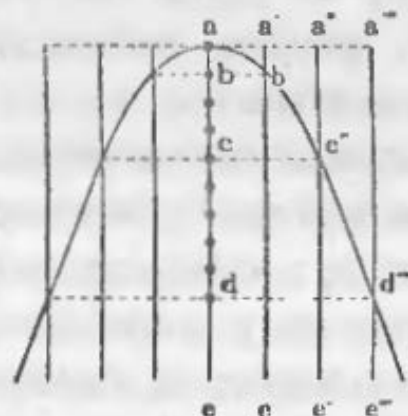


Fig. 4.

pionowej. Zwróćmy przedewszystkiem uwagę na spadanie. Przypuśćmy, że prosta  $ae$  (fig. 4) przedstawia położenie pionowej linii w chwili, gdy ciało zaczyna spadać z punktu  $a$ . Jeżeli linia ta pozostaje nieruchoma, wtedy spadające ciało przebywa w kolejno po sobie następujących sekundach, lub równych odstępach czasu, drogi  $ab$ ,  $bc$ ,  $cd$  i t. d. Przytem według dawniej wyprowadzonych wzorów (str. 25) będziemy mieli:  $ac = 4ab$ ,  $ad = 9ab$  i t. d.



Gdy jednak pionowa linia spadania  $ac$  poruszać się będzie ruchem jednostajnym w kierunku  $aa'''$  równoległe do siebie, to przyjmie ona w rozważanych odstępach czasu kolejno położenie  $a'e'$ ,  $a''e''$ ,  $a'''e'''$  i t. d., przytem, wskutek jednostajności ruchu, poziome drogi  $aa'$ ,  $a'a''$ ,  $a''a'''$  i t. d. będą sobie równe. Jednocześnie jednak ciało spada i dochodzi po pewnym czasie do tegoż samego poziomu, do którego doszłoby, gdyby ruch w kierunku poziomym nie odbywał się wcale. Po pierwszym więc odstępzie czasu dojdzie ono do wysokości  $b$ , lecz już po linii  $a'e'$ , a więc dosięgnie punktu  $b'$ , który oznaczyć możemy łatwo, kreśląc poziomą linię  $bb'$ . W podobny zupełnie sposób znajdziemy punkt  $c''$ , w którym istotnie ciało znajdować się będzie z końcem drugiego odstepu czasu, i punkt  $d'''$  po trzecim okresie i t. d. A teraz połączmy krzywą linią znalezione punkty  $a$ ,  $b'$ ,  $c''$ ,  $d'''$  i t. d. i pośrednie, znajdujące się pomiędzy nimi, a wyznaczone w ten sam sposób dla krótszych okresów czasu, a otrzymamy istotną drogę spadającego ciała.

W zupełnie analogiczny sposób da się wykreślić droga, którą ciało przebędzie podczas ruchu do góry. Widzimy ją na rysunku na lewo od linii  $ac$ . W punkcie  $a$  łączy się ona z uprzednio oznaczoną linią  $ab'c''d'''$ . Jeszcze łatwiej możemy ją wyznaczyć, obracając płaszczyznę  $ea'''e'''$  dokoła

linii *ae* o  $180^\circ$ , czyli przewracając ją z prawej na lewą stronę.

Cała krzywa nosi nazwę paraboli. Ciało rzucone, zależnie od warunków, może przebyć większą lub mniejszą część tej drogi. Gdy, stojąc nieruchomo, obserwować będziemy z boku piłkę, rzuconą i następnie pochwyczoną przez osobę biegnącą, lub znajdującą się na posuwającym się statku, to spostrzeżemy, że droga, którą piłka odbyła, będzie miała wygląd krzywej naszego rysunku. Tak samo kamień, rzucony w górę w kierunku pochyłym, nawet w przypadku, gdy osoba rzucająca stoi nieruchomo, zakreśla w powietrzu drogę paraboliczną. Linia ta jest nam również dobrze znana z kształtu strumienia wody, który wyrzuca np. wodotrysk. Każda cząstka wody w takim strumieniu pędzi, jedna za drugą, po tej samej drodze. Gdy strumień nie jest skierowany do góry, lecz poziomo wypływa z otworu, wtedy mamy oczywiście do czynienia tylko z jedną połową całkowitej krzywej np. z połową *ab'c'd'''*.

A teraz powstaje pytanie, jaka jest szybkość ciała, poruszającego się po paraboli. Badając ruch taki dokładniej, przekonujemy się, że szybkość poruszającego się ciała maleje podczas wznoszenia się aż do punktu *a*, następnie zaś podczas spadania znowu wzrasta. To zwolnienie ruchu odpowiada, — co łatwo rozpoznać, — opóźnieniu podczas wznoszenia się, jak również wzrost szyb-

kości odpowiada przyspieszeniu podczas spadania wzdłuż linii pionowej. Ale w chwili, gdy ciało dosięgło najwyższego punktu krzywej drogi, a więc punktu  $a$ , nie możemy twierdzić, aby w chwili tej szybkość jego wzrastała lub malała. W tym punkcie na jeden moment tylko szybkość pozostaje niezmienną. W tem miejscu jedynie posiada ciało szybkość poziomą taką, jaką ma pionowa prosta  $ac$ . Kierunek ruchu jest poziomy, a więc prostopadły do kierunku działania siły ciężkości. Stąd wynika następujący doniosły wniosek. Siła, działająca prostopadle do kierunku ruchu ciała, nie zmienia jego szybkości, nie powiększa jej ani nie zmniejsza. Jedynym skutkiem jej działania jest to, że droga ruchu staje się krzywą. — Siła ciężkości sprawia więc, że piłka, począwszy od punktu  $a$ , nie pędzi dalej po prostej  $aa'''$  z szybkością tą, jaką posiada w tym punkcie, lecz skręca w dół na drogę  $ab'c'd'''$ . Ta zmiana kierunku ruchu jest tem znaczniejsza, im działająca siła jest większa. Gdybyśmy mogli zwiększyć siłę ciężkości, wtedy piłka, począwszy od  $a$ , zakreśliłaby parabolę jeszcze bardziej odchyloną od poziomej linii  $aa'''$ , aniżeli droga, którą zakreśliła w pierwszym razie.

Gdy wiemy, jak wielka jest szybkość ciała i jaką jest siła, działająca na ciało prostopadle do kierunku ruchu, natenczas możemy wyliczyć skrzy-

wienie drogi. By wzór niezbędny do tego celu uczynić bardziej zrozumiałym, zmuszony jestem poprzedzić go pewną geometryczną definicyą. Można mały odcinek każdej krzywej linii uważać w przybliżeniu jako łuk koła, i oczywiście z tem mniejszem odstępstwem od rzeczywistości, im uważana część krzywej będzie mniejsza. Koło, do którego należy ten drobny łuk, nazywa się kołem

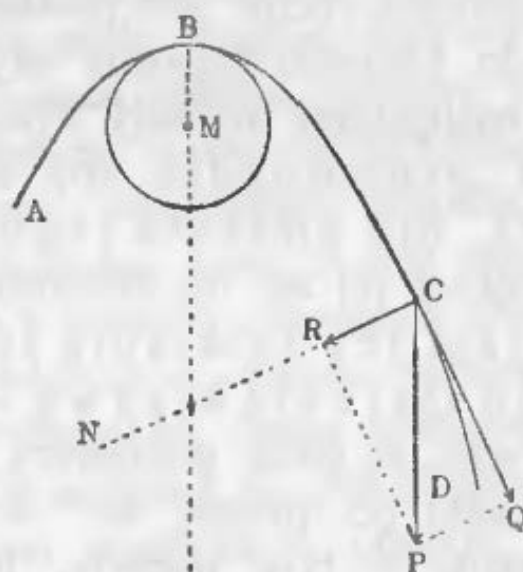


Fig. 5.

krzywizny danej linii w rozważanym punkcie, a jego promień promieniem krzywizny. Długość tego promienia może być dla nas miarą samej krzywizny, mianowicie w tem znaczeniu, że krzywizna, t. j. odchylenie od prostej linii, będzie tem mniejsze, im większy w danym punkcie będzie promień koła krzywizny.

Żeby to, o czem w tej chwili mówię, bardziej uwidocznic, rysuję w wierzchołku paraboli (fig. 5).

w punkcie  $B$  koło krzywizny.  $M$  jest środkiem tego koła. Koło to przystaje do paraboli lepiej, aniżeli jakiekolwiek inne koło, przechodzące również przez punkt  $B$ . Koła krzywizny, wykreślone w innych punktach paraboli, mają wszystkie większe promienie aniżeli koło o promieniu  $MB$ . Np. koło, które należy do punktu  $C$  paraboli, ma swój środek na przedłużeniu linii  $CN$ , mniej więcej w odległości 13 cm od punktu  $C$ .

Niech szybkość, jaką ma ciało w wierzchołku paraboli, wynosi  $v$  cm na sekundę, a  $m$  g niech będzie masa tego ciała. Siła zaś, z jaką go ziemia przyciąga ku sobie, niech wynosi  $K$  dyn; natenczas promień krzywizny w punkcie  $B$ , wyrazi się wzorem:

$$r = \frac{mv^2}{K}$$

Wzór ten należy udowodnić, tembardziej, że znajduje on zastosowanie w wielu ważnych wypadkach, które rozważać będziemy. Najpierw zwróćmy uwagę na to, że  $K$  jest to ta sama siła, która ciału swobodnie spadającemu może nadać przyspieszenie  $g$ , równe 981 cm na sekundę, która więc według uprzednio wyprowadzonego przez nas wzoru (str. 23) wyraża się równaniem:

$$K = mg$$

A teraz rozpatrzmy rysunek fig. 6, w którym odcinek krzywej  $AB$  ma przedstawiać bardzo małą



część paraboli, mianowicie tę, która znajduje się na prawo od wierzchołka paraboli.

Cały rysunek jest to koło krzywizny dla wierzchołkowego punktu paraboli, a środkiem koła jest punkt  $M$ . Łuk  $AB$  tego koła jest zarazem częstką paraboli, zaś  $AM$  jest równe promieniowi krzywizny, a więc wynosi  $r$  cm. Spuśćmy z punktu  $B$  prostopadłą na pionową średnicę koła, t. j.

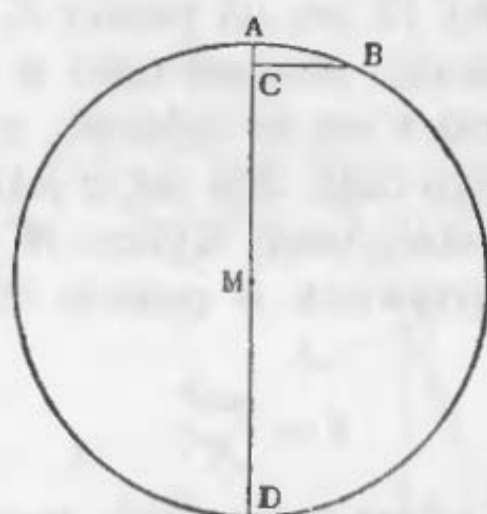


Fig. 6.

na linię  $AD$  i przypomnijmy sobie to, cośmy roztrząsali na fig. 4. Analogicznie musimy więc tutaj  $AC$  uważać jako odstęp, na jaki ciało spadło, gdy jednocześnie linia, po której spadanie miało miejsce, przesunęła się w kierunku poziomym o długość  $CB$ . Jeżeli, potrzebny do przebycia łuku  $AB$ , czas wynosi  $t$  sek, — gdzie  $t$  oczywiście jest bardzo drobnym ułamkiem, — wtedy odcinek  $CB$  obliczy się, jako

$$CB = vt.$$

Uprzednio wyprowadziliśmy również wzór (str. 25), według którego możemy obliczyć długość  $AC$ , mianowicie

$$AC = \frac{g}{2} \cdot t^2.$$

A teraz zastosujmy jeszcze pewne geometryczne twierdzenie, pozwalające wyrachować długość odcinka  $CD$ . Twierdzenie to powiada: długość odcinka  $CD$  znajdziemy, mnożąc przez siebie liczbową wartość odcinka  $CB$  i dzieląc następnie otrzymany rezultat przez wartość liczbową odcinka  $AC$ . Mamy więc wymnożyć przez siebie  $vt$ , t. j. podnieść do kwadratu, co wyniesie  $v^2 t^2$ , i następnie podzielić przez  $\frac{g}{2} \cdot t^2$ , innemi słowy napisać ułamek:

$$\frac{v^2 t^2}{\frac{1}{2} g t^2} = \frac{v^2}{\frac{1}{2} g} = \frac{2v^2}{g}$$

który po skróceniu da nam  $\frac{2v^2}{g}$ , t. j. liczbową wartość odcinka  $CD$ . Rezultat ten jednak nie jest całkowicie dokładny. Łuk  $AB$  paraboli nie przystaje bowiem zupełnie dokładnie do łuku  $AB$  koła. Żeby błąd ten stał się możliwie mały, należy długość łuku robić coraz mniejszą, a więc przybliżać coraz to bardziej punkt  $B$  do punktu  $A$ , przytem oczywiście przybliża się i  $C$  ku  $A$ . Ponieważ otrzymany w ten sposób wynik podaje wartość  $CD$  tem dokładniej, im linia ta wykazuje mniejszą

różnicę w porównaniu do średnicy  $AD$ , należy więc ostatecznie przyjąć otrzymany wynik dla  $CD$  jako równy średnicy  $AD$ . Znalazłszy w ten sposób wartość średnicy koła, czyli dwu promieni, otrzymujemy wartość samego promienia:

$$r = \frac{2v^2}{g} : 2 = \frac{v^2}{g}.$$

Rozszerzmy nasz ułamek  $\frac{v^2}{g}$ , mnożąc licznik i mianownik przez tę samą liczbę  $m$ . Przypomnijmy następnie sobie, że  $mg = K$  (str. 23), a wtedy dojdziemy do ostatecznego wzoru dla  $r$ , mianowicie:

$$r = \frac{mv^2}{K},$$

cośmy właściwie udowodnić zamierzali.

Z wzoru tego czytamy bezpośrednio: gdy  $r$  będzie miało mniejszą wartość, a więc krzywizna będzie większą, natenczas  $K$  musi stać się większe, to znaczy musi się zwiększyć siła, powodująca skrzywienie drogi. Z drugiej strony skrzywienie to może zmaleć, przy niezmienniej sile  $K$ , jeżeli tylko wzrośnie szybkość  $v$ , gdyż wtedy wzrośnie wartość powyższego ułamka. Na zmianę kierunku ruchu w ciele, poruszającym się z wielką szybkością, ma siła, działająca prostopadle do ruchu, znacznie mniejszy wpływ, niż na ciało, poruszające się z mniejszą szybkością. Porównajmy tylko ruch kuli karabinowej w tym względzie z ruchem piłki ręką rzuconej, albo przypatrzmy się kształtom

strumienia, wytryskającego poziomo z naczynia raz z mniejszą, a drugi raz z większą szybkością.

Do wzoru powyższego doszliśmy przez dokładne rozpatrzenie przypadku, w którym działającą siłą jest siła ciężkości, a poruszające ciało znajduje się właśnie w wierzchołku paraboli. Otrzymany rezultat ma jednak wartość ogólną. W każdym przypadku, gdzie na ciało, znajdujące się w ruchu, działa siła prostopadła do kierunku ruchu, szybkość ruchu nie ulega żadnej zmianie, lecz jedynie ulegnie zmianie kierunek ruchu, mianowicie zostanie on skrzywiony w tym stopniu, jaki podaje wartość liczbowa powyżej wyprowadzonego wzoru. Jeżeli przytem działająca siła jest prostopadła do kierunku ruchu nie tylko w jednym punkcie drogi — jak to ma miejsce w powyższym wypadku dla paraboli, — lecz trwale położenie to zachowuje, natenczas i szybkość ruchu pozostaje bez zmiany. Przytem jeszcze zdarzyć się też może, że działająca siła, ulega co chwila zmianie co do swej wielkości, zachowując jednak trwale prostopadły do ruchu ciała kierunek. Wtedy i krzywizna drogi w każdym momencie będzie inna, a droga przybiera niekiedy bardzo zawiłą postać. Jeżeli jednak siła, działająca prostopadle do kierunku ruchu pozostaje niezmienna, to i promień krzywizny  $r$  musi pozostać niezmienny, a to jest możliwe, — w przypadku ruchu w tej samej płaszczyźnie, — jedynie wtedy, gdy droga ruchu jest

kołem. W ten sposób doszliśmy do bardzo ważnego specjalnego przypadku, w którym ciało porusza się ruchem jednostajnym po kole (fig. 7), a pewna, nie ulegająca zmianie, siła w każdym momencie drogi działa stale w kierunku środka koła.

Tym właśnie przypadkiem ruchu krzywoliniowego będziemy przeważnie zajmowali się w niniej-

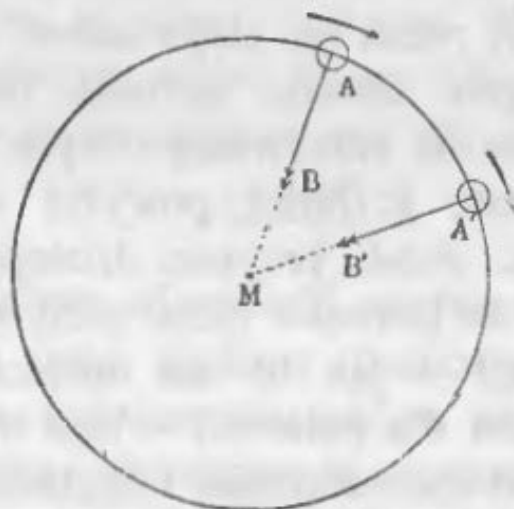


Fig. 7.

szym wykładzie. Na chwilę jednak przerwijmy nić naszych rozważań, a to w celu omówienia jeszcze jednego zagadnienia z nauki o siłach, które będzie nam bardzo pomocne w dalszym ciągu wykładu.

Zdarza się często, że na pewne ciało działa nie jedna, lecz jednocześnie dwie i więcej sił, które przytem, — pozwolę sobie założyć, — mają różne kierunki. By w przypadku takim można było łatwo zdać sobie sprawę z działania sił, należy



skorzystać z geometrycznego przedstawienia rzeczy, a mianowicie kierunek i wielkość sił wyrazić za pomocą odcinków, mających długość i kierunek odpowiedni do danych sił. W fig. 8. strzałka  $ac$  jest dwa razy dłuższą od strzałki  $ab$ . Ma to uwidocznć różnicę, jaka zachodzi pomiędzy wielkością sił w jednym i drugim przypadku.

Gdy raz będzie utrwalona długość odcinka, odpowiadającego jednej dynie, natenczas siły o 3,

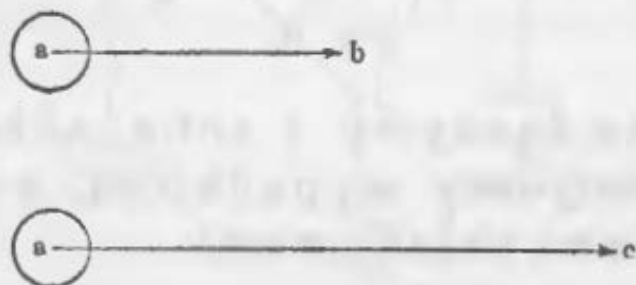


Fig. 8.

10 lub 100 dynach, przedstawia się jako odcinki 3, 10 względnie 100 razy dłuższe.

Środkiem pomocniczym, którym posługiwać się będziemy, w celu określenia całkowitego działania na ciało dwóch sił, jest prawo, znane pod nazwą **równoległoboku sił**. Gdy za pomocą prostych  $AP$  i  $AQ$  (fig. 9), przestawimy dwie, działające na ciało  $A$ , siły co do ich wielkości i kierunku, to możemy na odcinkach, wyrażających te siły, nakreślić równoległobok, prowadząc z punktów końcowych  $P$  i  $Q$  linie równoległe do tych odcinków. Wtedy linia, łącząca punkt  $A$  z przeciwległym punktem  $R$ , t. j. przekątnia równo-

ległoboku, przedstawi nam kierunek i wielkość siły, której działanie jest takie same, jak działanie obu sił  $AP$  i  $AQ$  razem. W ten sposób jesteśmy w stanie dwie siły, różne co do kierunku i wielkości, zastąpić jedną. Gdy to czynimy, powiadamy,

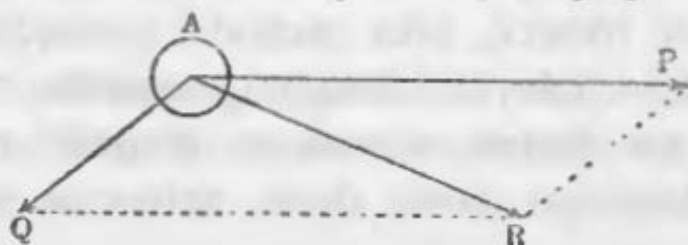


Fig. 9.

że siły te łączymy z sobą, składamy. Siłę  $AR$  nazywamy wypadkową, a siły  $AP$  i  $AQ$ , siłami składowymi.

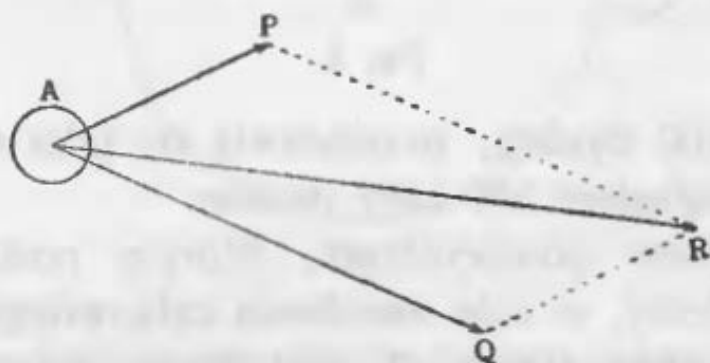


Fig. 10.

Z tego, cośmy powyżej powiedzieli, należy przede wszystkim podnieść to, że zasada równoległoboku sił ma zastosowanie bez względu na to, pod jakim kątem obie siły składowe działają i jaka ich jest względna wielkość. Na fig. 10 widzimy równoległobok sił innego kształtu, aniżeli równoległobok, przedstawiony na fig. 9.

Podobnych równoległoboków możemy wykreślić jeszcze więcej. Weźmijmy np. dwie siły, równe co do wielkości, lecz działające na ciało w przeciwnie strony, w kierunku bardzo mało zbaczającym od linii prostej. Przekonamy się wtedy, że siły te prawie się znoszą wzajemnie, ponieważ dają

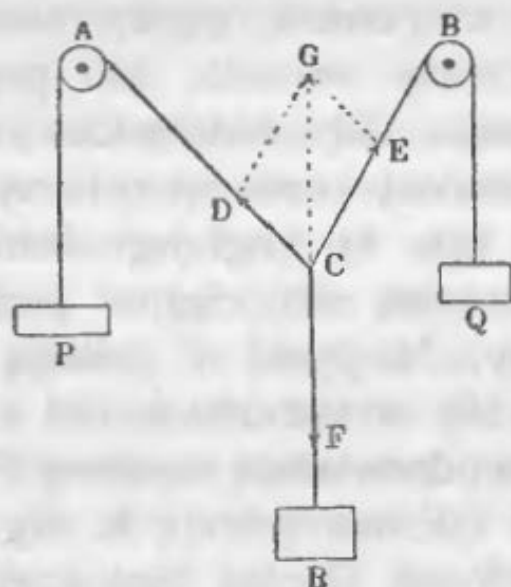


Fig. 11.

na wypadkową mały odcinek, który stoi prostopadle prawie do kierunku sił składowych.

Prawo równoległoboku sił jest wynikiem doświadczenia i dlatego też pozwolę tu sobie wykonać pewne doświadczenie, które, aczkolwiek polega na użyciu jednego tylko rodzaju sił, prawo to dostatecznie stwierdza.

Poprzez bloki *A* i *B* (fig. 11) przerzucony jest sznurek, na końcach którego wiszą ciężarki *P* i *Q*, podczas gdy w punkcie *C* przytwierdzony

jest inny sznurek, napięty pionowo ku dołowi ciężarkiem  $R$ . Jesteśmy w możności punkt  $C$  przesunąć w lewo, lub prawo, lecz, gdy przyrząd pozostawimy samemu sobie, punkt ten jako też i sznurek z ciężarkiem  $R$  przyjmie pewne określone położenie. Wtedy mamy ustaloną równowagę, i z łatwością za pomocą reguły równoległoboku sił znaleźć możemy warunek, jaki przytem spełniony być musi. Gdy mianowicie jeden koniec sznurka, przerzucony przez nieruchomy blok, podlega działaniu siły, to drugi jego koniec wskutek napięcia z tą samą siłą ciągnie przedmiot doń przytwierdzony. Na punkt  $C$  działają tu jednocześnie dwie siły w kierunkach  $CA$  i  $CB$ , które wielkością swą odpowiadają ciężarom  $P$  i  $Q$ . Niech odcinki  $CD$  i  $CE$  reprezentują te siły co do ich kierunku i wielkości. Oprócz tego działa na punkt  $C$  napięcie trzeciego sznurka, skierowanego ku dołowi. Napięcie to jest równe uwiązaniu doń ciężarowi  $R$  i możemy je przedstawić za pomocą odcinka  $CF$ .

Aby wyznaleźć warunek, w którym wszystkie trzy siły  $CD$ ,  $CE$  i  $CF$  będą z sobą w równowadze, nakreślmy na odcinkach  $CD$  i  $CE$  jako na bokach, odpowiedni równoległobok. Przekątnia jego  $CG$  przedstawi nam siłę, którą możemy zastąpić siły składowe  $CD$  i  $CE$ . Ta wypadkowa siła musi jednak pozostać w równowadze z siłą  $CF$ , co oczywiście jest tylko wtedy możliwe, gdy co do

wielkości będzie ona dokładnie równa sile  $CF$ , a co do kierunku — zwrócona w stronę wprost przeciwną, t. j. pionowo ku górze. Przyrząd, w którym widzimy powyższą figurę nakreśloną na pionowej tabliczce, umieszczonej poza sznurkami, stwierdza wszystko to w istocie. W ten sposób zostaje więc prawo równoległoboku sił doświadczalnie udowodnione.

Prawo równoległoboku sił znajduje zastosowanie nie tylko w przypadku składania dwóch sił. Również dobrze możemy go użyć i wtedy, gdy się rozchodzi o to, by jedną siłę zastąpić dwiema innymi, co niekiedy ze względu na łatwość oceny ich działania może być bardzo wskazane. Przyjmijmy np. (fig. 9), że dana nam jest pewna siła  $AR$ . Kierunki  $AP$  i  $AQ$  możemy wybrać zupełnie dowolnie, jednak tak, by linia  $AR$  leżała pomiędzy nimi. Przeprowadźmy z końca siły  $AR$ , a więc z punktu  $R$  równoległe do  $PA$  i  $QA$ , tj. linie  $RQ$  i  $RP$ , a otrzymamy równoległobok, którego przekątnią jest właśnie dana siła  $AR$ . Boki, otrzymanego w ten sposób, równoległoboku a więc odcinki  $AP$  i  $AQ$  reprezentują nam siły, które razem wzięte zastąpić mogą siłę  $AR$ . To, cośmy teraz uczynili, nazywa się rozkładem siły, obie otrzymane siły — składowymi siłami danej siły  $AR$ . Oczywiście, taki rozkład siły może być skuteczniejszy w bardzo rozmaity sposób, ponieważ można z łatwością nakreślić



bardzo wiele równoległoboków, mających za przekątnię ten sam odcinek  $AR$ .

A teraz rozpatrzmy przykład, na którym możemy poznać zastosowanie zasady o rozkładzie sił. W doświadczeniu, przedstawionem na fig. 11 oba sznurki są ruchome. Umocujmy teraz ich końce nieruchomo w punktach  $A$  i  $B$ . W przypadku tym jesteśmy w stanie określić, jak silnie każdy ze sznurków jest napięty ciężarem  $R$ . Ponieważ oba sznurki dźwigają razem ten ciężar, istnieć więc musi pewna wypadkowa siła, skierowana wprost do góry i równa sile  $CF$ . Niech tą siłą będzie  $CG$ . Kreśląc równoległobok z końca tej siły, t. j. z punktu  $G$ , otrzymujemy dla napięć każdego sznurka odpowiednie odcinki  $CD$  i  $CE$ , które reprezentują nam ich wielkość i kierunek. Jeszcze prościej rzecz się cała przedstawi, jeżeli rozważanie nasze zaczniemy od rozkładu ciężaru  $CF$  na dwie siły, z których jedna ma działać na punkt  $C$  w kierunku  $AC$ , druga zaś w kierunku  $BC$ . Pierwsza z tych składowych napnie sznur  $AC$ , druga zaś sznur  $BC$ .

Jest rzeczą bardzo pouczającą nakreślić równoległobok sił, w przypadku, gdy punkt  $C$  wybrany będzie wyżej, aniżeli na fig. 11, a punkty  $A$  i  $B$  na tej samej co poprzednio wysokości. Zobaczymy wtedy, że dla napięć obu sznurków wypadną większe odcinki, a wreszcie gdy  $C$  umieścimy tylko nieco niżej linii łączącej punkty  $A$  i  $B$ —

położenie punktu  $C$  na samej linii  $AB$  nigdy zdarzyć się nie może, — wtedy nawet napięcie składowe, każde z osobna, staje się większe od ciężaru  $R$ . Każdy z nas wie dobrze, jak mocno napiąć trzeba linę poziomą, by zawieszony pośrodku jej ciężar nie wygiął jej zbyt silnie ku dołowi.

A gdybyśmy nawet nie umieścili na rozpiętym sznurze żadnego ciężaru, to jednak własny ciężar jego stawiałby opór wyprostowaniu sznura przez napięcie, i naturalnie napięcie to musiałoby być tem większe, im bardziej prosty kierunek chcielibyśmy mu nadać. Teorya tego przypadku jest nieco bardziej skomplikowana, w każdym jednak razie opiera się na tych samych zasadach. Przypuśćmy np., że mamy na dwóch słupach rozpięty drut telegraficzny, albo telefoniczny. Niech oddalenie słupów od siebie wynosi 100 m, a obniżenie środka drutu poniżej prostej, łączącej punkty zaczepienia, 0.5 m — wtedy napięcie na końcach drutu, a więc siła, z jaką drut pociąga słup, równa się 25-krotnemu ciężarowi całego drutu. W wypadkach, gdy drut ten w porze zimowej obciążony bywa szronem, do ciężaru metalu przybywa jeszcze 25-krotny ciężar lodu. Nic więc dziwnego, że wobec tak potężnych napięć drut taki nierzadko ulega zerwaniu.

Teraz pozwolę sobie raz jeszcze powrócić do fig. 5 i mianowicie rozpatrzeć ciało w tym momencie ruchu po parabolicznej drodze, gdy jest ono w punkcie  $C$ . Niech odcinek  $CP$  przedstawia

nam siłę ciężkości. Rozłożmy ją na siłę  $CQ$ , działającą w kierunku ruchu i siłę  $CR$  prostopadłą do tego kierunku. Wpływ siły ciężkości na ruch ciała możemy opisać w następujący sposób. Składowa  $CQ$  powiększa szybkość ruchu, w zależności od swej wielkości i wielkości masy ciała, natomiast skrócenie drogi liczy się na rachunek składowej  $CR$ . Promień krzywizny jest określony wzorem str. 50, jeżeli tylko za  $K$  podstawimy wartość siły  $CR$ , a za  $v$  oczywiście szybkość, jaką ciało posiada w punkcie  $C$ .

Jestem w obawie prawie, że temi rozważaniami wyczerpałem, być może, zanadto cierpliwość Pannów, ale pocieszam się myślą, że jednak w ten sposób poznaliśmy tutaj wszystkie te zasady, na podstawie których matematyk może albo obliczyć ruch ciał, znając wielkości i kierunki działających sił, albo przynajmniej — w przypadkach bardziej zawiłych, — spróbować rachunek taki przeprowadzić. Siłę działającą możemy zawsze rozłożyć na dwie składowe, z których jedna działa w kierunku ruchu drogi, druga — prostopadle do niego. Przytem jedna składowa stale określa zmianę szybkości, druga zaś zmianę kierunku ruchu.

Możemy łatwo sami ocenić, jak daleko zejść można przy pomocy tego rodzaju rachunków. W tym celu wybierzmy bardziej prosty przykład.

Widzieliśmy już uprzednio, że ciało znajdujące się w ruchu może opisywać koło (fig. 7), jeżeli

siła, nań działająca, stale skierowana będzie do tegoż samego punktu środkowego. Siła ta jest tu istotnie konieczna, przytem musi posiadać określoną wielkość, która z łatwością daje się obliczyć na podstawie wzoru str. 50. Wymnożmy wzór ten przez  $K$ , a otrzymamy:

$$Kr = mv^2$$

a stąd

$$K = \frac{mv^2}{r}$$

Tyle to dyn wynosić musi siła dośrodkowa, jeżeli masa ciała  $m$  podana jest w gramach, promień  $r$  w centymetrach i szybkość  $v$  w centymetrach na sekundę. Gdyby jej nie było wcale, ciało poruszałoby się po linii prostej, stycznej do koła w danym punkcie. Gdyby siła ta stała się mniejszą, aniżeli jest określone powyższym rachunkiem, wtedy dalsza droga ruchu ciała aczkolwiek odbiegłaby od linii prostej, nie byłaby jednak kołem: ciało oddaliłoby się o środka jeszcze nieco dalej. Gdyby wreszcie siła dośrodkowa stała się większą, aniżeli tego wymaga ruch po danem kole, wtedy droga skierowałaby się ku środkowi koła.

Teraz jesteśmy już w stanie zrozumieć cały szereg zjawisk, które mamy możność obserwować przy każdym ruchu obrotowym. Mam tutaj np. pręt  $AB$  (fig. 12), który w płaszczyźnie poziomej szybko obracać się może dookoła środkowego punktu  $M$ . Na pręcie osadzona jest przedziurawiona

kula  $C$ , dająca się łatwo przesuwac. Zwróćmy uwagę na to, że wskutek obracania pręta kula  $C$  oddala się od punktu obrotu  $M$  i pędzi ku końcowi pręta. Zjawisko to łatwo wytłumaczyć się daje. Mamy tu poprostu potwierdzenie ogólnej zasady, że ciało, raz otrzymawszy pewną szybkość, stara się szybkość tę zachować co do jej wielkości i kierunku, o ile tylko nie działa siła, która

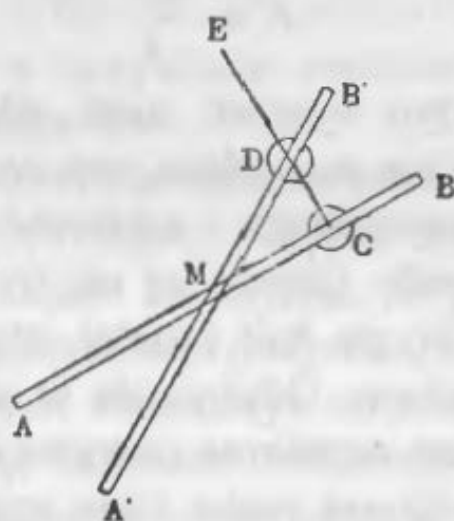


Fig. 12.

ruch ten tamuje. Gdyśmy więc poczęli obracać pręt  $AB$ , dokoła osi  $M$ , to ruchomo osadzona na nim kula  $C$  wskutek udziału w obrocie otrzymała również pewną szybkość w kierunku  $CE$ . Po tej więc linii, posuwając się dalej dochodzi ona do punktu  $D$  wtedy, gdy pręt  $AB$  dosięga położenia  $A'B'$ . Widoczna jest, że odległość kuli od środka stała się większa.

Pomyślmy dalej, żeśmy kulę  $C$  sznurkiem zwią-



zali z środkowym punktem  $M$ . I wtedy podczas obrotu pręta zacznie się ona odsuwać od  $M$ . Ruch ten jednak bardzo prędko ustaje. Sznurek rozciąga się i na mocy swej sprężystości wywiera na kulę pewną siłę w kierunku osi obrotu  $M$ . Siła ta wzrasta dopóty, dopóki nie dosięgnie wielkości, wyrażonej powyższym wzorem. Wtedy posiada ona dokładnie tę wartość, która potrzebna jest, by zmusić ciało  $C$  do posuwania się po obwodzie koła. Ciało  $C$  nie będzie już dalej odsuwało się od środka i dalsze napięcie sznura ustanie.

W ten sam sposób wypręża się też sznur, gdy umocowaną na jednym jego końcu kulę poczniemy obracać, trzymając w ręku drugi koniec sznura. W pewnej chwili spuścimy kulę ze sznurka, np. w taki sam sposób, jak to czynimy gdy rzucamy kamień z procy. Droga, którą kula teraz biedz pocznie, jest w pierwszej chwili styczną do koła, po którem kula poprzednio się poruszała — i kula zatacza parabolę, gdyż zwolniona ze sznura ulega działaniu siły ciężkości. Na podstawie naszego wzoru możemy z łatwością obliczyć jak wytrzymały ma być sznurek, by w przypadku takim nie uległ rozerwaniu. Przypuścimy, że mamy zamiar obracać na stalowym drucie, długości 1 m, ciało ważące 1 kg, z szybkością 10 m na sekundę. W przyjętych C.G.S. jednostkach wielkości te wyrażają się liczbami:

$m = 1000$ ,  $v = 1000$ ,  $r = 100$ , które po podstawieniu w powyższym wzorze, dadzą nam dla  $K$  wartość 10,000.000 dyn. Taką to właśnie wartość mieć będzie siła skierowana ku środkowi obrotu. Tę samą również wielkość będzie miało i napięcie drutu. Przyjmijmy, że drut stalowy, o  $1 \text{ mm}^2$  przekroju jest w stanie udźwignąć ciężar 80 kg, co odpowiada sile 80,000,000 dyn. W naszym więc przypadku drut taki musi mieć w przekroju co najmniej  $\frac{1}{8} \text{ mm}^2$ , jeżeli chcemy, by nie uległ zerwaniu. W analogiczny sposób możemy też odwrotnie obliczyć, jak szybko należy obracać dane ciało, by zerwać drut, do którego jest ono umocowane. Według tychże zasad, aczkolwiek już nie tak łatwo, daje się również za pomocą rachunku przewidzieć, przy jakiej szybkości rozpędowe koło maszyny w kawałki rozpaść się musi.

Z przyrządem, który powyżej mieliśmy w użyciu, możemy wykonać również kilka jeszcze innych doświadczeń. Wykażą nam one, jak ciało albo część pewnego ciała, przy obrocie dookoła osi, wskutek nabytej szybkości, stara się od tej osi odsunąć. Oto na pionowej osi  $AB$  (fig. 13), utwierdzamy metalowe obręcze  $CGDH$  i  $CEDF$ , i następnie wprawiamy je w ruch obrotowy. Wtedy punkty  $G$ ,  $E$ ,  $H$  i  $F$  otrzymają szybkości, wskazane przez strzałki, i poczną się odsuwać od osi obrotu. Pierścienie wydłużają się wskutek tego w kierunku poziomym i dzieje się to dotąd, aż przeciw-

działanie metalu wskutek sprężystości powstrzyma dalsze odkształcanie się obręczy. To wydłużenie poziome łączy się z skróceniem osi pionowej, w ten sposób mamy przed sobą zjawisko, którego często używa się do uzmysłowienia spłaszczenia kuli ziemskiej w biegunach. Naturalnie, że to spłaszczenie ziemi nastąpiło jeszcze wówczas, gdy

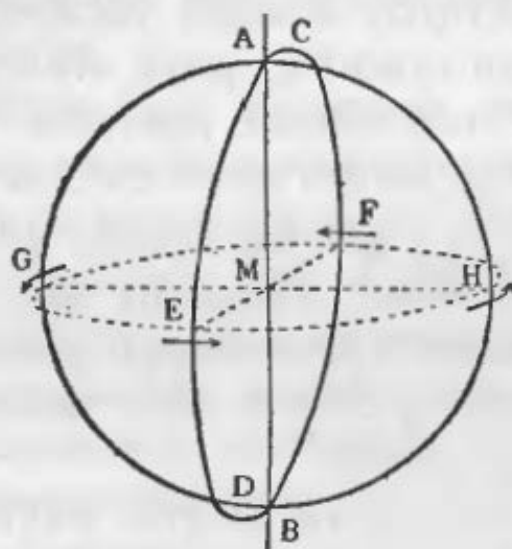


Fig. 13.

ziemia nie była skrzeplą kulą. W przypadku tym jednak siły, które powstrzymały dalsze wydłużanie się średnicy równika, były zgoła inne, aniżeli siły powstałe wskutek sprężystości w odkształconych obręczach naszego przyrządu.

Zdaje mi się, że będzie rzeczą zbyteczną powtarzać tu jeszcze doświadczenie z walcem szklanym, napełnionym częściowo wodą, a obracany szybko dookoła jego geometrycznej osi. Jest widoczna, że ciecz podniesie się u brzegów naczynia,

a jej wolna powierzchnia przyjmie kształt wgłębionego lejka. Również nie ulega wątpliwości, że w przypadku, gdy odpowiednie, szczelnie zamknięte naczynie będzie wypełnione nie cieczą, lecz powietrzem, natenczas wskutek obrotu naczynia, znajdujące się wewnątrz powietrze w okolicach osi obrotu ulegnie rozrzedzeniu, a przeciwnie zgęści się przy bocznych ścianach naczynia, i w razie obecności tam otworów, przez otwory te pocznie uchodzić. To rozrzedzenie powietrza w środkowej części naczynia bardzo łatwo uwidocznimy, łącząc część tę z górnym końcem pionowej rurki, której drugi koniec zanurzony jest w naczyniu z wodą. Wskutek wytworzonego przez ruch obrotowy rozrzedzenia ciecz w rurce podniesie się ponad normalny poziom.

Dotąd rozważaliśmy jedynie przykłady, w których ciałom badanym nadawaliśmy pewną określoną szybkość obrotu. W ten sposób np. powstało w sznurku napięcie o wielkości, ściśle określonej uprzednio wyprowadzonym przez nas wzorem. Siła napięcia zastosowuje się więc w tych przypadkach do szybkości ruchu.

Może się jednak zdarzyć, że siła, działająca na ciało ku środkowi obrotu, t. j. siła dośrodkowa, już wskutek ubocznych okoliczności jest stale określona. Natenczas ciało będzie się poruszało po obwodzie koła jedynie przy pewnej ściśle określonej szybkości. Szybkość tę możemy również obliczyć

z powyższego wzoru. Z pierwszego równania str. 61 czytamy, że druga potęga szybkości  $v$  ma się równać liczbie, otrzymanej jako rezultat z podzielenia iloczynu  $Kr$  przez  $m$ . Wniosek ten zapisujemy wzorem:

$$v = \sqrt{\frac{Kr}{m}}.$$

Szybkość musi być tem większa, im większa jest siła dośrodkowa.

Stwierdzenie tego wyniku da się uskutecznić przy pomocy wahadła, podobnego do tego, jakim posługiwaliśmy się w pierwszym wykładzie. Podnieśmy, jak uprzednio, kulę  $A$  (fig. 14, str. 68) do pewnej wysokości w górę, nie pozwólmy jej jednak następnie swobodnie spadać, lecz popchnijmy z pewną szybkością prostopadle do płaszczyzny, po której wyprowadziliśmy ją z położenia równowagi, t. j. prostopadle do płaszczyzny  $ACM$ .

Jeżeli nadamy kuli znaczną szybkość, wtedy opisze ona wydłużoną eliptyczną linię, po której poruszając się, dosięgnie większego oddalenia od punktu  $M$ , aniżeli w punkcie  $A$ . Również w razie małej szybkości droga kuli będzie miała podobny kształt, z tą tylko różnicą, że kula zbliży się do położenia równowagi bardziej, aniżeli w punkcie  $A$ . Jedynie, w razie odpowiednio dobranej szybkości, będzie kula obracała się dokładnie po kole o promieniu  $AM$ .

Nie potrzebujemy zastanawiać się wiele, by



odgadnąć, że siła, która w tym wypadku pociąga ciało ku środkowi, jest częścią siły przyciągania kuli przez ziemię. Wielkość jej wynika z następującego prostego wykreślenia. Rozłożmy ciężar kuli  $AP$ , za pomocą przedstawionego na figurze równoległoboku, na składowe  $AQ$  i  $AR$ , z których

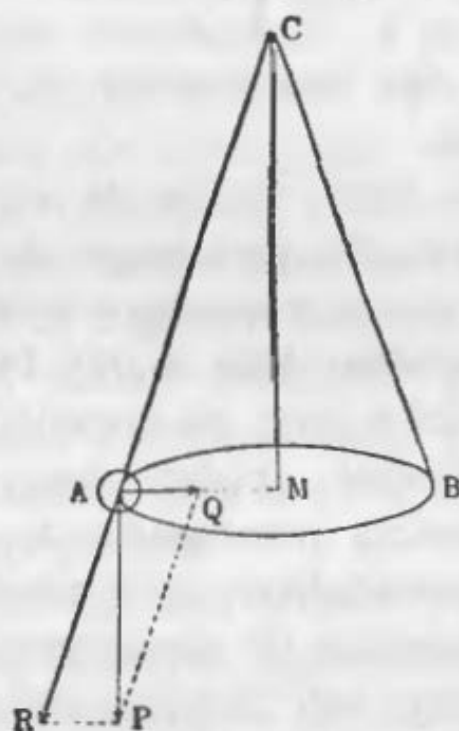


Fig. 14.

pierwsza skierowana jest ku środkowi koła, druga zaś biegnie w przedłużeniu nici wahadła. Ta ostatnia napina sznurek, nie ma jednak żadnego zgoła wpływu na ruch kuli; pierwsza zaś jest to ta właśnie siła, która zmusza kulę do obrotu po kole. Gdy jej liczbową wartość podstawimy w powyżej wyprowadzony przez nas wzór, otrzymamy szybkość, którą musimy nadać kuli  $A$ , by jej obrót

dokoła punktu  $M$  odbywać się mógł po kole o promieniu  $AM$ .

Rachunku tego nie będziemy jednak przeprowadzali, nie dla tego, by był on trudny do wykonania, lecz dla tego, że nie mamy na to czasu. Ostateczny rezultat zależeć będzie jedynie od promienia, jaki posiada koło, po którem ruch ma się odbywać. Dla każdej wartości promienia  $r$  będzie inna szybkość  $v$ , a także i inny czas obiegu. Czas ten będzie tem mniejszy, im większy jest promień koła, co łatwo sprawdzić można na tych oto dwóch jednakowych wahadłach, jeżeli zmusimy jedno z nich do obrotu po większem, a drugie po mniejszem kole.

Mam nadzieję, że z powyższych przykładów i rozważań doszliśmy do przedświadczenia, jak poznawszy ruch ciała, można zawsze wyprowadzić wnioski o sile, która nań działa. Najbardziej bijący w oczy przykład tego dają nam astronomowie, którzy z obserwacyi nad ruchem ciał niebieskich wyprowadzają dokładne wnioski o siłach, jakim ciała te podlegają. Okoliczność, że wiele ciał niebieskich krąży po drogach, odmiennych nieco kształtem od koła, daje nam możliwość skorzystać z tych badań i zapomocą bardzo skromnych środków matematycznych dojść do rezultatów, które dla naszej znajomości zjawisk natury są wogóle pierwszorzędnej doniosłości.

Zacznijmy od najbliżej nas znajdującego ciała

niebieskiego, t. j. od księżyca. Obiega on dokoła ziemi po drodze kołowej, musi więc znajdować się pod wpływem pewnej siły skierowanej ku ziemi. Nikt chyba nie wątpi, że siłę tę należy przypisać wpływowi ziemi na księżyc. Możemy więc ją nazwać siłą przyciągania ziemi.

Odrzuć jednak powstaje następujące pytanie. Wiemy już, że wszystkie ciała, znajdujące się na powierzchni ziemi, są przez nią przyciągane i mianowicie w kierunku pionowym, to znaczy, — wprost do środka ziemi. Czy jednak przyciąganie to jest tego samego rodzaju, co przyciąganie, działające na księżyc; czy można je np. przypisywać tym samym zmianom w stanie ośrodka, otaczającego zewsząd kulę ziemską, czy też jest ono zgoła czemś innem? Zdawałoby się w pierwszej chwili, że kwestya ta nie może być rozstrzygnięta dopóty, dopóki, z jednej strony nie jest znany dokładnie mechanizm przyciągania przez ziemię spadającego na nią kamienia, z drugiej zaś — nie wyjaśniony jest sposób i rodzaj oddziaływania ziemi na księżyc. Musimy się przyznać, że sprawa rozstrzygnięcia tych ostatnich pytań niestety jest od nas jeszcze bardzo oddalona. A jednak mimo to, przy bliższem rozważaniu kwestyi, dojść można w inny sposób do całkowicie pewnych wniosków. Oddziaływanie ziemi, — które należy przypisać pewnym zasadniczym przyczynom, — musi maleć z oddaleniem od ziemi, według jakiegoś stałego prawa. Jeżeli

przeto siły, które działają na księżyc i na spadający kamień, są tej samej natury, należy oczekiwać, że istnieje pewien związek, być nawet może bardzo prosty, pomiędzy siłami temi, a odległościami ciał od środka ziemi. Natomiast nie można nań rachować i nie możnaby go wogóle, — gdyby nawet istniał, — zrozumieć, jeśli tylko siły w obu tych przypadkach będą odmiennej natury. Hipoteza, że pomiędzy siłami temi istnieje pewne powinowactwo, daje się więc wypróbować. Zadanie polegać będzie na stwierdzeniu, czy rzeczywiście istnieje zależność tych sił od odległości od środka ziemi. W tym celu obliczmy wielkość siły, działającej na księżyc, na podstawie znanego już nam wzoru:

$$K = \frac{mv^2}{r}$$

Odległość księżyca od środka ziemi, t. j. promień  $r$  jego kołowej drogi dookoła ziemi, jest 60.3 razy tak wielki, jak promień kuli ziemskiej. Ten ostatni jest znany, ponieważ wymierzono obwód ziemi, wynosi on 40,000,000 m. Stąd obliczamy wartość  $r$  w centymetrach:

$$r = 384.10^8 \text{ cm } ^1).$$

Wiemy również, że księżyc odbywa swą drogę dookoła ziemi w 27,3 dniach. Ponieważ z rozmia-

---

<sup>1)</sup> Zamiast umieszczać 8 zer za ostatnią cyfrą liczby 384, prościej jest wielkość tę wyrazić powyższym iloczynem.

rów promienia tej drogi łatwo możemy obliczyć jej długość, więc, mając czas obiegu i drogę, znajdujemy szybkość. Wynosi ona:

$$v = 102300 \text{ cm na sekundę.}$$

Nieznaną nam wprowadzić jest jeszcze masa  $m$  księżyca. Hipoteza nasza zawiera jednak w sobie i to przypuszczenie, że ziemia oddziałuje na każdy gram masy księżyca w ten sam sposób, jak na powierzchni ziemi, to znaczy, że każdy gram masy księżyca oddzielnie podlega tej samej sile przyciągania. Obliczmy więc nie całkowitą siłę, z jaką ziemia przyciąga ku sobie całą masę księżyca, lecz siłę  $K$ , z jaką działa ona na pojedynczy gram tej masy, i porównajmy następnie otrzymany rezultat z tym, jaki poprzednio znaleźliśmy dla grama masy na powierzchni ziemi. A więc założmy we wzorze  $m = 1$ , i podstawmy dla  $r$  i  $v$  powyższe wartości. Wtedy otrzymamy dla siły, działającej na 1 gram masy księżyca, wartość

$$K = 0.272 \text{ dyn}$$

t. j. liczbę 3610 razy mniejszą od tej, którą wyraża się siła przyciągania masy jednego grama na powierzchni ziemi, a która, jak wiemy, wynosi 981 dyn. Lecz stosunek oddaleń punktu powierzchni ziemi i księżyca od środka ziemi wynosi 60.3. Gdy liczbę tę podniesiemy do drugiej potęgi, t. j. pomnożymy przez siebie, otrzymamy  $60,3 \times 60,3 = 3640$ . Jest to prawie tyle, ile razy



siła przyciągania na powierzchni ziemi jest większa od siły przyciągania z odległości księżyca. Mała różnica, jaka tu występuje, pochodzi od nieuwzględnienia w rachunku pewnych okoliczności, o których później jeszcze mówić będziemy. Na podstawie tego wyniku, stwierdzającego istnienie bardzo prostej prawidłowości, możemy śmiało uważać naszą hipotezę za dostatecznie sprawdzoną. Siły więc, działające na księżyc i na ciało znajdujące się na powierzchni ziemi, są wspólnego pochodzenia i tegoż samego rodzaju. Jednocześnie wyprowadziliśmy też prawo, które określa zależność wielkości tej siły od oddalenia, a mianowicie: siła przyciągania ziemi maleje do kwadratu z wzrostem oddalenia od środka ziemi, znaleźliśmy bowiem, że w oddaleniu od środka ziemi, 60 razy większem, przyciąganie jest 60<sup>2</sup> mniejsze. Możemy więc przypuszczać, że ogólnie, że gdy oddalenie wzrośnie  $a$  razy, przyciąganie stanie się  $a^2$  mniejsze.

W ten sposób zrobiliśmy krok pierwszy w znanej nauce o powszechnej sile ciężenia, ugruntowanej przez sławnego Newtona. O dalszym rozwoju jego teorii, o tem nadzwyczaj starannem porównaniu dawnych i nowszych pomiarów, dokonanych w ciągu ostatnich dwu stuleci, nie będę się tu obszernie rozwodził. Zauważę tylko, że w ten sposób, jakeśmy porównali ruch księżyca z spadającym na powierzchnię ziemi kamieniem, mo-

zna również łatwo porównać z sobą ruchy dwóch lub większej ilości księżyców, np. tych, które krążą dookoła Jowisza. Zagadnienie tak postawione ma pewne podobieństwo z pytaniem, jak zmienić się musi szybkość wahadła, gdy zmusimy je do obrotu raz po większem, a drugi raz po mniejszem kole, a więc może być rozwiązane również za pomocą powyżej wyprowadzonych wzorów (str. 67).

Jeżeli siła przyciągania, jak uczy teoria Newtona, jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu z odległości, to najbardziej oddalony księżyc Jowisza powinien mieć szybkość najmniejszą, a przytem — jak to wynika ze wzoru — kwadrat tej szybkości powinien być odwrotnie proporcjonalny do promienia drogi. Ruchy księżyców Jowisza zgadzają się z tem żądaniem teorii w zupełności, co jest dowodem tego, że siła, wywierana przezeń na sąsiednie ciała, podlega również prawu Newtona. Dalsze potwierdzenie tegoż prawa, tylko w jeszcze większych rozmiarach, znajdujemy w ruchu planet dookoła słońca. Stosunek szybkości ziemi i Jowisza jest taki, jak 2·28 do 1, a odległości ciał tych od słońca znajdują się w stosunku 1 do 5·20. Ponieważ  $5·20 = 2·28^2$ , to oczywiście potwierdza się i w tym rezultacie wszechstronność prawa Newtona. Działanie przyciągającej siły słońca jest więc identyczne z działaniem takichże sił na ziemi i Jowiszu. Gdybym nie był zmuszony dla braku czasu ograniczyć treści ni-

niejszych wykładów, chętnie mówiłbym jeszcze tutaj o istotnym kształcie dróg, po których krążą planety. Że one mniej lub więcej odbiegać muszą od kształtów koła, nie powinno to zdziwić. W pewnem określonym oddaleniu od słońca istnieć musi jedna tylko szybkość, z jaką ciało niebieskie powinno się poruszać po obwodzie koła, a każda zmiana tej szybkości musi spowodować zmianę kształtu drogi. Gdy chcemy, by wahadło krążyło po obwodzie danego koła, to nadając mu ruch, możemy nie natrafić na odpowiednią szybkość i zrobić ją albo nieco większą, lub też nieco mniejszą od wyznaczonej dla danego koła. Wtedy wahadło ruszać się będzie nie po kole, lecz po pewnej krzywej, której kształt tembardziej zbliżony będzie do elipsy, im mniej się ona oddala od położenia równowagi. Podobnie też każda planeta, podlegając przyciąganiu słońca w stosunku odwrotnym do kwadratu z jej oddalenia, opisze w rzeczywistości nie koło, lecz elipsę, jeżeli tylko jej szybkość w tem oddaleniu nie odpowiada szybkości wymaganej dla koła. Pomiedzy obu tymi przypadkami istnieje jednak ta różnica, że gdy w przypadku wahadła położenie jego równowagi przypada na środek elipsy, to słońce nie zajmuje środkowego punktu drogi planet, lecz znajduje się w pewnem oddaleniu od niego. Można z zasad mechaniki wyprowadzić, jak się to ma istotnie, jako też dokładnie oznaczyć, jak się co chwila

zmienia szybkość ruchu po eliptycznej drodze. Wszystkie te szczegóły teorii znajdują swe potwierdzenie w rzeczywistości, w spostrzeżeniach astronomicznych, albo lepiej zostały one poraz pierwszy przez Keplera z pomiarów tych wysnute, zanim jeszcze Newton znalazł klucz do ich wyjaśnienia.

Prawo Newtona w swej najogólniejszej formie tworzy wspaniałe uogólnienie. Powiada ono, że w każdej parze materalnych części obie cząstki podlegają wzajemnemu przyciąganiu, które jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu ich oddażeń. A więc prawo to nie ogranicza się jedynie do przyciągań, które wychodzą od danego ciała niebieskiego, jako od całości, lecz wnika ono daleko głębiej i uważa widomą siłę przyciągania, jako wypadkową niezliczonej ilości pojedynczych sił, wywartych oddzielnie przez pojedyncze cząstki, stanowiące całość danego ciała. Zasada ta stawia matematyce do rozwiązania zadanie obliczenia wypadkowej tych wszystkich elementarnych oddziaływań.

Dla przypadku przyciągania przez kulę, o równomiernem rozmieszczeniu jej masy w całej objętości, odpowiedź matematyki brzmi jak następuje: wypadkowa przyciągań jest skierowana wprost do środka. Wobec tego jesteśmy zupełnie usprawiedliwieni, żeśmy poprzednio w naszych rozważaniach nad spadaniem kamienia i przyciąganiem księżyca



odległość tych ciał zawsze obliczali od środka ziemi.

Na powyższych wynikach nie kończy się jednak prawo Newtona, wybiega ono dalej, aniżeli nasze dotychczasowe rozważanie. Twierdzi ono mianowicie, że przyciąganie pomiędzy obu ciałami jest wzajemne. I w samej rzeczy, dwa ciała przyciągają się zawsze obustronnie, a nie jednostronnie. Jeżeli pewne ciało wywiera na inne ciało działanie określonej wielkości i określonego kierunku, to również ulega ono samo działaniu tego drugiego ciała, w tym samym stopniu co do wielkości, lecz w przeciwnym kierunku. Jest to reguła, która się bez wyjątku stwierdza. Pewien ciężar, leżący na stole, wywiera na stół ciśnienie skierowane ku dołowi, jest jednak równocześnie z taką samą siłą uciskany przez deskę stołu ku górze. Deska i ciężar ulegają przytem w miejscach dotyku częściowym odkształceniom. Dwie kule podczas uderzania ściskają się wzajemnie, a kawałek żelaza przyciąga ku sobie magnes z taką samą siłą, z jaką magnes oddziaływa na żelazo. Jeżeli więc przedstawimy geometrycznie działanie ciała  $A$  na  $B$  (fig. 15, str. 78) za pomocą odcinka  $EF$ , to oddziaływanie ciała  $B$  na ciało  $A$  musimy również przedstawić zapomocą równego odcinka  $CD$ , skierowanego jednak w stronę ku  $B$ .

Gdybyśmy zapomocą tejże figury przedstawić chcieli działanie siły powszechnego ciężenia, lub



w szczególności, siły ciężkości ziemskiej, — w takim razie, zwiększając np. masę ciała  $B$  dwukrotnie, musielibyśmy podwoić wielkość siły  $EF$ . Wynika to, jak wiemy, już choćby z doświadczeń nad spadaniem ciał, a potwierdza się w zupełności danymi pomiarów astronomicznych. Lecz równość obu sił wymaga, by i siła  $CD$  również podwojona została. Gdy następnie zwiększymy również masę ciała  $A$ , np. trzykrotnie, to i obie siły ulegną dalszemu trzykrotnemu zwiększeniu, a więc będą wynosić teraz sześć razy tyle, co początkowo.

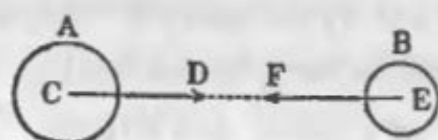


Fig. 15.

W ten sposób dochodzimy do wniosku, że wzajemne przyciąganie się dwu ciał jest proporcjonalne zarówno do masy jednego, jak i do masy drugiego ciała, a więc innemi słowy do iloczynu liczb, wyrażających wielkość tych mas.

Tę właśnie stronę prawa Newtona, obowiązany byłem dodatkowo wyłożyć tu jeszcze, by przedstawić w całej pełni doniosłość tego wielkiego odkrycia i w ten sposób zapoznać Panów z bronią, przy pomocy której astronomowie w badaniach swych nad ruchem ciał niebieskich dokonali tylu tak szczęśliwych i doniosłych zdobyczy. Poszedłbym jednak

zbyt daleko, gdybym chciał twierdzić, że na drodze tej zostało rozwikłane już wszystko. Są np. dotąd niewyjaśnione małe zboczenia od teorii w ruchu planety Merkurego. Zwracam jednak uwagę, że powyżej przytoczona pozorna niezgodność liczb 3610 i 3640 (str. 72), którejsmy w naszym rozważaniu nie uwzględnili, bynajmniej nie należy do tej kategorii faktów, znajduje ono bowiem zupełne wyjaśnienie wtedy, gdy uwzględniony zostanie istotny ruch księżyca i prawdziwy kształt ziemi. Również dobrze i z coraz to większą dokładnością dają się wyprowadzić na podstawie tej teorii drobne zboczenia od drogi eliptycznej, które są spowodowane wzajemnym przyciąganiem się wszystkich ciał układu słonecznego. W ten sposób teoretyczna astronomia jest najwspanialszym przykładem nauki, która umie przepowiadać zjawiska. O ogólnej wartości prawa powszechnego ciężenia jesteśmy obecnie tak mocno przeświadczeni, że nawet nie przejdzie nam przez myśl, by zaćmienie słońca, — jak np. to, na które wyjeżdżają obecnie astronomowie holandcy do Indyj wschodnich, — nastąpić mogło choćby o minutę wpię, albo minutę później, aniżeli zapowiedziane zostało.

To wszystko, cośmy tu o prawie Newtona powiedzieli, jestem przeświadczony, obudza w każdym z nas jeszcze jedno życzenie. Mianowicie chcielibyśmy sprawdzić doświadczalnie to twierdzenie teorii, że każde dwa ciała, a więc np.

dwa kawałki mosiądzu istotnie przyciągają się wzajemnie. Doświadczenie takie rzeczywiście wykonać się daje, choć siły, które przytem obserwować wypada, są bardzo małe. Już dość dawno Cavendish zmierzył przyciąganie, jakie wywiera kula ołowiana o masie 150 kg, a inni fizycy współcześni z bardziej udoskonalonymi środkami pomocniczymi pomiary te powtórzyli. Wymienię tu tylko badania, dokonane przez Boys'a pomiędzy rokiem 1892—95. Mały i lekki pręt poziomy, zawieszony w sposób uzmysłowiony na fig. 1 (str. 7) na cienkiej nitce kwarcowej, był opatrzony na swych końcach dwiema kulkami ze złota, wagi kilku gramów. W pewnej odległości od tych kuleczek znajdowały się kule ołowiane wagi około 7 kg. Ustawiono je tak, by wpływ przyciągania na kulki złote był możliwie wielki. I rzeczywiście, udało się z całą pewnością za pomocą tej siły wywołać drobną, a jednak dokładnie wymierną zmianę w położeniu pręcika. Jakiego talentu i wytrwałości wymagają doświadczenia tego rodzaju, — zbyteczne byłoby tłumaczyć. Uprzytomnijmy sobie tylko, że najmniejsze drgnienie podstawy przyrządu lub najsłabszy ruch powietrza w otoczeniu pręcika uniemożliwiają wykonanie pomiaru.

Wynik doświadczeń Boys'a był następujący. Dwie kulki każda o masie 1 gr, w oddaleniu 1 cm od punktów środkowych, przyciągają się z siłą,

$$\frac{6,66}{10^8} \text{ dyn.}$$

Z rezultatem tym w rękę, możemy odrazu za pomocą prawa Newtona obliczyć przyciąganie się dwóch mas dowolnej, lecz ściśle określonej wielkości z dowolnego oddalenia. Można też również z wielkości obserwowanego przyciągania, z danej masy jednego z ciał i danej wielkości wzajemnego oddalenia wyliczyć masę drugiego ciała. W ten sposób także oblicza się np. masę kuli ziemskiej. Wiemy, że przyciąga ona na swej powierzchni masę grama z siłą 981 dyn. Biorąc pod uwagę wymiary ziemi, po przeprowadzeniu odpowiedniego rachunku znajdziemy, że jej masa jest 5·53 razy tak wielka, jak masa wody o 4° Celsiusa w objętości równej objętości kuli ziemskiej.

### WYKŁAD III.

#### Ruchy drgające. Promienie świetlne.

---

Do najczulszych organów zmysłów naszych, którymi posilkujemy się w odbieraniu wyobrażeń o zjawiskach świata zewnętrznego, należą bezwątpienia organy słuchu i wzroku. Organy te odbierają wrażenia zapomocą bardzo szybkich i drobnych ruchów wahadłowych (drgań), które pochodzą z zewnątrz. Dla tego też nauka o drganiach dla każdego, kto chce sobie zdać sprawę z tego, w jaki sposób i jaką drogą spostrzegamy zjawiska świata zewnętrznego, jest pierwszorzędnej wartości. Dla fizyka ma ona doniosłość z tego względu, że obejmuje sobą nadzwyczajną mnogość faktów i zjawisk, przedstawia nadzwyczajną piękność praw i daje wreszcie możność wglądnięcia w istotę rzeczy, które przed nami otwiera.

Z chwilą, gdy wykładem niniejszym rozpoczynamy nowy rozdział fizyki, zarzucamy pole zjawisk, opartych na ruchach widzialnych, a przecho-



dzimy w nową, odmienną sferę zjawisk, gdzie nas prowadzić mają siła wyobraźni i teoria.

Lecz przejścia tego nie potrzebujemy dokonać nagle, przeciwnie możemy to uczynić stopniowo. Mówiliśmy już poprzednio o wahadle, ruszającym się miarowo tam i z powrotem, a także o wahającej się igle magnesu. Wtedy już stwierdziliśmy zgodność zupełną pomiędzy zjawiskami w obu razach. W obu też przypadkach mamy położenie równowagi i siłę, powodującą ruch ciała w stronę położenia równowagi z chwilą, gdy ciało opuszcza to położenie. Siła, podtrzymująca ruch w pierwszym przypadku, była to siła ciężkości, w drugim zaś — siła magnetyczna, ale jest przecie widoczna, że możność podobnych ruchów wahadłowych nie jest wykluczona w przypadku działania zupełnie odmiennego rodzaju sił. Ogólnie mówiąc, powstanie ruchów wahadłowych w pewnym ciele, albo części ciała, albo nawet w całym układzie ciał, jest możliwe zawsze wtedy, gdy ciało znajdzie się w warunkach tego rodzaju, że w pewnym określonym położeniu jest w równowadze, w każdym zaś innym, — a więc po wyprowadzeniu ze stanu równowagi, — podlega działaniu siły, dążącej do przywrócenia pierwotnego położenia. Siłę tę będziemy nazywali siłą popędową, a ruch siłą tą podtrzymany ruchem drgającym. Wyprowadźmy ciało, podlegające działaniu tego rodzaju siły, z położenia równowagi na pewną odległość i następnie

pozostawmy je samemu sobie. Widzimy, że dąży ono z powrotem do położenia równowagi. Ponieważ przytem działająca siła co do kierunku jest zgodna z ruchem samego ciała, ciało to poruszać się będzie ruchem przyśpieszonym. Wobec tego dochodzi ono do położenia równowagi z pewną określoną szybkością i w położeniu tem zatrzymać się raptem nie może, przeciwnie — posuwa się dalej. Z chwilą jednak, gdy ciało minie położenie równowagi, znajdzie się w tej chwili pod wpływem siły popędowej, której kierunek jest tym razem przeciwny kierunkowi ruchu. Powstać więc musi ruch opóźniony. Szybkość jego powoli maleje, aż się całkowicie wyczerpie. Wtedy ciało zaczyna znowu powracać ruchem przyśpieszonym, mija powtórnie położenie równowagi, oddala się od niego w przeciwną stronę, znowu wraca, znowu mija położenie równowagi i t. d. Łatwo zrozumieć charakter tego ruchu. Widzimy odrazu że przy dokładniejszym badaniu przedewszystkiem należy zwrócić uwagę na przeciąg czasu, podczas którego ciało przebiega tę samą drogę tam i z powrotem, t. j. na tak zwany okres wahnienia. Jeżeli czas ten (jednego wahnienia) ma być określony za pomocą rachunku, co jest w istocie możliwe, to należy wziąć pod uwagę: wielkość siły poruszającej (popędowej) i masę poruszanego ciała. Już poprzednio (str. 21) zwróciliśmy uwagę na to, że dodanie pewnej masy, która sama nie ulega

działaniu siły ciężkości, powoduje zmniejszenie szybkości wahnień. Ten sam wpływ masy objawia się zarówno i we wszystkich innych przypadkach, w których siła popędowa zachowuje dawną swą wielkość, a więc nie ulega zmianie wskutek dodania masy. Jeżeli jednak przeciwnie masa pozostaje stałą, a zwiększy się siła popędowa, wtedy oczywiście ruch ciała w kierunku położenia równowagi będzie odbywał się szybciej, a wskutek tego i wahnienia staną się prędsze. Można to łatwo sprawdzić, obserwując ruch igły kompasowej, której obraz widzimy w tej chwili na ekranie. Pod wpływem wyłącznie siły ziemskiego magnetyzmu waha się ona powoli. Jeżeli jednak siłę tego ostatniego wzmocnimy przybliżeniem magnesu sztucznego, ruchy igły kompasu staną się szybsze.

Najpierw rozpatrzmy jeszcze kilka przykładów ruchu wahadłowego, odbywającego się pod wpływem siły ciężkości. Oto są dwie kule, przywiązane do sznurków w różnych punktach, końce zaś sznurka umocowane są w dwóch, na tej samej wysokości położonych punktach. Obok widzimy rurkę szklaną mającą kształt litery U, w której pewną ilość wody można pobudzić do przelewania się z jednego ramienia w drugie i z powrotem. Z wahniętami temi porównać możemy np. kołysanie się wody w naczyniu, gdy powierzchnia cieczy to z jednej, to z drugiej strony kolejno dosięga najwyższego swego położenia.

W innych znowu razach w grę wchodzi sprężystość ciała. Przez nazwę tę rozumiemy siły, działające pomiędzy oddzielnymi cząsteczkami ciała. Powstają one wskutek przesunięcia cząstek ciała względem siebie, t. j. wskutek jego odkształcenia, i starają się nadać mu pierwotny stan równowagi. Komu z nas nie są znane np. wahnienia deski, podpartej na dwóch końcach, i wskutek kołysania się wyginającej się to w górę, to w dół, albo drgania pręta stalowego, umocowanego jednym swym końcem w nieruchomej podstawie. Znany jest też każdemu instrument muzyczny, noszący nazwę cymbałków, w którym drgania płytek metalowych wywołujemy oderzeniem młoteczka. Wprost uderzające w oczy podobieństwo do powyższych przykładów widzimy w drganiach płyt i dzwonów.

Bardziej jednak proste stany ruchu drgającego napotykamy w napiętych sznurach, np. w strunach instrumentów smyczkowych. W ruchach strun możemy zarazem obserwować, że jedno i to samo ciało, zależnie od warunków, może drgać w sposób rozmaity, a mianowicie — podlegać drganiom o okresach większych, lub mniejszych. Napięta struna drga przedewszystkiem swą całkowitą długością. Wtedy w położeniu największego wychylenia ma ona kształt, przedstawiony w górnej części fig. 16 pełną linią *ADB*.

W drugim zaś przeciwległym położeniu największego wychylenia przyjmuje symetryczne po-

łożenie  $AD'B$ , przedstawione linią przerywaną. Punktu  $C, D, E$  struny poruszają się tam i z powrotem po liniach prostych  $CC', DD', EE'$ , prostopadłych do długości napiętej struny. Łatwo zrozumieć, co stanowi tu siłę popędową. Zwróćmy uwagę naszą przedewszystkiem na środkową część struny, w położeniu jej największego wychylenia, przedstawionego pełną linią  $ADB$ . Ta część struny

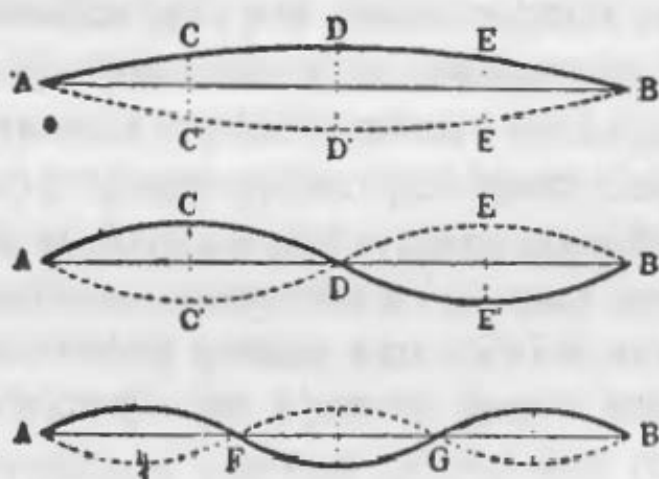


Fig. 16.

napięciami pozostałych części z obu stron ściągana jest oczywiście na dół. Wypadkowa obustronnych tych ciągnięć popycha więc środkową część struny ku położeniu równowagi (str. 54).

Ale ta sama struna może drgać i w inny sposób; mianowicie może ulec podziałowi na dwie części, z których każda osobno drga w ten sam sposób, jak poprzednio struna w całości, z tą tylko różnicą, że podczas gdy jedna jej część wychyla się w stronę prawą, w tym samym czasie część



druga wychyla się w stronę lewą. Rysunek środkowy powyższej figury przedstawia właśnie ten przypadek. Środkowy punkt struny pozostaje stale w spokoju. Łatwo to zrozumieć, jeżeli przypomnimy sobie, że jest to punkt przyciągany jednocześnie przez napięcia obu sąsiednich części struny z równą siłą, ale w prost przeciwnych kierunkach. Punkt taki, nie ulega ruchowi podczas drgania struny, nosi on nazwę węzła, natomiast punkty *C* i *E* są punktami, które doznają największych wychyleń: tu się tworzą wzdęcia struny.

Rysunek trzeci tej samej figury przedstawia wreszcie drgania struny, która podzieliła się aż na trzy równe części. Widzimy tu aż dwa węzły w punktach *F* i *G* i trzy punkty pośrednie, w których cząstki struny doznają największych wychyleń. W ten sam sposób możemy postępować dalej i narysować odpowiednie figury o trzech, czterech i większej ilości węzłów. We wszystkich tych przypadkach drgająca struna przybiera postać krzywej linii, zwanej linią falistą.

A teraz powstaje pytanie, co dzieje się w takich przypadkach z okresem wahnień, albo innymi słowy, z ilością drgań na sekundę. Jest rzeczą jasną, że czas ten obliczyć będzie można, mając podane: długość struny, jej masę oraz siłę jej napięcia. Sądzę, że nie potrzebuję na tem miejscu powtarzać znowu, jaką rolę odegra tu masa struny. Również z łatwością oryentujemy się, że

liczba drgnień na sekundę wzrośnie, skoro tylko struna będzie mocniej napięta. Wtedy bowiem cząstki struny z większą siłą będą popychane ku położeniu równowagi. Muszę jednak jeszcze dodać tylko, że w strunach sporządzonych z tego samego materiału, a posiadających tę samą grubość i tak samo mocno napiętych, ilość drgnień na sekundę będzie tem mniejsza, im struna będzie dłuższa i odwrotnie tem większa, im struna będzie krótsza. A więc mamy tu znowu do czynienia z bardzo prostą prawidłowością: ilość drgnień jest odwrotnie proporcjonalna do długości ciała drgającego. Prawo to możemy wreszcie uzupełnić następującą ogólną uwagą: każde zmniejszenie rozmiarów drgającego ciała prowadzi do zwiększenia ilości drgnień na sekundę.

Z powyższego rozważania widzimy, że jesteśmy w posiadaniu rozmaitych sposobów, dających nam możność zwiększenia, lub zmniejszenia ilości drgnień na sekundę. A właśnie od ilości tych drgnień zależeć będzie, czy drgająca struna wyda dźwięk, czy też go wcale nie wyda. Widzimy np. dobrze drgania powolne, jakim ulega długi a mało napięty sznurek, ucho nasze nie odbiera tu jednak jeszcze żadnego wrażenia. Dopiero, gdy ich ilość dosięgnie liczby 15 na sekundę, poczynamy drgania te odczuwać jako głos. Zdolność tę ucho nasze zachowuje i dla drgań częstszych, aż

do 36,000 na sekundę. Poza tą liczbą ustaje znowu wrażliwość ucha. W powyższych więc granicach częstości znajdują się drgania, dochodzące do nas przez powietrze a odczuwane jako wrażenia głosowe. Gdy przytem ruch, o którym mowa, składa się z równomiernych, kolejno po sobie następujących, a niczem nie zmaconych drgań o tej samej częstości — nazywamy go *tonem muzycznym*. Jest on tem wyższy, im częstość drgnień na sekundę jest większa.

Każda struna drga całością w przypadku, gdy wydaje tylko jeden określony ton, tak zwany *ton zasadniczy*; tworzy ona wtedy jedno tylko wzdęcie w środku swej długości. Wysokość tonu struny regulujemy zmianą jej napięcia. Czynność tę nazywamy *strojeniem*. Ale, jak wiemy, też sama struna może drgać i częściami. Ponieważ każda połowa struny drga wtedy oddzielnie, rzecz cała ma się więc tak samo, jak w strunie drgającej całością, lecz o połowę krótszej. Ilość więc drgnień musi być tym razem dwa razy większa, aniżeli ilość drgnień tonu zasadniczego. Ton ten nosi nazwę *pierwszego harmonicznego tonu struny*. Możemy też otrzymać i dalsze tony harmoniczne — drugi, trzeci, czwarty i t. d., gdy strunę zmusimy do drgnień w trzech, czterech, pięciu i t. d. częściach. Ilość drgnień tych dalszych tonów harmonicznych jest: trój, cztero, pięcio i t. d. — krotną ilością drgnień tonu zasadniczego. W muzyce pierw-

szy ton harmoniczny nazywa się oktawą primy, czyli tonu zasadniczego, drugi — kwintą oktawy, trzeci — oktawą oktawy i t. d.

Wszystkie te tony możemy z łatwością słyszeć oddzielnie. Należy tylko jedną i tę samą strunę raz wstrząsnąć wtedy, gdy jest ona zupełnie swobodna, a następnie potrącić, przytrzymując zlekka palcem w odległościach, równych połowie, trzeciej, czwartej i dalszych częściach całości.

W połączeniu z kwestyą wysokości wywołanego tonu stoi w parze jeszcze i inna, godna uwagi prawidłowość. Zwykle proste wahadło, którem już niejednokrotnie posługiwaliśmy się, w naszych doświadczeniach, porusza się prawie taksamo szybko bez względu na to, czy odchylimy je więcej, czy też mniej. Znaczy to, że wymaga ono tegoż samego przeciągu czasu na przejście drogi tam i z powrotem. Ma to jednak miejsce tylko wtedy, gdy łuk, po którym obiega, nie jest zbyt duży. Dwa więc wahadła jednakowej długości, wychylone niejednakowo — zachowują mimo to zupełną zgodność w swych ruchach. Prawidłowość ta nosi w nauce nazwę izochronizmu drgań. Moglibyśmy wyprowadzić ją z znanych nam już zasad mechaniki, zechcemy jednak poprzestać jedynie na krótkim wyjaśnieniu sprawy. W wahadle, wyprowadzonym z położenia równowagi, możemy siłę ciężkości, działającą w kierunku pionowym, rozłożyć na dwie siły składowe — jedną w kierunku nici wahadła, drugą —



w kierunku prostopadłym do poprzedniego, a więc w kierunku stycznym do łuku koła, po którym się ruch odbywa. Z odpowiedniego rysunku widzimy wtedy, że ta właśnie składowa, która jest tutaj siłą popędową wahadła, staje się tem większa, im większy jest kąt odchylenia wahadła, t. j. kąt, jaki tworzy nić odchylonego wahadła z linią pionową. Dwa jednakowo długie wahadła, odchylone nierówno, mają do przebycia drogi nierówne: droga wahadła wyżej wzniesionego będzie w każdym razie dłuższa, aniżeli droga wahadła wzniesionego niżej, ale też i siła popychająca pierwsze wahadło będzie większa, aniżeli siła popędowa wahadła drugiego. Większa zaś siła nada i większą szybkość, a więc dwa te wpływy zrównoważą się wzajemnie. Stąd też czas wahnienia pozostać musi ten sam, t. j. dla obu wahadeł równy.

Mówiąc ogólnie, siła popędowa zawsze wzrasta z wielkością oddalenia ciała od położenia równowagi. A więc siła sprężysta jakiegoś ciała nabiera tem większej wartości, im więcej cząstki ciała względem siebie zostaną przesunięte, innemi słowy im ciało to ulegnie większemu odkształceniu. Tak samo jest i w innych przypadkach. Ten właśnie przyrost siły popędowej sprawia, że we wszystkich dotychczas zbadanych przypadkach ruchu wahadłowego, a także w ciałach brząkających, o ile tylko ruch drgający nie jest zbyt gwałtowny, drgania mniejsze i większe wymagają tegoż samego



przeciągu czasu. Ton więc utrzymuje się stale na tej samej wysokości, bez względu na to, czy cząstki ciała brzącego przebiegają drogi krótsze lub dłuższe, czy więc posiadają większą, czy mniejszą amplitudę drgań, albo, co na jedno wychodzi, czy będą to tony słabsze, czy silniejsze. Bez jakiegokolwiek bądź przesady śmiało twierdzić możemy, że ta właściwość ruchu drgającego jest jednym z niezbędnych warunków naszej muzyki. Gdyby właściwość ta nie istniała, w takim razie wywołanie pewnego określonego tonu na organach lub fortepianie dałoby się skutecznie użyciem siły tylko określonej wielkości, i gdyby wywołany ton słabnął powoli, zmieniałby się musiała i jego wysokość.

Wypada mi jeszcze pokazać, że struna, na której przed chwilą wywołałem różne tony harmoniczne, rzeczywiście wykonywa ruchy, przedstawione na rysunku fig. 16. Przekonać się o tem można, umieszczając na strunie w pewnych odstępach małe siodełka papierowe i następnie pobudzając ją do drgań. Siodełka pospadają ze struny, lecz nie wszystkie: pozostaną te, które znajdowały się na węzłach. Ponieważ jednak z od dali doświadczenie to nie dla wszystkich jest widoczne, lepiej więc zamiast struny użyć dłuższego od niej, a mniej napiętego sznurka. Można go łatwo wprowadzić w ruch wahadłowy w następujący sposób. Jeden koniec sznurka należy umocować

nieruchomo, drugi zaś potrącać miarowo za pomocą ręki, albo jeszcze lepiej — jeden koniec sznurka przytwierdzić do ramienia widełek strojowych, drugi zaś przerzucić przez mały bloczek i opatrzyć odpowiednim ciężarkiem. Po wprowadzeniu w ruch widełek strojowych, obserwować można już zdaleka powstanie w równych odstępach węzłów i wzdęć.

Ruch samych widełek strojowych, których używaliśmy do tego doświadczenia, jest również ruchem drgającym, a odbywa się w ten sposób, że jednocześnie oba ramiona widełek kolejno to nachylają się ku sobie, to odbiegają od siebie. Wygięcie wewnętrznej części pręta zgiętego w kształcie litery U w czasie drgania widełek ulega rytmicznej zmianie i albo wzrasta, albo też maleje. Siła popędowa pochodzi głównie od sprężystości tej właśnie środkowej części pręta.

To drganie widełek strojowych można doskonale uwidocznić za pomocą tak zwanej metody graficznej. Metoda ta w badaniach nad zjawiskami ruchu wielokrotnie oddaje niepospolite usługi. Oto mamy tu walec, oparty na poziomej osi, a owinięty arkuszem okopconego nad świecą papieru. Walec ten obraca się łatwo dookoła swej osi. Umieśćmy na końcu jednego z ramion widełek strojowych mały ostry rysik albo małą szczecinkę, i przystawmy widełki tak do powierzchni walca, by koniec rysika zlekka dotykał papieru. Potrą-

ćmy teraz widełki, a wydadzą one ton pewien. W razie drgań ramienia widełek wzdłuż osi walca, rysik kreślić będzie białą poziomą kreskę, odpowiadającą co do długości amplitudzie drgań. Gdyby widełki nie wydawały tonu, a więc nie drgały rysik kreśliłby na papierze obracanego walca linię prostą. Jeżeli jednak jednocześnie z ruchem walca odbywać się będą i drgania rysika, i natenczas rysik wychylać się będzie kolejno to w lewo, to w prawo od linii prostej, i na papierze powstanie linia falista, znacząca wahadłowy ruch widełek. Możemy ją teraz zbliższa dokładnie rozpatrzyć. Linię tę moglibyśmy oczywiście otrzymać również dobrze i w inny sposób, np. na płaskiej płytce szklanej; musielibyśmy tylko drgające widełki strojowe, opatrzone jak powyżej rysikiem, w odpowiedni sposób przesuwając po zakopconym szkłe. Powstałby wtedy diagram linii falistej, który z łatwością daje się powiększyć w przyrządzie projekcyjnym. Oba sposoby zapisywania linii falistej, mają pewne podobieństwo do następującej bardzo prostej czynności. Gdy idąc, poruszamy po piasku miarowo w lewo i w prawo końcem kija, kreślimy wtedy na jego powierzchni krzywą, mającą również kształt fali.

Na linii, wykreślonej drgającym ramieniem widełek strojonych na powierzchni obracającego się walca, rozpoznajemy dokładnie wszystkie szczegóły ruchu. Porachujmy liczbę zagłębień, lub wy-

pukłości po jednej stronie tej linii, a będziemy wiedzieli, ile drgań odbyło się podczas jednego obrotu walca. Znając zaś szybkość obrotu walca, potrafimy obrachować, ile drgnień przypadło na przeciąg jednej sekundy. Szerokość nakreślonej fali poucza nas dalej, jak wielką była amplituda tych drgań. Na tej oto linii, która w analogiczny sposób nakreślona została, pochodzi jednak nie od widełek strojowych, lecz od innego ciała brzącego, widzimy kolejno to słabsze, to silniejsze drgania. Na tych liniach obserwować się dają nawet najdrobniejsze szczegóły ruchu dgrającego. Gdy np. rysik, poruszając się pomiędzy krańcowymi punktami swej drogi, zmienia w tym czasie swój kierunek, t. j. zawraca, a potem znowu posuwa się naprzód, wtedy nakreślona przezeń linia falista odtwarza to w sposób, który z łatwością wyobrazić sobie można.

I w wielu innych przypadkach badania ruchów metoda graficzna oddaje nam wielkie usługi. Fizyologowie zapisują np. ruchy oddechowe, uderzenia pulsu i t. d., przenosząc je w ten lub inny sposób na ruch piszącego rysika, dotykającego powierzchni obracającego się walca. Nawet ruchy bardzo powolne dają się utrwalić w podobny sposób. Tylko w tym razie należy uważać, by i ruch walca był dostatecznie powolny, co najłatwiej utrzymać się daje za pomocą odpowiedniego mechanizmu zegarowego. W taki też sposób na wielu

stacjach meteorologicznych zapisują się automatycznie linie krzywe, odtwarzające ruchy barometru w sposób ciągły, z chwili na chwilę.

A teraz, gdy przy pomocy metody graficznej poznaliśmy już dokładnie ruch drgających widełek strojowych, należy zdać sobie sprawę z tego, jak drgają cząstki powietrza w pudełku rezonacyjnym, do którego widełki te są przytwierdzone. Pudełko to ma zwykły kształt wydłużonego prostopadło-

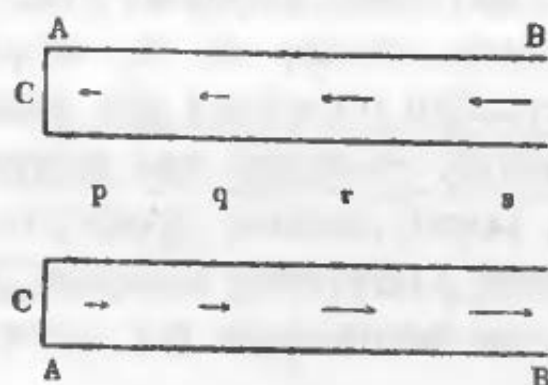


Fig. 17.

ścianu i jest na jednym końcu otwarte. Ruch powietrza, w nim zawartego, polega prosto na tem, że podczas drgania widełek w danej chwili cząstki powietrza posuwają się wzdłuż pudełka w jednym kierunku, np. nazewnątrz, a następnie w przeciwnym — ku wewnątrz i tak dalej naprzemian. Fig. 17 uzmysławia to w następujący sposób.

Strzałki nakreślone wewnątrz pudełka przedstawiają rozkład i szybkość cząstek powietrza i wskazują zarazem kierunek ruchu, który, jak widzimy,



na górnym rusunku jest wprost przeciwny do kierunku na rysunku dolnym. Ta zmiana kierunku ruchu następuje w odstępach czasu, równych połowie całkowitego okresu drgania. Względna długość strzałek wyraża różnicę w szybkości w różnych punktach powietrznego słupa. Szybkość ta w okolicy  $s$  jest największa, a tuż przy tylnej ścianie  $p$  najmniejsza. W jaki sposób ruchy drgających widłek przeniesione zostały na ruch powietrza w pudełku, tego na razie rozważać nie będziemy. Zwróćmy jedynie uwagę na to, skąd pochodzi w danym przypadku popędowa siła, podtrzymująca drganie powietrza. Pochodzi ona mianowicie stąd, że powietrze, skoro zostanie zgęszczone, wywiera większe ciśnienie, i odwrotnie mniejsze, gdy ulegnie rozrzedzeniu, w porównaniu do pierwotnego ciśnienia.

A więc, gdy w ten lub inny sposób cząsteczki powietrza zostaną wychylone ze swych położeń równowagi i popchnięte ku wewnętrznej części rury głosowej, wtedy na przeciwnym jej końcu, przy ścianie tylnej, nastąpić musi zgęszczenie warstw powietrza. Powstanie wskutek tego większe ciśnienie, które starać się będzie do popchnięcia cząstek powietrza z powrotem ku ich dawnym położeniom równowagi. Lecz wzbudzony w ten sposób ruch cząstek nazewnątrz wywoła rozrzedzenie warstw przylegających do ściany tylnej i w miejscu tem powstanie teraz zmniejszenie ciśnienia. Pociągnie

to znowu za sobą ruch powietrza do wnętrza rury, a to wskutek nadmiaru ciśnienia panującego nazewnątrz i t. d.

W analogiczny sposób powstać mogą wahania powietrza i wzdłuż rury, otwartej na obu końcach. Stan powietrza w rurce przedstawia fig. 18. Pośrodku mamy węzeł. Częstki powietrza ruszają się tu w kierunkach, uwidoczniionych zapomocą strzałek. Kolejno, co pół okresu, zmieniają jednak kierunek ten na przeciwny, a więc cząstki te dążą z obu stron

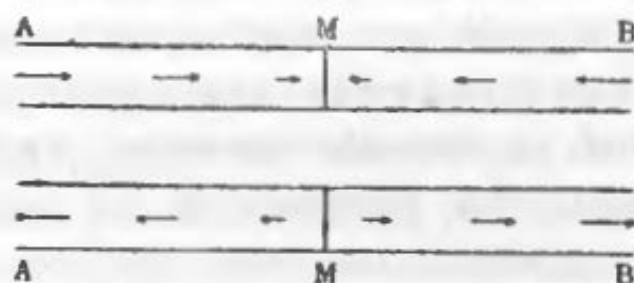


Fig. 18.

ku węzłowi, to przeciwnie od niego odbiegają. W pierwszym przypadku w węźle utworzyć się musi zgęszczenie powietrza, w drugim zaś przeciwnie — rozrzedzenie. Że w tym przypadku powstawać muszą na tem samem miejscu kolejno następujące po sobie różnice ciśnień, rzecz to jasna. W tem leży właśnie przyczyna siły popędowej. Nie będziemy tu rozpatrywali innych możliwych, a bardziej zawitych przypadków rozmieszczenia węzłów w rurce głosowej, zauważmy jedynie, że ma to miejsce w pieszczalkach organów i we wszyst-

kich innych instrumentach dętych, wogóle tam, gdzie ma się do czynienia z drganiami słupów powietrznych. We wszystkich tych przypadkach można zawsze obliczyć szybkość wahań, należy tylko wiedzieć, jak się zmienia ciśnienie powietrza w zależności od zgęszczenia lub rozrzedzenia. Obliczenie to wychodzi z pewnego równania, które podaje, jak się zmienia szybkość pewnej ilości powietrza o danej masie, w zależności od danej różnicy ciśnienia.

Po rozpatrzeniu powyższych przykładów ruchu drgającego, wypada nam zająć się teraz dokładniej kwestią przenoszenia się tych ruchów na odległość i wogóle kwestią zaburzeń równowagi. To przenoszenie się ruchów od cząstki do cząstki może mieć miejsce zarówno w ciałach stałych, płynnych jakoteż i gazowych. Polega ono na tem, że zawsze, skoro gdzieś w ciele, w pewnej ograniczonej jego przestrzeni, wywołane będzie zakłócenie równowagi, — przez przesunięcie cząstek w pewnym kierunku, — powrotowi tych cząstek do dawnego położenia towarzyszyć będzie zawsze przeniesienie się dalszych cząstek w tym kierunku, w którym pierwsze popchnięte zostały. Te dalsze cząstki przenoszą następnie nadane im przesunięcia tak samo na jeszcze dalsze sąsiednie cząstki. W ten sposób obejmuje zaburzenie równowagi coraz to dalsze miejsca, coraz to bardziej oddala się od punktu wyjścia. S z y b k o ś ć p o s u -

wania się zaburzeń równowagi mierzy się drogą, przebytą w ciągu 1 sekundy. Zależy ona od wielkości sił, które zwracają wychylone cząsteczki ku ich położeniom równowagi, jakoteż od wielkości masy, która ma być w ruch wprawiona. Im siły te są większe, tem prędzej nastąpi powrót ku położeniom równowagi i przez to w tym krótszym czasie odbędzie się to samo zjawisko. Natomiast wielkość masy wywrzeć musi w danym razie wpływ wprost przeciwny.

W ten sam zupełnie sposób, jak się rozchodzą pojedyncze jednorazowe zakłócenia równowagi, rozchodzić się może i cały szereg kolejno po sobie następujących zakłóceń. Biegają one po wszystkich liniach, wzdłuż których postępują zaburzenia.

Proste i powszechnie znane każdemu przykłady mogą to wszystko dobrze objaśnić. W zwykłych falach, biegnących po powierzchni wody, siłą popędową jest siła ciężkości. Gdy część popowierzchni cieczy, znajdującej się w zupełnem spokoju zostanie w ten lub inny sposób podniesiona do góry i następnie puszczone swobodnie, — to wskutek działania siły ciężkości spadać ona pocnie ku dołowi. Jednocześnie jednak wytworzy się dokoła pierścieniowy grzbiet fali, ponieważ wtłoczona w tem miejscu w dół woda musi wypchnąć do góry sąsiadujące z nią cząstki cieczy. Gdy następnie grzbiet ten pocnie się opuszczać na dół i znikać, dalsze cząstki cieczy dokoła zni-

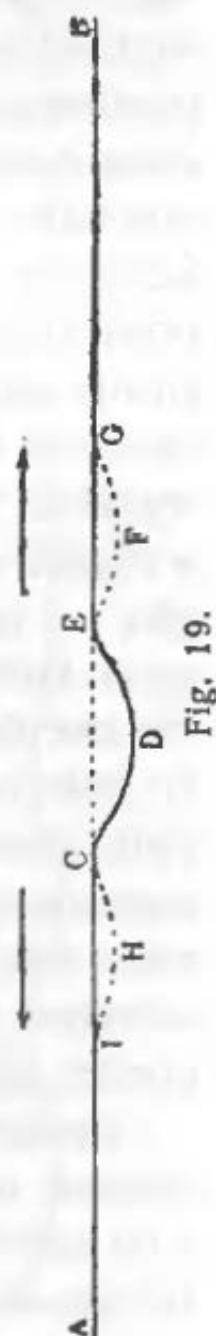
kającego pierścienia poczną się podnosić do góry i wytworzyć nowy grzbiet. Ruch ten w sposób ciągły przenosi coraz to dalej, i widzimy, jak grzbiet fali obejmuje coraz to większe koła. Analogicznie wciśnięcie pewnej części swobodnej i nieruchomej powierzchni wodnej powoduje powstanie pierścieniowego zagłębienia, posuwającego się z jednostajną szybkością we wszystkich kierunkach powierzchni. A gdy nareszcie w pewnym miejscu lustrzanej powierzchni wodnej będziemy kolejno wywoływali to podniesienia to zagłębienia tejże, wytworzymy przez to na tem miejscu źródło kolejno po sobie wychodzących grzbietów i dolin. Łatwo sprawdzić to można, rzucając np. kamień na spokojną powierzchnię wodną. Niech przytem pływa po niej klocek drzewa; nadpływająca fala zakłóci go, kolejno podrzucając i opuszczając. Nie posunie go jednak naprzód. Klocek pozostaje na tem samem miejscu a tylko fale pod nim się toczą. Zjawisko to wyjaśnia nam dokładnie, jaka jest różnica pomiędzy ruchem fali, a ruchem cząstek wody, po której fala przebiega.

Tak samo, jak na lustrzanej powierzchni wodnej, występuje powyższe zjawisko w napiętym sznurze, a nawet jest ono w tym przypadku nieco prostsze. Wyobraźmy sobie, że raptownem uderzeniem potraciliśmy pewien punkt rozpiętego sznurka  $D$  ku dołowi (fig. 19). W miejscu tem powstaje natychmiast zagłębienie  $CDE$ . Cząstki sznurka



przy  $D$  wskutek zwiększonego napięcia w sąsiednich cząstkach, zostają pociągnięte ku górze (str. 87). Ze swej strony wywierają one na te cząstki ciążenia ku dołowi. Za chwilę znika pierwotne zagłębienie, lecz na miejsce jego powstają nowe zagłębienia  $IHC$  i  $EFC$ .

Zagłębienia te posuwają się coraz to dalej w lewo i prawo. Godnem uwagi jest to, że cząstki w części  $D$  powrócą do pierwotnego położenia równowagi, ale go nie przekroczą, t. j. krzywa  $CDE$  przyjmie kształt prostej  $CE$ . Jest to wynikiem tego, że cząstki sznurka są tu w inny sposób pociągane ku położeniu równowagi, jak w kołyszącej się strunie. Jak tylko bowiem cząstki przy  $D$  zbliżą się nieco ku położeniu równowagi, już sąsiednie cząstki przy  $C$  i  $E$  zostaną zagłębione i swym napięciem powstrzymywac będą coraz to bardziej powrotny ruch cząstek przy  $D$ . W ten sposób ruch tych ostatnich, rozpoczęty początkowo z wzrastającą szybkością, zaczyna maleć i zanika wreszcie zupełnie z chwilą, gdy punkt  $D$  znajdzie się na poziomie prostej  $CE$ .

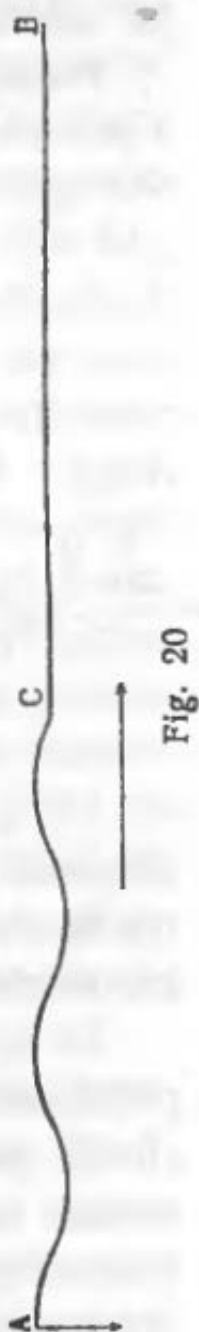


Toż samo powtarza się w częściach sznurka, leżących po prawej i lewej stronie pierwotnego zagłębienia: skoro tylko powstanie w nich na chwilę zagłębienie, bezpośrednio po nim następuje wyprostowanie się cząstek wzdłuż linii równowagi. Znamionem objawem jest tu również i to, że powstałe fale *IHC* i *GFC* rozbiegają się wyłącznie w prawo i lewo, nie dają jednak nigdy fali powrotnej, co musiałoby nastąpić, gdyby choć na chwilę stały się one powodem cofających się wstecz zaburzeń równowagi. Ponieważ nie mam możliwości wyjaśnić wszystko to dokładnie, — dałoby się to wykonać na podstawie zasadniczych praw mechaniki, — ograniczam się więc na razie do powyższych krótkich wskazówek. Sądzę jednak, że wystarczą one do wytworzenia należytego pojęcia o tem, co stanowi istotę rzeczy. Okoliczność, że zakłócenia równowagi, przebiegając przez ciało, nie pozostawiają po sobie śladu, upraszcza niezmiernie rzecz całą. Nie jest to zjawisko ogólne, aczkolwiek powtarza się w większości wypadków, o których poniżej mówić zamierzamy.

Zamiast wprowadzać w ruch środkową część napiętej nici, możemy toż samo uczynić z jednym z jej końców. Oto przytwierdzam kauczukową rurkę jednym końcem do mocnego haka, a drugi naciągam ręką. W ten sposób napinam całą rurkę. Gdy teraz raptem uderzę rurkę w pobliżu ręki, albo wprost wstrząsnę ręką, którą trzymam koniec

rurki, wytworzę w tem miejscu zagłębienie, po-  
 suwające się wzdłuż po rurce. Przypuszczam,  
 że jest to widoczne nawet z bardziej  
 oddalonych miejsc sali, zresztą do-  
 świadczenie to łatwo każdy z nas  
 sam wykonać potrafi, a rurkę kau-  
 czukową sznurkiem zastąpić może.  
 Powtarzając je kilkakrotnie, przeko-  
 nujemy się dalej, że przebieg fali  
 jest tem szybszy, im rurka jest bar-  
 dziej napięta. Wynika to, jak wiemy,  
 z ogólnych wymagań teorii (str. 101).  
 Zauważymy przytem, że fala, po doj-  
 ściu do przeciwległego końca rurki,  
 zostaje przezeń odbita z powrotem.  
 Biegnie ona teraz w kierunku ku  
 ręce, a chociaż może nie jest już  
 tak dobrze widoczna, jednak odczu-  
 wać się daje, uderza bowiem w rękę  
 i wstrząsa nią nieco. Następnie odbije  
 się od ręki powtórnie i to samo po-  
 wtarza się dalej.

Gdybyśmy chcieli wywołać trwałe  
 wahania cząstek na całej długości nici,  
 moglibyśmy to uczynić również bar-  
 dzo prosto w następujący sposób. Po-  
 ruszajmy miarowo końcem rurki, trzymanym w rękę,  
 to w jedną, to w drugą stronę. W ten sposób wywo-  
 łamy zjawisko zupełnie podobne do rozchodzenia się



dolin i grzbietów na powierzchni wody. Fig. 20 przedstawia chwilę, w której tylko nieznaczna ilość fal zajęła część drogi od  $A$  do  $C$ .

Poruszajmy jednak ręką dalej bez przerwy, a fala coraz to dalej posuwać się będzie. Wkrótce dosięgnie przeciwnego końca rurki. Od tej chwili zjawisko całe staje się bardziej skomplikowane. Następuje spotkanie się fal odbitych z falami postępującymi naprzód. Aby uniknąć zawikłania sprawy, pomyślmy sobie, że nasza rurka jest nieskończenie długa. Wtedy otrzymamy falistą linię dowolnej

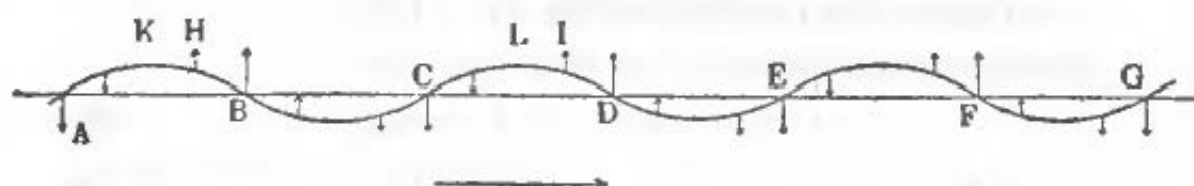


Fig. 21.

długości, której część przedstawia fig. 21. Strzałki tej figury oznaczają szybkości cząstek co do ich każdorazowego kierunku i wielkości.

Że są one narysowane dobrze, o tem się łatwo przekonać możemy. By otrzymać kształt nici dla chwili następnej po tej, którą przedstawia rysunek, należy wyobrazić sobie całą linię falistą przesuniętą nieco w stronę postępu fali. Punkt  $H$ , który dojść ma do wierzchołka grzbietu, znajdującego się w tej chwili w punkcie  $K$ , istotnie poruszać się musi do góry, a więc w kierunku zaznaczonym strzałką.

A teraz zamieńmy w myśli nasz nieskończenie długi sznurek również na długi pręt, z jakiegokolwiek bądź sprężystego materiału np. drzewa, szkła, albo metalu. Uderzmy raptownie młotkiem dostępny nam koniec pręta w kierunku jego długości. Bezpośrednim skutkiem tego uderzenia będzie ściśnięcie się, czyli zagęszczenie najbliższych znajdujących się cząstek. Gdy ta część pręta, dzięki sile sprężystej, pocznie następnie się rozszerzać, dalsza część zostanie w ruch wprowadzona i ulegnie przez to ściśnięciu. W ten sposób wywołane zgęszczenie posuwać się będzie coraz to dalej wzdłuż pręta. Toż samo stanie się i z rozrzedzeniem, które wywołamy, gdy wolny koniec pręta raptem pociągniemy ku zewnętrznej stronie. Tak samo wreszcie mogą przesuwać się kolejno po sobie następujące wahnienia, bez względu na to, czy cząstki podlegające drganiom poruszać się będą w kierunku długości pręta, czy też otrzymają wychylenia w kierunku poprzecznym do tej długości.

Od pręta przejść możemy dalej do ciała, które rozciąga się we wszystkich kierunkach. Gdy w którymkolwiek jego punkcie wprowadzimy cząstki w ruch, to wywołane zaburzenie równowagi w tejże chwili rozszerzać się pocznie we wszystkie strony, ale oczywiście, w porównaniu do pręta, będzie ono szybko maleć z oddaleniem od punktu wyjścia.



To rozchodzenie się wywołanego w ciałach stałych zaburzenia równowagi możemy obserwować bardzo często. Słyszymy np. wyraźnie uderzenia kieszonkowego zegarka, gdy przystawimy go do jednego końca dłuższego pręta, a drugim końcem dotkniemy ucha. Zastanawiając się nad tem zjawiskiem, wnioskujemy, że każde uderzenie zegarka przebiega po pręcie. Pukanie, albo stukanie w ścianę rozchodzi się po murze na wszystkie strony, a wstrząśnienie skorupy ziemskiej w pewnem miejscu przebiega znaczną część jej powierzchni. Za pomocą bardzo czułych przyrządów mierniczych, które do tego celu służą i wskazują drgania powierzchni ziemi tak słabe, że je bezpośrednio odczuć nie jesteśmy w stanie, stwierdzamy np. w Anglii albo we Włoszech wstrząśnienia, które wywołane zostały trzęsieniem ziemi aż w Japonii, i obliczamy nawet szybkość, z jaką wstrząśnienia te przebiegają tak długą drogę. Wynosić ona może po kilka kilometrów na sekundę.

Wskutek tej nadzwyczajnej szybkości rozchodzenia się fal w ciałach stałych, odbieramy — w przypadku ciał o mniej znacznych rozmiarach, — wrażenie, że każde przesunięcie cząstek, powstałe w pewnym punkcie ciała, rozchodzi się po niem momentalnie. Uciskając np. środek szyby szklanej, wginamy ją na całej powierzchni aż do brzegów, nie jesteśmy jednak w stanie zauważyć, by przesunięcie się tego wgłębienia od cząstek środkowych ku brze-

gom szyby wymagało pewnego przeciągu czasu. Ta sama jednak szyba, trafiona pociskiem z broni palnej, podlega działaniu siły tylko przez bardzo krótki przeciąg czasu. Nie może wobec tego w pewnem oddaleniu od miejsca uderzenia uleść pęknięciu, gdyż w miejscu tem w czasie, który kula wymaga do przejścia przez warstwę szkła, nie zaszła jeszcze najmniejsza zmiana. Stąd to pochodzi, że kula wybija w szybie szklanej tylko wyraźnie odgraniczony mały otwór.

Mógłbym w tem miejscu omówić jeszcze i inne przypadki rozchodzenia się fal, np. bliżej rozpatrzyć przebieg fali pulsowej w arteriach, jest już jednak czas wielki, byśmy się zajęli kwestyą przebiegu fal w ciałach gazowych, zwykle pośredniczących w przenoszeniu głosu. Co prawda nie wypadnie nam mówić o tem zbyt wiele. W słupie bowiem powietrza, zamkniętego w długiej rurce, rozchodzić się mogą zgęszczenia i rozrzedzenia w ten sam sposób, w jaki rozchodzą się w sprężystym pręcie. Przedewszystkiem jednak zwróćmy naszą uwagę na drgania, które pochodzą od widełek strojowych. Gdy ramiona widełek rozchylają się, t. j. odbiegają od siebie wzajemnie, w warstwach powietrza na zewnątrz, wytwarza się zgęszczenie, które rozchodzi się natychmiast dalej we wszystkie strony po liniach prostych. Dosięgnie ono po pewnym czasie krzywej powierzchni, która z każdą chwilą powiększa się w swych rozmiarach. Za

zgęszczeniem postępuje rozrzedzenie, wywołane ruchem widełek ku sobie, następnie nowe zgęszczenie i. t. d. Gdybyśmy mogli widzieć powietrze, obserwowalibyśmy warstwy zgęszczone i rozrzedzone, kolejno, w równych odstępach postępujące za sobą. Warstwy te odpowiadają znanym nam grzbietom i dolinom fal wodnych. To samo zupełnie spostrzeglibyśmy i dokoła każdego innego brząkającego ciała.

Podczas rozchodzenia się zgęszczeń i rozrzedzeń wszystkie cząstki powietrza otrzymują kolejne wychylenia to w jedną, to w drugą stronę. Każda cząstka powietrza, nawet najbardziej oddalona od źródła głosu, bez względu na to, czy otrzymuje drgania, bezpośrednie czy też takie, które już odbyły drogę większą lub mniejszą, drga sama dokładnie w tym samym tempie, co i źródło głosu. Również wahnienia, przejęte przez jakikolwiek inny, dostatecznie ruchliwy przedmiot, zachowują ten sam okres drgań. A okres ten, jak wiemy, jest cechą wysokości tonu.

Przypomnijmy sobie, jakieśmy badali ruch fal wodnych. Stojąc w pobliżu, mogliśmy wyraźnie obserwować na falującej wodnej powierzchni pływający przedmiot. Mieliśmy więc widzialny (jawny) ruch cząstek materii. W wypadku fali głosowej ruchu tego widzieć nie możemy. Nie wzrokiem, lecz uchem, dokładniej — jego błoną bębenkową mamy łowić niewidzialne, kolejno po sobie nastę-

pujące zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza, które obok nas przechodzą.

Za każdym razem, gdy zgęszczenie obok nas przebiega, błona bębenkowa zostaje wgięta ku wewnętrznej części ucha, a następnie podczas następującego rozrzedzenia wygina się nazewnątrz. W ten sposób wykonywa ona dokładnie tyleż drgnień, ile zgęszczeń, albo mówiąc przenośnie, ile grzbietów fal w tym samym czasie obok nas przebiegnie. Na podstawie tych rozważań możemy przeprowadzić następujące obrachowanie. Szybkość rozchodzenia się głosu w powietrzu jest dla wszystkich tonów jednaka, mianowicie wynosi ona w temperaturze  $15^{\circ}\text{C}$  34000 cm na sekundę. Pomyślmy sobie linię prostą, wychodzącą ze źródła głosu, więc od ciała brzącego. Wyobraźmy sobie dalej na linii tej poruszający się szereg zgęszczeń, linią tą przeciętych, i zwróćmy uwagę na to, ile tych zgęszczeń w ciągu jednej sekundy przejdzie przez dowolnie wybrany stały punkt linii. Będzie to oczywiście ilość zgęszczeń, które zajmowały na tej linii przestrzeń 34000 cm. W zależności od oddalenia pomiędzy dwoma po sobie następującymi zgęszczeniami, wypadnie ono tem większe, im oddalenie to będzie mniejsze. Dla odległości tej wynoszącej 75 cm, ilość zgęszczeń wypadnie:

$$\frac{34000 \text{ cm}}{75 \text{ cm}} = 453.$$

Tyle właśnie razy błona bębenkowa naszego ucha wychyli się tam i z powrotem, taka więc będzie ilość jej drgnień, i taka też jest, w myśl powyższych wywodów, liczba wahaní źródła głosu w ciągu 1 sekundy.

Odległość jednej zgęszczonej warstwy od następnej, która w powyższym przykładzie wynosi 75 cm, zwié się długością fali głosowej. Ogólnie więc mówiąc, ilość drgnień na sekundę równa się ilorazowi z liczby, wyrażającej szybkość rozchodzenia się zaburzeń równowagi, przez liczbę, odpowiadającą długości jednej fali. Jeżeli, dajmy na to, długość fali wynosi  $l$  cm, a szybkość jej  $v$  cm na sekundę, natenczas ilość drgań  $N$ , wyrazi się jako

$$N = \frac{v}{l}.$$

Wzór ten nie ogranicza się jedynie do drgań głosowych, lecz, oczywiście, bez różnicy ma zastosowanie do każdego rodzaju falowań. Należy tylko jako długość fali  $l$  uważać zawsze przestrzeń, o którą trzeba w kierunku postępu fali przesunąć się, by znowu natrafić na takiż sam stan ruchu. Na powierzchni wodnej — długość fali jest odległością pomiędzy wierzchołkami dwóch po sobie następujących grzbietów, a na falującej lince (fig. 21) — odległością pomiędzy punktami  $K$  i  $L$  lub, co na jedno wychodzi, odległością od  $A$  do  $C$ , względnie od  $B$  do  $D$ .



Powyższe rozumowanie możemy w ten sam co poprzednio sposób zastosować i do każdego innego szczególnego przypadku i dojść zawsze do tegoż samego ogólnego rezultatu. Można mu nadać jednak i inną szatę zewnętrzną. Gdy ramię widełek drga, to wykonywa, jak wiemy, szereg szybko po sobie następujących ruchów wahadłowych. Przypuśćmy, że liczba ich na 1 sekundę wynosi  $N$ , wtedy  $\frac{1}{N}$  część sekundy jest czasem, który upłynął od rozpoczęcia się jednego zgęszczenia do chwili, kiedy zaczęło wytwarzać się następne. W czasie tym pierwsze zgęszczenie odbiegnie od źródła głosu na pewną odległość, która oczywiście musi się równać  $N$ -tej części drogi, przebytej posuwającym się zgęszczeniem w ciągu całej sekundy, t. j.  $N$ -tej części z szybkości  $v$ . Jest to właśnie długość jednej fali:

$$l = \frac{v}{N}.$$

Otrzymujemy więc wzór, który, rzecz oczywista, jest identyczny ze wzorem na str. 112.

Użyjmy wzoru tego do obliczenia długości fali w przypadku, gdy dana jest liczba drgnień na sekundę  $N$ . Oto mamy tu dwie pary widełek strojowych, jedną o częstości drgnień 256, drugą o częstości 512 na sekundę. Długość fali dla tonu, wydawanego przez pierwsze, wyniesie w powietrzu:

$$\frac{34000 \text{ cm}}{256} = 133 \text{ cm},$$

gdy dla widełek o częstości 512 otrzymamy odpowiednio:

$$\frac{34000 \text{ cm}}{512} = 66.5 \text{ cm},$$

a więc o połowę mniej.

Długości fal tonów, wydawanych przez struny fortepianowe, mieszczą się w granicach od 1100 do 10 cm, a dla najczęstszych drgań, odczuwanych jeszcze przez nas jako głos, t. j. dla 36000 drgnień na sekundę, długość ta nie wynosi nawet 1 cm. Gdybyśmy mogli widzieć cząstki powietrza, mielibyśmy obraz podobny do tego, który spostrzegamy na powierzchni wody, przenoszącej to odległe od siebie grzbiety fal, to znowu fale drobne, biegnące tuż jedne za drugimi. Oprócz tego wpadło by nam w oko jeszcze i inne godne uwagi zjawisko. Wiemy dobrze, że dwa, posuwające się po powierzchni wody a powstałe od rzucenia kamieni, pierścienie faliste mogą się z sobą krzyżować, nie przeszkadzając sobie wzajemnie. Grzbiety jednego systemu fal, biegną po grzbietach i dolinach drugiego, tak samo czynią i postępujące za nimi doliny. Analogicznie w powietrzu moglibyśmy widzieć krzyżujące się warstwy zgęszczeń i rozrzedzeń. Wyobraźmy sobie, że pewne źródło głosu wywołuje w powietrzu posuwający się szereg zgęszczeń i rozrzedzeń. Niech inne jeszcze źródło w tem,

zmienionem w swej normalnej gęstości, powietrzu wywołuje również zgęszczenia i rozrzedzenia. Zmiany te będą zupełnie takie same, jakie byłyby, gdyby pierwsze źródło głosu nie istniało, innemi słowy takie, jakie wytworzyłyby się w powietrzu zupełnie niezmienionem. Wobec tego jest rzeczą zrozumiałą, dla czego jesteśmy w stanie słyszeć jednocześnie wszystkie tony grającej orkiestry lub głosy wielu jednocześnie mówiących osób. Jesteśmy nawet pewni, że, aczkolwiek w potoku dźwięków nie dostrzegamy często najslabszych, np. pochodzących od najdelikatniejszych zderzeń dwóch jakichkolwiek bądź ciał, drgania pochodzące stąd napewno istnieją, napewno tworzą oddzielne systemy fal.

Drgania świetlne stanowiąc będą treść następnego wykładu, który mam zamiar poświęcić wyłącznie temu przedmiotowi. Dziś jednak, korzystając z czasu, pozwolę sobie zaznajomić Panów z pewnemi zjawiskami i prawami, które — o ile są Panom już znane — pragnąłbym jedynie przypomnieć. O tem, że promień światła przebiega po linii prostej, wiemy wszyscy dobrze. Wiemy też, że ma to miejsce jedynie wtedy, gdy pozostaje on w środowisku jednorodnem, t. j. posiadającym w każdym swym punkcie te same własności. Mówić o tem nie mam potrzeby.

Wypada mi może tylko dotknąć kwestyi, streszczającej się w prawie o odbiciu promieni. Niech promień  $LA$  (fig. 22), padający na zwierciadło  $SS$ , ustawione prostopadle do płaszczyzny rysunku, odbija się w kierunku  $AC$ . Prostopadłą  $AN$ , ustawioną w punkcie odbicia, zwiemy prostopadłą padania. Kąt padania  $LAN$  równa

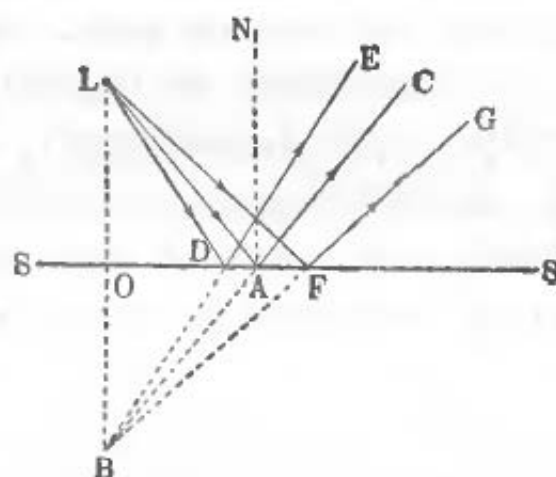


Fig. 22.

się zawsze kątowi odbicia  $NAC$ . Jest to prawo ogólne.

Na fig. 22 mamy narysowany cały szereg promieni:  $LD$ ,  $LA$ ,  $LF$ , wychodzących z tego samego punktu  $L$  i padających na powierzchnię zwierciadła  $SS$  w punktach  $D$ ,  $A$ ,  $F$ . Każdy z tych promieni zostaje odbity według powyższego prawa, każdy więc posiada inny kąt odbicia, zamknięty prostopadłą padania i kierunkami  $DE$ ,  $AC$ ,  $FG$ . Możemy się z łatwością przekonać, że linie te,

gdybyśmy je przedłużyli poza płaszczyznę zwierciadła, zbiegną się w punkcie  $B$ . Znajdujemy go poprostu, odcinając na prostopadłej, spuszczonej z punktu  $L$  na zwierciadło i przedłużonej poza zwierciadło, odległość  $OB$  równą  $OL$ . Ten, komu promienie odbite trafiają do źrenicy oka, będzie miał wrażenie, że wychodzą one z punktu  $B$ , co nie jest w istocie prawdziwe. Będzie mu się zdawało, że widzi obraz punktu  $L$  z drugiej strony zwierciadła w punkcie  $B$ , w tem samym od niego oddaleniu, w jakim ma przed zwierciadłem świecący punkt  $L$ .

Zjawisko załamania światła podlega również bardzo prostemu prawu. Jest to zjawisko zmiany kierunku przy przejściu z jednego przezroczystego środowiska w drugie. Zwróćmy tu najpierw uwagę na to, że w zasadzie każdy promień świetlny przy przejściu z jednego środowiska w drugie zostaje rozszczepiony na szereg promieni, które oddzielnie wywołują w naszym oku wrażenie różnorodnych barw. Niech  $AB$  będzie (fig. 23) graniczną płaszczyzną dwóch ciał, ustawioną prostopadle do powierzchni rysunku. Dajmy na to, że powyżej tej granicy znajduje się powietrze, poniżej — szkło. Promień «białego» światła, a więc promień słoneczny, albo promień światła elektrycznego lub gazowego, niech pada na powierzchnię szkła w kierunku linii  $LC$ . Wtedy w szkłe powstaje cały sze-



reg promieni, zawartych w granicach kąta  $GCD$ . Wszystkie promienie te — na figurze narysowane są tylko cztery  $CD$ ,  $CE$ ,  $CF$ ,  $CG$  — zbaczają z pierwotnej drogi promienia białego i czynią to przytem nie w jednakowym stopniu. Promienie, które zostały najmniej załamane, które zatem biegną w pobliżu linii  $CD$ , robią wrażenie świa-

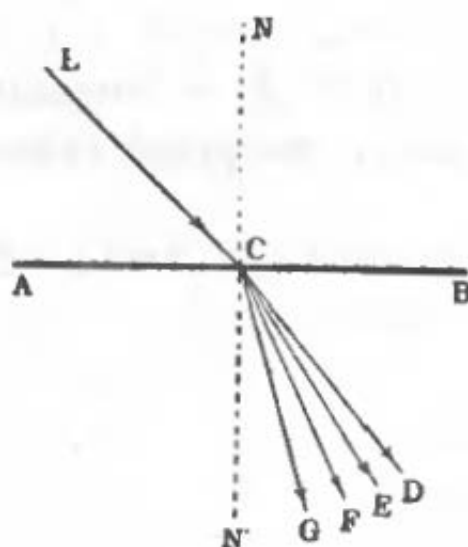


Fig. 23.

tła czerwonego; krótko mówiąc, można je nazwać promieniami czerwonymi. W kolejnym od nich porządku, ku stronie promienia  $CG$ , następują promienie pomarańczowe, żółte, zielone, błękitne i wreszcie fioletowe.

Ten rozkład promienia «białego» na poszczególne barwy składowe odkryty został przez Newtona. Wykazał on również, że światło białe

otrzymuje się odwrotnie wtedy, gdy promienie poszczególnych barw złączone razem trafiają do naszego oka. W ten sposób doszedł Newton do poglądu, — następnie wielokrotnie przez późniejsze badania stwierdzonego, — że białe światło jest w rzeczywistości zjawiskiem złożonym, że więc w promieniu  $LC$  są złączone promienie różnych barw. W szkłe ulegają one dlatego rozdziałowi, ponieważ zostają w nierównomiernym stopniu załamane, a więc muszą obrać odmienne drogi. Że promienie te, w porównaniu do światła białego, w istocie zasługują na miano promieni prostych, wynika to stąd, że każdy z tych promieni barwnych, oddzielnie wzięty, przechodząc z jednego przezroczystego ciała w drugie, nie ulega przy ponownem załamaniu dalszemu rozszczepieniu na nowe składniki. Promień taki posiada już trwałe niezmiennie własności, poddany bowiem dalszym odbiciom i załamaniom, np. przy przejściu ze szkła do powietrza, wykazuje ten sam stopień załamania.

Prawo załamania wykryte było poraz pierwszy przez prof. Snelliusa z Lejdy. Rysunek fig. 24 niech nam służy do jego wyjaśnienia.  $AB$  przedstawia tu znowu płaszczyznę graniczną pomiędzy szkłem a powietrzem. Niech szkło znajduje się u dołu, powietrze zaś u góry. Rozpatrzmy szereg jednorodnych promieni, które w kierunku linii  $C_1D$ ,  $C_2D$ ,  $C_3D$  padają na po-

wierzchnię szkła. Są one wszystkie tak załamane, że z prostopadłą  $MN$ , przeprowadzoną w punkcie  $D$  do granicznej płaszczyzny  $AB$ , tworzą mniejsze kąty aniżeli w powietrzu. Drogami tych promieni będą więc łamane linie  $C_1DE_1$ ,  $C_2DE_2$ ,  $C_3DE_3$ . Opiszmy teraz dokoła punktu  $D$ , jako środka, koło promieniem dowolnej długości. Obwód tego koła przecnie

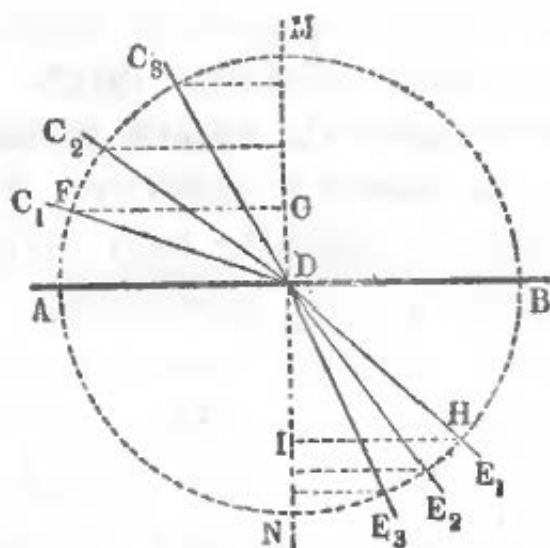


Fig. 24.

wszystkie te promienie. Przeprowadźmy następnie z punktu przecięcia tego koła z promieniem wchodzącym t. j. z punktu  $F$ , prostopadłą do  $MN$ . Uczyńmy to samo dla punktu przecięcia się koła z wychodzącym promieniem, t. j. dla  $H$ , otrzymamy prostopadłe  $FI$  i  $HJ$ . Podzielmy prostą  $FI$  przez  $HJ$ , a otrzymamy liczbę, która nie zmieni swej wartości, gdy promieniowi koła nadamy większe lub mniejsze rozmiary. Prawo, wy-

kryte przez Snelliusa, powiada dalej, że stosunek obu prostopadłych nie zmieni się również i wtedy, gdy padającemu promieniowi  $C_1D$  nadamy jakikolwiek bądź inny kierunek. Na naszej fig. punkty  $C_2, E_2$  np., w których promienie  $C_2D$  i  $DE_2$  przecinają obwód koła, leżą w takich oddaleniach od prostej  $MN$ , że stosunek tych oddaleń pozostaje ten sam, co i stosunek oddaleń  $FG$  do  $HI$ .

Stosunek ten zachowuje niezmienną wartość, o ile mamy do czynienia z tą samą parą ciał przezroczystych i z tym samym promieniem jednorodnego światła prostego. Zwiemy go współczynnikiem załamania światła. Liczni fizycy zajmowali się dokładnem wymierzeniem go dla bardzo wielu ciał. W naszym przykładzie — szkła i powietrza — wynosi on dla promienia czerwonego 1.53 zaś 1.55 dla światła błękitnego.

Znając współczynnik załamania dla danego promienia w danych ciałach, można z łatwością wyrachować kierunek drogi, jaką promień ten obierze przy przejściu z jednego ciała w drugie. Z tego to powodu prawo Snelliusa stanowi podstawę dla teorii soczewek i optycznych przyrządów — lunet i mikroskopów — przy pomocy których staramy się wzmocnić naszą zdolność widzenia. Bliższe zajmowanie się tą sprawą nie leży jednak w planie naszych wykładów. Będziemy głównie mówili dalej o różnych rodzajach promieni i różnicy, jaka między nimi istnieje.

W przypadku, gdy świecące ciało jednocześnie wysyła różnorodne promienie świetlne, promienie te, jak o tem była mowa, ulegają przy każdym załamaniu rozszczepieniu na części składowe — na promienie proste. By rozszczepienie to można było uskuteczyć w rozmiarach znaczniejszych, a osobliwie w przypadku, gdy, jak to zwykle bywa,

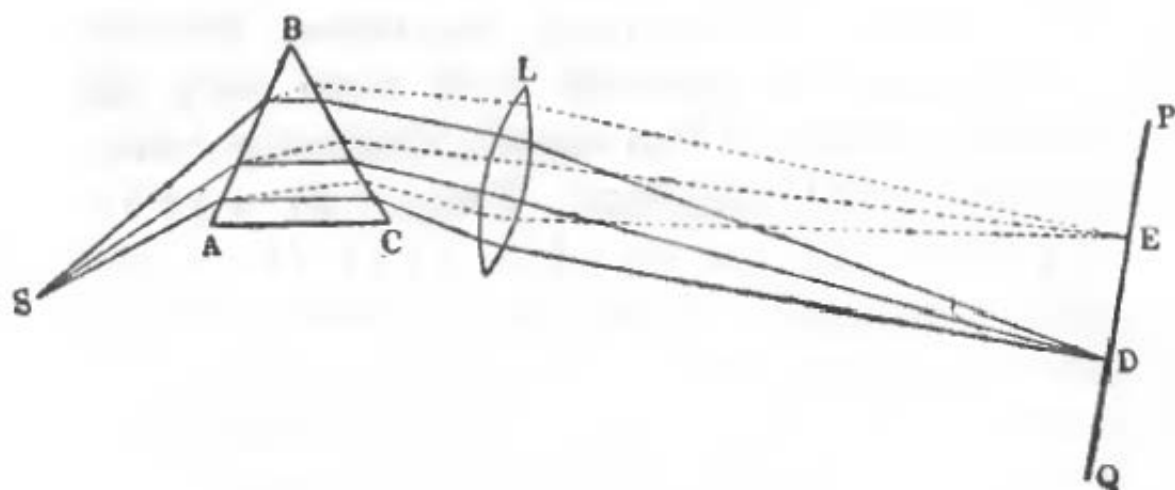


Fig. 25.

promienie wychodzą rozbieżnie ze źródła białego światła, należy użyć w tym celu środków bardziej skutecznych. Można np. postąpić w sposób przedstawiony na fig. 25. Punkt *S* ma oznaczać bardzo wąską pionową szparę, ustawioną prostopadle do płaszczyzny rysunku. Źródło światła znajduje się za szparą. Pewna ilość promieni, z których tylko część mała przedstawiona jest na naszej figurze, przechodzi przez szparę i pada na pryzmat *ABC*, również ustawiony swą osią prostopadle do płaszczyzny



rysunku. Po przejściu przez pryzmat promienie te trafiają w dalszej swej drodze soczewkę  $L$ , za którą w pewnej odległości znajduje się ekran  $PQ$ . Dla prostoty rysunku przyjęto, że tylko dwa gatunki promieni jednorodnego światła tworzą pierwotny promień złożony. Aż do granicy  $AB$ , t. j. do bocznej ściany pryzmatu, oba rodzaje promieni pozostają obok siebie, ale już w szkłe wskutek nierównej łamliwości obierają inne drogi. Promienie, które się załamują najmocniej, uwidocznione są na rysunku liniami pełnymi, mniej zaś łamliwe — liniami przerywanymi. Pierwsze z nich trafiają na ekran w punkcie  $D$ , drugie zaś — w punkcie  $E$ . W tych punktach ekranu — o ile wszystko jest dobrze ustawione — widzimy jasne linie, równoległe do szpary i krawędzi pryzmatu, a więc prostopadłe do płaszczyzny rysunku. Są one przytem tembardziej od siebie oddalone, im większą różnicę w załamaniu wykazują oba rodzaje promieni.

Jako przykład światła, złożonego tylko z dwóch rodzajów promieni, może służyć płomień tego oto palnika. Jest on zabarwiony solą kuchenną. Rozłożmy żółte światło tego płomienia w sposób, podobny w zasadzie do przedstawionego na fig. 25, z tą tylko różnicą, że światło badane przejdzie nie jeden ale cztery pryzmaty i większą ilość soczewek. Czynimy to dla wzmocnienia wyniku doświadczenia. W tymże celu puszczaemy rozłożone promienie nie na ekran, lecz wprowadzamy

do lunety, zapomocą której można je będzie dokładnie obserwować. Siatkówka naszego oka odegra tu rolę ekranu  $PQ$ . W tych warunkach doświadczenia ujrzymy w lunecie bardzo blisko siebie leżące dwa żółte prążki świetlne, które odpowiadać będą dwom rodzajom światła prostego.

W ten sposób zestawiony przyrząd pozwala na wykonanie jeszcze jednego pouczającego doświadczenia. Znaczenie obserwowanego tu zjawiska omówimy w następującym wykładzie, narazie ograniczmy się tylko do zaznajomienia się z jego treścią. Poza płomieniem palnika, zabarwionym na żółto solą kuchenną, ustawiam silne źródło światła białego, np. światło wapniowe palnika Drumonda, i to tak, by promienie jego po przejściu przez płomień z solą kuchenną również trafiły na szparę naszego przyrządu. Gdy usuniemy płomień z solą kuchenną, w lunecie w całym polu jej widzenia widzimy jasne światło wszystkich pojedynczych barw widma. Natomiast przy wstawionym płomieniu z solą kuchenną na tem samym jasnym tle barwnego światła spostrzeżemy dwa wąskie prążki ciemne.

Najbardziej uderzającą w oczy właściwością całego tego zjawiska jest to, że powyższe dwa ciemne prążki powstają dokładnie w tem samym miejscu pola widzenia lunety, w którym przy badaniu samego tylko płomienia z solą kuchenną obserwowaliśmy obecność dwóch jasnych prążków żółtych.

Przekonamy się o tem z łatwością, jeżeli promienie światła Drumonda zatrzymamy zasłoną tak, by nie przeszły one przez płomień żółty i nie dostały się wraz z jego promieniami do szpary przyrządu, a następnie zasłonę tę usuniemy. W pierwszym przypadku trafią do przyrządu jedynie żółte promienie z płomienia soli kuchennej i dadzą dwa żółte jasne prążki; w drugim zaś na tle barwnego pola wystąpią na miejscu obu prążków ciemne linie tych samych, co prążki, rozmiarów.

## WYKŁAD IV.

### Drgania świetlne.

---

Wykład dzisiejszy zacznę od pytania, jaka jest szybkość światła. Następnie postaram się udowodnić, że promienie światła są to bardzo szybkie drgania, wychodzące od świecącego przedmiotu, które, gdy dotrą do siatkówki naszego oka, wywołują w nas swoiste wrażenie światła.

Teorya Chrystiana Huygensa, z którą uczony ten związał swe imię na wieki, odkryje przed nami istotę nie tylko tych licznych zjawisk świetlnych, które spostrzega każdy z nas codziennie, lecz także i tych, o istnieniu których dowiedzieliśmy się jedynie dzięki nadzwyczajnie udoskonalonej sztuce badania.

Największą trudnością w pomiarach szybkości rozchodzenia się drgań świetlnych jest to, że szybkość ta jest niezmiernie wielka. Że głos potrzebuje pewnego czasu, by dotrzeć do naszego ucha, stwierdzamy to niejednokrotnie prostem spostrze-

żeniem, obserwując np. z odpowiedniego oddalenia uderzenia młota lub wystrzał pistoletu. Przeciwnie światło rozchodzi się w podobnych przypadkach prawie momentalnie. Takie wrażenie odbieramy przynajmniej bezpośrednio zmysłami. Łatwo to pojąć, skoro się zważy, że istotna szybkość światła w ciągu 1 sek. wynosi więcej, jak siedm razy wzięty obwód kuli ziemskiej. Do wniosku tego doprowadziły naukę poraz pierwszy zjawiska astronomi-

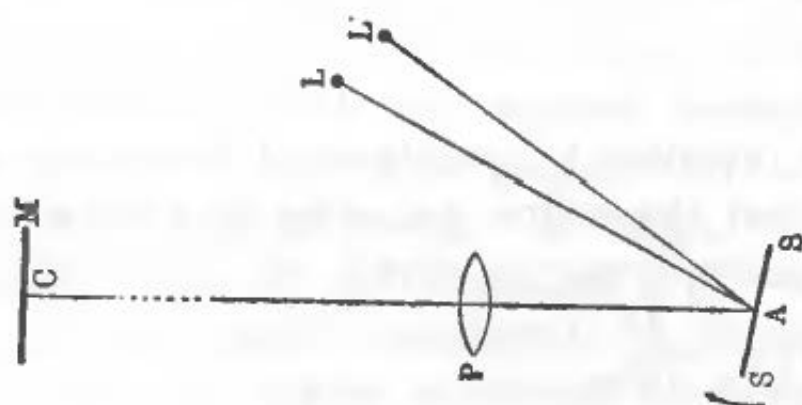


Fig. 26.

czne, gdzie ma się do czynienia istotnie z ogromnymi odległościami. Znacznie później dopiero dwaj uczeni fizycy francuscy, Fizeau i Foucault, potrafili zmierzyć dokładnie czas, który światło zużywa do przebycia pewnej przestrzeni na ziemi. Jestem w stanie za pomocą fig. 26 objaśnić zasadę metody w tym celu stosowanej.

$L$  niech przedstawia tu świecący punkt, a  $SS'$  płaskie zwierciadło. Zwierciadło to z łatwością może być wprowadzone w szybki ruch obrotowy dokoła pio-



nowej osi, rzutem której na płaszczyźnie rysunku jest punkt  $A$ . Promienie, wychodzące z punktu  $L$ , padają na zwierciadło i w chwili, gdy podczas obrotu w kierunku strzałki, zajmuje ono położenie, przedstawione na rysunku linią  $SS$ , odbijają się w kierunku linii  $AC$ , lub po liniach do niej bardzo blizkich. Odległość  $AC$  jest stosunkowo dość znaczna. Przebiegłszy ją, promienie zostają odbite od ściany  $M$ , ustawionej prostopadle do  $AC$ , a więc wrócić muszą po tej samej drodze.

Ma być zmierzony czas, który minie, zanim światło od  $A$  dojdzie do  $C$  tam i z powrotem. Na drodze promieni  $SS$ , odbitych od zwierciadła, ustawiona jest skupiająca soczewka  $P$ , mająca za zadanie powstrzymać promienie od rozproszenia. Po odbiciu od  $M$  promienie światła powracają do  $SS$ . Gdyby zwierciadło w czasie tym nie zmieniło pierwotnego położenia, odbite od niego promienie poszłyby po dawnej drodze  $AL$  z powrotem do punktu  $L$ , z którego początkowo wyszły. Ale zwierciadło  $S$  ulega szybkiemu kręceniu, przypuśćmy w kierunku zaznaczonem strzałką. W czasie więc, gdy promień światła przebiegnie dwukrotnie drogę  $AC$ , zwierciadło zdąży obrócić się nieco dokoła osi  $A$ . Ta zmiana położenia zwierciadła względem padającego promienia, powoduje zmianę kąta odbicia. Wskutek tego promień odbity tym razem nie pójdzie w kierunku  $AL$ , lecz po linii  $AL'$ , tworzącej z poprzednią bardzo nieznaczny kąt,

trafi więc na punkt  $L'$  położony w pobliżu  $L$ . Zmierzymy główną odległość pomiędzy  $A$  i  $C$ , następnie odległość  $AL$  i małe przesunięcie obrazu świecącego punktu  $LL'$ . Gdybyśmy przytem w jakikolwiek sposób zmierzylili szybkość obrotu zwierciadła  $S$ , mielibyśmy wszystkie potrzebne nam dane.

Oto są odnośne liczby, zaczerpnięte z pracy amerykańskiego uczonego Michelsona. Odległość  $LL'$  w doświadczeniu, w którym zwierciadło robiło 257·9 obrotów na sekundę, wynosiła 13·77 cm, a więc była to wielkość dobrze wymierzona. Stąd na podstawie długości  $AL=10$  m, wyliczymy z łatwością czas, w ciągu którego zwierciadło zmieniło swe położenie o ten nieznaczny kąt. Wynosił on dokładnie  $\frac{1}{240000}$  część sekundy. W tym samym przeciągu czasu światło odbyło drogę od  $A$  do  $C$  tam i z powrotem, a więc 62450 cm jak to właśnie miało miejsce w doświadczeniach Michelsona. Droga odbyta w ciągu całej sekundy musi więc być 240000 razy większa, czyli wyniesie około  $2998 \times 10^7$  cm. Jest to doświadczalnie zmierzona szybkość światła. W ten sposób otrzymana liczba zgadza się dobrze z wyliczeniami astronomów dla szybkości w przestrzeniach międzyplanetarnych. Dla łatwiejszego spamiętania weźmijmy zamiast tej liczby jej przybliżoną wartość i przedstawmy w postaci

$$3000 \times 10^7 \text{ albo } 3 \times 10^{10} \text{ cm}$$

W kilometrach wyniesie to 300.000 km na sekundę.

Powstaje teraz pytanie, skąd wiemy, że liczba ta jest właśnie szybkością rozchodzenia się drgnień, i to szybkością tak wielką, że drogę od słońca do ziemi drgania te mogą przebyć w 8 minut? Dla czego nie są to drobniutkie kulki — jak to nawet sądzono, — które z szybkością tą pędzą od słońca ku ziemi. Czyż dla tego tylko przypuszczenie to mamy odrzucić, że wydaje się nam ono nieco dziwnem? Przecie także każdy, kto po raz pierwszy posłyszysz o posuwających się naprzód drganiach, również odbiera wrażenie czegoś niezwykłego? Wrażenia takie nie powinny jednak zgoła rozstrzygać w kwestyach nauki. Odpowiedzi na to pytanie należy szukać jedynie na drodze doświadczalnej. I jeżeli ostatecznie zdecydujemy się w świetle widzieć zjawisko, polegające na ruchach drgających, to czynimy to na tej podstawie, że w zjawiskach świetlnych mamy do czynienia z takimi objawami, które powstać mogą jedynie w ruchach drgających i tylko przez istnienie tych ruchów objaśnione być mogą.

O tej kategorii zjawisk mówiliśmy już po części przy falach wodnych i drganiach głosowych (str. 114), jest jednak wskazane na tem miejscu powrócić do nich raz jeszcze. Mam na myśli — przypuśćmy, że ograniczam się jedynie do zjawisk głosu — tę własność fal głosowych, która pozwala

na współczesny przebieg fal, wychodzących z różnych źródeł. Widzieliśmy w powietrzu — wprawdzie w wyobraźni tylko — szereg warstw zgęszczonych i rozrzedzonych, które się wzajemnie krzyżowały, nie stawiając sobie jednak w ruchach najmniejszej przeszkody. W ten sposób widzimy obraz, przedstawiający nam całą przestrzeń powietrzną, jako wypełnioną niezliczoną ilością tych ruchów.

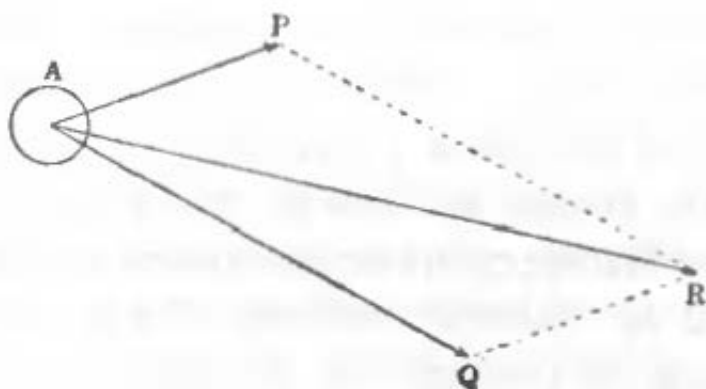


Fig. 27.

Zwróćmy uwagę naszą chwilowo na jeden tylko punkt tej przestrzeni. Nazwijmy go krótko «cząstką powietrza». Cząstka ta w chwili, gdy żaden jeszcze dźwięk wzbudzony nie został, znajduje się w pewnem określonym położeniu, dajmy na to w  $A$  fig. 27. Trafiona falą, pochodzącą z pewnego źródła głosu, opuszcza ona zajmowane miejsce i za chwilę znajdzie się już np. w punkcie  $P$ . W ten sam sposób i inna fala, pochodząca z innego źródła, w przypadku gdy sama w powietrzu wibruje, może podbić cząstkę  $A$  i wyprowadzić

ją z położenia równowagi. Niech tym razem po uderzeniu fali cząstka znajdzie się, dajmy na to, w  $Q$ . Stąd już wynika reguła o składaniu ruchów w bardzo prosty sposób. Przypomina nam ona regułę równoległoboku (str. 53) sił.

Łączymy  $A$  z  $P$  i  $Q$  i kreślimy na liniach  $AP$  i  $AQ$ , jako na bokach, odpowiedni równoległobok. Czwarty kąt tego równoległoboku jest punktem, do którego podąża cząstka powietrza, gdy jednocześnie ulega działaniu obu pobudek. Przekątnia  $AR$  wskaże nam kierunek jako też wielkość odsunięcia od położenia równowagi. Naturalnie, że gdybyśmy chcieli narysować figurę tę w rozmiarach, odpowiadających rzeczywistości, musielibyśmy wykreślić ją znacznie mniejszą. Także jest rzeczą zrozumiałą, że rysunek ten daje nam obraz stanu przejściowego, pochwyconego na jedną chwilę tylko, i gdybyśmy za parę chwil później chcieli wykreślić go znowu, to wypadłby on całkiem odmiennie. A wreszcie dla każdej innej cząstki powietrznej mielibyśmy znowu odmienny obraz. Nie możemy jednak i nie będziemy wgłębiać się we wszystkie te szczegóły. To cośmy powyżej powiedzieli, podaliśmy jedynie w celu wyjaśnienia zasady, na podstawie której wszelkie, nawet najbardziej skomplikowane drgania współczesne zsumować się dają. Nie trudno też wobec tego zrozumieć, co dziać się będzie, gdy nie dwa, lecz trzy lub więcej jeszcze



źródła głosu jednocześnie współdziałać zaczął. Nic nam bowiem nie może stać na przeszkodzie, byśmy w ten sam sposób połączyli i dalsze współcześnie odbywające się drgania. Dać to nam musi w końcu jedno tylko drganie wypadkowe. Jest też rzeczą samo przez się widoczną, że rozumowania powyższe również dobrze zastosować się dadzą i do wszelkich innych drgających układów. Mamy więc pewne ogólne pojęcie o tem, że jednocześnie mogą odbywać się w danem ciele liczne drgania. Jesteśmy nawet w stanie zrozumieć teraz pewną, dość pozornie zagadkową kategorię zjawisk, znaną w nauce pod nazwą interferencyi. Na szczęście sprawa ta nie jest przytem zawsze tak skomplikowana, jakby to z powyższego ogólnego rozważania wydać się mogło. Bardzo często zdarzyć się może, że aczkolwiek punkt drgający otrzymuje jednocześnie więcej niż jedno wychylenie, wychylenia te mają jednak kierunek ruchu po tej samej prostej, a wtedy składanie tych ruchów jest niezrównanie prostsze. Nawet nie potrzebujemy uciekać się wtedy do pomocy równoległoboku. Dwa przesunięcia w tę samą stronę dają w rezultacie jedno wypadkowe przesunięcie, równe sumie obu. W przypadku zaś, gdy pewien punkt otrzyma jednocześnie dwa wychylenia w strony wprost przeciwne, w rzeczywistości dochodzi do skutku wychylenie równe różnicy obu wychyleń składowych. Zachowa ono oczywiście kie-

runek większego wychylenia składowego. Jeżeli więc np. jedna pobudka jest w stanie przesunąć punkt na pięć jednostek długości w lewo, a druga o dwie także jednostki w prawo, to przesunięcie punktu odbędzie się w lewo, ale tylko o trzy jednostki długości.

Zwykliśmy mówić, że dwa drgania posiadają tę samą fazę, gdy oba przesuwają jeden i ten sam punkt w tę samą stronę, i naodwrot, oznaczamy dwa drgania, jako drgania o fazach przeciwnych, gdy nadają one temu samemu punktowi wychylenia w strony wprost przeciwne. Stąd bezpośredni wniosek: dwa drgania o tej samej fazie wzajemnie się wzmacniają, i przeciwnie, muszą się osłabiać, jeżeli posiadają fazy przeciwne. Gdy wreszcie w tym ostatnim razie oba przesunięcia składowe będą jednakowo wielkie, wtedy rozważany punkt pozostanie w położeniu równowagi i wcale nie ulegnie przesunięciu w tę lub drugą stronę. Oba drgania znoszą się wtedy wzajemnie.

Właśnie ta okoliczność, że dwa ruchy drgające w zależności od danych warunków mogą albo się wzmacniać, albo też wzajemnie się osłabiać, stanowi najbardziej charakterystyczną cechę zjawisk interferencyi. Oczywiście, właściwość tę najłatwiej można zauważyć wtedy, gdy wytworzone wzmocnienia i osłabienia drgań będą następowały kolejno jedne po drugich. Wtedy można je bezpośrednio porównywać z sobą i z łatwością

dostrzedz występujące przeciwieństwo. W tym celu omówimy tu przedewszystkiem pewne zjawisko głosowe, w którym natężenie głosu kolejno to wzrasta, to maleje.

Oto mamy tu dwie pary widełek strojowych, wydających prawie ten sam ton. Gdybym każdą z nich osobno do drgań pobudził, nie moglibyśmy zauważyć żadnej różnicy tonu. A mimo to różnica ta w rzeczywistości istnieje, aczkolwiek jest bardzo mała. Ta różnica wysokości tonu jest przyczyną tego, że gdy obie pary widełek jednocześnie w ruch wprowadzimy, usłyszymy ton kolejno zmieniający swe natężenie. Wyjaśnienie tego zjawiska leży jak na dłoni. Najłatwiej daje się ono wytłumaczyć wtedy, gdy weźmiemy pod uwagę liczbę drgnień, wykonywanych przez oba ciała brzmiące. Dla jednej pary widełek strojowych, liczba ta, czyli wysokość tonu, wynosi 256, dla drugiej zaś równa się 252 na sekundę. Zwróćmy uwagę naszą na błonę bębenkową ucha, która drgania te odbiera. Gdy pierwsza para widełek brzmi osobno, błona bębenkowa ucha 256 razy na sekundę wciśnięta zostaje do środka. Tak samo, gdy dźwięczą tylko widełki o wysokości tonu 252, błona ta 252 razy na sekundę ugina się ku wewnętrznej stronie ucha. A teraz pochwycmy chwilę, w której oba źródła głosu powodują wychylenie błony w tę samą stronę, np. także ku środkowi ucha. Wtedy błona wygnie się bardziej i bę-

dziemy to odczuwać jako wzmocnienie dochodzącego do nas głosu. Taki stan rzeczy trwać będzie jeszcze i podczas najbliższych następnych drgnień błony. Wkrótce jednak wystąpi zmiana. Po upływie  $\frac{1}{8}$  sekundy od powyższej chwili pierwsze źródło głosu będzie znowu powodować 33-cie z rzędu wychylenie błony ku wewnętrznej stronie ucha, ponieważ w powyższem przeciągu czasu odbyło się już  $\frac{256}{8} = 32$  pełne drgnienia błony. W tym samym okresie czasu druga pobudka wykona tylko  $\frac{252}{8} = 31\frac{1}{2}$  drgnień. Tyleż drgnień otrzyma i błona. Gdyby te drugie drgnienia dochodziły same tylko do błony usznej, to w okresie  $\frac{1}{8}$  sekundy błona ucha wykonałaby pełnych 31 drgnień i jeszcze  $\frac{1}{2}$  drgnienia, czyli z rozpoczęciem się następnej  $\frac{1}{8}$  sekundy błona poruszałaby się nie ku wewnętrznej, lecz ku zewnętrznej stronie ucha. Ponieważ jednak obie pobudki działają współcześnie, drgania błony znajdują się więc po upływie tego okresu czasu w fazach wprost przeciwnych i następstwem tego musi być osłabienie odczuwanego przez nas tonu. Po upływie następnej  $\frac{1}{8}$  części sekundy pierwsza pobudka wytworzy pełnych 64 drgnień, podczas gdy druga tylko 63. W chwili tej oba drgania będą miały znowu równe fazy, skutkiem czego nastąpić musi wzmocnienie tonu. Rozważanie dalszych okresów prowadzi do tych samych wniosków i zdaje mi

się, zbytecznem tłumaczyć, że w warunkach takich kolejno po sobie następować muszą wzmocnienia i osłabienia głosu.

Te kolejne wzmocnienia i osłabienia głosu zwać się **dudnieniami**. Odczuwamy je zawsze wtedy, gdy jednocześnie dochodzą do ucha dwa tony, różniące się tylko nieznacznie co do wysokości, t. j. ilości drgnień na sekundę. Szybkość, z jaką dudnienia te występują, zależy również od różnicy wysokości obu tonów. Podlega ona tak samo bardzo prostemu prawu. W powyższym przykładzie, co każde  $\frac{1}{8} + \frac{1}{8} = \frac{1}{4}$  sekundy następuje nowe wzmocnienie głosu, i oczywiście ilość dudnień na sekundę wyniesie  $1 : \frac{1}{4} = 4$ , a więc dokładnie tyle, ile wynosi różnica bezwzględnych wysokości obu tonów:  $256 - 252 = 4$ . Prawidłowość ta jest ogólna. Opatrzmy ramiona widełek strojowych, wydających ton niższy, małymi pierścieniami kauczukowymi. Wskutek powiększenia masy, drgać one będą powolniej. Ilość drgnień na sekundę jeszcze bardziej różnić się teraz będzie od ilości drgnień widełek o tonie wyższym. Równocześnie wzmoże się też i ilość wzmocnień tonu w ciągu jednej sekundy, a więc liczba dudnień. Nieznaczne powiększenie masy drugiej pary widełek wywrze oczywiście wpływ wprost przeciwny.

Gdybyśmy zjawisko dudnienia zechcieli zbadać zapomocą metody graficznej, to również łatwo



doszlibyśmy do powyższych wyników. Odpowiadającą temu zjawisku linią falistą cechowałaby kolejna zmiana w amplitudzie drgań: — to wzrost amplitudy, to znowu jej zmniejszenie się. Taką falistą linię rzeczywiście otrzymać można doświadczalnie, poddając błonę, złączoną z aparatem piszącym, jednocześnie działaniu dwóch mało różniących się od siebie tonów. — Ze względu na dalsze zastosowanie wypada tu zauważyć, że ruch błony, złączonej z aparatem piszącym, względnie ruch błony usznej, jeżeli drgania te słyszymy, może być przedstawiony i opisany w dwojaki sposób. Albo możemy powiedzieć, że błona wykonywa wahnienia, których amplituda ulega peryodycznym zmianom, albo też, co na jedno wychodzi, że podlega ona jednocześnie dwom ruchom drgającym, których wysokości bezwzględne wykazują pewną nieznaną różnicę, lecz amplitudy których pozostają niezmiennie. Nie ulega najmniejszej wątpliwości, że ciało zmieniające podczas drgania amplitudę wahaní, w otaczającym je środowisku wywołać musi te same zjawiska, co odpowiedni układ dwóch współczesnych ruchów drgających.

Zatrzymałem się nieco dłużej nad zjawiskiem dudnienia przede wszystkim dlatego, że zjawisko to jest samo przez się bardzo interesujące, powtóre i dlatego, że nadaje się ono doskonale jako pierwszy przykład zjawiska interferencji. To, co obecnie będziemy obserwowali w zjawiskach światła,

należy do tejże kategorii zjawisk, lecz do odmiennego nieco rodzaju. Promienie świetlne, które się wzajemnie wzmacniają, lub osłabiają, wykazują tę samą ilość drgnień na sekundę. W warunkach tych nie może więc być mowy o tem, by w pewnym określonym punkcie drgania tych promieni kolejno, co czas pewien, wykazywały to zgodne, to wprost przeciwne fazy. A i błona bębenkowa naszego ucha nie mogłaby wykazać obecności dudnień, gdyby trafiały w nią dwa drgania tej samej częstości: dudnień nie było wcale. Gdy fazy dwóch ruchów drgających o tej samej częstości staną się raz zgodne, nie mogą już potem nigdy zmienić się na niezgodne, podobnie jak dwa jednakowo długie wahadła, popchnięte jednocześnie w tę samą stronę, zachować muszą zgodność swych ruchów, i zdarzyć się nie może, by następnie choć na chwilę wychylenia ich były przeciwne. By jednak w przypadku tonów o dokładnie tej samej częstości można było obserwować zmianę natężenia głosu, należałoby przesuwając się w przestrzeni, przenoszącej drgania głosowe z jednego punktu w drugi. W samej rzeczy, dwa ruchy drgające tej samej częstości, wychodzące z dwóch różnych punktów, mogą się wzajemnie w pewnym miejscu wzmacniać, w drugim zaś osłabiać.

Doświadczenie, które tu zamierzam opisać, było poraz pierwszy pomyślane i wykonane przez *Fresnela* na początku zeszłego stulecia. — *AO*

i  $OB$ , przedstawiają dwa płaskie zwierciadła ustawione prostopadle do płaszczyzny rysunku (fig. 28). Leżą one prawie w tej samej płaszczyźnie, to znaczy tworzą kąt, wynoszący cokolwiek tylko mniej

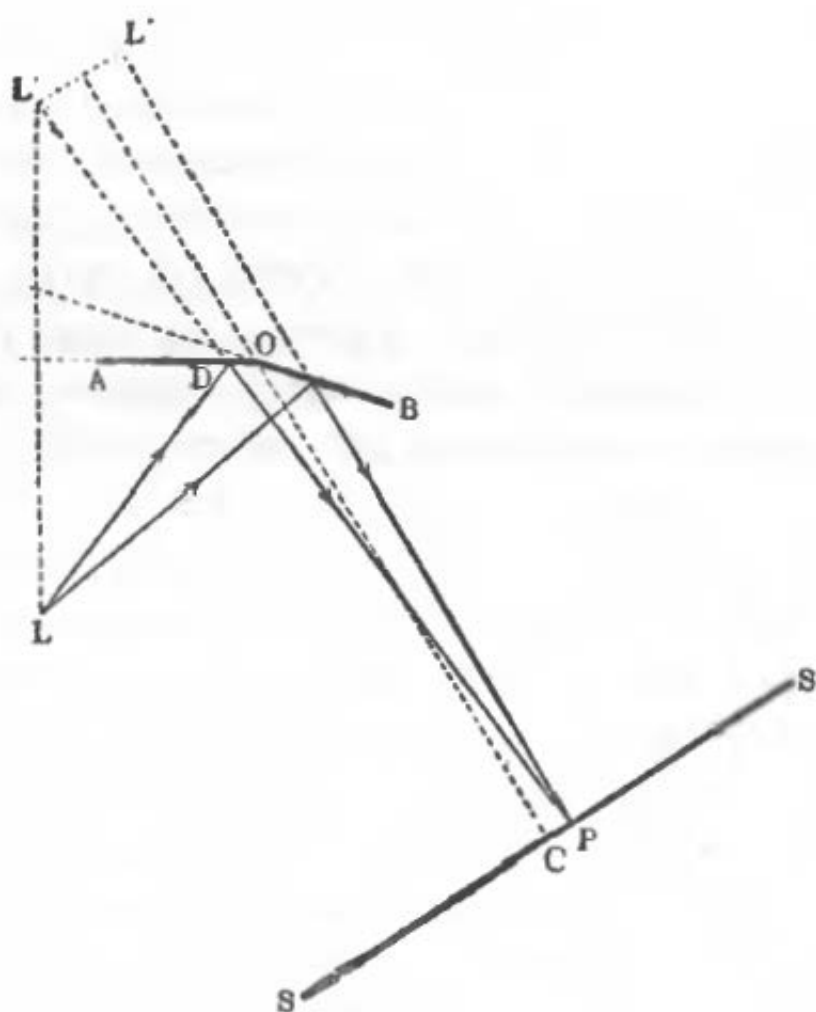


Fig. 28.

od  $180^\circ$ .  $L$  jest świecącym punktem, właściwie pionową silnie oświeconą szparą, której promienie po odbiciu w zwierciadłach dają się pochwycić na ekranie  $SS$ .

W warunkach tych w pewnym określonym punkcie na powierzchni ekranu nastąpić może spotkanie się dwóch promieni, z których jeden odbity jest od zwierciadła  $AO$ , drugi zaś od zwierciadła  $OB$ . Istota całego doświadczenia opiera się właśnie na wytworzeniu interferencji tych promieni. Najpierw zbadajmy dokładnie przebieg promieni. W tym celu skorzystajmy z obrazów  $L'$  i  $L''$ , które świecący punkt  $L$  wytwarza w obu zwierciadłach. Niech dane będą położenia obrazów za zwierciadłami, a więc punkty  $L'$  i  $L''$ . Jeżeli zbadać mamy, które promienie dojdą do danego punktu  $P$ , to należy złączyć go prostymi liniami z punktami  $L'$  i  $L''$  i następnie z punktów przecięcia tych prostych z płaszczyznami zwierciadeł przeprowadzić nowe połączenia do świecącego punktu  $L$ . W ten sposób otrzymamy drogę, którą odbędzie promień z  $L$  po odbiciu w punkcie  $D$  od zwierciadła  $AO$  i po której dojdzie do ekranu w punkcie  $P$ . Ponieważ  $LD = L'D$ , więc całkowita łamana droga promienia równa się prostej linii  $L'P$ . Również droga promienia odbitego od drugiego zwierciadła  $OB$ , a więc droga od  $L$  do zwierciadła i stamtąd do  $P$  równa się prostej  $L''P$ . Te względne wielkości obu dróg stanowią właśnie podstawę całego doświadczenia, albowiem, stojąc na gruncie założenia, że światło są to drgania, można liczyć na wywołanie zjawiska, dla którego długości obu dróg są miarodajnym czynnikiem.

By mieć przytem najpierw do czynienia z przypadkiem najprostszym, przypuśćmy, że źródło światła w  $L$  wysyła promienie proste, jedno-barwne, i że promienie te, — w założeniu, że światło jest ruchem drgającym — posiadają pewną, dokładnie jednakową ilość drgnień na sekundę, że są to więc drgania o tej samej częstości. Niech  $N$  oznacza liczbę, wyrażającą ilość tych drgnień na sekundę. Wtedy okres jednego wahnienia wynosi  $\frac{1}{N}$ . Załóżmy dalej, że drgania te, co do kierunku ruchu, są podobne do ruchu napiętej struny, to znaczy, że odbywają się w poprzek do kierunku samego promienia. Przypuśćmy wreszcie, że świecąca cząstka ze źródła światła w  $L$  porusza się prostopadle do płaszczyzny rysunku, a więc drga w kierunku pionowym. Powstać wtedy muszą zakłócenia równowagi, skierowane kolejno to ku górze, to ku dołowi, które przenoszą się dalej, jako promienie światła. W takim razie jednak istnieć musi określona długość fali  $l$ , a także pewna określona szybkość jej postępu  $V$ . Jeżeli częstość drgnień wynosi  $N$ , wtedy długość ta daje się oczywiście obliczyć ze wzoru (str. 113)

$$l = \frac{v}{N}$$

skoro  $v$  i  $N$  są wielkości znane. Wzór ten przypomina nam, że  $l$  jest to droga, którą światło



przebędzie w czasie  $\frac{1}{N}$  sekundy, to znaczy w czasie, w którym odbyło się jedno pełne wahnienie. W każdym promieniu, wychodzącym z  $L$ , znajdziemy w odległościach równych długości fali  $\lambda$  zaburzenia równowagi dokładnie o tych samych kierunkach, ponieważ wyszły one ze źródła w odstępach czasu dokładnie równych okresom pełnego wahnienia. Natomiast w punktach, odległych od siebie o połowę długości fali, t. j.  $\frac{\lambda}{2}$ , w tym samym czasie odbywać się muszą przesunięcia w strony wprost przeciwne, ponieważ wyszły one ze źródła w odstępie czasu, równym połowie okresu pełnego wahnienia.

Zwróćmy uwagę na punkt  $C$ , leżący na ekranie, a równoodległy od punktów  $L'$  i  $L''$ . Takich punktów na zasłonie nie może być więcej niż jeden<sup>1)</sup>. Obie drogi, biegnące z  $L$  do tego punktu są jednakowo długie, a więc i czasy przebiegu po nich promienia będą jednakowo długie. W punkcie  $C$  zbiegną się więc razem wychylenia, które jednocześnie wyszły z punktu  $L$ , a więc wychylenia skierowane w tę samą stronę, dajmy na to, do góry, lub ku dołowi. Takie zakłócenia równowagi muszą się wzajemnie wzmocnić.

<sup>1)</sup> Przyp. tłumacza. Jest to bowiem punkt leżący jednocześnie na symetralnej  $CM$ , przeprowadzonej do odcinka  $L'L''$ , i na prostej  $SS$ , a punktów takich nie może być więcej niż jeden.

Inaczej jednak rzecz ta przedstawi się w punktach, leżących po lewej i prawej stronie od  $C$ . Posuwając się np. w stronę prawą od  $C$ , natrafimy na punkty, których odległość od  $L'$  będzie nieco wzrastała, a odległość od  $L''$  przeciwnie malała. W ten sposób możemy dobrać punkt  $P$ , którego odległości od  $L'$  i  $L''$  różnią się tylko o  $\frac{l}{2}$ , t. j. o połowę długości fali. W tym przypadku przebieg promienia po krótszej drodze wymagać będzie czasu krótszego, aniżeli przebieg po dłuższej drodze. Różnica wyniesie dokładnie  $\frac{1}{2}$  okresu pełnego wahnienia. A więc zakłócenia równowagi, które jednocześnie zejdą się w punkcie  $P$ , muszą wyjść z  $L$  w odstępie czasu, wynoszącym połowę pełnego wahnienia, muszą więc mieć przeciwne kierunki ruchów, czyli, innemi słowy, mieć fazy przeciwne. Z tego to powodu w punkcie  $P$  będą drgania te wzajemnie się osłabiać, a w razie — jak to ma miejsce w danym przypadku — gdy amplituda ich jest równa, nawet znikną zupełnie. W punkcie więc  $P$  musi panować zupełna ciemność. Posuwając się dalej na prawo od punktu  $P$ , natrafimy znowu na miejsca świecące, ponieważ różnica dróg obu promieni stanie się większą, niż połowa długości fali. W tym samym kierunku nieco dalej znajdziemy oczywiście znowu punkt, oddalony od  $C$  prawie dwa razy więcej, niż od  $P$ , którego odległość od  $L'$  jest o całą długość fali większa od

odległości od  $L''$ . W punkcie tym zejdą się jednocześnie zakłócenia równowagi, które wyszły z  $L$  w odstępie czasu, równym dokładnie pełnemu okresowi jednego wzniesienia, a więc drgania o tym samym kierunku ruchu. Takie zakłócenia równowagi muszą się wzajemnie wzmacniać.

Rzecz oczywista, że toż samo rozważanie przeprowadzić można i dla dalszych punktów na prawo od  $C$ . Należy z pewnością oczekiwać, że w szeregu tych punktów zmieniać się będą kolejno jasność i ciemność. Tak jest w istocie. W żaden inny sposób zjawiska tego wytłumaczyć niepodobna. Jest więc ono dla nas niezbitym dowodem istnienia drgań świetlnych.

Wypada nam jeszcze zwrócić uwagę na to, że zjawisko powyższe nie ulegnie zmianie i wtedy, gdy drgania odbywać się będą w jakimkolwiek innym niepionowym kierunku<sup>1)</sup>. Zachowując toż samo co uprzednio położenie przyrządów (szpary, luster i ekranu), otrzymamy i w tym razie pionowe smugi interferencyjne, t. j. pasemka kolejno po sobie następujących miejsc jasnych i ciemnych.

Naturalnie, że doświadczenie to należy po-

---

<sup>1)</sup> Kąt pomiędzy liniami  $L'P$  i  $L''P$  w istocie jest tak mały, że drgania prostopadłe do kierunku promienia będą w punkcie  $P$  wprost przeciwne sobie nawet wtedy, gdy odbywać się będą nie pionowo do płaszczyzny rysunku, lecz do niej równolegle, dlatego też będą prawie zupełnie się znosić.

wtórzyć i z innymi rodzajami światła prostego, a więc np. z promieniami czerwonymi i błękitnymi. Różnica efektu polegać będzie tylko na tem, że ze zmianą rodzaju światła zmieniać się będzie wzajemna odległość powstałych prążków. Za każdym razem powstaną jednak tak samo kolejno smugi jasne i ciemne. W punkcie  $C$ , stosownie do wymagania teorii, mamy stale smugę jasną, lecz pierwsza smuga ciemna  $P$  będzie bliżej punktu  $C$  w razie, gdy użyjemy promieni błękitnych zamiast czerwonych. Stąd dochodzimy do oczywistego wniosku, że długość promieni błękitnych musi być mniejsza, aniżeli promieni czerwonych, dla każdego bowiem rodzaju światła połowa długości fali będzie wyznaczona różnicą pomiędzy oddaleniami  $PL'$  i  $PL''$ . Ta różnica w przypadku światła błękitnego jest mniejsza — ponieważ  $P$  leży bliżej  $C$  — aniżeli w przypadku światła czerwonego.

Na podstawie tych wyników możemy z góry nawet powiedzieć, co się stanie, gdy do doświadczenia użyjemy światła białego, a więc złożonego z poszczególnych barw prostych. Powinniśmy wyobrazić sobie, że każda prosta barwa da na ekranie własny obraz smug interferencyjnych i że obrazy pojedynczych barw wzajemnie złączyć się muszą w jeden obraz złożony. W punkcie  $C$  otrzymamy oczywiście wszystkie barwy razem, a więc białą smugę, lecz już na lewo i na prawo od  $C$  smugi jednej barwy nie nakryją dokła-

dnie smug barwy drugiej. Tam, np. gdzie barwa błękitna wskutek interferencji zostanie zgaszona, barwy inne pozostaną jeszcze, a wtedy z miejsca tego odbierzemy wrażenie światła barwnego, a nie białego.

Nie może więc wydać się nam dziwnem to, że po obu stronach jasnej smugi wystąpi w takim razie cały szereg wązkich pasemek barwnych. Rozpatrzyć je dokładnie można tylko z bliska. Urządzenie doświadczenia, które tu obecnie przedstawiam, jest nieco odmienne od opisanego powyżej, ale niema to znaczenia ani wpływu na istotę zjawiska. Bliżej w sprawę tę wchodzić nie będę, nie będę też pokazywał osobno doświadczeń z światłem prostem. Żeby uwidocznić wpływ długości fali na wielkość odstępu smug interferencyjnych, dość jest wstawić na drodze promieni białych barwną płytę szklaną, naprzód czerwoną, a potem błękitną. W ten sposób przekonamy się odrazu o słuszności naszego twierdzenia.

Sprawa interferencji światła zabrała nam sporo czasu i kosztowała niemało trudu. W nagrodę za to otrzymaliśmy jednak ogólny, zupełnie zadowalający pogląd na istotę zjawisk świetlnych. Nie tylko bowiem została usunięta wszelka wątpliwość co do istnienia drgań, lecz zarazem wyjaśniło się też pytanie, na czym polega różnica pojedynczych barw. Jak widzimy tkwi ona w długości fali. Ta ostatnia jest największa dla promieni najmniej



łamliwych, t. j. dla promieni czerwonych, a przeciwnie najmniejsza dla promieni najbardziej załamujących się t. j. dla promieni fioletowych. W związku jednak z długością fali zmienia się i częstość drgań. Możemy bowiem przyjąć, że szybkość rozchodzenia się drgań w powietrzu dla wszystkich barw jest jednaka. Wtedy ze wzoru (str. 149) bezpośrednio odczytujemy, że krótszej fali  $\lambda$  odpowiadać musi większa liczba drgnień  $N$  i odwrotnie. Przechodząc od barwy czerwonej o największej długości fali  $\lambda$  do barwy fioletowej o najmniejszej długości, znajdujemy najmniejszą częstość drgnień  $N$  dla barwy czerwonej i największą dla promieni fioletowych. A więc pomiędzy barwami światła istnieje też sama różnica, co i pomiędzy pojedynczymi tonami różnej wysokości.

Możemy nawet w naszych rozważaniach posunąć się o krok dalej i nie ograniczać się jedynie do wniosków jakościowych. Jesteśmy bowiem w stanie te istotne właściwości pojedynczych barw światła wyrazić w postaci stosunkowo dokładnych liczb. W doświadczeniu Fresnela łatwo dają się zmierzyć wzajemne oddalenia: szpary  $L$ , zwierciadeł i zasłony  $SS$ , a także oddalenia punktów  $C$  i  $P$  od siebie. Z liczb tych oblicza się długość pojedynczych linii  $L'P$  i  $L''P$ , i następnie ich różnica, równająca się połowie długości fali, t. j.

$\frac{l}{2}$ , a więc otrzymuje się i długość całej fali  $l$ . Dokładne pomiary tego rodzaju, oparte na tej samej zasadzie, przeprowadzone jednak w nieco odmiennej formie, wykazały, że istotne długości fal świetlnych — w porównaniu do długości fal głosowych i tych odległości, z którymi zwykliśmy operować w życiu codziennem — są nadzwyczaj małe. I tak np. długość fali najmniej łamliwego promienia czerwonego wynosi około 0,00008 cm, a najbardziej odchylonego promienia fioletowego: 0,00004 cm.

Jesteśmy przytem w posiadaniu wzoru

$$N = \frac{v}{l},$$

możemy więc, mając wartości  $l$  dla poszczególnych promieni, a także stałą wartość  $v$  szybkości światła, obliczyć częstość drgnień dla każdego rodzaju światła. Ponieważ  $l$  jest wielkością wogóle bardzo małą, a  $v$  przeciwnie bardzo wielką  $v = 3 \cdot 10^{10}$  cm, a więc wartości liczby  $N$  wypaść muszą bardzo duże. Dla światła czerwonego znajdujemy np. liczbę 375 biljonów ( $375 \times 10^{12}$ ), a dla fioletowego aż 750 biljonów drgnień na 1 sekundę!

W dotychczasowych naszych rozważaniach nad drganiami świetlnymi wcale nie zajmowaliśmy się kwestyą, jakie to właściwie ciało drganiom tym podlega. Drgania te dochodzą do nas od najbar-

dziej oddalonych ciał niebieskich, a więc należy przypuszczać, że w przestworzach wszechświata poza granicami atmosfer różnych planet i ciał niebieskich znajdować się musi ciało, pewnego rodzaju środowisko, które pośredniczy w tem przenoszeniu drgań. Ciałem tem, które wskutek swych własności stanowi do dziś dnia jedną z największych zagadek wiedzy przyrodniczej, jest wszystko przenikający, wypełniający cały wszechświat — eter. Jest on istotnie dotychczas zagadką, lecz nie taką, byśmy wobec niej stali całkiem bezradni. Powiadamy, że jest on «przenikającym wszystko», to znaczy chcemy tem wyrazić to, że eter znajduje się zarówno w gazach, płynach, jak i ciałach stałych, krótko mówiąc przenika każde ciało materialne, jakie tylko gdziekolwiek się znajduje i istnieje. Mam nadzieję, że Panowie przyjmiecie to oświadczenie »*in verba magistri*«, i że zadowolicie się jedynie prostym wyjaśnieniem, odnoszącem się na razie do powietrza tylko.

Szybkość rozchodzenia się drgań świetlnych, jak to wspomnieliśmy uprzednio, została obliczona na podstawie spostrzeżeń astronomicznych, doświadczalnie zaś stwierdzona za pomocą pomiarów na powierzchni ziemi. W jednym i drugim przypadku, otrzymane rezultaty wykazały zupełną zgodność, w istocie jednak rzeczy — podkreślić to należy — doświadczenia te nie były

o tyle dokładne, by mogły wykazać drobną różnicę.

Oczywiście, że szybkość, zmierzona przez astronomów, jest tą szybkością, która posiada światło w przestrzeniach międzyplanetarnych, a więc w czystym eterze. Zgodność rezultatów, otrzymanych tą drogą, z danymi, obliczonymi z doświadczeń dokonanych na powierzchni ziemi, byłaby zupełnie niezrozumiałą, gdyby powietrze nie zawierało w sobie wcale eteru, a więc gdybyśmy mieli do czynienia z szybkością rozchodzenia się drgań w dwóch zgoła różnych ciałach. Musimy więc przyjąć, że w przenoszeniu drgań świetlnych na powierzchni ziemi, rolę główną odgrywa eter, istniejącą zaś różnicę — narazie nie stwierdzoną doświadczalnie, lecz pośrednio obliczoną — przenieść należy na rachunek powietrza, w przypadku, gdy światło przez nie przechodzi.

Jeżeli zjawiska drgań głosowych przedstawiają, jak to już wiemy, nadzwyczajną rozmaitość i mnogość objawów, to kraina faktów, którymi się obecnie zajmujemy, jest jeszcze obszerniejsza i zarazem wspanialsza. Nie potrzebujemy nawet mówić o tem, co się dzieje w niezmiernych przestrzeniach wszechświata, wypełnionych promieniami niezliczonej ilości słońc, których drgania potrzebują tysiące lat na to, by dojść do naszej ziemi. Tu na ziemi, w naszym najbliższem otoczeniu, spotykamy

się z milionami milionów fal świetlnych, które biegną jedne poprzez drugie w najrozmaitszych kierunkach, a mimo to są tak delikatnie i dokładnie zorganizowane, że np. w falach, które biegną w tej chwili od lewej strony tej sali ku prawej, odtworzone są wszystkie najdrobniejsze nawet szczegóły przedmiotów, które tam po lewej stronie widzimy.

Czasami pojedyncze, składowe części światła białego trzymają się razem, wtedy promienie różnych barw, zachowując właściwy każdemu z nich okres drgań, biegną wspólnie: światło białe nie ulega żadnej zmianie. Czasami jednak promienie te zostają rozdzielone, a wtedy wogóle powstaje barwność zjawisk. Rozszczepienie to pochodzić może z różnych przyczyn. Barwy powstają albo wskutek nierównomiernego załamania różnych promieni w pryzmacie szklanym, lub w kropli deszczowej i w ten sposób współdziałają w wytworzeniu się tęczy, albo znowu promienie białe, przechodząc przez niezupełnie przezroczyste środowisko, tracą pewną część pojedynczych barw, wskutek różnicy w pochłonięciu, czyli absorbcyi. Zjawisko to tłumaczy się w ten sposób, że drgania świetlne zostają przemienione w ruchy innego rodzaju i wskutek tego dla zjawiska świetlnego stracone. Jeżeli np. płyta szklana przepuszcza promienie czerwone lepiej aniżeli promienie inne, to nie dziwi nas to że, patrząc przez tę płytę, wszystko



widzimy czerwono. Barwa tego oto zielonego, pokrywającego stół sukna, którą oglądamy w świetle odbitem, powstała również wskutek absorbcyi pewnych promieni.

Wreszcie z doświadczenia *Fresnela* przekonaliśmy się, w jaki sposób mogą powstać barwy, gdy promienie pewnego rodzaju światła wskutek interferencyi zostaną zgaszone. Znane powszechnie tęczowe barwy baniek mydlanych stąd właśnie pochodzą. Są to barwy interferencyjne.

Cieniutka kulista błonka bańki takiej odbija padające na nią promienie zarówno od zewnętrznej, jako też i wewnętrznej powierzchni. W pewnym punkcie siatkówki oka naszego mogą wobec tego zbiedz się promienie, których część jedna odbyła drogę dłuższą o podwójną grubość ściany, tworzącej błonkę bańki, aniżeli część druga. Stąd powstać musi interferencya, która, wobec różnicy w długościach fal, w jednym rodzaju drgań działa wzmacniająco, w innym zaś przypadku drgania te osłabia i wobec tego powoduje wystąpienie pewnej wypadkowej barwy, zmiennej w zależności od grubości błonki, jako też wielkości kąta padania promieni. Te same objawy wykazują i inne, dostatecznie cienkie warstewki ciał przezroczystych, jak np. warstewka rozlanej po wodzie oliwy. Nasza teoria światła, teoria drgań świetlnych, we wszystkich tych, a także i w wielu innych przypadkach, których przytaczać tu nie mogę, daje zu-

pełnie dokładne wyjaśnienie nastroczających się pytań.

Być może, jesteście Panowie do pewnego stopnia zdziwieni, że zjawiska interferencyjne nie występują tak często, jakby się to zdawać mogło, i że do ich badania trzeba używać osobliwych środków pomocniczych. Okoliczność tę należy przypisać trzem następującym przyczynom: po pierwsze — wymiarom naszych źródeł światła, które składają się z niezliczonej ilości świecących cząstek; powtórę — skomplikowanym własnościom samych promieni, po trzecie — tej okoliczności, że większość ciał, któremi chwytałyśmy promienie świetlne, posiada rozmiary o wiele znaczniejsze, aniżeli rozmiary fal świetlnych, w porównaniu więc są to ciała stosunkowo bardzo wielkie.

A teraz niech mi będzie wolno raz jeszcze powrócić do zjawiska rozkładu «białego światła» za pomocą pryzmatu. W sposób, przedstawiony szematycznie na rysunku fig. 25, rzucam na ekran barwny obraz szczeliny, oświeczonej mocno za pomocą światła Drumonda, t. j. światła, jakie wysyła rozżarzone do białości wapno palone. Barwny ten obraz, zwany *widmem* (spektrum), przedstawia nieprzerwaną ciągłość wszystkich kolorów od czerwonego aż do fioletowego. Otrzymane światło zawiera więc wszystkie promienie o częstościach, względnie długościach fali, zawartych w granicach

uprzednio przez nas omówionych (str. 149). Bardziej proste zjawisko obserwujemy jednak wtedy, gdy źródłem światła jest ciało gazowe. Widmo żarzącego się gazu składa się bowiem tylko z większej lub mniejszej ilości pojedynczych jasnych prążków, których ilość odpowiada dokładnie tylu rodzajom światła prostego, ile ich ciało świecące wysyła.

Poznaliśmy już dawniej widmo płomienia, zabarwionego solą kuchenną. Składa się ono tylko z dwóch, bardzo blisko siebie położonych linii żółtych. W ten sam sposób i za pomocą tychże środków możnaby otrzymać i rzucić na ekran jeszcze i inne widma liniowe (prążkowe). Zwykle jednak w badaniu tem posługujemy się lunetą, do której skierowujemy promienie, po ich przejściu przez pryzmat, względnie cały szereg pryzmatów. Przyrząd tak zestawiony nazywa się spektroskopem. Jest to jeden z najważniejszych środków pomocniczych, jakimi rozporządzają nowoczesne nauki przyrodnicze.

Oto mamy tu dwa zwykłe spektroskopy. Przed szparą jednego z nich znajduje się tak zwana rurka Geisslera, wypełniona rozrzedzonym w znacznym stopniu wodorem. Zawarty w niej gaz możemy pobudzić do świecenia, przepuszczając przez rurkę iskry elektryczne. Drugi zaś spektroskop skierowany jest na małą iskrę elektryczną, przeskakującą pomiędzy końcami dwóch żelaznych drutów. W pierw-

szym z tych przyrządów zobaczymy pojedyncze trzy świetlne prążki (linie), tworzące razem linio-  
we widmo wodoru, w drugim zaś będziemy mogli obserwować rodzaje światła, składające się na widmo żelaza, przeprowadzonego razem iskry w stan lotny.

Na fig. 29 jest uwidocznione położenie pojedynczych linii wodorowych  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  w porównaniu do ciągnącego się bez przerwy — od czerwieni aż do fioletu — widma światła białego. Oprócz tego zaznaczona jest widmowa linia  $Na$  sodu.

Ze względu na małe rozmiary rysunku, jest ona przedstawiona tylko w postaci pojedynczego prążka, aczkolwiek w istocie widmo soli kuchennej składa się z dwóch, bardzo bliskich sobie prążków. Sól kuchenna przedstawia chemiczne połączenie metalu sodu  $Na$  z pierwiastkiem chlorem  $Cl$ . Takie samo widmo dają i inne połączenia metalu sodu, skoro umieścimy je w płomieniu gazowym, a nawet

sam czysty metal sól. Stąd przychodzimy do wniosku, że sól kuchenna ulega w płomieniu palnika

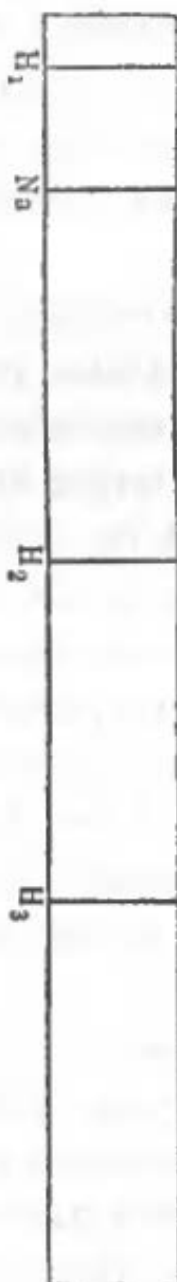


Fig. 29.

rozkładowi, i że obserwowane w spektroskopie widmo liniowe pochodzi od wolnych atomów sodu, które w płomieniu tym świecą.

To, co zapomocą tych małych spektroskopów obserwować można, daje jedynie słabe przedstawienie o całym bogactwie zjawisk, jakie badania spektralne w nauce o świetle dotąd nagromadziły. Badania te, rzecz można, rozwinęły się obecnie w oddzielną gałąź fizyki. Przyrządy bardziej dokładne i potężne dają możliwość dostrzeżenia takich delikatnych linii, których w zwykłych aparatach obserwować nie można. Okazało się przytem, że wiele linii, które uprzednio uważano za linie pojedyncze, w istocie są liniami złożonemi z dwóch albo trzech prążków. Oprócz tego możemy do badania widm zastosować fotografię i w ten sposób rozszerzyć zakres naszych badań, mianowicie na te promienie, których, z powodu wielkiej częstości drgań, oko nasze już nie odczuwa, a które ulegają mocniejszemu załamaniu, aniżeli promienie fioletowe. Są to promienie «p o z a f i o l e t o w e». Istnieją również promienie «p o z a c z e r w o n e», których zdolność załamania się jest mniejsza od ulegających najmniejszemu załamaniu promieni czerwonych. Do tej kategorii promieni należą tak zwane «promienie ciepł-  
ne», wysyłane przez mocno ogrzane, lecz nie świe-  
cące jeszcze ciała ciemne. W ten sposób granice badania widma rozszerzyły się w obie strony i to



w znacznym stopniu. Zdają nam z tego sprawę następujące liczby. Podczas gdy długość fal widzialnych promieni chwieje się w granicach od 0,00008 cm do 0,00004 cm, zmierzone długości fal promieni pozaczerwonych i pozafioletowych wynoszą 0,003 cm, względnie 0,00001 cm.

W pozafioletowej okolicy widma stwierdzono nadto największe bogactwo linii. Fotografia tej części widma dla żelaza, — którą obecnie widzimy na ekranie w powiększeniu — może nam dać o tem należyte wyobrażenie.

O ogromnej doniosłości tej kategorii zjawisk nie mam potrzeby mówić wiele. Łatwo odgadnąć, co za nieoceniony środek pomocniczy posiada nauka w badaniu widm, bądź to w celu odróżnienia różnych ciał dokładnie już znanych, bądź też nawet w odszukiwaniu nowych pierwiastków. Badając widma różnych ciał, spostrzeżono linie, których nie można było odnieść do żadnego znanego pierwiastka, w ten więc sposób natrafiono na ślad wielu nieznanых uprzednio pierwiastków. Największa teoretyczna wartość polega jednak na tem, że każda najdelikatniejsza linia widmowa reprezentuje pewien określony rodzaj prostego światła, posiadający sobie tylko właściwą częstość drgań, a więc dający się porównać z prostym tonem w muzyce.

Dwa prążki widmowe, leżące w pewnem od

siebie oddaleniu, wykazywać muszą zawsze pewną różnicę długości fal, i długość ta — jeżeli będziemy stale rysowali widmo w sposób powyżej przedstawiony fig. 29 — wypadnie najkrótszą dla tych promieni, które dają prążki najdalej wysunięte ku stronie prawej. Wypada przytem zauważyć, że właśnie dla tych, wyraźnie oznaczonych rodzajów światła, długości fal zmierzone zostały z dokładnością, sięgającą bardzo daleko. Tak np. dla linii wodorowych (fig. 29)  $H_1 = 0,0000656$ ,  $H_2 = 0,0000486$  i  $H_3 = 0,0000434$  cm wymierzono je do siódmego miejsca dziesiętnego, a dla obu linii sodowych  $Na = 0,00005895$  i  $0,00005889$  aż do ósmego nawet.

Że atomy pierwiastków są w stanie wykonywać drgania o tej właśnie częstości, jaka jest odzwierciadlona w położeniu ich linii widmowych, to naturalnie zawisłem być musi od budowy, właściwości i rozmiarów tych najdrobniejszych cząsteczek. Stąd wynika doniosłe zagadnienie dla przyszłych badań, mianowicie zdobycie takiego poglądu na budowę atomów, który mógłby zdać nam sprawę z położenia linii danego pierwiastku w widmie.

A chociaż od rozwiązania pytania tego jesteśmy chwilowo jeszcze bardzo dalecy, możemy jednak już obecnie, nawet przy pomocy bardzo prostych rozważań, wyciągnąć pewne doniosłe wnioski.

O tem przekonać nas mogą dwa zjawiska, których opisem zajmiemy się w tej chwili.

Pierwszem z nich jest zjawisko współdrzania dwóch ciał. Ciało, posiadające pewien właściwy sobie, a zależny od masy i siły popędowej okres wahnień, daje się wprowadzić w ruch wahadłowy zapomocą nawet bardzo nieznacznych sił. Chodzi tylko o to, by ciało to poddane było przejściowemu działaniu siły w odstępach czasu, równych dokładnie okresowi pełnego wahnienia. Biorę np. kulkę spokojnie wiszącego wahadła i słabem popchnięciem wprawo wyprowadzam ją z położenia równowagi. Z następem uderzeniem czekam dotąd, aż kulka, odbywszy drogę tam i z powrotem, znowu pocźnie zwracać się wprawo. W tej chwili potracam ją nanowo. Powtarzam to kilkakrotnie, wywierając za każdym razem pewną siłę w kierunku istniejącego ruchu. Naturalnie że w ten sposób wzmacniam za każdym razem ruch kulki, i mogę nadać jej wahnieniom taką amplitudę, której z pewnością nie otrzymałaby, gdybym te same uderzenia uskuteczniał nierównomierne, lub w innych odstępach czasu.

Coś podobnego ma też miejsce w następującem doświadczeniu. Oto na tej samej ramie wiszą dwa, jednakowo długie wahadła, a więc wahadła posiadające ten sam okres wahnień. Jedno z nich jest ciężkie,

składające się z metalowego pręta i zawieszonego na nim ciężaru, drugie lekkie, utworzone z metalowej kulki, zawieszanej na nitce. Wprowadźmy w ruch jedynie wahadło cięższe. Po pewnym czasie dostrzeżemy także ruch wahadła lżejszego: wykonywa ono wahnienie, zgodne z wahnieniami wahadła cięższego. Jest to wynik miarowych drobnych wstrząśnięć, jakie ciężkie wahadło wywiera na statyw, a więc i na punkt zaczepiania wahadła lżejszego.

Widzimy więc tu współdrżania dwu wahań o tym samym okresie wahnień. To samo zjawisko powstaje również w przypadku dwóch ciał brzmiących, jeżeli tylko są one do siebie dostrojone. Wahnienia jednego z tych ciał udzielają się drugiemu za pomocą cząstek powietrza, albo też innego ciała pośredniczącego. Chodzi tylko o to, by te drobne uderzenia następowały po sobie z odpowiednią szybkością, a to stać się może tylko wtedy, gdy oba ciała mają ten sam okres wahnień. Usłyszymy np. łatwo współbrzmienia jednej z tych dwóch par dostrojonych do siebie widełek strojowych, skoro tylko drugą w ruch wprowadzimy.

Po tem wszystkiem nasuwa się bezpośredni wniosek, że powyższe rozważania muszą zachować swą moc i dla drgań świetlnych. Zróbmy z tego użytek przy badaniu zjawisk absorbcyi światła. Zapytajmy się, w jakich warunkach drżania świetlne

będą przez pewne ciało najbardziej pochłaniane? Możemy przypuszczać, że będzie to miało miejsce wtedy, gdy drgania świetlne z łatwością oddane być mogą cząsteczkom ciała, t. j. wtedy, gdy cząsteczki te zdolne są do drgań o tym samym okresie, co i padające na ciało promienie światła. W każdym gazie pojedyncze cząsteczki materii posiadają, jak wiemy, zdolność do drgań o pewnej, ściśle określonej częstości. By sprawę początkowo uprościć, pomyślmy sobie taki gaz, którego cząstki wykonywać mogą drgania jednego tylko okresu, a więc gaz, dający jedną tylko linię widmową. Jeżeli powyższe rozumowania są słuszne, gaz taki powinien właśnie te tylko promienie pochłaniać, które posiadają tę samą częstość drgań, co i światło przez niego wysyłane. Idąc drogą tych rozważań wnioskujemy dalej, że gaz, wysyłający dwa lub trzy rodzaje światła o różnych długościach fali, będzie absorbował właśnie promienie tej samej długości.

Być może, że w powyższem rozumowaniu ta lub inna strona kwestyi została pominięta lub nie uwzględniona, w każdym jednak razie całość rozważania zasługuje na to, byśmy go poddali próbie doświadczalnej. Przekonamy się wtedy, że wyprowadzone przez nas wnioski istotnie są prawdziwe. Przypomnijmy sobie doświadczenie (str. 124) z promieniami rozżarzonego wapna, przechodzącymi przez płomień, zabarwiony solą kuchenną.



Otrzymaliśmy wtedy, zamiast ciągłego, widma widmo przerwane dwoma ciemnymi prążkami w miejscach dokładnie tych samych, w których znajdują się żółte linie widma sodowego. Powstanie tych ciemnych prążków może być wytłumaczone jedynie przez absorbcję żółtych promieni sodowych. Należy to rozumieć tak, że w obu tych ciemnych miejscach widma zmniejszenie natężania światła przez absorbcję jest silniejsze, aniżeli wzrost jego, wywołany promieniowaniem samego sodu.

Na ten zadziwiający związek pomiędzy promieniowaniem i absorbcją ciał gazowych należało koniecznie zwrócić uwagę w toku naszego wykładu. Rozumiemy bowiem teraz dobrze, jaką doniosłość przedstawiają widma, przerywane ciemnymi prążkami. Do nich należy też i widmo światła słonecznego.

Obserwując światło słoneczne za pomocą małego spektroskopu, dostrzegamy w jego widmie zaledwie siedm ciemnych linii. Inaczej jednak rzecz się przedstawia, skoro do tego celu użyjemy przyrządu silniejszego. Wtedy możemy linii tych naliczyć nie kilka, lecz kilka setek, o czym z łatwością przekonać się możemy z tej oto częściowej fotografii widma słonecznego. Linie ciemne przypadają dokładnie w miejscach jasnych linii, tworzących widma znanych nam pierwiastków chemicznych. Okoliczność ta pozwala nam wywnioskować, skąd linie te pochodzą. Mogą one powstać

jedynie przez absorbcję białego światła podczas jego przejścia przez pary odpowiednich pierwiastków. Ponieważ w widmie słonecznem znajdujemy np. dwie ciemne linie, odpowiadające swem położeniem jasnym liniom widma sodowego, należy więc przyjąć obecność par sodowych w atmosferze słońca. Pary te powodują absorbcję światła, promieniającego z głębszych warstw kuli słonecznej.

Drugim zjawiskiem, które pragnę tu omówić, jest wpływ, jaki ma postępowy ruch drgającego ciała, a więc źródła głosu lub światła, na odczuwaną przez nas ilość drgnień. Już uprzednio przekonaaliśmy się, że, gdy brzmiące ciało drga, drga także i otaczająca je masa powietrza, a także i błona bębenkowa naszego ucha i to w ten sam sposób, w jaki odbywają się drgania samego źródła głosu. Nie zaznaczając wyraźnie, przyjęliśmy wtedy jednak za warunek to, że oddalenie pomiędzy uchem a źródłem głosu nie ulega zmianie podczas rozchodzenia się fali głosowej. W takich warunkach dwa jednakie zaburzenia równowagi, wywołane w powietrzu przez ciało brzmiące w przerwie, wynoszącej okres jednego wahnienia, mają do przebycia tę samą drogę.

Okoliczność ta musi ulegz jednak zmianie, jeżeli drgające ciało w czasie pomiędzy jednym a drugim zakłóceniem równowagi przesunie się

ku nam bliżej. Wtedy późniejsze zakłócenie równowagi ma do przebycia krótszą drogę, aniżeli pierwsze, zużyje więc na to czasu mniej. Stąd odstęp czasu pomiędzy dojściem do nas pierwszego zaburzenia a dojściem następnego będzie krótszy, aniżeli odstęp czasu pomiędzy wyjściem obu zaburzeń z ich wspólnego źródła. Gdy więc mamy np. do czynienia z objawami głosu, błona bębenkowa ucha częściej będzie wciskana wewnątrz podczas posuwania się ku nam źródła głosu. Wtedy też i poślyszany przez nas ton będzie wyższy.

Z tegoż samego powodu ton staje się niższy, skoro źródło głosu od ucha się oddala.

Objawy te można z łatwością zauważyć, wsłuchując się w ton gwizdawki przebiegającej szybko obok nas lokomotywy. Z chwilą, gdy lokomotywa nas wymija, ton staje się niższy.

A teraz wymienimy w myśli ciało brzmiące na jakąkolwiek gwiazdę lub inne ciało niebieskie, którego część gazowa wysyła promienie o pewnej określonej długości; ucho zaś nasze zastąpmy spektroskopem. Za pomocą podobnego jak powyżej rozumowania dochodzimy do wniosku, że posuwanie się ciała świecącego w kierunku ziemi musi powiększyć ilość drgnień, które w ciągu jednej sekundy dojdą do szpary spektroskopu i przeciwnie, że ilość ta powinna zmaleć, w razie, jeżeli świecące ciało niebieskie będzie się od nas odda-

łało. W pierwszym przypadku w spektroskopie będziemy obserwowali to samo, cobyśmy obserwowali, gdyby szpara przyrządu była oświetlona promieniami, wychodzącymi z nieruchomego źródła światła, lecz o większej częstości drgań, w drugim zaś przeciwnie — ze źródła, wysyłającego promienie o mniejszej częstości. A więc w pierwszym przypadku powinniśmy w spektroskopie dostrzedz przesunięcie się linii w stronę fioletu, w drugim zaś przeciwnie w stronę czerwieni.

Gdybyśmy widzieli, w jakim stosunku szybkość ruchu gwiazdy znajduje się do szybkości światła, moglibyśmy obliczyć, o ile zmieni się liczba drgnień na sekundę. Odwrotnie, moglibyśmy wyrachować szybkość ruchu ciała niebieskiego, gdyby się nam udało obliczyć zmianę w ilościach drgnień spowodowaną przesunięciem linii widmowych <sup>1)</sup>.

Zawdzięczając uprzejmości prof. V o g e l a

---

<sup>1)</sup> Przypuśćmy że pewna gwiazda przybliży się ku nam z szybkością, równającą się  $\frac{1}{1000}$  części szybkości światła. Wtedy, podczas trwania jednego drgnienia, przybliży się ona ku nam o  $\frac{1}{1000}$  część długości fali. Następne drgnienie, by dojść do nas, zaoszczędzi w porównaniu do pierwszego na czasie tyle, ile pierwsze drgnienie zużyć potrzebowało na przebycie tej krótkiej części drogi. Czas ten wyniesie  $\frac{1}{1000}$  część całego okresu pełnego drgania. Stąd więc okres jednego pełnego wahanienia, przez nas dostrzeganego, stanowić będzie  $\frac{999}{1000}$  istotnego okresu. Obserwowane przez nas drgania będą więc częstsze, a więc i długość fali krótsza.

z Potsdamu, jestem w stanie przedstawić tu fotografię widma gwiazdy  $\alpha$ -Byka, którą w powiększeniu rzucam w tej chwili na ekran. Na obrazie tym widzimy cały szereg ciemnych linii, t. j. prążków absorbcyjnych. Powyższa teoria stosuje się do nich oczywiście zupełnie tak samo, jak i do jasnych linii widma. Obok przedstawione są również linie widma żelaza, które jednocześnie z widmem gwiazdy w tym samym aparacie odfotografowane zostały. Odrazu wpada nam w oko to, że każdej jasnej linii żelaza odpowiada w widmie gwiazdy ciemny prążek. Nadto przy bliższem wpatrzeniu się, dostrzegamy pewne przesunięcie tych prążków i to w stronę, odpowiadającą falom większej długości. Fakt ten świadczy o oddalaniu się gwiazdy od ziemi. Z pomiarów przesunięcia prążków wyrachował prof. Vogel szybkość tego oddalania się. Wynosi ona dla badanej gwiazdy 75 km na sekundę.

Spostrzeżenia tego rodzaju mają dla tego wielką doniosłość, że przesunięcia ciał niebieskich w kierunku linii widzenia w żaden inny sposób stwierdzić się nie dają. Rozpoczęto wykonywać je poraz pierwszy w astrofizycznym obserwatorium w Potsdamie w 1887. Już w cztery lata później zmierzono tym sposobem szybkość ruchu 47 gwiazd. Od tego czasu pomiary spektroskopowe prowadzą się również w innych wielu obserwatoriach astronomicznych. Mniemać można — jak to



twierdzi prof. Vogel —, że w ciągu bieżącego stulecia rozszerzą one nasze wiadomości o świecie gwiazd stałych w tym samym stopniu, w jakim w zeszłym stuleciu rozszerzyły znajomość systemu słonecznego.

Nie wypada mi wreszcie przemilczeć tutaj o niektórych innych niemniej ciekawych wynikach spektroskopowych badań pewnych gwiazd. Spostrzeżono np., że widmo gwiazdy Algol odznacza się liniami, przesuwającemi się to w jedną to w drugą stronę w okresie niespełna trzech dni. Fakt ten da się wytłumaczyć jedynie na podstawie przypuszczenia, że badana gwiazda to peryodycznie ku nam się przybliża, to znowu się oddala. Jest to zrozumiałe tylko wtedy, gdy gwiazda krąży po kole, które z ziemi może być widziane jedynie z boku. Ponieważ czas obiegu dany jest z obserwacji, a szybkość może być łatwo obliczona, z przesunięcia linii widmowych można więc wyrachować obwód, względnie promień koła, po którym krąży gwiazda. Nie należy się dziwić, że ruchów tych za pomocą zwykłej lunety, lub nawet teleskopu, spostrzedz nie jesteśmy w stanie, oddalenie bowiem badanych ciał od ziemi jest nadzwyczaj wielkie, a średnice przebieganych przez nie dróg, stosunkowo małe.

Lecz na tem nie koniec. Wiemy z poprzednich wykładów dobrze, jakie są warunki obrotowego ruchu ciał. Działać tu musi pewna niezmienna siła,

skierowana trwale ku środkowi. W danym wypadku siła ta pochodzić może jedynie od innego jakiegoś ciała, które krążącą dokoła planetę ku sobie przyciąga. Ciało to musi być ciałem ciemnym, inaczej dałoby widmo, a linie tego widma nie mogłyby zachowywać się w ten sam sposób, co linie widma krążącej dokoła planety. W istocie już oddawna stwierdzono dla Algolu zmienność natężenia światła, powtarzającą się w tym samym okresie czasu, co i przesunięcie się linii widma. Okoliczność tę można wytłumaczyć jedynie na mocy przypuszczenia, że ciemne ciało podczas obrotu Algolu zasłania go w pewnem położeniu i powoduje częściowe jego zaćmienia.

Na podstawie analogicznych spostrzeżeń stwierdzono istnienie całego szeregu gwiazd podwójnych. W niektórych przypadkach spostrzeżono nie tylko przesuwanie się linii widma, ale nawet ich rozdwojenie. Rozdwojenie to zmieniało się periodycznie: to wzrastało do pewnej granicy, to znowu malało aż do zniknięcia. I w tym wypadku wyjaśnienie leży jak na dłoni. Dwie gwiazdy, obie świecące, obracają się dokoła wspólnego środka. Może to mieć miejsce w przypadku dwóch ciał przyciągających się wzajemnie. Gdy jedna z gwiazd przybliżyła się ku nam, druga się od nas oddala. Linie widma przesuwają się więc w strony przeciwne. Następnie linie te zbliżają się ku sobie, a czas pewien pozostają nawet w złączeniu. Obja-

śnienie powyższe potwierdza się i przez to, że niekiedy obserwować można przesunięcie się pewnej grupy linii widmowych w jedną — innej zaś w drugą stronę. Znaczy to, że każda z tych grup liniowych pochodzi od dwóch różnych ciał.

## WYKŁAD V.

### Ruchy cząstkowe.

---

Undulacyjna teoria światła, czyli teoria drgań świetlnych, doprowadziła nas do poglądu, że w przestrzeni wolnej od jakiegokolwiek bądź ciała stałego, płynnego lub gazowego, znajdować się musi pewnego rodzaju środowisko, pośredniczące w przenoszeniu tych drgań.

Środowisko to przyjęto nazywać eterem świetlnym albo kosmicznym lub po prostu eterem. Gdy po usunięciu, względnie możliwie dokładnem wypompowaniu powietrza z pewnej przestrzeni, dojdziemy do tak zwanej «próżni», będziemy mieli do czynienia właściwie z eterem. W ten sposób otrzymany eter przedstawia — o ile nam dziś wiadomo — zupełnie te same właściwości, co i eter, wypełniający przestwory międzyplanetarne. Środowisko to — ten kosmiczny eter — posiada cechę jednorodności, mocą której uderza-

jąco wyróżnia się od wszystkich innych ciał, bezpośrednio oddziaływających na nasze organa zmysłów. Musi więc to być ciało zupełnie innego rodzaju.

W celu zaznaczenia różnicy będziemy nadawali zwykłemu ciałom miano «materji» i nazwy tej nie będziemy stosowali do eteru. Albo dobitniej jeszcze, będziemy mogli mówić o materji ważkiej, t. j. ulegającej sile ciężenia, w przeciwieństwie do nieważkiego eteru. Taki sposób wyrażania się jest zupełnie usprawiedliwiony, ponieważ nie posiadamy żadnych danych, któreby wskazywały, że eter podlega działaniu siły ciężkości, innemi słowy, że eter jest ciałem posiadającym «ciężar».

Jeszcze w niezbyt odległych czasach — w pierwszej połowie zeszłego stulecia — fizycy przyjmowali także istnienie kilku innych «nieważkich ciał», tak zwanych «fluidów». Dawne podręczniki chemii zaczynały się rozdziałem o «ciepliku». Fluid ten miał rzekomo zawierać w każdym ciele i w dodatku w tem większej ilości, im wyższa była temperatura ciała. Cząsteczki ciepłika miały posiadać własność wzajemnego odpychania się: stąd pochodziła zdolność rozszerzania się ciał od temperatury.

Zapomocą hipotezy o istnieniu ciepłika jako odrębnego ciała, bez wątpienia łatwo można było objaśnić i wytłumaczyć wiele własności ciał, np.



przechodzenie ciepła przy zetknięciu ciała gorętszego z ciałem zimniejszym, przewodzenie ciepła w ciele posiadającym różnicę temperatur. Lecz było też i wiele takich zjawisk — i to zjawisk obserwowanych niemal na każdym kroku, — objaśnienie których hipotezą cieplnego fluidu nastęczało nieprzezwyciężone trudności. Wreszcie ku ogólnemu zadowoleniu hipoteza ta powszechnie odrzucona została i ustąpiła miejsca innemu pojmowaniu rzeczy.

Każdy z nas wie dobrze, że przez tarcie, lub uderzenie dwóch ciał o siebie możemy uczynić je gorętszemi, niż były uprzednio. Na to mamy dowodów tysiące. Osie kół wagonowych ogrzewają się podczas biegu, piła rozpala się przy robocie, młot rozgrzewa się od uderzeń i t. d. Nikt z nas nie mógłby powiedzieć, skąd w przypadkach tych ciała ogrzane pobrały fluid ciepły, jeśli posiadają go wogóle więcej, niż ciała zimne. Natomiast będzie dla nas rzeczą zupełnie zrozumiałą, gdy z ust nowoczesnej nauki usłyszymy, że w przypadkach tych ma się do czynienia z przemianą widzialnych ruchów ciał jako całości na ruchy niewidzialne, składających te ciała cząstek.

Nie trudno wyobrazić sobie, że przez tarcie cząsteczki ciała, wskutek niezliczonej ilości drobnych potrażeń, wprowadzone być muszą w stan ruchu. Takie pojmowanie sprawy wydać się musi tembardziej uzasadnione, skoro uprzytomnimy sobie, że ciało ogrzane wzbudza drganie eteru, czego by

w żaden sposób dokonać nie mogło, gdyby samo nie było siedliskiem ruchu.

W ten sposób wkraczamy w dziedzinę ruchów cząsteczkowych i wykład niniejszy poświęcimy wyłącznie temu przedmiotowi, aczkolwiek będziemy mówili jedynie o ciałach gazowych. To ograniczenie wynika stąd, że właśnie ciała gazowe wykazują najprostsze własności, a więc i ich teoria kinetyczna jest w chwili obecnej najbardziej posunięta naprzód.

Znamienną własnością każdego gazu i najbardziej bijącą w oczy jest jego zdolność do bezgranicznego rozszerzania się we wszystkich kierunkach. Gdy np. w naczyniu walcowatym, opatrzonem dokładnie przystającym tłokiem, zamkniemy pewną ilość atmosferycznego powietrza, a następnie podniesieniem tłoka powiększymy pierwotną objętość gazu dziesięć lub stokrotnie, wtedy gaz, znajdujący się pod tłokiem, rozejdzie się natychmiast równomiernie po całej pozostałej przestrzeni. Zatrzymajmy wyciągnięty tłok w pewnym miejscu nieruchomo. Rozrzedzone powietrze mimo to nie straci zdolności dalszego rozszerzania się, wywierać więc musi na wszystkie strony pewne ciśnienie. Również powietrze, zawarte w tym pokoju, ciśnię z pewną określoną siłą na każdą powierzchnię, z którą znajduje się w styczności. A więc sciska nieco i to ze wszech stron ten o to

kawałek drzewa, przygniała obie strony tej oto kartki papieru, bez względu na jej położenie, pędzi do góry wodę w rurce, którą jednym końcem zanurzam w ciecz, a przez drugi ustami wyciągam w niej zawarte powietrze i t. d. A ponieważ zdolność rozszerzania się nie ustaje nigdy, przeto nigdy zniknąć nie może wywierane przez gaz na ciała ciśnienie, choćby objętość powietrza stała się dowolnie wielka. Gdybyśmy więc w walcu z tłokiem powiększyli pierwotną objętość nie sto, lecz milionkrotnie, mimo to jeszcze zawarte w nim powietrze wywierałoby na ściany pewne, choć już bardzo małe ciśnienie.

Fizyka współczesna tłumaczy wszystkie te objawy za pomocą ruchu cząstek powietrza. Przyjmujemy, że cząsteczki powietrza pędzą we wszelkich możliwych kierunkach z pewną szybkością, która jest tem większa, im temperatura gazu jest większa. Pędzące na wszystkie strony cząsteczki gazu nieustannie spotykają się z sobą, potracają się wzajemnie, uderzają o ściany naczynia i o ściany wszelkich zawartych w gazie przedmiotów. To nieustające bombardowanie ścian jest przyczyną wywieranego na nie przez gaz ciśnienia. Powstaje pytanie, jakiego rodzaju jest ten ruch cząstek? Przypuszczamy, że drobiny gazu są tak małe i zajmują w rzeczywistości tak małą część przestrzeni wypełnionej przez gaz (ca.  $\frac{1}{1000}$  część

objętości), że nie mogą oddziaływać na siebie z tak daleka i tylko przy bezpośrednim zetknięciu, albo tuż przed zetknięciem wystąpić może działanie sił przyciągających. W przerwie więc pomiędzy dwoma po sobie następującymi zderzeniami, cząsteczka gazu nie podlega wpływowi żadnej siły, jeżeli nie będziemy brali w rachubę siły ciężkości, która ze względu na nadzwyczaj małą masę drobiny odgrywać musi podrzędną rolę. Wobec tego cząsteczka gazu porusza się po liniach prostych, po każdym jednak zetknięciu się z inną cząsteczką, lub ścianą zmienia kierunek ruchu. W ten więc sposób droga pojedynczych cząsteczek przedstawia się jako najbardziej nieprawidłowa, zygzakowata linia.

Po tych, być może nieco przydługich, rozważaniach ogólnych, przystąpmy do odpowiedzi na pytanie, z jaką szybkością powinna posuwać się cząsteczka gazu, by mogła wyrzeć obserwowane w nim ciśnienie. Załóżmy, że ciśnienie gazu jest normalne, t. j. równe ciśnieniu powietrza atmosferycznego. Najpierw musimy więc obliczyć, ile wynosi to ciśnienie atmosferyczne. Na to daje nam odpowiedź znany powszechnie przyrząd, zwany *barometrem*. W otwartym naczyniu *M*, zawierającym pewną ilość rtęci (fig. 30), ustawiona jest pionowo zamknięta u góry rurka szklana *AB*, nie zawierająca wcale powietrza, o czym się łatwo przekonać możemy, pochylając rurkę nieco na bok.

Rurka wypełnia się wtedy całkowicie rtęcią do samej góry i przeciwnie opróżnia się częściowo, gdy jej nadamy powrotnie położenie pionowe. Przy tej sposobności zwróćmy uwagę na to, że po pierwsze, — przestrzeń u góry rurki ponad rtęcią jest niczem innym tylko eterem, inaczej bowiem światło nie mogłoby przestrzeni tej przeświecać, powtórę, — eter nie mógłby tam się znaleźć, gdyby nie przenikał szkła lub rtęci.

W tej chwili nie potrzebujemy jednak zajmować się znowu eterem: nie jest on przedmiotem dzisiejszego wykładu. Chwilowo rozchodzi się nam o wyjaśnienie, w jaki sposób ciśnienie zewnętrznego powietrza na wolną powierzchnię rtęci w naczyniu *M* jest w stanie podnieść płyn w rurce do góry i to tylko do pewnej ściśle określonej wysokości *D*. Stwierdzamy bowiem, że rurka dostatecznie długa, nie zostaje całkowicie wypełniona rtęcią, a przeciwnie posiada u góry przestrzeń wolną od powietrza, czyli tak zwaną pospolicie — próżnię.

Jest rzeczą łatwo do zrozumienia, dlaczego różnica wysokości obu wolnych poziomów rtęci w rurce i w naczyniu daje nam odpowiedź na pytanie, jak wielkie ciśnienie powietrza na zewnątrz rurki. W razie zupełnego braku atmosfery, rtęć



Fig. 30.



w rurce mogłaby tylko wtedy pozostać na wysokości  $D$ , gdyby rtęć w naczyniu zewnętrznym podniesiona została również do tej samej wysokości. Stąd dochodzimy do wniosku, że powietrze zewnętrzne wciska zwierciadło rtęci w naczyniu w dół z taką samą siłą, z jaką czyni to słup rtęci wysoki na odległość poziomów od  $C$  do  $D$ .

Wysokość ta nie jest jednak zawsze jedna i ta sama, przeciwnie ulegać może zmianom. By mieć jednak do czynienia z ściśle określonym przypadkiem, przyjmijmy, że w pewnych warunkach wynosi ona 76 cm, a wypełniająca rurkę rtęć ma temperaturę  $0^{\circ} C$ . Każdy centymetr sześcienny rtęci waży w tej temperaturze 13,6 g.

Odwróćmy na chwilę uwagę naszą od barometru i wyobraźmy sobie, że ponad poziomą płytą stołu, na którym w tej chwili wykonujemy nasze doświadczenia, wznosi się warstwa rtęci 76 cm wysoka. Nad każdym centymetrem kwadratowym tej powierzchni wznosi się więc słup rtęci o objętości 76 centymetrów sześciennych. Ciężar tego słupa wynosi w takim razie

$$13,6 \times 76 = 1033,6 \text{ g},$$

czyli w liczbie okrągłej 1030 g. Ciężar ten dźwiga na sobie  $1 \text{ cm}^2$  powierzchni stołu. Przerachowując siłę tą na przyjęte poprzednio  $C. G. S.$  jednostki, znajdziemy,

$$981 \times 1030 = 1010000 \text{ Dyn},$$

ponieważ, jak wiemy, ciężar 1 g równa się sile 981 dyn.

Tej samej wielkości ciśnienie wywiera powietrze nie tylko na  $1 \text{ cm}^2$  powierzchni stołu, lecz i na każdą inną powierzchnię z którą się styka, a więc, np. i na każdy centymetr kwadratowy powierzchni tłoka, zamykającego w walcu gaz o pewnej gęstości (fig. 31). Ponieważ mamy wyrachować szyb-

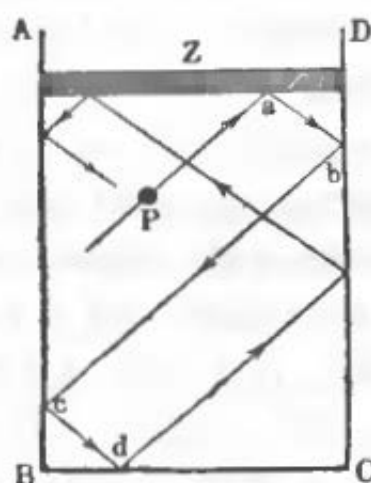


Fig. 31.

kość cząsteczek gazu dla pewnej niezmienniej temperatury, przeprowadźmy więc nasz rachunek, przypuśćmy, dla temperatury  $0^{\circ} \text{C}$ . By rachunek ten uskutecznić, zmuszeni jesteśmy poczynić pewne dowolne założenia. Są one jednak dla wprawnego matematyka zgoła zbyteczne. Nie będziemy więc uwzględniali wzajemnych spotkań pomiędzy cząsteczkami gazu. Głębiej wnikające rozważanie tej kwestyi poucza, że w rzeczywistości uderzenia cząsteczek o cząsteczki — jeżeli tylko ich rozmiary są dostatecznie małe — nie może mieć żadnego wpływu

na wielkość ciśnienia, wywieranego na ściany naczynia. Zresztą nawet bez pomocy rachunku można się o tem łatwo przekonać. Na fig. 31 mamy zaznaczoną cząsteczkę  $P$ . Za chwilę ściana otrzyma od niej uderzenie. Uderzenie to przyczyni się nieco do zwiększenia całkowitego ciśnienia, wywieranego przez gaz na ścianę tłoka. Może się jednak zdarzyć, że cząsteczka  $P$ , zanim do ściany tej dojdzie, zostanie przez inną cząsteczkę zatrzymana i odrzucona w stronę przeciwną. Zdawałoby się więc mogło, że w takim razie nie przyczyni się ona do zwiększenia ciśnienia, lecz przeciwnie całkowite ciśnienie wypadnie nieco mniejsze. Tak jednak nie jest i być nie może. Dajmy na to, cząsteczka  $P$  zatrzymuje w biegu inną cząsteczkę, pędzącą naprzeciw. Skoro nastąpi spotkanie, obie cząstki odskoczą w strony wprost przeciwne, a więc cząsteczka, pędząca od ściany tłoka, z powrotem będzie ku niej nawrócona, a także i cząsteczka dążąca ku ścianie, zostanie odrzucona w kierunku powrotnym. W takim razie ściana tłoka otrzyma przypadające w danej chwili uderzenie, aczkolwiek uderzenie to będzie pochodziło od innej cząsteczki.

Drugie założenie, które dla uproszczenia rachunku również uczynić nam wypada, polega na odpowiednim wyborze kształtu naczynia. Niech naczynie, zawierające gaz, nie jest walcem lecz kostką, której dolną podstawą ma być nieruchoma ściana  $BC$ , zaś górną — ruchoma ściana tłoka  $Z$ . Wła-

ściwą drogą pojedynczej cząsteczki jest łamana linia  $Pabcd$ , znacząca zmienny co do kierunku ruch cząsteczki w trójwymiarowej przestrzeni. Przypuśćmy jednak, że tak nie jest. Załóżmy, że całkowita ilość cząsteczek rozdzielona jest na trzy równe części, z których jedna ma kierunek prostopadły od ściany  $BC$  do  $Z$ , druga — prostopadły pomiędzy ścianami  $AB$  i  $CD$ , trzecia zaś zachowuje kierunek z przodu w tył i odwrotnie, a więc wywiera ciśnienie na tylną i przednią ścianę naczynia. Założenie to jest o tyle usprawiedliwione, że rezultat, otrzymany przy pomocy dokładnego rachunku, ostatecznie wypada ten sam. Nie mniej jednak założenie to jest zupełnie dowolne.

Trzecim wreszcie założeniem ma być przypuszczenie, że krawędź kostki jest tylko na 1 cm długa. Założenie to jest również usprawiedliwione, ponieważ naczynie, zawierające powietrze o danej gęstości, może mieć kształt zupełnie dowolny. Z licznych i dokładnych pomiarów wiemy, że ciężar 1 cm<sup>3</sup> powietrza pod ciśnieniem jednej atmosfery (760 mm) i w temperaturze 0° C wynosi 0,001293 g, tyleż więc wynosi masa wszystkich zawartych w tej objętości cząsteczek gazu, powodujących ciśnienie na ściany naczynia. Według powyższych założeń ciśnienie, wywarte przez gaz jedynie na ścianę tłokową, będzie trzecią częścią powyższego ciężaru, a więc wyniesie 0,000431 g. Zamiast tych liczb szczególnych dla krótkości na-

dal używać będziemy liczb ogólnych, znacząc je odpowiednio literami  $m$  i  $\frac{m}{3}$ .

Przyjmijmy teraz, że szybkość cząsteczki wynosi  $v$  cm na 1 sek. Jest to wielkość dla nas nieznana. Każda cząsteczka w czasie pomiędzy jednym a drugim uderzeniem o ścianę tłoka ma przebyć drogę 2 cm, mianowicie 1 cm w dół i 1 cm z powrotem do góry. Ile razy droga ta, t. j. 2 cm, mieścić się będzie w drodze przebytej w ciągu 1 sekundy, t. j. w szybkości  $v$  cm, tyle razy na sekundę cząsteczka gazu uderzy o ścianę tłoka. A więc ilość tych uderzeń wyniesie  $\frac{v}{2}$ .

A teraz zastanówmy się bliżej jeszcze nad tem, co się stanie po każdym oddzielnym uderzeniu cząsteczki o ścianę tłoka. Wyobraźmy przytem sobie, że ściana rzeczywiście za każdym uderzeniem nabywa pewną aczkolwiek bardzo nieznaczną szybkość. Obrachujmy, do jakiego stopnia zsumują się te drobne działania w ciągu 1 sekundy. Znalazszy zaś szybkość, którą nabędzie tłok w ciągu jednostki czasu, będziemy mogli wyprowadzić wniosek o wielkości działającej siły. Lecz ruch, który tłokowi nada siła określonej wielkości, zależy i od masy tłoka. By mieć do czynienia z wielkościami konkretnymi, zrobmy założenie, że masa tłoka jest tysiąc razy większa od trzeciej części masy gazu zawartego w naszym na-



czyniu, t. j. od masy tych cząsteczek, które wyłącznie wywierają ciśnienia na ścianę tłoka.

Każda cząsteczka uderzy w ciągu 1 sekundy  $\frac{v}{2}$  razy o ścianę tłoka. Wyobraźmy sobie, że wszystkie cząstki, poruszające się pomiędzy dwiema ścianami, jednocześnie uderzają o ścianę. Masa tych cząstek wynosi  $\frac{m}{3}$  g.

W każdym uderzeniu należy rozróżniać dwa okresy. W pierwszym okresie siła, z jaką tłok oddziaływa na uderzające weń cząsteczki, niweczy szybkość  $v$  tych cząstek. Siła ta, gdyby wywierała na cząsteczki działanie w kierunku ich ruchu, nadałaby im w ciągu tego samego czasu szybkość  $v$ . Ponieważ z zasad dynamiki wiemy, że każdemu działaniu odpowiada równe przeciwdziałanie, więc i siła, z jaką cząstki działają na ścianę tłoka, jest tak samo wielka, jak siła oddziaływania tłoka na cząsteczki gazu. Wobec tego, w czasie pierwszego okresu uderzenia, na ścianę tłoka działa siła, która masie  $\frac{m}{3}$  może w ciągu 1 sek. nadać szybkość  $v$  cm na sekundę. Ponieważ masę ściany tłoka przyjęliśmy 1000 razy większą od masy  $\frac{m}{3}$ , więc i szybkość nadana ścianie tłoka działaniem tej siły wyniesie  $\frac{v}{1000}$ .

Podczas drugiej połowy uderzenia każda cząsteczka gazu otrzyma z powrotem szybkość  $v$  w stronę ku dołowi naczynia. Z szybkością tą będzie się ona od ściany oddalała. Na mocy zasady działania i przeciwdziałania musimy przyjąć, że tłok otrzyma znowu szybkość  $\frac{v}{1000}$ . Ostatecznie całkowite działanie jednorazowego uderzenia na tłok nada mu szybkość podwójną, t. j.  $\frac{2v}{1000}$ , a ponieważ podczas 1 sekundy uderzeń takich będzie  $\frac{v}{2}$ , więc nabyta przybkość w ciągu 1 sekundy wyrazi się w centymetrach liczbą

$$0,002v \times \frac{v}{2} = 0,001 v^2.$$

Chcąc obliczyć w dynach siłę, która nadała w ciągu 1 sek. tłokowi tę szybkość, należy wartość jej wymnożyć przez liczbę gramów, stanowiących masę tłoka (str. 23). Ilość tych gramów wynosi  $\frac{m}{3} \times 1000$ , a więc dla działającej siły otrzymamy liczbę

$$p = 1000 \frac{m}{3} \times 0,001 v^2 \text{ dyn}$$

czyli

$$p = \frac{mv^2}{3}.$$

Gdybyśmy w rachunku powyższym założyli, że

masa tłoka jest nie 1000, lecz 10000 razy większa od masy  $\frac{1}{8}$  części zawartego w naczyniu gazu, otrzymalibyśmy ten sam rezultat końcowy, ponieważ jeden z czynników naszego rachunku zmalałby w tym samym stopniu, w jakim wzrósł drugi.

Otrzymany wzór wyraża ciśnienie zamkniętego w naczyniu powietrza, obliczone na jednostkę pola, t. j. na 1 cm<sup>2</sup> powierzchni tłoka. Wiemy jednak na podstawie doświadczeń z barometrem, że ciśnienie to w temperaturze 0° C wynosi 1010000 dyn (str. 178) a więc

$$\frac{m}{3} \times v^2 = 1,010,000$$

a ponieważ obrachowaliśmy (str. 181), również doświadczalnie, że

$$\frac{m}{3} = 0,000431,$$

więc

$$v^2 = \frac{1010000}{0,000431} = 2340000000.$$

Stąd możemy obrachować z łatwością samo  $v$ , wiemy bowiem, że wielkość ta wymnożona przez siebie równa się 2340000000. Jest to liczba 48000, a więc

$$v = 48000 \text{ cm}$$

na 1 sekundę. Rezultat ten potwierdza nasze przypuszczenie, że cząsteczki gazu znajdują się w bardzo

szybkim ruchu, wynoszącym, jak widzimy, w temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$  — 480 m na sekundę <sup>1)</sup>.

Otrzymany powyższą drogą wzór

$$p = \frac{m}{3} v^2$$

nie tylko poucza nas o tem, że ze wzrostem temperatury wzrosnąć musi ciśnienie gazu, ponieważ  $v$  staje się wtedy większe, lecz także wyjaśnia, że ciśnienie to będzie tem większe, im większa jest masa  $m$  gazu, zawarta w jednostce objętości, t. j. im większa jest jego gęstość.

Wywody te sprawdzają się doświadczalnie w całej rozciągłości. Oto mamy tu długą rurkę szklaną, zamkniętą na jednym końcu, a zanurzoną drugim otwartym końcem w głębokim naczyniu z rtęcią, podobnie jak w doświadczeniu z barometrem fig. 30. Tylko ponad rtęcią w rurce niema obecnie próżni; przeciwnie, znajduje się pewna ilość powietrza. Wobec tego wysokość rtęci w rurce jest też niższa. Pochodzi to stąd, że cząsteczki powietrza, uderzając o powierzchnię rtęci, wciskają ją do pewnego stopnia na dół.

Rurkę tę możemy zanurzyć w naczyniu z rtęcią jeszcze głębiej, przez co naturalnie zmniejszy się objętość zamkniętej w niej ilości powietrza. Pociągnąć to musi za sobą częstsze uderzenia cząsteczek

---

<sup>1)</sup> Przyp. tłumacza. Jest to szybkość, odpowiadająca mniej więcej szybkości pocisku nowoczesnej broni palnej.

gazu o powierzchnię rtęci. Cząsteczki zamkniętego gazu uprzednio miały do przebycia całą długość, zajętej przez powietrze objętości, obecnie, gdy ta objętość zmalała, przebiegać będą drogę krótszą, a więc w mniejszych odstępach czasu uderzać będą o powierzchnię rtęci. W samej rzeczy widzimy, że gdy rurkę zanurzymy, opada poziom rtęci, aczkolwiek nie w tym samym stopniu, w jakim rurka została zagłębiona. Zdaje mi się, że byłby to trud zbyteczny z mej strony, gdybym chciał wyjaśniać jeszcze, dla czego w razie wyciągania rurki podnosi się w niej słup rtęci.

Obniżenie poziomu rtęci w rurce można wywołać jeszcze i w inny sposób. Trzymajmy rurkę nieruchomo na tem samem stałe poziomie. Ogrzejmy jednak nieco zapomocą tego oto płomienia jej koniec górny, zawierający powietrze. Szybkie ruchy cząsteczek płonącego gazu świetlnego, wywołane działaniem chemicznej przemiany, udzielą się cząsteczkom zewnętrznej warstwy szklanej rurki. Szkło przewodzi następnie ciepło ku stronie wewnętrznej, t. j. zewnętrzne ogrzane cząstki ściany szklanej, znajdujące się w bardzo szybkim ruchu, udzielają ruchu tego cząstkom wewnętrznym. Ten przyrost ruchu przejmują powoli cząsteczki powietrza zawartego w rurce, szybkość ich ruchu wzrasta, uderzenia o ściany stają się częstsze, a więc powiększa się i ciśnienie gazu, a poziom rtęci przesuwają się ku dołowi.



Wyprowadziliśmy powyżej zapomocą rachunku, jaka jest szybkość ruchu pojedynczych cząsteczek gazu. Otrzymany wynik na pierwszy rzut oka wydaje się wprost niewiarogodnym, a w każdym razie wywołuje wrażenie czegoś, co nie odpowiada rzeczywistości. Tak jednak nie jest. Przy bliższem, zbadaniu sprawy, okazuje się bowiem, że teoria usuwa wszystkie występujące tu wątpliwości i znakomicie je przewyżcza. Zarzutu, że tych ruchów pojedynczych cząsteczek nie widzimy i nie czujemy wcale, niema prawie potrzeby odpierać. Ruchy te są niewidzialne, bo niedostrzegalne są również i same cząsteczki. A co się tyczy ich odczuwania, to w rzeczywistości moglibyśmy odczuwać je tak samo dobrze, jak odczuwamy powiew wiatru. Obecność wiatru dostrzegamy przecie jedynie tylko wskutek ciśnienia przezeń wywieranego. Oba przypadki w istocie rzeczy nie różnią się wcale. Różnica polega na tem, że cząsteczki gazu, znajdującego się w spoczynku, wywierają na wszystkie strony jednakie ciśnienie. Oprócz tego panuje we wszystkich cieczach i gazach, wchodzących w skład naszego ciała, to samo ciśnienie, co i w otaczającym nas powietrzu zewnętrznem.

Zanim przejdziemy do dalszych rozważań, zwróćmy jeszcze uwagę naszą na to, że i w płynącej masie powietrza właściwie istnieją ruchy dwojakie, mianowicie: nieskoordynowane ruchy

cząsteczek we wszelkich możliwych kierunkach, i skoordynowany ruch masy powietrza, jako całości. Można to wypowiedzieć i w inny sposób: w gazie, znajdującym się w spoczynku, cząsteczki gazu równomiernie poruszają się we wszystkich możliwych kierunkach, gdy natomiast w gazie płynącym przeważa ruch o określonym kierunku.

Pewna wątpliwość, którą należy istotnie wziąć tu pod rozwagę, jest następująca. Jeżeli cząsteczki gazu w rzeczywistości poruszają się stosownie do wymagań teorii, z szybkością kilkuset metrów na sekundę, to powinnyby w bardzo krótkim przeciągu czasu, w jakąś nieznaczną część sekundy, przebiec wzdłuż ten oto pokój. Należałoby więc spodziewać się, że w tych warunkach występować musi bezustanne nadzwyczaj szybkie wymieszanie różnych warstw powietrznych. W rzeczywistości jednak, aczkolwiek istotnie takie zmieszanie się warstw ma miejsce, odbywa się ono stosunkowo powoli. Gdyby powietrze, zawarte w tej sali, nie ulegało szybkiej cyrkulacyi, wywołanej różnicą temperatur, możnaby dość długo czekać, zanim obecność, wytwarzającego się w jednym końcu pokoju gazu, dałaby się dostrzedz po przeciwnej jego stronie, np. po woni, przez ten gaz wydawanej.

Jak to zjawisko pogodzić z wynikami teorii, z tą wielką szybkością pojedynczych cząsteczek? Jak wytłumaczyć, że ciężkie gazy, np. bezwodnik

kwasu węglowego, mogą pozostawać przez czas dłuższy w otwartym naczyniu i uchodzą zeń bardzo powolnie. O bezwodniku węglowym wiemy np., że zalega on dna wielu grot i pieczar podziemnych. A przecież cząsteczki tego gazu posiadają szybkość, dzięki której mogłyby wznieść się na tysiące metrów w górę, wbrew działaniu siły ciężkości!

W istocie rzeczy objawy te nie przeczą jednak teorii, gdyż są one również wynikiem faktów przez teorię przewidzianych. Należy tylko pamiętać o tem, że teoria przypuszcza i przewiduje wzajemne spotkanie się cząstek gazu. Musimy sobie rzecz całą przedstawić w taki sposób. Pojedyncze cząsteczki istotnie posiadają wielkie szybkości ruchu, lecz w zwykłych warunkach wskutek ustawicznych spotkań daleko zajść nie mogą. Cząsteczka gazu, posuwając się z ogromną szybkością, potraça co chwila inne cząsteczki, zawraca z drogi, odbija się w bok, w dół, do góry, — słowem biegnie po linii łamanej, o bardzo krótkich bokach. Jeżeli w ten sposób zrobi ona w istocie — nawet w bardzo krótkim czasie (1 sekundy) — drogę paruset metrów, albo nawet paru kilometrów, to przytem nie zdoła jednak posunąć się naprzód więcej, jak o 1 milimetr.

Na podstawie takiego pojmowania rzeczy, z danych doświadczalnych o szybkości mieszania się dwóch gazów udało się nawet wyrachować, jak wielką jest droga, pomiędzy jednym a drugim

uderzeniem cząsteczki o inną cząsteczkę, czyli zdołano obliczyć tak zwaną swobodną drogą molekuly.

Dla cząsteczek powietrza o temperaturze i gęstości, jakie posiada np. powietrze tej sali, droga ta wynosi około 0,00001 cm. Jest oczywista, że tu może być mowa jedynie o obliczeniu średniej wartości tej swobodnej drogi. Ruchy niezliczonej ilości pojedynczych cząsteczek są bardzo zawiłane i nieprawidłowe, a warunki swobodnego przejścia pomiędzy sąsiednimi cząsteczkami mogą być dla pewnej cząstki korzystniejsze, niż dla jakiegokolwiek innej. Wogólności w kinetycznej teorii gazów mamy jedynie do czynienia z liczbami przeciętnymi, a nawet liczba, którą powyżej wyprowadziliśmy dla szybkości cząsteczek gazu, nie może być uważana za szybkość, odpowiadającą dokładnie każdej cząsteczce. Z chwilą, gdy cząsteczki, pędzące ku sobie, zderzą się i odskoczą, jak dwie sprężyste kule, powstaje w większości wypadków różnica w ich szybkościach nawet wtedy, gdy jej przed zderzeniem nie było. Jest więc rzeczą zupełnie możliwą, że pewna część cząsteczek, dzięki całemu szeregowi sprzyjających zderzeń, osiągnie szybkość, przewyższającą dwukrotnie, a może nawet i dziesięciokrotnie średnią szybkość, wyrachowaną z powyżej wyprowadzonego wzoru. Lecz naturalnie tych uprzywilejowanych

cząsteczek jest niewiele, stanowią one bowiem tylko nieznaczną część całości gazu.

Wreszcie na zakończenie dodam, że na podstawie zjawisk, których niestety tu roztrząsać nie jestem w stanie, możemy ze sporą dozą dokładności ocenić, ile pojedynczych drobin mieści się w jednym centymetrze sześciennym otaczającego nas powietrza. Wyrachowano mianowicie, że odpowiadająca tej ilości, liczba jest liczbą siedmiocyfrową. Jest to wynik niezbyt oddalony od istotnego stanu rzeczy i przedstawiający rzeczywistość dość dokładnie.

Przypomnijmy sobie, że w naszych rozumowaniach o szybkości rozchodzenia się głosu w powietrzu w postaci kolejno następujących po sobie zgęszczeń i rozrzedzeń bardzo często braliśmy pod uwagę ilość powietrza, zajmującą przestrzeń nie większą od 1 mm<sup>3</sup>, a mimo to zupełnie dobrze potrafiliśmy zdać sobie sprawę z drgań tej drobnej masy, jako też ze zmian gęstości jakim ona podlega. Nie potrzebujemy obawiać się, by ta mała uważana przez nas ilość powietrza, mogła wymknąć się, że tak powiem, z pod rąk naszych i w jednej chwili rozsypać się na wszystkie strony. Co prawda wciskają się do niej cząstki obce z zewnątrz, ale tylko, jakieśmy to widzieli, nie głębiej jak na 0.00001 cm. Przytem większość tych cząstek zostaje wyrzucona z powrotem. W tym samym również stopniu będzie się odbywać i po-



wrót tych cząstek, które w rozważanej objętości powietrza potrafiły się wymknąć. Dzięki właśnie tym wzajemnym zderzeniom główna masa cząsteczek pozostaje przez czas pewien niezmienniona i w ten sposób rozważana niewielka ilość gazu zachowuje swą indywidualność. Możemy powiedzieć nawet, że ilość ta wcale prawie nie przyjmuje do wnętrza swego cząsteczek obcych z zewnątrz, a więc jako taka może, podczas gdy jej cząstki pędzą we wszystkie strony, poruszać całością w tę lub inną stronę i jednocześnie, wskutek bombardowania cząstkami z zewnątrz — ulegać większym lub mniejszym zmianom gęstości.

Takie to drobne masy powietrza, składające się mimo to jeszcze z ogromnej ilości pojedynczych cząsteczek, mieliśmy zawsze na uwadze wtedy, gdyśmy wyprowadzali nasze wnioski o szybkości rozchodzenia się drgań głosowych. Wtedy nie było mowy o pojedynczych cząsteczkach gazowych, lecz o bardzo drobnych objętościach gazu jako całościach.

A teraz jeszcze wypada nam zaznajomić się z trzema pewnymi rodzajami zjawisk, które bardziej może od innych nadają się do stwierdzenia prawdziwości rozważanej przez nas teorii.

Zacznę przedewszystkiem od wykonania pewnego doświadczenia, którego wyniki dadzą nam podstawę do wyjaśnienia pierwszego z tych zjawisk, mianowicie zjawiska, ogrzewania się wzglę-

dnie oziębianie się gazu wskutek zgęszczenia względnie rozrzedzenia. Oto mamy tu zawieszone na niciach dwie kule z kości słoniowej, jedną — wielką, drugą — stosunkowo małą. Mała kulka niech wyobraża nam cząsteczkę gazu, duża zaś — tłok walca, cząsteczkami temi potrącany. Umocujmy większą kulę nieruchomo i pozwólmy mniejszej spaść na nią z pewną szybkością. Po zderzeniu się obu kul, mniejsza odskoczy z powrotem z tą samą szybkością, z jaką na większą kulę spadła. Mniej więcej taki sam przebieg będzie miało to doświadczenie wtedy, gdy wielka kula, aczkolwiek nie umocowana, w chwili uderzenia mniejszej znajdować się będzie w spokoju. Inaczej jednak rzecz się cała przedstawi w razie ruchu wielkiej kuli w chwili uderzenia o nią kulki małej. Widzimy, że w przypadku posuwania się kuli wielkiej na przeciw kuli małej, ta ostatnia po zderzeniu odskoczy wyżej, a więc otrzyma szybkość większą od tej, z jaką trafiła kulę większą. I odwrotnie, w razie usuwania się kuli większej przed pędzącą ku niej kulką mniejszą, ta ostatnia odbija się z szybkością mniejszą.

Wyniki tego doświadczenia zastosujemy do poprzednio przez nas rozpatrywanego walca z tłokiem, wypełnionego wewnątrz gazem. Wyobraźmy sobie, że wciskamy tłok do walca. Każda cząsteczka gazu, trafiająca tłok i przezeń odbita z powrotem, odskakuje z nieco większą szybkością, a więc średnia

szybkość cząsteczek ściskanego gazu musi wskutek tego wzrastać. Pewna liczba cząsteczek otrzyma zwiększoną szybkość. Ten przyrost szybkości wobec nieustających wzajemnych zderzeń pomiędzy cząsteczkami nie może być stracony, rozdzielić się on musi równomiernie na wszystkie cząsteczki, a więc i ich średnia szybkość się wzmoże.

Zwiększenie szybkości poszczególnych cząsteczek ciała jest wyrazem podniesienia jego temperatury. Należy więc oczekiwać, że następstwem ściśnięcia gazu będzie jego ogrzanie się, i przeciwnie rozrzedzenie gazu pociągnie za sobą jego oziębienie.

Te zmiany temperatury w gazie, podlegającym zmianom gęstości, znane są oddawna. Możemy je z łatwością obserwować, jeżeli tylko ściany naczynia, w którym pewną ilość gazu będziemy poddawali zgęszczeniom lub rozrzedzeniom, potrafimy ochronić od oddawania ciepła na zewnątrz lub przyjmowania go stamtąd. Najprostszym środkiem, wiodącym do tego celu, będzie szybkie wykonanie doświadczenia. Zmiany objętości należy więc uskuteczniać z taką szybkością, by ściany naczynia nie miały czasu oddać ciepła na zewnątrz, względnie pobrać go stamtąd w przypadku oziębiania się gazu. Nie ma też koniecznej potrzeby, by ruchoma ściana naczynia, zawierającego gaz, była tłokiem. Jeżeli w rurce szklanej, używanej przez nas poprzednio do doświadczeń z barome-

trem, pozwolimy rtęci dostatecznie szybko opadać, spadnie również temperatura zamkniętego w rurce gazu. Toż samo stać się musi i w większych masach powietrza, jeżeli w pewnem miejscu zajmowanej przez gaz przestrzeni znajdą lokalne zmiany gęstości.

Poprzednio omówiliśmy też sprawę, dlaczego jedna ruchoma warstwa gazu, uderzając o drugą nieruchomą, napotyka w niej rodzaj stałej ściany. Wiemy, że przyczyną tego zjawiska jest nadzwyczaj krótka swobodna droga pojedynczych cząstek. Gdy więc pewna część powietrza ulega zmniejszeniu objętości, otaczające ją sąsiednie warstwy muszą oczywiście ku niej podążać. Wskutek tego pojedyncze molekuly uważanej części powietrza, po odbiciu od naciskających je warstw sąsiednich, otrzymają zwiększoną szybkość ruchu.

To podwyższenie temperatury wskutek ściskania gazu doskonale dają się sprawdzić w t. z. «ogniwie pneumatycznym». Przyrząd ten — jest to mocna, zatopiona z jednego końca rura szklana, zaopatrzona w tłok, szczelnie w niej chodzący. Szybkim ruchem ręki wciskamy tłok wewnątrz. Następuje gwałtowne rozgrzanie się zamkniętej masy gazu i w przypadku, gdy rurkę napelnimy parą dwusiarczku węgla, zapalenie się tegoż.

W celu przedstawienia zjawiska wprost przeciwnego do tego, które obserwujemy w ogniwie pneumatycznym, zrobmy następujące doświadcze-



nie. Wypełnijmy jeden zbiornik szklany powietrzem wilgotnem, a z drugiego wypompujemy powietrze. Połączmy następnie oba zbiorniki rurką. Z chwilą otwarcia kurka, zamykającego połączenie pomiędzy obu zbiornikami, zauważymy w pierwszym z nich powstanie obłoczka mgły, co jest dowodem znacznego ochłodzenia się zawartego w nim gazu. — Rezultaty powyższych doświadczeń również można dokładnie obrachować. Stwierdzono np. że powietrze o temperaturze  $15^{\circ}\text{C}$ , raptownie ściśnięte do piątej części pierwotnej objętości, ogrzewa się aż do  $280^{\circ}\text{C}$ . Nie powinniśmy dziwić się, że zjawisko, występujące w tym stopniu, odgrywa wybitną rolę w naturze i w zastosowaniach praktycznych. Uwzględniać je musimy, np. wtedy gdy chcemy badać rozdział temperatur w różnych warstwach atmosfery ziemskiej. W powietrzu krążą bezustannie to słabsze, to silniejsze prądy, nie tylko w kierunku poziomym, lecz również i w innych kierunkach, np. z dołu do góry i odwrotnie. Gdybyśmy zechcieli przypuścić, że wskutek ruchów tych temperatura całej masy powietrza będzie wszędzie jednaka, podobnie jak w wymieszanej masie wody, popełnilibyśmy błąd wielki. Podnosząca się ku górze warstwa powietrza, napotyka tam ciśnienie coraz to mniejsze, a więc rozpręża się i wskutek tego ochładza. Odwrotnie zstępujące ku ziemi warstwy powietrza ulegają zgęszczeniu, a więc



ogrzewają się. I chociaż wzajemne wymieszanie się warstw powietrznych odbywać się więc może tylko w ten sposób, że powietrze, schodzące ku dołowi ogrzewa się, a podnoszące się ku górze jednocześnie się oziębia, jednak nie pociąga to jeszcze za sobą konieczności równomiernego rozkładu temperatury, lecz przeciwnie temperatura powietrza maleć będzie w kierunku od warstw niższych ku wyższym. I rzeczywiście obserwowana dla różnych warstw atmosfery różnica temperatur zgadza się w przybliżeniu z wielkością, obrachowaną na mocy powyższego rozważania.

Drugim zjawiskiem, które mamy obecnie rozpatrzeć, jest tak zwane tarcie wewnętrzne gazu. Wiemy już, że kłoc drewniany, posuwany po powierzchni stołu, podlega ze strony tegoż stołu działaniu siły w kierunku przeciwnym ruchowi — siły, którą nazywamy tarciem (str. 11). Wiemy też, że i poruszający się kłoc również oddziaływa na stół i stara się go z taką samą siłą pociągnąć za sobą. Coś podobnego ma również miejsce wtedy, gdy dwie warstwy jakiegokolwiek cieczy albo gazu poruszają się z nierówną szybkością równolegle do płaszczyzny, rozdzielającej obie warstwy. Warstwy te ulegają w takim razie pewnemu wzajemnemu oddziaływaniu, dążnością którego jest wyrównanie istniejących różnic w szybkościach obu warstw, to znaczy — oddziaływanie to jest dla ruchu jednej z warstw czynnikiem

hamującym, dla drugiej zaś przeciwnie czynnikiem przyspieszającym. W ciałach gazowych zjawisko to tłumaczy się w następujący właściwy sobie sposób.

Nie rozpatrujemy tu mianowicie istotnego działania siły, lecz przede wszystkim zwrócimy uwagę naszą na ruch samych cząsteczek. Pomiedzy ścierającymi się warstwami  $P$  i  $Q$  fig. 32 musi odbywać się wymiana cząsteczek. Niech warstwa  $P$  ma szybkość ruchu większą od warstwy  $Q$ . Czą-

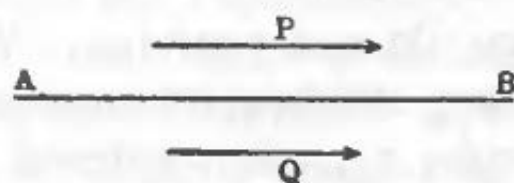


Fig. 32.

steczki gazu z warstwy  $P$  przenikać będą po przez płaszczyznę  $AB$  do warstwy  $Q$ . Tu przyjmą one udział w ruchu wraz z cząsteczkami o mniejszej szybkości. Oczywiście szybkość warstwy  $Q$  jako całości musi wobec tego wzrastać, a odwrotnie dla tych samych powodów wskutek przenikania cząsteczek z  $Q$  do  $P$ , szybkość warstwy  $P$ , jako całości, maleć. Całe zjawisko polegać więc będzie poprostu na wymieszaniu się warstw o nierównej szybkości ruchu, i chociaż przebieg jego musi się odbywać stosunkowo powoli z przyczyn poprzednio wyjaśnionych, to jednak da się sprawdzić

rachunkowo, że odbywa się ono zgodnie z rezultatami odpowiednich pomiarów doświadczalnych.

Pomiary te można przeprowadzić w bardzo rozmaity sposób. Zauważmy przedewszystkiem, że na mocy istnienia tarcia wewnętrznego w gazach, możemy płytkę ciała stałego, dającą się przesuwac w kierunku własnej płaszczyzny, zmusić do ruchu w tym samym kierunku za pomocą drugiej płytki, ustanowionej do pierwszej równolegle w pewnym od niej oddaleniu. Płytką przesuwana przez nas pociąga za sobą przedewszystkiem najbliższą warstewkę przylegającego do niej powietrza. Warstewka ta wskutek wymiany składających ją cząsteczek z cząsteczkami drugiej z rzędu warstewki pociągnie ją za sobą, ta znowu w ten sam sposób oddziaływa na trzecią i t. d. aż do ostatniej, sąsiadującej z drugą płytką. Ta druga płytką jest więc potrącana uderzeniami cząsteczek z warstwy przylegającego do niej powietrza, zostaje więc wprowadzona w ruch i poruszać się będzie w tym samym kierunku, co i płytką pierwszą.

Zjawisko to daje się z łatwością odtworzyć za pomocą dwóch poziomych okrągłych blaszek łyżczykowych, które obracać się mogą na pionowych osiach w ten sam sposób, jak igła kompasu, a więc są zdolne do obrotów w ich własnej płaszczyźnie. Ustawmy obie te blaszki pod szklanym kloszem tak, by ich punkty środkowe znajdowały się ponad sobą. Do dolnej blaszki przytwierdźmy

w dodatku parę namagnesowanych igiełek stalowych. Gdy teraz w odpowiedni sposób poruszać zaczniemy magnesem w pobliżu klosza, dolna płytką, pocnie się kręcić i pociągnie za sobą górną blaszkę w tym samym kierunku.

Powstaje jeszcze pytanie, jaki wpływ wywierać będzie rozcieńczenie powietrza na przebieg powyższego doświadczenia, innymi słowy, w jakim stopniu tarcie wewnętrzne gazu zmienia się ze zmianą jego gęstości. Oczywiście liczba cząstek, przechodzących przez płaszczyznę  $AB$  (fig. 32) w jednostkę czasu, ulegnie teraz zmniejszeniu, co w myśl powyższych rozważań powinno stać się czynnikiem, działającym ujemnie na przenoszenie ruchu. Wpływowi czynnika tego przeciwdziałać jednak będzie inny czynnik, o wprost przeciwnym kierunku działania. W doświadczeniu z płytkami tłuszczowymi zmienia się oczywiście szybkość poziomych warstewek powietrza powoli od dołu ku górze. Coś podobnego możemy wyobrazić sobie i na fig. 32. Przenoszenie ruchu przez płaszczyznę  $AB$  wpoprzek będzie oczywiście zależne nie tylko od ilości cząsteczek powietrza, które w tem udział wezmą, lecz także i od tego, z jakich warstw ponad i popod płaszczyznę  $AB$ , cząstki te pochodzą. Im z wyższych warstw wyjdą cząsteczki, przenikające płaszczyznę  $AB$ , tem większą szybkość nadać one mogą warstewkom, znajdującym się pod tą płaszczyzną.

Każda z cząsteczek gazu bierze udział w ruchu tej warstewki, w której nastąpiło ostatecznie jej zderzenie się z inną cząsteczką. Warstewka ta przeciętnie leży oczywiście tem dalej od płaszczyzny  $AB$ , im gaz jest bardziej rozcieńczony. Wtedy bowiem jest większe prawdopodobieństwo przedostania się danej cząsteczki pomiędzy innemi i uniknięcia zderzenia, t. j. cząsteczka posiadać będzie większą swobodną drogę ruchu. Ten właśnie drugi czynnik, rozcieńczenia gazu, równoważy dokładnie wpływ zmniejszenia ilości przenikających cząsteczek. Wynik ten opiera się oczywiście na dokładnie przeprowadzonym rachunku, którego tu powtarzać nie jesteśmy w stanie. Ostateczny rezultat jest jednak ten sam, a mianowicie, że tarcie wewnętrzne gazu pozostanie bez zmiany nawet w razie znaczniejszej zmiany jego gęstości. Sprawdzić to możemy na naszym przyrządzie. Wypompujemy z pod klosza powietrze, np. mniej więcej do  $\frac{1}{5}$  części pierwotnej objętości. Nie zauważymy mimo to jednak jakiegokolwiek bądź zmiany w całkowitym przebiegu zjawiska. Dolna blaszka tak samo pociąga za sobą i wprowadza w ruch górną blaszkę, jak i poprzednio, gdy klosz wypełniony był powietrzem normalnej gęstości <sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> Posuwając rozcieńczenie gazu coraz to dalej, dojdziemy wreszcie do tego, że cząsteczki bez przeszkody, t. j. bez spotkania z innemi przedostawać się będą od jednej płytki ku dru-



Zatrzymaliśmy się nieco dłużej nad tą sprawą dla tego, że zdaniem moim, ta niezależność tarcia wewnętrznego od gęstości gazu, nie może być wytłumaczona w żaden inny sposób jak tylko zapomocą hipotezy ruchów cząsteczkowych. Sprawa ta posiada jeszcze i dlatego wielką doniosłość, że najpierw została przewidziana teoretycznie a następnie dopiero doświadczalnie sprawdzona. O istnieniu podobnego zjawiska nie miano przedtem najmniejszego pojęcia.

Wreszcie trzeciem zjawiskiem, którem w dzisiejszym wykładzie zajmować się jeszcze będziemy, jest pewne zjawisko spektroskopowe, występujące przy bardzo dokładnych badaniach nad liniami widm świecących gazów. Niestety zapomocą zwykłych środków doświadczalnych nie daje się ono odtworzyć. Istota tego zjawiska jest następująca. Każda linia widmowa występująca w spektroskopie posiada pewną szerokość, zależną po części od szerokości szpary, po części od tego, że przyrząd widmowy nie jest przyrządem zupełnie doskonałym, i wreszcie na jej wielkość wywiera również wpływ same źródło światła. Stwierdzono np., że gęstość świecącego gazu powoduje zwiększenie szerokości linii widmowych z przyczyn, w rozważanie których wchodzić

---

głej. Ody w tych warunkach zmniejszać będziemy jeszcze dalej gęstość gazu, naturalnie zmniejszy się i zdolność przenoszenia ruchu z jednej płytki na drugą.

tu nie możemy. Michelson zapomocą pewnej, bardzo sprytnie pomyślanej metody interferencyjnej potrafił wykazać pośrednio, w jakim stopniu to rozszerzenie się linii widmowej należy odnieść na rachunek poszczególnych czynników. W rezultacie zostało udowodnione, że nadzwyczaj rozcieńczony gaz, badany zapomocą możliwie doskonałego przyrządu, wykazuje mimo to pewną aczkolwiek już bardzo nieznaczną szerokość linii widmowych, a przyczyna tego zjawiska tłumaczy się ruchem cząsteczek świecącego gazu. Drgająca cząsteczka gazu wysyła promienie świetlne, jednocześnie jednak pędzi ustawicznie naprzód. Różne cząstki gazu pędzą w najrozmaitszych kierunkach. Jedne zbliżają się do obserwatora, inne znowu oddalają się od niego. Zastosujmy do zjawiska tego rozważania, które poznaliśmy w poprzedzającym wykładzie, gdy była mowa o widmie poruszających się ciał niebieskich. Cząsteczki gazu, które w danej chwili nie posuwają się ku nam, ani się od nas oddalają, naturalnie nie mogą wywrzeć wpływu na rozszerzenie się linii. Linie te zajmować będą miejsca im istotnie przynależne w widmie. Lecz wszelkie inne cząstki gazu — o innych kierunkach ruchu — muszą dać prążki nieco przesunięte wprawo, względnie wlewo. To przesunięcie linii w tę lub drugą stronę dla różnych cząstek musi być różnej wielkości, a ostateczny rezultat jest ten, że wypadkowa linia, wywołana przez sumę wszystkich czą-

stek, będzie posiadała pewną określoną szerokość. Michelson stwierdził, że szerokość ta, obliczona na podstawie powyższych rozumowań i danych, jakie dla szybkości cząsteczek gazowych otrzymaliśmy z kinetycznej teorii, zgadza się w zupełności z wynikami jego doświadczeń. Rezultat ten jest, zdaniem moim, dowodem prawdziwości samego tłumaczenia sprawy. Nie popełnię również błędu, twierdząc, że badania Michelsona udowodniły istnienie ruchu pojedynczych cząsteczek gazowych w sposób tak samo dokładny — bo ten sam nawet — jak badania widm ciał niebieskich przekonały nas o ruchu tychże.

Wszystko to, o czym dowiedzieliśmy się dotąd w wykładzie o ruchach cząsteczkowych, z natury rzeczy jest tylko bardzo drobnym rozdziałem ogromnej dziedziny teorii cząsteczkowych. Gdyby mi czas pozwalał, chętnie postarałbym się zwrócić jeszcze uwagę na różnicę w szybkościach cząsteczek dla różnych gazów, a także na ich budowę. Jest ona niekiedy bardzo zawiła, a zawiłość ta wynika z ogromnej różnorodności w łączeniu się atomów na grupy i samoistne kompleksy atomów zwane cząsteczkami (molekułami). Mogłbym następnie bliżej wyjaśnić, w jaki sposób cząsteczka, poruszając się całością, zachowuje mimo to ruch pojedynczych atomów i grup atomów w jej skład wchodzących. Pod tym względem możnaby ją

przyrównać do układu słonecznego, z tą tylko różnicą, że układ ten nie posiada środkowego ciała, jakim jest w systemie słonecznym kula słońca. Wszystkie te kwestye musimy jednak pozostawiać na uboczu. Zoddala tylko rzucmy jeszcze przelotne spojrzenie na wewnętrzny stan materji płynnej. W tę dziedzinę zjawisk, wprowadził nas genialny umysł van der Waalsa. Utorował on nam drogę, po której nadal kroczyć należy. Powiem krótko, że przyciągania, które cząsteczki materji z nadzwyczaj małych odległości na siebie wywierają, w ciekłym stanie poczynają odgrywać rolę przodującą. W przyciąganiach tych tkwi przyczyna, utrzymująca cząstki w pewnej określonej objętości mimo ich ruchów samodzielnych. Objętość cieczy nie przewyższa już zbytnio objętości zawartych w niej cząsteczek, jak to miało miejsce w gazach. Przestrzenie międzycząsteczkowe stają się wielkościami tegoż samego rzędu, co i wymiary pojedynczych cząsteczek.

A wreszcie przechodząc do ciał stałych, mamy znowu zgoła odmienny obraz. Wprawdzie musimy i w tym razie przyjąć, że cząsteczki materji całkowicie są rozdzielone i stanowią pojedyncze indywidua, lecz siły cząsteczkowe wiążą je tutaj w mocne trwałe skupienia. Te siły przyciągania, względnie odpychania, wyznaczają każdej cząstce materji pewne określone położenie równowagi, dokoła którego cząstka drga tem żwawiej, im mo-

cniej ciało jest ogrzane. Z położenia tego cząsteczka może być nieco wychylona, jeżeli ciało ulega odkształceniu pod wpływem sił zewnętrznych.

Być może, że kiedyś okaże się nawet, iż wszystkie te objawy oddziaływania cząsteczek są wynikiem zmian, jakie zachodzą w wypełniającym między-drobinowe przestrzenie eterze świetlnym! Jeżeli tak jest istotnie, wtedy i pędzący po żelaznym moście pociąg kolejowy jest utrzymywany na nim siłą napięć w eterze, zapomocą których cząsteczki żelaza wiążą się jakby sprężystymi pasmami w jedną nierozzerwalną całość.

---



## WYKŁAD VI.

### Zjawiska elektryczne.

---

Zjawiska i teorie, które były dotychczas przedmiotem naszych rozważań, nie dotyczyły wcale objawów elektrycznych. Gdybyśmy chcieli pominąć ten dział fizyki, poglądy nasze na przewodnie idee i teorie fizyki współczesnej byłyby bardzo jednostronne. Dlatego też wykład niniejszy postanowiłem poświęcić wyłącznie tej dziedzinie zjawisk, aczkolwiek tym razem jeszcze bardziej świadom jestem trudności mego zadania, wynikającej z ogromu istniejącego tu materiału. Na szczęście nastrocza się nam możliwość skorzystania z pewnej nowej teorii, która w głównych zarysach jest tak łatwa, że bez wątpienia staje się dostępna pojęciom nawet mniej wyćwiczonego umysłu, a mimo to pozwala w krótkich słowach objąć bardzo wiele faktów.

Niech mi wolno będzie uważać za rzecz powszechnie znaną, że w świecie zjawisk elektrycz-

cznych istnieją dwa wprost sobie przeciwne elektryczne stany, które rozróżniamy powszechnie utartą nazwą stanu elektrycznego dodatniego i ujemnego. Przypomnijmy sobie już uprzednio przez nas stwierdzone fakty (str. 9), że dwa pręty szklane, potarte o ten sam kawałek jedwabnej materji nabierają własności wzajemnego odpychania się, gdy przeciwnie potarty jedwabiem pręt szklany i potarta futrem laska laku wzajemnie się przyciągają. Wreszcie stwierdźmy jeszcze, że dwa kawałki laku, potarte o to samo ciało trzecie, zachowuje się tak samo, jak dwa kawałki szkła. Oznaczając potarte szkło, jako ciało elektrycznie dodatnie, a potarty lak, jako ciało elektrycznie ujemne, możemy wszystkie te objawy wyrazić łatwo w następującej bardzo prostej regule: dwa ciała elektrycznie dodatnie, albo, jak zwykle się mówi, naładowane elektrycznością dodatnią wzajemnie się odpychają, również zachowują się ciała naładowane elektrycznością ujemną, natomiast dwa ciała naładowane elektrycznościami wprost przeciwnymi wzajemnie się przyciągają. Albo jeszcze prościej: «dwa ciała naelektryzowane jednoimiennie wzajemnie się odpychają, naelektryzowane zaś wprost przeciwnie wzajemnie się przyciągają».

Oczywiście, że prawo to nie ogranicza się wyłącznie do szkła i laku. Jesteśmy w stanie wprowadzić w stan elektryczny całe mnóstwo innych

ciał, przekonamy się jednak zawsze, że ich oddziaływania są albo takie jak laku, albo takie jak szkła. Możliwość czegoś trzeciego nie istnieje wcale. Umówmy się nazywać każde ciało, posiadające właściwość potartego szkła, dodatnim, a każde ciało o własnościach potartego laku ujemnym, wtedy reguła powyższa ma wartość ogólną.

W doświadczeniach tego rodzaju, przeprowadzonych z różnorodnymi ciałami, najbardziej bijącym w oczy objawem jest fakt, że jeśli dwa ciała zostaną potarte o siebie, każde z nich otrzyma pewien elektryczny ładunek, lecz stale przeciwnej jakości. Zjawisko to doprowadza do poglądu, że oba ładunki dodatni i ujemny już poprzednio musiały się znajdować w obu ciałach, lecz się tam wzajemnie zobojętniały, wskutek zaś tarcia zostały częściowo rozdzielone. W ten sposób dochodzimy do podstaw teorii, która jest nicią przewodnią w dziedzinie zjawisk elektrycznych.

O istocie elektrycznego ładunku niech nam będzie wolno nic nie mówić. Natomiast zrobmy założenie, że w każdego rodzaju materii są obecne nadzwyczaj drobne cząsteczki, których jedna połowa posiada niezmiennie ładunki dodatnie, druga zaś tak samo ładunki ujemne. Wystawiamy więc sobie, że gdybyśmy mogli operować oddzielnie temi cząsteczkami, obserwowalibyśmy w miniaturowych rozmiarach te same zjawiska, jakie pozna-

liśmy w doświadczeniach z laskami laku i szkła. Należy położyć nacisk na to, że objawy te byłyby nadzwyczaj drobne, nadwyraz nieuchwytnie, a to dlatego, że owe drobnutkie cząsteczki, o których jest mowa, mają być najmniejsze z pośród tych, którymi zajmują się nauki przyrodnicze, mniejsze od cząsteczek (molekuł) i atomów samych. Podstawę do takiego poglądu o wielkości tych elektrycznych cząsteczek, znajdziemy w dalszym ciągu niniejszego wykładu. Nadajmy cząsteczkom tym, zarówno ujemnym jak i dodatnim, wspólne miano «elektronów», odróżniając je przymiotnikami «ujemny i dodatni». Przypuśćmy dalej, że te elektryczne cząsteczki — elektrony — rozpowszechnione są we wszystkich ciałach, że żadna nawet najmniejsza cząsteczka ważkiej materii nie jest od nich wolna, że ilość ich w każdym ciele jest prawie niezliczona i że wreszcie, skoro jakieś ciało nie wykazuje objawów elektrycznych, posiada oba rodzaje elektronów w tej samej ilości. Przeciwnie zaś eter wyłączmy z pod panowania elektronów. Ma on pozostać jedynie środowiskiem (medium), które pośredniczy we wszystkich oddziaływaniach pomiędzy elektrycznie naładowanymi cząsteczkami. Należy mu jednak przypisać zgoła odmienne własności.

Uzbrojeni w powyższe założenia i poglądy, postarajmy się teraz wykonać odpowiednie doświadczenia. W tym celu użyjmy bardzo prostego przyrządu, zwanego elektroskopem listkowym. W korku

butelki szklanej (fig. 33) widzimy wetknięty pręcik metalowy, opatrzony u góry metalową gałką *B*, u dołu dźwigający cieniutkie listki złote *P* i *Q*.

Listki te zwisają ku dołowi pionowo, skoro jednak otrzymają obie jednoimienny nabój elektryczny, odskakują w strony przeciwne. Wychylenie listków, które możemy z łatwością uwidocznić za pomocą przyrządu projekcyjnego na ekranie, jest dowodem obecności w listkach stanu elektrycznego.

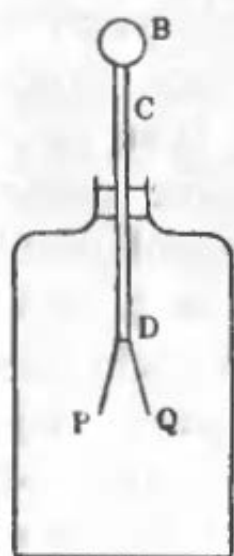


Fig. 33.

Zacznijmy od tego, że będziemy gałkę przyrządu pocierali pręcikiem szklanym. W tejże chwili widzimy na ekranie wychylenie się listków elektroskopu. Nabój elektryczny, który tu został wzbudzony jest nabojem ujemnym. Pręt metalowy wraz z gałką *B* i zarówno listki *P* i *Q*

otrzymały nadmiar elektronów ujemnych. Stać się to mogło albo wskutek przejścia elektronów ujemnych ze szkła do metalu, albo też przez to, że dodatnie elektrony, zawarte w metalu a zubożone normalnie obecnością elektronów ujemnych, przeszły na szkło, albo też wreszcie wskutek obu przyczyn jednocześnie. Kwestyi tej oczywiście doświadczenie rozstrzygnąć nie jest w stanie.

Doświadczenie to jednak może pouczyć nas



o czymś innym, mianowicie o tem, że nabój wywołany w kulce  $B$  rozszerzył się i dotarł przez pręcik metalowy aż do końca obu listków. Żeby się to stać mogło, konieczne są dwa warunki. Popierwsze, elektrony muszą posiadać zdolność wolnego przesuwania się po metalu, powtóre, musi być obecna siła, która popycha je od  $B$  do  $D$  i wpędza w listki  $P$  i  $Q$ . Własność pierwszą wyrażamy zdaniem: metale należy zaliczać do dobrych przewodników elektryczności. Co się zaś tyczy siły, o której tu mowa, to źródło jej należy upatrywać we wzajemnem odpychaniu się ujemnych elektronów, znajdujących w nadmiarze początkowo tylko na gałce elektroskopu. Jest zrozumiałe, że dążyć one muszą do jak największego odsunięcia się od siebie i że część ich pozostać musi w gałce, część zaś przejdzie do listków, wobec czego listki starać się będą rozsunąć jak najbardziej. Z innym nieco odmiennym poglądem na tę sprawę zapoznamy się jeszcze w dalszym ciągu wykładu.

W doświadczeniu z elektroskopem obserwowaliśmy przesunięcie się ładunku elektrycznego na stosunkowo nieznacznej przestrzeni. Możemy jednak doświadczenie to wykonać w większych rozmiarach. Połączmy długim drutem miedzianym gałkę elektroskopu z kulą mosiężną, umocowaną na szklanej podstawie. Tym razem jednak potrzymajmy nie elektroskop, lecz ową mosiężną kulę. Re-

zultat doświadczenia będzie znowu ten sam co i poprzednio, a możemy być pewni, że nie ulegnie on zmianie nawet przy użyciu bardzo długiego drutu, czego jednak ze względu na rozmiary sali przedstawić tu nie można. A więc ładunek elektryczny rozchodzi się tak daleko, jak daleko sięgają ciała, które go przewodzą.

Bardzo szeroko i daleko rozejść się on może, jeżeli naładowany elektroskop połączymy przewodnikiem z ziemią. Ciało ludzkie przedstawia właśnie taką drogę, i dość jest dotknąć palcem gałki elektroskopu, by zniszczyć cały jego ładunek w jednej chwili. Nadmiar elektronów ujemnych rozszedł się teraz dokoła po powierzchni podłogi i znikł zupełnie w ziemi, a to co mogło jeszcze pozostać w listkach elektroskopu, jest ilością istotnie niedającą się obserwować. Uwzględniając z jednej strony skłonność ładunku elektrycznego do opuszczania przedmiotu, na którym się znajduje, i stojąc z drugiej strony wobec faktu, że elektroskop może otrzymać i przechować nadany mu ładunek, dochodzimy bezpośrednio do wniosku, że szkło w elektroskopie jest ciałem, które elektryczności przewodzić nie może. Rozumiemy to w ten sposób, że szkło zawiera wprawdzie elektrony w sobie, nie mają one tu jednak, w przeciwieństwie do elektronów w metalach, swobody ruchów.

Wobec wyniku tego zrozumieliśmy staje się fakt, dlaczego naelektryzowanie pręta szklanego, trzy-

manego w rękę, jest mimo to możliwe. Oczywiście, że dodatnie elektrony, które po natarciu zbiorą się na szkle w pewnem oddaleniu od ręki, aczkolwiek wzajemnie się odpychają, nie mogą jednak dostać się do ziemi, gdyż szkło zamyka im drogę do ręki.

Że szkło po natarciu jest istotnie elektrycznie naładowane, o tem z łatwością przekonać się możemy za pomocą elektroskopu. Spróbujmy tylko dotknąć natartą laską gałki elektroskopu. Z góry przekonani jesteśmy, że elektrony z tej części szkła, która dotknie elektroskopu, spłyną nań i dojdą aż do listków, które rozchylą. Na razie nie spodziewamy się, by mogło tu zajść jeszcze coś więcej. W istocie jednak rzeczywistość przewyższa oczekiwania nasze. Listki istotnie rozchylają się, i dzieje się to już nawet wtedy, gdy jeszcze elektroskopu, nie dotknęliśmy laską szklaną a tylko zbliżyliśmy ją ku niemu. Po odsunięciu laski, listki znowu opadają, i powtarzać się to będzie tyle razy ile razy zbliżymy i odsuniemy naelektryzowaną laskę szklaną. Zjawisko to jest bardzo ciekawe, a prztem łatwe do wytłumaczenia, i moglibyśmy je byli nawet przewidzieć, gdybyśmy na pomoc zawezwali naszą teorię elektronów i uprzytomnili sobie fakt łatwego ich poruszania się w metalach. W samej rzeczy, zbliżając ku gałce elektroskopu naelektryzowaną laskę szklaną, wywołać w nim musimy rozdział zmieszanych z sobą obu rodzajów

elektronów. Nadmiar dodatnich elektronów laski pociągnie ku niej ujemne elektrony, znajdujące się w metalowych częściach elektroskopu. Skupią się więc one na jego gałce, natomiast dodatnie elektrony zostaną odrzucone i zbiorą się w listkach elektroskopu, powodując ich wzajemne rozchylenie.

Gdy w ten sposób dojdzie do skutku naelektryzowanie metalowych części elektroskopu, gałka tegoż będzie przyciągana ku znajdującej się w pobliżu łasce szklanej, natomiast przeciwny koniec pręcika, gdzie są listki, ulegać będzie odpychaniu. Ponieważ jednak działanie siły przyciągającej musi być większe, wobec mniejszego oddalenia od naelektryzowanej laski, aniżeli działanie siły odpychającej, to całkowity wpływ laski na masę metalu będzie ostatecznie polegał na przyciąganiu. Taki sam rezultat również wypaść musi i wtedy, gdy zamiast laski szklanej operować będziemy potartą laską laku. Stąd to pochodzi fakt, że każde ciało naelektryzowane, bądź to ujemnie bądź też dodatnio, wywiera początkowo na przedmioty nienaelektryzowane zawsze działanie przyciągające.

Zastanówmy się jeszcze również i nad tem, co się stanie, gdy do gałki już naelektryzowanego elektroskopu przysuwać będziemy inne naelektryzowane ciało. Przypuśćmy, że elektroskop posiada już pewien nabój np. ujemny. Oczywiście, że ciało



dodatnio naelektryzowane, zbliżone do niego, ściąganie ujemne elektrony do gałki. Ładunek więc w listkach zmniejszy się. Pociągnie to za sobą zmniejszenie się ich rozchylenia. Przedmiot naelektryzowany ujemnie wywrze rzecz prosta działanie wprost przeciwne. Doświadczenie poucza, że jedno i drugie sprawdza się dokładnie.

Z tej kategorii objawów elektrycznych można przedyskutować jeszcze niejedno godne uwagi zjawisko, szczupłe ramy wykładu nie pozwalają nam jednak na to. Ograniczę się więc do podania przykładów, w jaki sposób można w cieple wywołać stan elektryczny. Oto uderzam np. futrem lub kawałkiem drzewa po arkuszu staniolu, albo pocieram zmiotką od kurzu lub rurką kauczukową kafilę glinianą, a za każdym razem otrzymuję pewny nabój elektryczny, dający się łatwo stwierdzić za pomocą elektroskopu. Gdybym rozporządzał bardziej czułym przyrządem, aniżeli ten oto zwykły elektroskop, wtedy moglibyśmy się przekonać, że drobne objawy elektryczne występują w niezliczonej ilości przypadków. Już najslabsze potarcie dwóch ciał o siebie złączone jest zawsze z mniejszem lub większem przesunięciem elektronów z jednego ciała na drugie i to w ten sposób, że jedno z nich otrzyma nadmiar elektronów dodatnich, drugie zaś — w tym samym stopniu — nadmiar elektronów ujemnych.



A teraz zwróćmy uwagę naszą na elektrony, znajdujące się w ruchu. Już kilkakrotnie przypadek ten obserwowaliśmy w naszych doświadczeniach.

Gdyśmy np. elektryzowali kulę miedzianą, złączoną z elektroskopem za pomocą drutu, pewna ilość cząsteczek elektrycznych przeszła po drucie do elektroskopu. Dla każdego, kto w swych rozważaniach operuje przy pomocy elektronów, nie ulega najmniejszej wątpliwości, że ma się tu do czynienia z ruchem elektronów po metalowym przewodniku. Jest to zjawisko, które nazywamy prądem elektrycznym, a którego praktyczne zastosowanie oddaje obecnie ludzkości nieocenione usługi. W powyższym przypadku prąd jest bardzo słaby i krótkotrwały. Jesteśmy jednak w stanie, za pomocą odpowiednich środków, natężenie tego prądu zwiększyć a nawet podnieść bardzo wysoko. Czasami znowu potrafimy zmusić elektrony do nadzwyczaj krótkiego prawie nagłego przebiegu przez dany przewodnik. Prądy tego właśnie rodzaju, prądy krótkotrwałe, są to prądy, które otrzymuje się za pomocą tak zwanych przyrządów indukcyjnych. Posiłowaliśmy się już nimi, gdyśmy wywoływali iskrę elektryczną. W innych znowu przypadkach mamy do czynienia z trwałym prądem, nieulegającym zmianie w ciągu dłuższego czasu. Analogię tych prądów mamy w ruchu wody, płynącej nieustannie w przewodach wodo-

ciągowych, albo jeszcze lepiej w przesuwaniu się jej przez rury, wypełnione wewnątrz rodzajem porowatej materii.

Podobnie jak ciecz obiera sobie w tym razie drogę przez drobniutkie kanaliki, rozsiane w rurze, tak samo według poglądów naszych elektrony płyną po miedzianym drucie pomiędzy cząsteczkami miedzi, a nawet być może przenikają przez nie. Lecz prąd elektryczny jest zjawisko bardziej złożone w porównaniu do prądu cieczy, ponieważ ma się w nim do czynienia z dwoma rodzajami cząsteczek elektrycznych — z elektronami dodatnimi i elektronami ujemnymi. Możemy sobie wyobrazić, że od przedmiotu, naelektryzowanego np. dodatnio, elektrony dodatnie spływają po drucie np. do tego oto elektroskopu, a to dla tego, że są odpychane przez resztę dodatnich cząsteczek elektrycznych, znajdujących się w nadmiarze w naelektryzowanym przedmiocie. Lecz dodatni ładunek przedmiotu również ściągać musi ku sobie ujemne elektrony, znajdujące się w metalowych częściach elektroskopu. Te muszą więc posuwać się po drucie w kierunku wprost przeciwnym do kierunku ruchu elektromów dodatnich. Do naelektryzowania elektroskopu wystarczyłby oczywiście ruch tych ostatnich tylko, ponieważ z chwilą usunięcia się pewnej części elektronów ujemnych z elektroskopu, musiałby pozostać tam nadmiar elektronów dodatnich.

W rzeczywistości będą jednak poruszać się jednocześnie oba gatunki elektronów: dodatnie — w jednym, a ujemne — w kierunku wprost przeciwnym. Najlepiej więc będzie mechanizm prądu elektrycznego pojmować, jako jednoczesny ruch obu rodzajów elektronów. Cząstki elektryczne o ile są bardzo drobnych rozmiarów, nie powinny w znacznej mierze w ruchu tem przeszkadzać sobie wzajemnie. W jakim stopniu elektrony każdego rodzaju biorą udział w ruchu, oczywiście wychodzi to poza granicę naszych powierzchniowych rozważań. W każdym razie określimy kierunek prądu elektrycznego dostatecznie już wtedy, gdy podajemy kierunek, w którym posuwają się po drucie cząstki jednego rodzaju. W zwykłe przyjętej formie wyrażania się kierunek ruchu elektronów dodatnich nazywamy kierunkiem prądu elektrycznego. Jeżeli zaś chodzi o pytanie, jakiej mocy jest prąd elektryczny, czyli jakie jest jego natężenie, to odpowiedź na to da nam ilość elektronów dodatnich i ujemnych, która w pewnym określonym czasie przepłynie po przewodniku w obie strony. Im ilość ta jest większa, tem prąd jest silniejszy.

Tu wypada nam uczynić pewną dodatkową uwagę. Jeżeli do rury całkowicie wypełnionej wodą będziemy ze zbiornika dopuszczać jeszcze więcej wody, to po otwarciu kurka doprowadzającego wodę do jednego końca rury, spostrzeżemy

natychmiast, albo w bardzo krótkim czasie, wypływ wody na drugim jej końcu. Ta wypływająca w pierwszej chwili woda nie jest tą wodą, która po otwarciu kurka weszła do rury ze zbiornika, lecz wodą znajdującą się już poprzednio w rurce u jej otwartego końca. Podobnież elektrony, które ładują elektroskop z chwilą połączenia go drutem z odległym przedmiotem naelektryzowanym, nie są elektronami, które przed drut z przedmiotu tego do elektroskopu dotarły. Elektroskop naładował się elektronami, pochodzącymi z końca drutu, bezpośrednio dotykającego gałki elektroskopu, i to wskutek odrzucania ich przez nadmiar tego samego rodzaju elektronów w przedmiocie elektryzującym. W ten sposób wogóle następuje przenoszenie się ruchu elektronów na znaczną odległość, mimo że pojedyncze elektrony być może posuwają się naprzód bardzo nieznacznie tylko. Szybkość przesyłania depeszy elektrycznej opiera się właśnie na tem, że to przenoszenie się ruchu na bardzo nawet znacznych przestrzeniach odbywa się w bardzo krótkim czasie, nie jest ona jednak dowodem tego, że pojedyncze elektrony posiadają znaczną szybkość ruchu. Przeciwnie mamy pewne dane, wskazujące, że elektrony poruszają się w przewodnikach bardzo powoli i raczej pełzają niż pędzą pomiędzy cząsteczkami metalu.

Wreszcie zauważyć musimy, że na podstawie wszystkiego, co obecnie o tem przedmiocie wiemy,

liczba elektronów dodatnich i ujemnych, biorąca udział w prądzie elektrycznym jest niezrównanie większa, aniżeli liczba jednego albo drugiego rodzaju elektronów, znajdująca się w nadmiarze w ciele naelektryzowanem o rozmiarach danego przewodnika. W związku z tem musimy przyjąć, że rozdział obu rodzajów elektronów, rozsuniecie ich wzajemne, uskutecznić się daje tylko w stosunkowo bardzo nieznacznym stopniu.

Prąd elektryczny, jakieśmy przed chwilą nadmienili, może posiadać moc różną. Gdy natężenie jego stanie się dostatecznie wielkie — większa aniżeli w naszych doświadczeniach z elektroskopem —, wtedy obecność prądu w przewodniku daje się wykazać zapomocą przyrządu zwanego galwanometrem. Używaliśmy go już okolicznościowo w doświadczeniach, opisanych na str. 33. Tam też podaliśmy wytłumaczenie urządzenia przyrządu. Obecnie, przystępując do zaznajomienia się z sposobami powstawania prądu elektrycznego, znowu zmuszeni jesteśmy go użyć.

By elektrony, znajdujące się w niezliczonej ilości w każdym kawałku metalu, można było w ruch wprowadzić, niema konieczności użyć ciała już poprzednio naelektryzowanego. Doświadczenie poucza, że jesteśmy w stanie uczynić to w bardzo rozmaity sposób. Niech *CC* fig. 34 wyobraża pewien przewodnik w kształcie zamkniętego pier-



ścienia albo łańcucha. Wyobraźmy sobie, że jesteśmy w stanie w ten lub inny sposób — na razie o tem mówić nie będziemy — przesuwać elektrony w miejscu *P* tego łańcucha w kierunku wskazanym strzałką. Mówimy wtedy, że w miejscu tem pozwalamy działać elektrobodźczej sile. Naturalnie, że popchnięte tą siłą elektrony wprawiają w ruch i dalsze elektrony w całym łańcuchu.

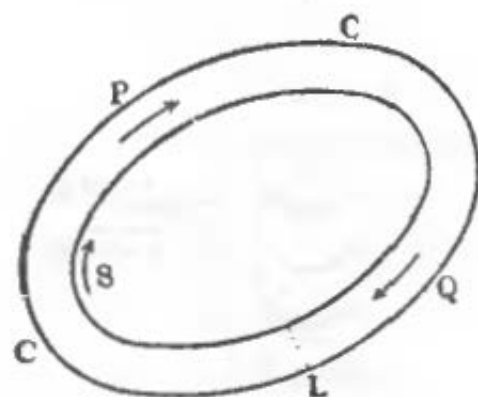


Fig. 34.

W jaki sposób ruch ten powstaje, roztrząsać tu nie będziemy. Dość będzie wiedzieć, że o ile działanie siły elektrobodźczej nie ustaje, prąd elektryczny w bardzo krótkim czasie rozszerza się na cały zamknięty w sobie łańcuch. W całym obwodzie krążą wtedy bezustannie dodatnie elektrony w kierunku oznaczonym strzałką, a odwrotnie elektrony ujemne w kierunku wprost przeciwnym. W ten sposób powstaje podwójne krążenie elektronów, o czem już powyżej była również mowa.

Oczywiście, że powyższa figura jest jedynie szematem. Zamknięty w sobie przewodnik może się składać z drutów, które tworzą obwód bardzo długi, niekiedy biegają one do bardzo odległych miejsc tam i z powrotem, niekiedy znów ulegają rozgałęzieniom w najrozmaitszych kierunkach, jak to np. ma miejsce w przewodach dzwonek elektrycznych.

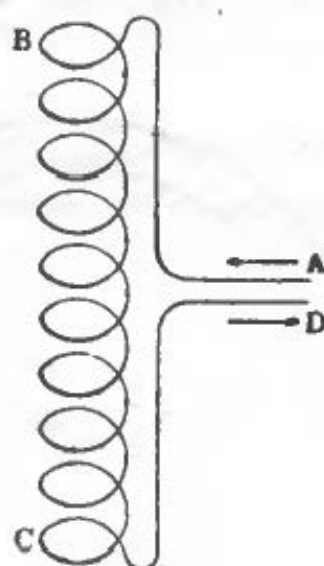


Fig. 35.

Część drogi może nawet składać się z drutów skręconych spiralnie (fig. 35), tak, że prąd musi w kolejnym porządku przebiegać każdy zwój z osobna. Drut, owinięty materiałem nieprzewodzącym elektrycznych ładunków, można również skręcić w zbitą rolkę, np. na drewnianej szpulce, podobnie jak to czynimy z nićmi do szycia. Takie np. szpulki, nawinięte izolowanym drutem, mamy w galwanometrze. W wydrążeniach szpulki jest

umieszczona igła magnesu, podlegająca wychyleniom pod wpływem prądu elektrycznego.

Naturalnie, że obwód takiego łańcucha mogą stanowić druty sporządzone z różnych metali, a nawet można część drogi zastąpić cieczą, przewodzącą elektryczne ładunki, np. wodnym roztworem soli. W takim razie do cieczy, po której ma przechodzić prąd, wstawiamy dwie płytki metalowe, tworząc przy ich pomocy połączenie z dalszymi częściami obwodu w sposób, przedstawiony na fig. 36. Widzimy więc, że pod tym względem panować może wielka różnorodność. Jakkolwiek sporządzimy przewód, jesteśmy pewni, że, o ile długość jego nie jest zbyt wielka, wzbudzony prąd już w ciągu nawet bardzo drobnego ułamka sekundy rozejdzie się po całym obwodzie.

Słusznie więc możemy nawet twierdzić, że siła elektrobodźcza, mająca ognisko swe w jednym punkcie obwodu, bezpośrednio wprowadza elektrony w ruch w całym obwodzie. Jeżeli w obwodzie działa jednocześnie kilka źródeł siły elektrobodźczej, to mogą one albo wzajemnie się wzmacniać, albo osłabiać, w zależności od kierunku działania pojedynczych sił. Przedstawione na fig. 34 zapomocą strzałek  $P$  i  $Q$  źródła sił elektrobodźczych, wspólnie działając, wytwarzają prąd silniejszy, aniżeli prąd, pochodzący tylko od jednej z sił.

Dotychczas nie zajmowaliśmy się kwestyą, w jaki sposób powstają elektrobodźcze siły, jak

je można wytworzyć? Doświadczenie poucza, że powstają one w bardzo rozmaity sposób. Pod tym względem mamy istotnie wielką różnorodność wyboru. Możemy np. przez ogrzanie miejsca zetknięcia dwóch różnorodnych metali, tworzących druty przewodu, wytworzyć w tem miejscu źródło siły elektrobodźczej. Umieścimy np. nad płomieniem palnika miejsce zetknięcia drutów miedzianego i żelaznego, a końce ich odprowadzamy do galwanometru. W jednej chwili nastąpi odrzucenie igły w galwanometrze, co jest dowodem krążenia prądu w zamkniętym obwodzie drutów. Nawet nieznaczne podwyższenie temperatury wystarczy do wywołania zjawiska. Dość np. miejsce zetknięcia obu metali na chwilę ścisnąć palcami. W obu tych przypadkach prąd elektryczny powstaje dzięki niewidzialnym ruchom cząsteczek, tym właśnie ruchom, w których upatrujemy istotę ciepła. Rzecz ma się tak, jak gdyby elektrony w tym ruchu ciepła brały udział i wskutek tego przenikały płaszczyznę zetknięcia obu metali, i jakby nadto z jakiegokolwiek bądź powodu dodatnie elektrony w większej ilości przenikały tę płaszczyznę w kierunku od miedzi do żelaza, aniżeli w kierunku przeciwnym.

W zupełnie odmienny sposób powstaje prąd, gdy wstawimy płytkę miedzianą *K* i cynkową *Z* (fig. 36) w naczynie, zawierające rozcieńczony kwas siarkowy. Zamiast rozcieńczonego kwasu siarko-

wego również dobrze można użyć innego kwasu rozpuszczalnego w wodzie, albo też rozpuszczalnej soli. Posiłkując się bardzo czułym galwanometrem, można wykazać powstanie prądu również i wtedy, gdy z jednej strony końce drutów cynkowego i miedzanego zanurzymy w czystą wodę, z drugiej zaś strony włączymy je w obwód z galwanometrem: wystarczy nawet, gdy oba druty, nie doprowadzając

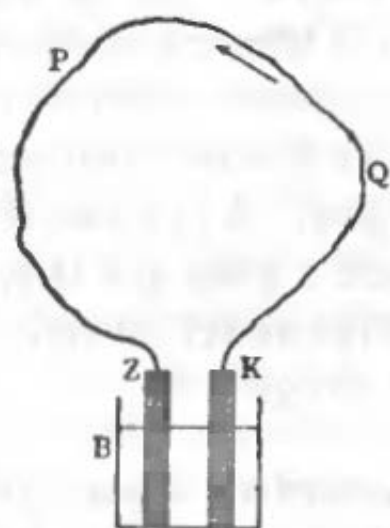


Fig. 36.

do bezpośredniego zetknięcia, dotkniemy wilgotną skórą ręki.

We wszystkich tych przypadkach otrzymujemy prąd dzięki chemicznej przemianie. Możemy wyobrazić sobie, że płytka cynku przyciąga z cieczy pewne atomy lub grupy atomów i że z nimi związane są elektrony jednego rodzaju np. elektrony ujemne. W ten sposób powstanie ruch elektronów, a więc i prąd elektryczny. Przypuszcze-



nie to posłużyć może nam do wyjaśnienia jeszcze innych zjawisk, wykazujących istnienie ścisłego związku pomiędzy działaniami chemicznymi i elektrycznymi.

W podobnych zestawieniach metali z cieczami mamy do czynienia z najprostszą formą przyrządu, zwanego ogniwem albo stołem elektrycznym. Kombinacja: — cynk, rozcieńczony kwas siarkowy, miedź — jest tą, którą najpierw do tego celu użyto. Odkrycie elektrobodźczego działania w tem prostem zestawieniu metalicznych i płynnych przewodników zawdzięczamy sławnemu włoskiemu fizykowi Aleksandrowi Volcie. Stało się to przed z górą stu laty, i od tej chwili w nauce o elektryczności otwarły się zgoła nieznane przedtem drogi.

Niemniej doniosłem było również odkrycie, którego dokonał w roku 1820 duński fizyk Oersted. Zauważył on, że drut metalowy, po którym krąży prąd elektryczny, odchyła bieguny igły magnesowej, umieszczonej w pobliżu prądu, a więc wywiera na nie pewnego rodzaju siłę. Jest to właśnie ta siła, która była nam pomocna przy stwierdzeniu istnienia prądu elektrycznego zapomocą galwanometru. Doświadczenia Oersteda stały się punktem wyjścia dla badań późniejszych fizyków otworzyły one wrota do nowego, ogromnego, a nieznanego dotąd świata zjawisk.

Jak działają na siebie wzajemnie druty, po których krążą prądy, w jaki sposób zapomocą prądów wytworzyć można potężne magnesy, jak przez ruch przewodnika w pobliżu istniejącego prądu lub magnesu w nim samym wzbudzić można prąd — wszystko to i wiele innych odkryć dokonane zostało dzięki usiłowaniom licznych badaczy, którzy nie tylko stosunki te wykryli, lecz i poddali ścisłym ilościowym pomiarom. W tym celu wybrano i utrwalono stałe jednostki, zapomocą których wyrażono poznane prawa w mierze i liczbie. A gdy w ten sposób gromadzono fakty, owocem których jest kwitnący stan dzisiejszej elektrotechniki, fizycy-teoretycy wyprzedzali się wzajemnie, dążąc do wykrycia związku pomiędzy zjawiskami i do wnikięcia w ich istotę.

Z tej masy zjawisk wybierzmy do bliższego rozważania następujące. Oto mamy tu gruby drut miedziany, zgięty w kształcie prostokąta, ustawionego swą płaszczyzną prostopadle do poziomu. Drut ten może się obracać dookoła pionowej osi. Możemy przytem przepuszczać przezeń mocny prąd elektryczny. Zwróćmy uwagę na jeden z jego pionowych boków. Równolegle do niego postawmy inny pionowy drut miedziany, również zasilany prądem elektrycznym. Gdy puścimy prąd w obu drutach, spostrzeżemy przyciąganie ruchomego boku ku drutowi nieruchomemu. Zmienia się ono na odpychanie, gdy zmienimy kierunek prądu w nieru-

chomym drucie. Jeżeli zbadamy w zjawisku tem kierunek prądów, to znajdziemy, że części przewodników, w których zachowany jest tu sam kierunek, wzajemnie się przyciągają, i przeciwnie odpychają się, gdy ten kierunek jest przeciwny.

Naturalnie, że odrazu powstaje tu pytanie, czy nie są to zwykłe przyciągania i odpychania, które obserwowaliśmy w ciałach naelektryzowanych. Na powierzchni drutów istotnie panuje pewny nieznaczný nadmiar elektronów dodatnich albo ujemnych, lecz wpływ jego na przebieg zjawiska może być tylko nadzwyczaj mały i wobec tego możemy go nieuwzględniać wcale. Powinniśmy natomiast zwrócić głównie uwagę na wnętrze drutów, gdzie oba rodzaje elektronów znajdują się w równych ilościach. Gdyby elektrony obu drutów nie ruszały się wcale lub znajdowały się w ruchu nieskoordynowanym, bez określonego kierunku. Wtedy, oczywiście, ani odpychanie ani przyciąganie nie miałoby miejsca. Przyciąganie, które np. dodatnie cząstki elektryczne w ruchomym drucie wywierałyby na ujemne elektrony drutu nieruchomego, byłoby zrównoważone odpychaniem, wywieranym przez dodatnie elektrony obu drutów. Również siły, które działałyby na ujemne cząsteczki elektryczne ruchomego drutu ze strony elektronów drutu nieruchomego, musiałyby się wzajemnie równoważyć. Tymczasem obserwowane zjawisko poucza nas, że widocznie nie wszystkie siły równoważą się, skoro części drutów ulegają

przyciąganiu, względnie odpychaniu. A więc muszą działać pewne siły, które występują tylko wtedy, gdy elektrony są w ruchu. Siły te są innego rodzaju aniżeli siły, które działają, gdy elektrony są w spoczynku. Występują one przytem tylko wtedy, gdy elektrony w obu częściach drutu są w ruchu, gdyż zjawisko przyciągania względnie odpychania się drutów ma miejsce jedynie wtedy, gdy w obu drutach krąży prąd elektryczny.

Stojąc na gruncie hipotezy, że wszelkie elektryczne działania przychodzą do skutku jedynie za pośrednictwem eteru, dochodzimy do następującego poglądu. Każdy pojedynczy elektron wywołuje w otaczającym go eterze pewne zaburzenie równowagi, które słabnie z oddaleniem od elektronu i jest inne wtedy, gdy elektron się porusza, a inne wtedy, gdy znajduje się w spoczynku. Częstka elektryczna, znajdująca się w pewnem oddaleniu od pierwszego elektronu, podlega działaniu siły w pewnym określonym kierunku i o pewnej określonej wielkości, co zależy bezpośrednio od stanu eteru w najbliższym sąsiedztwie tej cząstki, a więc pośrednio od ładunku i ruchu pierwszego elektronu. Jak i w jakim stopniu ten drugi poruszający się elektron podlega wpływowi otaczającego go eteru, zależy to też będzie jeszcze i od jego własnego ładunku i szybkości.

Wszystkie zachodzące tu stosunki udało się wyrazić zapomocą matematycznych wzorów. Moglibyśmy więc nawet obliczać wyniki doświadczeń w tej



kategorii zjawisk, którą dziś właśnie zajmować się będziemy. Co prawda nie potrafiono jeszcze całkowicie przewyciężyć wszystkich nastroczających się tu trudności. W ostatnich czasach np. fizyk francuski Crémieu przeprowadził doświadczenia, które teorii elektronów sprawiają wiele kłopotu. Nie będziemy jednak w te szczegóły bliżej wchodzić, a to co będzie potrzebne do wyjaśnienia zjawisk, którymi będziemy się tu zajmowali, nie wymaga żadnych poważniejszych zmian w naszych dotychczasowych założeniach <sup>1)</sup>.

Teoria elektronów oblicza najpierw wielkości wzajemnego przyciągania względnie odpychania dwóch przewodników w zjawisku, któreśmy powyżej opisali. Następnie umożliwia nam określić działanie to w przewodnikach najrozmaitszych kształtów. Na jej podstawie przewidzieć się daje, że zwinięty spiralnie drut (fig. 35), podczas gdy po nim prąd krąży, wywierać powinien te same działania, co i pręt magnesu, i takimi samymi działaniami ulegać. Doświadczenie potwierdza to w zupełności. Istotnie, końce dwóch spiralnie skręconych drutów przyciągają się, względnie odpychają się wzajem-

---

<sup>1)</sup> Uwaga tłumacza. Chodzi tu mianowicie o pewne, teorią przewidziane i dawniej już obserwowane przez Rowlanda zjawisko wpływu poruszających się ciał naelektryzowanych, np. obracającej się płyty, na igłę magnetyczną. W doświadczeniach Crémieu go wpływu tego nie było. Najnowsze jednak badania innych fizyków potwierdziły wyniki dawnych spostrzeżeń Rowlanda.



nie, gdy po nich prąd przebiega, podobnie jak to czynią bieguny magnesów. Gdy jeden z tych spiralnych zwojów (fig. 35) zawiesimy ruchomo w położeniu poziomem, zwróci się on jednym końcem na północ, drugim na południe, a więc długością swą stanie w położeniu, równoległym z igłą kompasu. Także na bieguny znajdującego się w pobliżu magnesu oddziaływa prąd, przebiegający zwoje drutu, w ten sam sposób, jak drugi magnes. Spiralne zwoje drutu nie tworzą tu zamkniętych kół, możemy jednak pomyśleć szereg zamkniętych pierścieni nasuniętych na walec. Gdyby w każdym z tych zamkniętych pierścieni elektrony krążyły w jednym i tym samym kierunku, całkowite działanie na zewnątrz byłoby takie, jakie mamy w sztabce magnesu.

Obserwując działanie przewodnika, po którym przebiega prąd, na znajdującą się w pobliżu igłę magnesu, lub stwierdzając zmianę kawałka żelaza na magnes również pod wpływem prądu elektrycznego, przebiegającego dokoła po zwojach drutu, mimo woli skłonni jesteśmy do przyjęcia poglądu, że pomiędzy zjawiskami elektrycznymi a magnetycznymi istnieć musi jakiś wewnętrzny przyczynowy związek i że obydwa rodzaje zjawisk nie mogą pochodzić od zgoła odmiennych przyczyn. Wspomniana przed chwilą tożsamość działania sztabki magnesu i prądu krążącego po zwojach spiralnie zwiniętego

drutu spowodowała, że powyższy pogląd znalazł wyraz w konkretnej teorii, znanej w nauce pod nazwą hipotezy Ampère'a. Według tej hipotezy w każdym magnecie mamy do czynienia z całym szeregiem zamkniętych kołowych prądów elektrycznych. Ampère zakłada mianowicie, że każdą pojedynczą cząsteczkę żelaza obiega dokoła tego rodzaju prąd. Taki prąd dokoła cząsteczki można porównać z prądem pojedynczego zwoju w spiralnym drucie. Jest więc rzeczą zrozumiałą, że oba te ciała, t. j. magnes i spiralny drut po którym przebiega prąd, muszą wywierać te same działania i tym samym wpływom ulegać.

Przełożona na język teorii elektronowej hipoteza Ampère'a sprowadza się do tego, że w każdym magnecie dokoła każdej pojedynczej cząsteczki żelaza odbywa się kołowy ruch elektronów w pewnym określonym kierunku — ruch, który pozostaje bez zmiany dopóty, dopóki na magnes nie działają wpływy zewnętrzne. Niema tam bowiem żadnego oporu, wpływającego na zmniejszenie szybkości elektronów. Nie przesądzając, jakiemu losowi ulegnie na przyszłość ten pogląd, możemy być pewni, że zawsze mimo to elektryczne i magnetyczne zjawiska będą traktowane ze wspólnego punktu widzenia. Nie podlega też wątpliwości, że — gdy jest mowa o działaniu magnesu — jesteśmy upoważnieni formalnie do zastąpienia magnesu przez układ kołowych prądów elektrycznych.

Właśnie działanie magnesu na poruszające się elektrony jest kwestią, którą mamy się zająć w dalszym ciągu niniejszego wykładu. W celu ułatwienia wykładu trzymajmy się następnie stale jednego i tego samego sposobu przedstawiania rzeczy. Przyjmijmy, że ruchy, które rozważać mamy, odbywają się w płaszczyźnie naszych rysunków, i że północny biegun magnesu znajduje się nad tą płaszczyzną, a więc po stronie obserwatora. Przebieg zjawiska będzie zresztą ten sam i wtedy, gdy zamiast północnego bieguna magnesu przed płaszczyzną rysunku, pomyślimy za nią biegun południowy. Również pozostanie wszystko bez zmiany w razie gdy przyjmijemy jednoczesną obecność obu biegunów dodatniego przed, a ujemnego za płaszczyzną rysunku, a ruch elektronów odbywać się będzie w polu pomiędzy obu tymi biegunami.

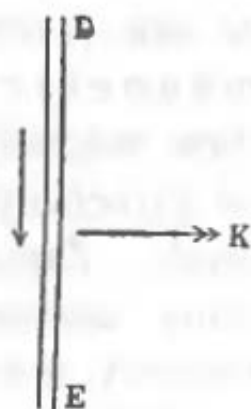


Fig. 37.

Niech  $DE$  (fig. 37) wyobraża drut miedziany, przewodzący prąd w kierunku od góry ku dołowi. Doświadczenie poucza, że drut ten wskutek działania bieguna magnetycznego znajduje się pod wpływem siły  $K$ , skierowanej wprawo, a więc siły, która nie może być nazwana siłą odpychania lub przyciągania, ponieważ nie dąży ona do przyciągnięcia lub odrzucenia drutu od bieguna magnesu.

Również łatwo może być podany kierunek tej siły i w każdym innym położeniu przewodnika, byleby tylko drut pozostał w tej samej płaszczyźnie t. j. w płaszczyźnie rysunku. Możemy poprostu dowolnie obracać drutem wraz z naszkicowanymi kierunkami prądu i działania siły. Strzałka  $K$  przedstawiać będzie zawsze kierunek siły, która na drut działa. Wykonajmy np. obrot figury o  $180^\circ$ , a otrzymamy prąd, biegnący ku górze,  $K$  zaś wskaże nam wtedy kierunek siły w lewo. Widzimy stąd, że siła, jakiej podlega przewodnik prądu w polu magnetycznem — to znaczy w okolicy bieguna magnetycznego —, zmienia kierunek działania na przeciwny, skoro odwróci się kierunek samego prądu. Zapomocą ruchomego drutu miedzianego, który mieliśmy poprzednio w użyciu (str. 229), możemy prawa te z łatwością potwierdzić.

Teorya, którą wybraliśmy jako nić przewodnią naszych rozumowań, upatruje w sile  $K$  wynik tych działań, które pole magnetyczne wywiera na płynące po drucie elektrony, względnie na sam drut, jest bowiem widoczna, że te ostatnie nie mogą bokiem ująć z drutu w kierunku działania siły. Jeżeli przyjmiemy, że prąd polega na ruchu dodatnich elektronów, w danym przypadku z góry ku dołowi, musimy też założyć, że na nie działa siła w kierunku  $K$ , t. j. na prawo. Przez odpowiednie skrócenie fig. 35 w płaszczyźnie rysunku otrzy-

muujemy z łatwością kierunek tej siły w każdym innym przypadku ruchu elektronów. Gdyby np. dodatnie elektrony posuwały się ku górze, wtedy pole magnetyczne wywierałoby na nie działanie na lewo. Możemy jednak prąd w drucie  $DE$  rozpatrywać jako ruch elektronów ujemnych z dołu do góry. Wtedy musimy również przyjąć, że działanie siły pola magnetycznego na ujemne elektrony odbywa się w kierunku  $K$ . Wszystkie inne

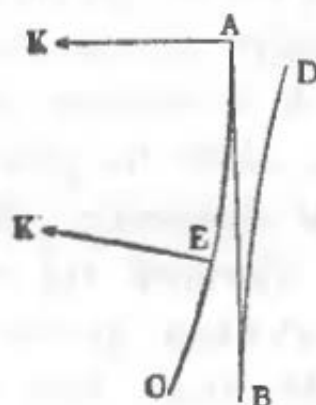


Fig. 38.

przypadki — co do kierunku ruchu ujemnych elektronów — otrzymamy przez obrót powyższej figury w ten sam co i poprzednio sposób. A więc widzimy, że działanie siły pola magnetycznego na elektrony dodatnie i ujemne poruszające się w tym samym kierunku jest wprost przeciwny.

A teraz wyobraźmy sobie przypadek ruchu elektronów wolnych, t. j. poruszających się nie w metalu, lecz w eterze. Gdyby biegun magnesu nie był obecny, elektron wolny posuwałby się



po prostej linii  $AB$  (fig. 38). Ponieważ jednak pole magnetyczne wywiera na poruszający się elektron pewną siłę, prostopadłą do kierunku ruchu, droga ta uległ musi skrzywieniu.

Fig. 38 przedstawia stan rzeczy dla poruszającego się elektronu ujemnego. Gdy kierunek jego ruchu jest z góry ku dołowi, po prostej od  $A$  do  $B$  wtedy biegun magnetyczny nie jest obecny i niema działania siły. Gdyby jednak ruch ten miał się odbywać w obecności bieguna, droga elektronu wypadłaby od  $A$  do  $C$  po łuku  $AC$ , do którego siła  $K$  w każdym punkcie drogi stałaby prostopadle. Jest to przypadek rozważany już przez nas w dynamice. Strzałki  $AK$ ,  $EK'$  reprezentują np. kierunek tej siły w punkcie  $A$  względnie  $E$ . Oczywiście, że siła ta wpływa jedynie na skrzywienie drogi, lecz nie zmienia szybkości elektronu.

A jeżeli nadto przypomnimy sobie to, cośmy rozważyli na fig. 37, z łatwością przekonamy się, że nie popełniliśmy żadnego błędu, skracając drogę ujemnego elektronu w lewo, a nie w prawo. Również łatwo możemy sobie wyobrazić, jak odpowiedni rysunek powinien wypaść w przypadku, gdy ujemny elektron — w razie nieobecności magnesu — posuwa się od  $B$  do  $A$ . Widzimy, że wskutek działania magnesu zboczenie nastąpi w prawo po łuku  $BD$ .

Zastosujmy wyniki powyższych rozważań do pewnego zjawiska, które w latach ostatnich z wielkim upodobaniem badane było przez wielu fizyków. Przypomnijmy sobie, że gdyśmy zamierzali w swoim czasie obserwować widmo wodoru, musieliśmy do tego celu użyć t. zw. rurki Geisslera: wypełniliśmy ją wodorem pod pewnym ciśnieniem i poddali działaniu wyładowań elektrycznych. O szczegółach rozdziału światła wzdłuż takiej rurki nie mówiliśmy wtedy nic zgoła, a i teraz nie możemy się zagłębiać dokładnie w rozpatrywanie tego

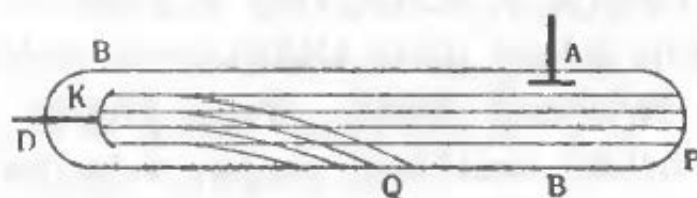


Fig. 39.

pięknego lecz bardzo jeszcze zagadkowego zjawiska wyładowań elektrycznych w rozrzedzonych gazach. Pomimo wielkiego nakładu pracy i licznych usiłowań podjętych w celu wyjaśnienia zachodzących tu wielorakich objawów, zjawisko o którym mowa, przedstawia dotąd jeszcze prawdziwy chaos. Z jednej tylko strony zostało ono wyjaśnione dokładnie; sprawa ta jest stosunkowo prosta.

Do obserwowania tej właśnie strony zjawiska nadaje się doskonale szklana rura *BB* (fig. 39), wypełniona powietrzem o odpowiednim rozrzedzeniu i opatrzona dwiema platynowymi płytkami,

wtopionemi w ścianę w punktach  $A$  i  $D$ . Przepuszczamy przez rurkę nagle krótkotrwałe prądy elektryczne, wytwarzane zapomocą przyrządu indukcyjnego, wprowadzając je przez  $A$ , a odprowadzając płytką  $K$ . Uwagę naszą zwróćmy przede wszystkim na koniec rurki  $P$ , przeciwległy płytce  $K$ . W miejscu tem widzimy osobliwe zielonawe świecenie ściany szklanej. Badanie bliższe nie pozostawia najmniejszej wątpliwości, że mamy tu do czynienia z wolnemi elektronami ujemnymi. Wybiegają one z płytki  $K$  i, posuwając się prostolinijnie, trafiają w ścianę rury w punkcie  $P$ . Bombardowanie ściany przez elektrony wywołuje w tem miejscu świecenie szkła. Jeżeli pogląd ten jest słuszny, należy oczekiwać zmiany w kierunku biegu elektronów w razie wprowadzenia ich w pole magnetycznego bieguna. Wyobraźmy, że ustawiamy biegun magnesu w ten sam sposób, co i dawniej. Nie możemy co prawda z góry być pewni, w jakim stopniu odchylenie to wystąpi, być bowiem może, że wystąpi ono w rozmiarach, uchylających się obserwacyi. Lecz już doświadczenie, wykonane nawet przy pomocy magnesu średniej mocy, przekonywa nas, że powyższe przypuszczenie jest słuszne. Bieg elektronów nie jest prostolinijny, ponieważ trafiają one teraz ścianę rury nie w punkcie  $P$ , lecz z boku w miejscu  $Q$ . By obserwację ułatwić, wstawia się w poprzek rury wewnątrz zasłonę, nie uwidocznioną na rysunku a posia-

dającą wązki otwór w kształcie szpary. Zasłona ta pozwala tylko na przejście drobnej wiązki «katodalnych promieni», wychodzących z płytki *K*. Oprócz tego wewnątrz rury w odpowiednim miejscu umieszcza się płytka, fosforyzująca pod wpływem uderzeń katodalnych promieni, t. j. elektronów, które na nią padają. Ustawiamy ją wzdłuż biegu promieni tak, by one tylko zlekka ukośnie na płytkę padały. W ten sposób możemy dokładnie obserwować przebieg promieni wewnątrz rury. Jest on uwidoczniony smugą światła, która nawet z pewnej odległości dokładnie dostrzedz się daje. Widzimy więc doskonale, jak smuga świetlna, pierwotnie prosta, ulega skrzywieniu, gdy do rury zbliżamy biegun magnesu.

Wreszcie na zakończenie przychodzimy do omówienia sprawy wpływu sił magnetycznych na promieniowanie światła. Zjawisko to odkryte zostało przez prof. Zeemana, pracującego podówczas w laboratorium prof. Kamerlingh Onnes'a, dla tego też jest w nauce znane pod nazwą zjawiska Zeemana. Przede wszystkim zaznaczę z góry, że wpływ sił magnetycznych na promieniowanie światła może być jedynie wtedy zrozumiany, gdy przyjmiemy, że temi najdrobniejszymi cząsteczkami, które w świecących przedmiotach drgają i przez wpływ na eter powodują promieniowanie na zewnątrz, są nie inne cząstki

tylko nasze elektrony. Przypuszczenie to robimy chwilowo jedynie dla tego, że na drodze tej będziemy mogli łatwo wyprowadzić zjawisko, o które nam tu właśnie chodzi.

Wyobraźmy sobie, że mamy pojedynczy ujemny elektron, którego położeniem równowagi jest punkt

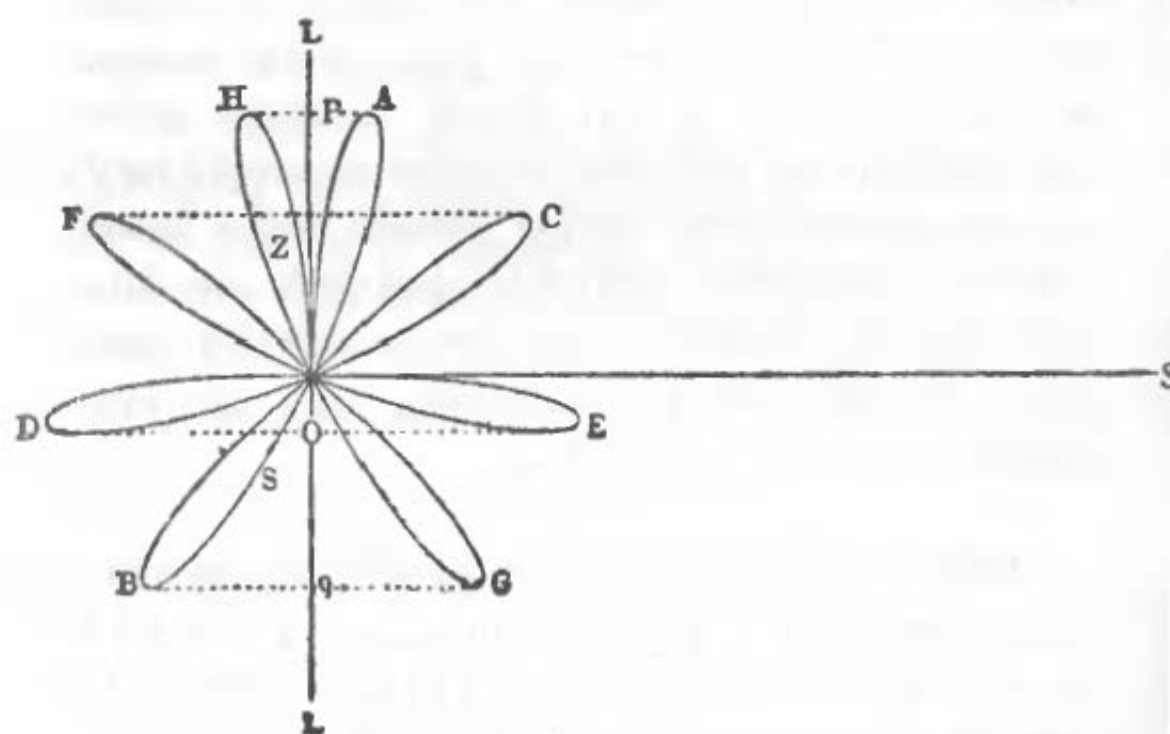


Fig. 40.

$O$  (fig. 40). Niech z chwilą, gdy elektron ten opuszcza punkt  $O$ , zaczyna nań działać pewna popędowa siła w kierunku powrotnym ku  $O$ . Siła ta jest stale skierowana ku  $O$ . Pod jej wpływem, wyprowadzony z równowagi elektron, będzie wykonywał drgania o pewnej częstotliwości wzdłuż prostej przechodzącej przez  $O$ . A gdyby wskutek tych drgań nastąpiło promieniowanie światła,



w spektroskopie powinniśmy otrzymać odpowiednią linię widmową ściśle określonego położenia.

Przyjmijmy, że drgania elektronu odbywać się mają wzdłuż każdej prostej, przechodzącej przez  $O$ . Te same siły, które skrzywiały drogę promienia katodowego w polu magnetycznym, muszą oczywiście wywrzeć wpływ na kierunek ruchu drgającego elektronu. Zaczniemy obserwować ruch ten z chwilą wyjścia cząstki z punktu  $O$  ku górze. Gdyby nie było działań pola magnetycznego, drgania elektronu odbywałyby się po prostej  $LL$ . Pod wpływem zaś pola droga elektronu ulegnie skrzywieniu, a mianowicie tak, jak to przedstawia na fig. 38 linia  $BD$ , a więc wypukłą stroną linii na lewo. Droga elektronu będzie więc leżała na lewo od prostej, łączącej  $O$  z  $A$  fig. 40, a w punkcie  $A$  dosięgnie elektron swego największego wychylenia. Przy powrotnym ruchu ku  $O$ , który odbyć się musi po linii odpowiadającej na fig. 38 linii  $AC$ , t. j. zwróconej wypukłą stroną na prawo, droga elektronu leżeć będzie po prawej stronie prostej łączącej  $A$  z  $O$ . Podczas więc ruchu od  $O$  tam i z powrotem ku  $O$  elektron odbył zamkniętą drogę  $OA O$  w postaci pętlicy, powrócił jednak do punktu wyjścia  $O$  inną drogą. Kierunek jego w tym miejscu, t. j. w punkcie  $O$ , tworzy z dawnym kierunkiem  $LL$  tylko nieznaczny kąt. W tym zmienionym nieco kierunku przechodzi elektron punkt  $O$  i, posuwając się dalej

po krzywej linii aż do  $B$  zawraca znowu ku  $O$ . Kształt tej części drogi jest oczywiście ten sam co i poprzednio, te same bowiem czynniki w grę tu wchodzi. Po powrocie do  $O$  wykonał elektron jedno pełne wzniesienie. W następnych okresach drogę elektronu przedstawiać będą pętlice  $OC$ ,  $OD$ ,  $OE$ ,  $OF$ ,  $OG$ ,  $OH$  i t. d. By kształt ich na rysunku wyraźniej mógł wystąpić, wybraliśmy przypadek, gdzie ma się do czynienia z silnym polem magnetycznym, a to w tym celu, by oddzielne pętlice stały się bardziej rozwarte i bardziej od siebie oddalone. Gdyby jednak magnetyczna siła pola była znacznie słabszą, wtedy pętlice przybrałyby postać prawie prostych linii, a promienie gwiazdzistej figury tworzyłyby z sobą znacznie mniejsze kąty. Wtedy właśnie jeszcze bardziej wpadałoby w oczy to, że ruch elektronu może być uważany jako drganie wzdłuż prostej linii, która jednak ustawicznie zmienia swe położenie, obracając się dokoła punktu  $O$ .

Rozłożmy ruch elektronu na dwa ruchy składowe. W tym celu poprowadźmy oprócz pionowej prostej  $LL$  poziomą linię  $OS$  do niej prostopadłą. Możemy powiedzieć, że elektron, posuwając się ruchem wahadłowym w kierunku prostej  $OS$ , jednocześnie drga w kierunku linii  $LL$ . By się przekonać, jak drgania po linii  $LL$  wyglądać będą, spuśćmy z punktu, w którym w danej chwili elektron się znajduje, prostopadłą na  $LL$  i zwróćmy

uwagę na ruch punktu podstawowego tej prostopadłej wzdłuż prostej  $LL$ . Punkt ten przechodzi z punktu  $p$  do  $q$  i powraca mijając  $O$ , ale dochodzi tylko do  $Z$ , znowu powraca, ale tylko do  $S$ , podnosi się następnie do  $O$ , znowu spada do  $S$ , podnosi do  $Z$  i t. d., słowem, podczas ruchu tam i z powrotem, kolejno dosięga krańcowych punktów  $p, q, Z, S, O, S, Z, q, p$  i t. d. Innymi słowy punkt ten waha się wzdłuż linii  $LL$  dokoła środkowego punktu  $O$ , a amplituda tych wahań to maleje to znów wzrasta w pewnych określonych granicach.

Zachodzi teraz pytanie, jaki rodzaj światła będzie wypromieniowywał elektron, drgający w powyższy sposób. Ograniczmy się do zwrócenia naszej uwagi na drgania, które rozchodzą się wzdłuż linii  $OS$ , a więc na promień światła  $OS$ . Wyobraźmy sobie obserwatora, znajdującego się na tej linii w oddaleniu znacznie przewyższającym rozmiary powyższej figury.

Już poprzednio przyjęliśmy (str. 142), że promień światła, co do kierunku ruchu drgań może być porównany do napiętego sznurka, po którym przebiega fala. Wynika to z pewnych, stosunkowo dawno poznanych zjawisk optycznych, o których tu mówić nie miałem jednak możliwości. W świetle mamy więc do czynienia jedynie z drganiami poprzecznymi do kierunku rozchodzenia się światła, czyli do kierunku promienia. Twierdzenie to przyjmijmy *in*

*verba magistri*. Stosując je do naszego przypadku, stwierdzamy, że w kierunku promienia  $OS$  nie mogą rozchodzić się żadne inne drgania (w płaszczyźnie rysunku) oprócz drgań wzdłuż  $LL$ , t. j. drgań poprzecznych do  $OS$ . Do drgań tych ruchy elektronu wzdłuż poziomej linii przyczynić się nie są w stanie. Drgania te wyłącznie składać się będą z ruchów elektronu wzdłuż  $LL$ . Innymi słowy, światło, promieniejące z  $O$  w kierunku  $OS$ , i spowodowane drganiem elektronów po liniach krzywych w kształcie podanym na fig. 40, niczem nie będzie różniło się od światła, wysyłanego przez elektron drgający wzdłuż prostej  $LL$  w peryodycznie zmiennych granicach  $pq$ ,  $qZ$ ,  $ZS$ ,  $SO$ ,  $OS$  i t. d. Lecz drgania o peryodycznych zmianach amplitudy tworzą zjawisko, które dla drgań głosowych nazwalismy dudnieniem (str. 137). Oko, znajdujące się na linii  $OS$  powinno by odczuć charakterystyczną cechę tego zjawiska — o ile ono nie występuje zbyt szybko —, a więc widzieć powtarzającą się zmianę w natężeniu światła, podobnie jak to czyni ucho z głosem.

Tak jednak nie jest z wielu różnych powodów. Jest jednak jeszcze inny środek, pozwalający zauważyć wpływ pola magnetycznego na ciało świecące. Wiemy już z poprzednich wykładów (str. 138), że drganie o peryodycznie zmiennej amplitudzie mogą być rozpatrywane jako drgania złożone z dwóch drgań, różniących się tylko nieznacznie

co do ich częstości. W takim razie drgania te możemy zapomocą spektroskopu rozłożyć na ich składowe części. Gdybyśmy więc promień  $OS$  zbadali przy pomocy spektroskopu, powinniśmy zamiast pojedynczej linii otrzymać dwie linie widmowe. Takie podwojenie się linii widmowej, wywołane umieszczeniem źródła światła w polu potężnego magnesu — należy wyobrazić sobie silny biegun północny przed płaszczyzną rysunku, a południowy za tą płaszczyzną —, istotnie występuje. Po raz pierwszy udało się je obserwować prof. Zeemanowi, przy użyciu spektroskopu o wielkiej zdolności rozszczepienia. Obraz, który widzimy na ekranie, otrzymano w ten sam sposób dla widma metalu kadmu. Możemy rozróżnić na nim niektóre z «dupletów» linii widmowych <sup>1)</sup>.

Nie mamy tu możliwości zajmować wielu innemi szczegółami tego nadzwyczaj ciekawego zjawiska. Wspomnę tylko, że w kierunku promienia  $OS$  rozchodzą się także i inne drgania prostopadłe do kierunku promienia, a więc nie tylko drgania w płaszczyźnie rysunku, lecz także drgania w płaszczyźnie do niej prostopadłej. Na drgania elektronu w tej płaszczyźnie i w tym kierunku pole magnetyczne nie ma jednak żadnego wpływu, a więc drgania te dają linię

---

<sup>1)</sup> Gdyby rysunek fig. 40 miał odpowiadać dokładnie zjawisku obserwowanemu przez Zeemana, należałoby ilość pętlic figury powiększyć do kilku tysięcy.



widmową w jej właściwym miejscu. Będzie się ona znajdowała pośrodku między liniami «dupletu», w rzeczywistości więc będziemy mieli do czynienia z potrójną linią widmową. Tylko przy pomocy pewnego doświadczalnego fortelu udało się prof. Zeemanowi wykonać fotograficzne zdjęcie tak, że promienie światła tej środkowej linii nie mogły dojść do płyty.

Badania nad zmianami linii widmowych pod wpływem pola magnetycznego rozszerzono obecnie na bardzo wiele pierwiastków. Wprawdzie okazały się przytem pewne komplikacje, jak gdyby natura chciała przez to zażartować z naszych prostych rozważań; w większości jednak przypadków rzecz cała przedstawia się tak, jak w przypadku z kadmem. W głównych zarysach, w istocie sprawy wyłożona teoria jest bezwątpienia słuszna. Wobec tego możemy śmiało twierdzić, że elektrony są to te cząsteczki, których drgania wytwarzają promienie świetlne. Z wyniku tego skorzystajmy zaraz w celu wyprowadzenia kilku dalszych bezpośrednich wniosków.

Przedewszystkiem wiemy już (str. 231), że elektron w otaczającym go eterze wytwarza pewne zmiany stanu, — zmiany, określone wielkością jego ładunku i zależne także od ruchu samego elektronu. W tych zmianach stanu eteru tkwi istota wszelkich oddziaływań elektronu na sąsiednie cząstki. Zmiany te są wyrazem tego, co się dzieje w eterze dokoła

ciał naelektryzowanych i magnesów. Drgający elektron będzie więc również wywoływał w eterze peryodyczne zmiany.

Cóż jest naturalniejszego, jak przypuszczenie, że w zmianach tych tkwi istota drgań świetlnych? Czyż nie należy przyjąć, że drgania świetlne są peryodycznymi zaburzeniami równowagi tego samego rodzaju, co i zmiany eteru, które występują w objawach działań elektrycznych i magnetycznych? Na tem założeniu opiera się właśnie elektro-magnetyczna teoria światła. Pierwszy doszedł do niej Clerk-Maxwell drogą teoretycznych rozważań. Teoria ta znalazła powszechne uznanie od chwili, gdy fizyk niemiecki Hertz (1888) doświadczalnie stwierdził, że elektro-magnetyczne zaburzenia równowagi, podobne z wielu względów do promieni świetlnych a różniące się tylko długością fal, rozchodzą się w przestrzeni z tą samą szybkością, co i światło.

Drugi wniosek, do którego prowadzi nas teoria elektronów, opiera się na istnieniu wielkiej liczby linii w widmach większej części pierwiastków. Fakt ten dowodzi, że cząsteczka danego pierwiastku, względnie jego atom — gdyż często istotnie mamy do czynienia z atomami tylko —, wysyłając promienie świetlne, może drgać w bardzo rozmaity sposób. Wobec tego muszą i atomy być cząsteczkami o skomplikowanej budowie. Prawdopodobnem bardzo zdaje się być przypuszczenie, że właśnie

elektrony, których drgania są źródłem światła, uważać należy za te drobniotkie części samych atomów.

Bez wątpienia fizyka dzisiejsza posiada dążność przypisania w bardzo wielu zjawiskach głównej roli owym naładowanym cząsteczkom elektrycznym i w rzeczy samej wiele przemawia za tem, że cząsteczki te tworzą istotną składową część materii. O ile obecnie wiadomo, są one pomostem pomiędzy ważką materią a eterem. Jedynie one wiążą się z eterem w tem sensie, że wskutek ich obecności i ruchu zmienia się stan samego eteru. Na elektronach pokładają też wielkie nadzieje ci, co istotę ciężenia i sił cząsteczkowych chcą widzieć w przemianach zachodzących w eterze.

## WYKŁAD VII.

### O zachowaniu energii.

---

W szeregu zjawisk, które w odpowiednim porządku zamierzałem tu wyłożyć i objaśnić, dobiegłem końca. Zdaje mi się jednak, że nie będzie rzeczą zbyteczną, a przeciwnie wskazaną, gdy ostatni ten wykład poświęcę zreasumowaniu tego wszystkiego, cośmy poprzednio poznali. Wyjdę z pewnego ogólnego punktu widzenia. W tym celu zmuszony jestem przedewszystkiem zwrócić uwagę na to, że w każdym doświadczeniu, które istotnie było lub mogło być przez nas wykonane, wywołana została zawsze pewna zmiana w stanie ciał, biorących w niem udział. A więc działo się to np. wtedy, gdyśmy ciężar podnosili do góry, gdyśmy zapomocą tłoku ściskali gaz w walcu, gdyśmy rozciągali spiralnie zwiniętą sprężynę, lub w napiętym sznurku albo na powierzchni wody wytwarzali ruchy faliste i t. d. i t. d. Ilość tych przykładów, wyjętych

z szeregu naszych rozważań, łatwo powiększyć możemy zapomocą przykładów, w których występują różnego rodzaju mechanizmy. Pomyślmy np. o podnoszeniu wody za pomocą pomp, o spajaniu i skuwaniu metali, o piłowaniu i heblowaniu drzewa, o wytwarzaniu prądu elektrycznego do celów oświetlenia i o innych tego rodzaju czynnościach.

Uwagę naszą zwrócimy obecnie na pracę, która do tego wszystkiego jest niezbędnie potrzebna i przede wszystkim na to, jakiemu warunkowi koniecznie zadość czynić musi siła, np. rąk naszych, by nią można było w ciele wywołać tę lub inną zmianę stanu.

Że nic nie jesteśmy w stanie wykonać bez pomocy t. j. użycia siły, jest to oczywiste samo przez się. Po pewnym jednak namyśle łatwo przechodzimy do przekonania, że oprócz siły wchodzić tu musi pod uwagę jeszcze coś innego. Trzymając w ręku nieruchomo pewien ciężar, nie wytwarzamy żadnej w nim zmiany. Toż samo również ma miejsce wtedy, gdy rozciągniętą sprężynę lub ściśnięty w tłoku gaz utrzymujemy siłą ręki w tym samym położeniu. Co najwyżej możemy powiedzieć, że w takim razie siłą naszych mięśni nie dopuszczamy, by zmiana, któraby zająć mogła, istotnie się odbyła. Czynność zaś pewną wykonujemy wtedy dopiero, gdy za naszym współudziałem, skutkiem naszych usiłowań wywołana zostanie pewna zmiana w ciele.



A więc niedość wywierać na ciało pewną siłę, trzeba nadto, by ciało pod wpływem siły w kierunku jej działania zostało przesunięte. Ma to np. miejsce wtedy, gdy przesuwamy hebel po desce, lub podniesiemy ciężar na pewną wysokość do góry.

Tego rodzaju rozważania doprowadziły do następującej powszechnie przyjętej umowy. Powiadamy, że pracą wykonujemy, jeżeli wywierając na ciało pewną siłę, przesuwamy go w kierunku działania siły. Przytem pracę tę rachujemy większą, im większa jest działająca siła i im większa jest droga, przebyta przez ciało pod wpływem tej siły. Innemi słowy wielkość pracy zakładamy proporcjonalną do działającej siły i przebytej drogi.

Na podstawie tych założeń jesteśmy teraz w możności obrać stałą jednostkę pracy. Definicja jej wypadnie, jak następuje: jest to praca, jaką wykonujemy gdy, siła ma wartość 1 dyny, a długość drogi wynosi 1 centymetr. Jednostkę tę nazywamy *ergiem*. Z łatwością teraz możemy podać, ile ergów wynosi dokonana praca w każdym poszczególnym wypadku. Niech np. użyta siła wynosi 7 dyn, a przebyta droga 3 cm, wtedy wielkość wykonanej pracy otrzymamy na podstawie następującego rozumowania. Gdyby siła miała wartość 1 dyny, a przebyta droga wynosiła 1 cm, to wykonana praca byłaby równa 1 ergowi.

Gdyby zaś siła równała się 7 dynom, a droga pozostała tak samo długa na 1 cm, wtedy wskutek proporcjonalności pracy względem siły, pierwsza wypadłaby 7 razy większa, czyli wynosiłaby 7 ergów. Lecz siła 7 dyn w rzeczywistości działała na drodze nie 1 cm, lecz 3 cm, t. j. na drodze 3 razy dłuższej, a więc i wykonana praca będzie ostatecznie 3 razy większa, t. j. równać się będzie  $7 \times 3 = 21$  ergom.

Przenosząc rachunek ten na liczby ogólne, znajdziemy dla pracy  $A$ , wykonanej siłą  $K$  dyn na drodze  $s$  cm, wzór:

$$A = K \cdot s \text{ ergów.}$$

Gdyby podczas ruchu ciała zmieniała się wielkość siły, powodującej jego przesunięcie, natenczas należałoby podzielić całkowitą drogę ruchu na tak małe odcinki, by działającą na tej krótkiej przestrzeni siłę można było uważać za stałą. Wymnożmy długość wszystkich pojedynczych odcinków całkowitej drogi przez wielkość siły, działającej na początku każdego takiego odcinka, i dodajmy otrzymane w ten sposób iloczyny, a znajdziemy wielkość pracy, wykonanej na całej przestrzeni. Można niekiedy zupełnie dokładnie, niekiedy zaś w przybliżeniu obliczyć pracę tę, mnożąc przebytą drogę przez średnią wartość siły.

W przypadku, gdy kierunek ruchu różni się od kierunku działania siły, tę ostatnią można rozłożyć na dwie składowe siły: jedną — w kierunku ruchu

ciała, drugą — w kierunku do niego prostopadłym. Praca oblicza się naturalnie tak, jak gdyby działała tylko pierwsza składowa całkowitej siły.

Definicja pracy jako iloczynu z użytej siły i przebytej drogi jest naturalnie dowolna, jako też i wybór erga jako jednostki pracy. Przekonamy się wkrótce, jaka z tego korzyść wynika.

Najpierw jednak umówmy się jeszcze co do sposobu wyrażania się, którym nadal będziemy się posługiwali. Powiadamy zwykle: «**w y k o n u j e m y** nad pewnym ciałem pracę», gdy np. ciało podnosimy. Zauważmy jednak, że taksamo jak my sami siłą naszych mięśni wywieramy na dane ciało pewną siłę, mogą i inne ciała czynić to samo. Jest więc rzeczą oczywistą, że w razie przesunięcia ciała «**w y k o n a n a** została nad nim pewna praca». Wyobraźmy np. dwie kule, pędzące po powierzchni stołu jedna przed drugą, w stałym z sobą zetknięciu. Gdy tylna kula popycha z pewną siłą przednią, jest sama przez nią w biegu powstrzymywana. Ta tylna kula jest ciałem czynnym. Mówimy wtedy, że ona to wykonywa pracę nad przednią kulą, a o kuli przedniej mówimy, że nad nią została praca wykonana. Wielkość tej pracy obrachowuje się zawsze zapomocą powyższego wzoru.

Zwykliśmy więc np. mówić: ściśnięty gaz, albo para wodna wykonywa pracę nad popychanym tłokiem maszyny, wiatr wykonywa pracę

nad skrzydłami wiatraku, a prąd wodny nad kołem młyńskim. Tak samo wyrażamy się również wtedy, gdy chcemy np. opisać działanie rozciągniętej sprężyny na przymocowany do niej przedmiot, o ile tylko jest ona w stanie przedmiot ten poruszyć. O spadającym powoli ciężarze, złączonym zapomocą sznurka z wewnętrznym mechanizmem zegara, powiadamy, że wykonywa on nad tym mechanizmem pracę. W dwóch ostatnich przykładach ciało czynne nie uciska wprawdzie bezpośrednio poruszanego ciała, lecz je pośrednio pociąga, mówimy i tym razem jednak zawsze o wykonanej pracy, skoro tylko przesunięcie poruszanego ciała odbywa się w kierunku poruszającej go siły. Jak widzimy, taki sposób wyrażania się znajduje szerokie zastosowanie. W dalszym rozważaniu ograniczmy się jednak jedynie do przypadków, w których ciała działają na siebie przez bezpośrednie zetknięcie, a części, znajdujące się w zetknięciu, przesuwają się również w kierunku działania siły, wykluczmy natomiast przypadki wzajemnego oddziaływania ciał na odległość.

Teraz wreszcie możemy przystąpić do zapoznania się z treścią tego najogólniejszego prawa natury, które — muszę się przyznać — zachowałem w ukryciu aż do ostatniego wykładu. Brzmi ono bardzo prosto, dla przekonania się jednak

o jego ogólnem i powszechnem zastosowaniu potrzeba było wielu długotrwałych poszukiwań.

Uważne zbadanie zjawisk w rodzaju tych, któreśmy przytoczyli powyżej, a także i bardzo wielu innych przekonywająco wyjaśniło następujące dwie zasadnicze strony kwestyi. Nigdy nie może być wykonana praca nad pewnem ciałem bez zmiany jego stanu, o ile ciało to nie wykonywa samo jednocześnie pracy nad innem znowu ciałem. I odwrotnie, żadne ciało nie może wykonać jakiejkolwiek bądź pracy bez zmiany swego stanu, o ile znowu nad ciałem tem nie jest jednocześnie wykonana praca ze strony innego ciała. Zmiany w obu wypadkach są wprost przeciwne. Oto używana przez nas poprzednio sprężyna spiralna ulega zmianie długości, gdy nad nią wykonywamy pracę, i przeciwnie powraca znowu do pierwotnego stanu gdy sama pracę oddaje.

Wszystko to jest nadzwyczaj proste. Zdawaćby się nawet mogło, że osobne podkreślanie tej kwestyi jest zupełnie zbyteczne. Czy moglibyśmy np. choć na chwilę pomyśleć, by spiralna sprężyna, jednym końcem umocowana nieruchomo, mogła drugim swym końcem wprowadzić cokolwiek w ruch, nie ulegając przytem zmianie długości? A mimo to jednak przez czas długi wysilano się nad wynalezieniem t. zw. *perpetuum mobile*, nie dla tego, by z kwestyi tej jasno nie zdawano



sobie sprawy, lecz dla tego, że nie miało dostatecznej znajomości zjawisk przyrody. *Perpetuum mobile* miało to być urządzenie, będące w możności wykonywania pracy bez zmiany swego stanu, albo ulegające wskutek oddania pracy tylko krótkotrwałej zmianie, a więc taki układ ciał, który przez pewien czas miał sam wytwarzać pracę, a następnie bez pobrania pracy z zewnątrz, miał powracać do pierwotnego stanu przez co nabierał zdolności do wykonania pracy nanowo. Dziś możemy śmiało twierdzić, że pomysł podobnego wynalazku jest poprostu utopią. Gdy jakieś ciało pracę wykonywa, samo ulega zmianie i to w ten sposób, że im dłużej pracuje, tem mniej jest zdolne pracować dalej, innemi słowy, gdy dane nam jest ciało w pewnym określonym stanie, to ciało to może wydać tylko pewną ilość pracy, czyli — jak powiadamy — posiada ograniczoną zdolność pracy, ograniczoną «energię». Jeżeli więc jakieś ciało istotnie wytwarza pewną pracę oznaczonej ilości ergów, to w tem samym stopniu zmniejsza się jego zdolność do wykonania dalszej pracy. W zdaniu tem występuje na jaw to, co jak łatwo zrozumieć, oddać może wielkie usługi, w zastosowaniu do przypadków bardziej złożonych. Wiemy teraz, że gdy pewne ciało, lub układ ciał, poznamy w dwóch różnych stanach, to stany te charakteryzują się nierównymi zasobami energii, a więc różnica energii w obu

stanach musi być równa pewnej określonej ilości ergów.

Jak już wspomiałem, zmiany, zachodzące w ciele wytwarzającym pracę, mają kierunek wprost przeciwny do kierunku, podczas wykonania nad nim pracy. Gdy zdolność pracy (energia ciała) w pierwszym razie maleje — w drugim wzrasta, a mianowicie o ilość pracy wykonanej nad ciałem. Przez to stosunek do siebie dwóch ciał, z których jedno wykonywa pracę nad drugim, występuje znowu w nowem świetle. Zdolność pracy (energia) w czynnem ciele maleje o ilość wykonanej przezeń pracy, natomiast energia ciała, nad którem wykonywa się praca, o tą samą ilość wzrasta. A więc suma zdolności pracy w obu ciałach pozostaje bez zmiany. Obrazowo powiadamy więc: jedno ciało może oddać swą zdolność pracy drugiemu. Pogląd ten możemy następnie rozszerzyć na wszystkie inne zjawiska, nawet na takie, w których biorą udział więcej niż dwa ciała. Zdarzyć się może, że pewne ciało wykonywa pracę nad dwoma, albo i większą ilością ciał współcześnie. Wtedy oddaje ono ze swego zasobu każdemu z tych ciał pewną ilość pracy. W innych znowu razach odwrotnie jedno ciało pobiera pracę od całego szeregu ciał, z których każde wywiera nań działanie. Może się też zdarzyć i taki przypadek, że jedno ciało, podczas wykonywania nad nim pracy przez drugie, samo wykonywa pracę

nad innym trzeciem. W tym razie to pierwsze ciało zachowa tę samą zdolność pracy, co miało przedtem, i jest możliwe, że nie zmienia wogóle swego pierwotnego stanu. Krótko mówiąc, dochodzimy do ostatecznego poglądu, że we wszechświecie istnieje pewna określona suma energii, a ilość jej mimo ustawicznych przemian nie ulega w całości żadnej zmianie.

Dość już jednak tych ogólnych rozważań, czas wielki przejść do konkretnych przypadków! Zauważmy przedewszystkiem, że ciało może posiadać zdolność pracy wskutek rozmaitych i różnorodnych przyczyn. Mamy więc poznać rodzaje tej zdolności pracy czyli rozmaite formy energii.

Zacniemy od rozpatrzenia działania ciężarków, powodujących chód zwykłych zegarów. Przyjmijmy, że zegarowy ciężarek waży  $P$  dyn i znajduje się na wysokości  $h$  cm ponad najniższym punktem do którego zejść może. Jest on w stanie wyciągnąć sznur w dół o tę właśnie odległość, a ponieważ wywiera przytem siłę  $P$  dyn, może więc więc wykonać pracę

$Ph$  ergów.

Tak wielka jest więc zdolność pracy ciężarka na wysokości  $h$ . W ten sam sposób możemy obrachować zdolność pracy innego dowolnego ciała, znajdującego się na pewnej wysokości. Pod  $h$  rozumiemy oczywiście odległość, o jaką ciało zniżyć

się może, a więc wysokość ponad pewną płaszczyzną pionową, poniżej której ciało w ruchu swem zejść już nie jest w stanie.

Zdolność pracy, jaką pewne ciało zawdzięcza położeniu, które samo względnie jego cząstki zajmują, nazywamy energią położenia, albo energią potencjalną. Gdybyśmy chcieli wyrachować jej wielkość dla układu składającego się z kilku ciał a nie dla pojedynczego ciała, musieliśmybyśmy wymnożyć ciężar poszczególnych ciał przez wysokość ponad pewną powierzchnię poziomą i otrzymane stąd iloczyny do siebie dodać. Naturalnie w tenże sposób możnaby obliczyć również energią położenia ciała o znaczniejszych wymiarach, np. pewnej ilości cieczy, jeżeli wysokość każdej jego cząstki z osobna będziemy brali w rachubę.

Właściwie nie jest całkowicie słusznem energią położenia w przypadkach powyższych przypisywać jedynie ciężarowi ciała. Pomiedzy danem ciałem a ziemią istnieje wzajemnie przyciąganie, skutkiem czego podczas spadania ciężaru ku ziemi, ta ostatnia również posuwa się — aczkolwiek w minimalnym tylko stopniu — ku spadającemu ciału. Ściśle rzecz biorąc, musielibyśmy raczej powiedzieć, że układ dwu ciał — ziemi i pewnego ciężaru — posiada energią położenia, a jeżeli przyczynę przyciągania będziemy upatrywali przytem w stanie pośredniczącego eteru, to należy i eter również wciągnąć w rachunek. Siedliskiem energii położenia

będzie to ciało, w którym zaszły zmiany stanu, a te zmiany zaszły właśnie w eterze <sup>1)</sup>.

Nie mamy jednak zgola potrzeby zagłębiać się zwykle tak daleko w istotę rzeczy, wystarczy powiedzieć — nie wdając się w szczegóły mechanizmu —, że wogóle dwa ciała, przyciągające się wzajemnie, a więc np. ziemia i kamień, dwa ciała niebieskie, albo dwie molekuly, dwa atomy, dwa elektrony i t. d., posiadają energię położenia, która jest — *ceteris paribus* — tem większa, im bardziej ciała te są od siebie oddalone. To co ma wartość dla dwu ciał, ma naturalnie w zasadzie wartość i dla dowolnie wielkiej liczby ciał, względnie cząsteczek pewnej ilości cieczy, gazu i t. d. Jeżeli prztem działają wyłącznie siły przyciągania, energia potencjalna układu maleje wraz ze zmniejszaniem się wzajemnego oddalenia ciał, wchodzących w skład układu. W samej rzeczy, przybliżanie się ku sobie dwu przyciągających się wzajemnie ciał układu może

---

<sup>1)</sup> Jest wobec tego rzeczą zrozumiałą, dla czego przyjęliśmy powyżej, że ciała oddziaływują na siebie jedynie przy zetknięciu (str. 256). Jeśli ciała przyciągają się z oddalenia, układ obu ciał ma pewną zdolność pracy, aczkolwiek nie jesteśmy w stanie rozdzielić całkowitą energię układu na dwie części, z których jedna należałaby do jednego, a druga do drugiego ciała. W takim jednak razie, znając jedynie całkowitą energię układu, niema racyi mówić, że jedno ciało oddaje energię drugiemu. Można by jedynie, przyjmując pośrednictwo eteru, wyrażać się w ten sposób, że jedno ciało oddaje energię eterowi, drugie zaś ją stamtąd odbiera.



być zużytkowane do wykonania pracy nad jakimś innym ciałem, albo układem ciał.

Jest widoczna, że analogicznie, w przypadku sił odpychania układowi ciał odpowiada również pewny zasób potencjalnej energii. Energia układu będzie jednak tym razem wzrastała wraz ze zbliżaniem się ku sobie składowych jego części, ponieważ do wykonania tej zmiany w układzie wymagany będzie pewien nakład pracy z zewnątrz. Jest też rzeczą zrozumiałą, że w przypadku rozciągniętej sprężyny ma się do czynienia z energią, która jest wynikiem sił działających pomiędzy cząstkami sprężyny i zależy od wzajemnego położenia tych cząstek. I tym więc razem mówić będziemy o energii położenia, albo o potencjalnej energii rozciągniętej sprężyny. W tych bardziej skomplikowanych przykładach energii potencjalnej można również obliczyć, jak wielka jest energia układu dla każdorazowego położenia; trzeba tylko wiedzieć, jak wielkie są siły działające pomiędzy ciałami względnie cząstkami układu. Naturalnie tym razem rachunek jest bardziej złożony, aniżeli w przypadku dwóch ciał np. ziemi i ciężarku zegarowego.

Przechodzimy teraz do innej nie mniej ważnej formy energii. Gdy nad ciałem wykonamy pracę, następstwem jej może być to, że ciało zostanie nadana pewna szybkość. Wprowadzone w ruch ciało otrzymało pewną zdolność pracy, pewny za-

pas energii, może ono bowiem ze swej strony poruszyć inne ciało, lub wogóle wywołać w tem ciele pewne zmiany.

Tak np. ruch skrzydeł wiatraku lub koła w młynie wodnym jest wynikiem ruchu cząstek powietrza względnie cząstek wody; ruch pocisku broni palnej wykonuje pracę, która polega na strzaskaniu pewnego ciała. Obrachujmy zasób pracy poruszającego się ciała czyli jego energię kinetyczną, albo energię ruchu. Można udowodnić, że energia kinetyczna ciała o masie  $m$  gramów, poruszającego się z szybkością  $v$  cm na sekundę wynosi

$$\frac{m}{2} \cdot v^2 \text{ ergów.}$$

Wyprowadzić to możemy w następujący sposób. Obrachujmy pracę, jaką należy wykonać nad ciałem o masie  $m$ , by mu nadać szybkość  $v$  cm. W tym celu pomyślmy, że na ciało to wywieramy przez pewien przeciąg czasu np.  $t$  sekund pewną niezmienną siłę. Oczywiście siłę tę musimy dobrać tak, by dokładnie po  $t$  sekundach jej działania ciało nadaną została szybkość  $v$  cm na sekundę. W ciągu więc 1 sekundy siła ta nada ciału szybkość  $\frac{v}{t}$  cm. Jest to więc przyspieszenie ruchu ciała, wytworzone działaniem siły. Ponieważ masa ciała wynosi  $m$  gramów, wielkość więc działającej siły  $K$  będzie (str. 23).

$$K = m \cdot \frac{v}{t} \text{ dyn.}$$

Podczas działania tej siły ciało przebiegnie pewną drogę, powiedzmy  $s$  cm. Łatwo możemy ją obliczyć. Przypomnijmy sobie, że dla ruchu jednostajnie przyspieszonego przebyta w pewnym okresie czasu droga jest równa drodze, którąby ciało w tym samym czasie przebyło, gdyby poruszało się z szybkością niezmienną, średnią pomiędzy początkową a końcową szybkością istotnego ruchu. W danym wypadku początkowa szybkość, w chwili rozpoczęcia działania siły, wynosi 0, końcowa zaś równa się  $v$  cm. Wartość więc średnia jest  $\frac{v}{2}$  cm. Czyli droga  $s$  przebyta w ciągu  $t$  sekund wyniesie

$$s = \frac{v}{2} t.$$

Ponieważ praca równa się iloczynowi z siły przez drogę, t. j.

$$A = K \cdot s \text{ ergów,}$$

a więc w danym razie wynosić ona będzie

$$A = m \frac{v}{t} \cdot \frac{v}{2} t = \frac{m}{2} \cdot v^2 \text{ ergów.}$$

Tak samo możemy udowodnić, że i odwrotnie w razie, gdy poruszające się ciało wykonywa nad innym ciałem pracę aż do zupełnego wyczerpania swej szybkości, wielkość pobranej przez to

drugie ciało pracy wyrazi się również powyższym wzorem.

Wyrachowaliśmy więc istotnie, jaką zdolność pracy posiada poruszające się ciało, czyli jego energię ruchu. Pozwólmy ciału znajdującemu się w ruchu wykonywać pracę, lecz nie tak długo, by szybkość jego wyczerpała się całkowicie. Wykonana przezeń tym razem praca będzie dokładnie równa zmniejszeniu jego kinetycznej energii. Niech np. pewne ciało o masie 1000 g, poruszające się z początkową szybkością 100 cm na sekundę, przez czas pewien pociąga za sobą lub popycha inne jakieś ciało. Wskutek wykonanej w tym czasie pracy szybkość pierwotna niech zmaleje, przypuśćmy, do 30 cm na sekundę. Wtedy kinetyczna energia ruchu zamiast:  $\frac{1}{2} \cdot 1000 \times 100^2 = 5000000$  wyniesie tylko:  $\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 30^2 = 450000$  ergów. Wykonana więc praca obliczy się jako różnica:  $5000000 - 450000 = 4550000$  ergów.

Kierunek poruszającego się ciała nie odgrywa tu żadnej roli. Nie ma więc znaczenia w obliczeniu kinetycznej energii ciała. Kula wyrzucona ukośnie do góry uderzeniem swem wywrze ten sam skutek, co i kula poruszająca się poziomo, byle energia ruchu była ta sama. Również natura ciała pozostaje tu bez znaczenia. Gdy np. znana jest nam szybkość wodnego prądu, a więc ilość wody przepływająca w pewnym czasie przez prostopadły do kierunku prądu przekrój, łatwo możemy poznać

jego zdolność pracy, czyli kinetyczną energię prądu. Innymi słowy możemy obrachować pracę, jaką prąd ten wykonać może w najkorzystniejszych warunkach, t. j. do zupełnego wyczerpania swej szybkości.

W ten sposób zapoznaliśmy się z dwoma głównymi rodzajami energii. Zdarzyć się może, że jedno i to samo ciało posiada oba rodzaje energii jednocześnie, ma więc wtedy całkowitą energię równą sumie obu. Dopóki ciało nie wykonywa pracy, ani też nie pobiera z zewnątrz, całkowita energia jego pozostaje bez zmiany, co jednak nie wyklucza możliwości przemian energii w samym ciele, mianowicie zmniejszania się względnie powiększania się jednego rodzaju energii kosztem drugiego. Rozpatrzmy np. ciało, spadające swobodnie z pewnej wysokości, a więc nie powodujące ruchu innego ciała. Traci ono wprawdzie na energii położenia, zyskuje jednak tyleż samo na energii ruchu. Toż samo dzieje się z wahadłem, gdzie podczas ruchu zachodzi ustawiczna przemiana jednego rodzaju energii w drugi. Kulka wahała, spadając z wysokości największego wychylenia i zbliżając się ku położeniu równowagi, traci na energii położenia, zyskuje natomiast na energii ruchu. W chwili przejścia przez punkt równowagi nabyta kinetyczna energia wynosi dokładnie tyle, ile wynosi strata energii potencjalnej. Podczas podnoszenia się wahadła odwrotnie — maleje coraz



to bardziej kinetyczna energia, a wzrasta potencjalna. W punkcie zwrotnym ta ostatnia osiąga *maximum*, pierwsza zaś spada do zera. Ponieważ w rozważanej chwili kulka dochodzi do tej samej, co i poprzednio wysokości, energia położenia otrzymuje dawną wartość.

Łatwo to sprawdzić możemy, przeprowadzając odpowiedni rachunek z liczbami konkretnymi. Gdy kulka wahadła podniesiona zostanie do wysokości, powiedzmy 10 cm, szybkość jej w chwili przejścia przez położenie równowagi wyniesie około 140 cm na sekundę (str. 25). Niech masa kulki równa się 1 g, innymi słowy niech kulka waży 981 dyn, wtedy energia położenia na wysokości 10 cm wyniesie  $981 \times 10 = 9810$  ergów. Tyleż samo wyniesie i kinetyczna energia w przejściu przez punkt równowagi:  $\frac{1}{2} \cdot 140^2 = 9800$  ergów.

Przy pomocy zasady o zachowaniu energii daje się łatwo zrozumieć i wytłumaczyć następujące zjawisko, obserwowane i opisane poraz pierwszy jeszcze przez Galileusza. Odchylmy kulkę wahadła w bok do pewnej wysokości i następnie puśćmy swobodnie. Wystawmy przytem w poprzek do płaszczyzny ruchu wahadła jakikolwiek pręt tak, by nie wahadła uderzyła weń w chwili przejścia przez położenie pionowe. Od tej chwili wahająca się kulka nie może już biec po obwodzie dawnego koła, lecz musi zatoczyć łuk o mniejszym promieniu, będzie więc obracać się po obwodzie koła, którego środek

znajduje się w miejscu zetknięcia nici z wysuniętym prętem. Mimo to kulka podniesie się do dawnej wysokości, t. j. do wysokości, z jakiej spadała i do jakiejby doszła, gdybyśmy w pół drogi nie skrócili długości wahadła.

Że to tak być musi, a nie inaczej, łatwo zrozumieć. Wstawiając pręt wpoprzek poruszającej się nici wahadła, nie wykonujemy żadnej pracy nad wahadłem, a więc całkowity zasób energii jego pozostaje ten sam. Możliwe to jest jedynie wtedy, jeżeli kulka w chwili zupełnej utraty energii kinetycznej osiągnie dawną energię potencjalną, a więc i dawną wysokość położenia.

Możemy jednak ruch wahadła łatwo w ten sposób zmienić, że kulka jego podnosić się będzie albo wyżej albo też niżej. Wystarczy tylko, byśmy w chwili, gdy nić wahadła mija położenie równowagi i uderza o pręt, popchnęli ją zlekka, lub powstrzymali przy pomocy tegoż. W pierwszym razie wykonamy pewną pracę nad wahadłem, w drugim zaś wahadło wykona ją nad prętem, czyli w pierwszym przypadku zwiększy się całkowity zasób energii wahadła, w drugim zaś przeciwnie się zmniejszy. Istotnie zgodnie z naszym wnioskiem widzimy, że wysokość wzniesienia się kulki pierwszym razem jest większa, drugim zaś mniejsza, w porównaniu do pierwotnej wysokości.

Pozwólmy sprężystej kuli, zawieszanej na nici, uderzyć o drugą podobną kulę. Spadająca kula

wykona nad nieruchomą kulą pewną pracę, sama zaś straci nadaną jej przez nas energię. Jeżeli obie kule są zupełnie równe co do wielkości i doskonale sprężyste, natenczas po uderzeniu o siebie pierwsza z kul pozostanie w spoczynku, druga zaś przejmie szybkość pierwszej. W przypadku takim energia kinetyczna jednego ciała została całkowicie oddana drugiemu. Tego rodzaju przenoszenie się energii z jednego ciała na drugie łatwo stwierdzić można np. na szeregu jednakowych kul z kości słoniowej. Zawieśmy je na niciach jednakowej długości tak, by dotykały się wzajemnie i w położeniu równowagi tworzyły razem linię prostą. Gdy pierwszą kulkę odchylimy i pozwolimy jej uderzyć w pozostałe, z szeregu kul odskoczy tylko ostatnia po przeciwnej stronie, kulka zaś spadająca zatrzyma się w miejscu i przystania do pozostałych. Odskakująca kula pobiera przejściowo całą energię, która została nadana pierwszej kuli przez podniesienie jej do pewnej wysokości w górę,

Zauważyć tu wypada jeszcze, że zasób energii, przenoszony z jednej kulki na drugą, jest zawsze równy pracy, którą jedna kulka wykonywa nad drugą. Wartość jej może być obliczona jeżeli znana jest działająca siła i przebyta droga. Wprawdzie podczas trwania uderzenia przesunięcie się punktu styczności obu sąsiadujących z sobą w szeregu kul, jest bardzo małe, natomiast średnia wartość działającej siły jest bardzo wielka, jak

o tem mieliśmy sposobność mówić w jednym z pierwszych wykładów (str. 36).

To przenoszenie się energii z kuli na kulę w szeregu kul z kości słoniowej prowadzi nas do wniosku, że i przy każdym rozchodzeniu się zakłóceń równowagi pewna ilość energii przechodzi z cząstki (środowiska) na cząstkę. Jeżeli np. przez czas pewien potrącamy ręką jeden koniec rozpiętego sznurka, wykonujemy nad nim pewną pracę i przez to wzmagamy jego energię, która jest tu zawarta w postaci rozchodzącej się fali. W ten sam bowiem sposób, w jaki ręka wykonywa pracę nad jedną tylko częścią sznurka, wykonywa ją każda następna część nad dalszą, oddając jej pracę przed chwilą pobraną. Gdy wreszcie fala dotrze do przeciwnego końca sznurka, umocowanego do ściany, ustanie w miejscu tem dalsze posuwanie się energii. Energia wraz z odbitą falą powraca wstecz. I jeżeli punkt zaczepienia sznurka jest zupełnie nieruchomy, pobrana przez ten punkt (nieruchome ciało) energia równa się zeru. W przypadku nieruchomo na obu końcach umocowanej nici, np. w przypadku struny, energia jej ruchu nie może być oddana, ani pobrana. Zawarta więc w drgającej się strunie energia może być oddana jedynie cząstkom otaczającego ją powietrza. Nie biorąc tego pod uwagę, będziemy mieli w brzmiającej strunie również przykład kolejnej przemiany

kinetycznej energii w potencjalną i odwrotnie, podobnie jak w wahadle.

Wymieńmy w myśli, w przykładzie ze sznurkiem, część jego poruszaną zapomocą ręki na drgający elektron, a całą dalszą część sznurka — na eter, otaczający zewsząd każdy pojedynczy elektron. Będziemy wtedy mieli promieniowanie światła i ciepła. Elektrony wykonują pracę nad otaczającym je eterem, wywołując w nim zaburzenia równowagi, poruszone zaś części eteru czynią tożsamo nad dalszemi częściami, oddając dalej pobraną przed chwilą pracę. Nieruchomej ścianie, odbijającej fale sznurka, odpowiadać tu będzie powierzchnia doskonałego zwierciadła. Gdy natomiast promienie wchodzią w materię ważką, ale nie całkowicie przezroczystą, muszą być przez nią częściowo pochłonięte. W przypadku tym praca, wykonana przez eter nad ciałem, powiększa jego energię wewnętrzną.

Wielorakie są zmiany, jakim w tym razie ciało ulegz może. Jeśli ciałem tem jest płyta fotograficzna, następują w niej przemiany chemiczne. Atomy zostają rozłączone, natomiast wzmagą się ich energia potencjalna. W wielu znowu przypadkach działanie pochłoniętych promieni objawia się w pobraniu przez ciało ciepła, w podwyższeniu jego temperatury. W tym razie zostaje podniesiona kinetyczna energia pojedynczych cząstek.

Tę energię drobnych cząstek materji możemy



też łatwo zwiększać, wykonując nad ciałem pracę. Przypomnijmy sobie, jakęśmy ogrzewali gaz, ściskając go tłokiem. Przebieg tego zjawiska tłumaczyliśmy tem, że cząsteczki gazu po odbiciu od tłoka nabierają większej szybkości, niż miały poprzednio przed uderzeniem. Obecnie możemy powiedzieć, że, wykonując pracę nad tłokiem, udzielamy mu energii, którą następnie pobierają cząsteczki gazu. O ile zdolność pracy ciała popychającego tłok zmaleje, o tyle wzmoże się energia ściskanego gazu. Gdybyśmy mogli widzieć wszystko to, co dzieje się wewnątrz walca z gazem, byłibyśmy w stanie zapomocą wzoru  $\frac{m}{2} \cdot v^2$  wyrachować dla

każdej cząsteczki, dla każdego atomu i elektronu nawet jego kinetyczną energię. Moglibyśmy również określić, jaką potencjalną energię (energię położenia) mieć będą względem siebie atomy, tworzące molekuły danego gazu. Gdybyśmy to wszystko zrachowali, znaleźlibyśmy, ile ergów wynosi całkowita energia danej ilości gazu, a więc moglibyśmy podać, o ile ona wzrosła po dokonaniem ściśnięciu. Okazałoby się wtedy z pewnością, że wzrost całkowitej energii gazu dokładnie równa się ilości pracy, wykonanej przez nas nad gazem.

W tej samej formie, w jakiej występuje energia gazu podczas ściskania — a więc w formie kinetycznej energii pojedynczych molekuł i atomów,

określonej zwykle mianem «ciepła» — objawia się również i praca, dokonana nad dwoma ciałami podczas tarcia. Moglibyśmy i tym razem obrachować ją z wielkości użytej siły i przebytej drogi. To samo znaleźlibyśmy również w przypadku zderzenia się dwu ciał, o ile ciała te nie są doskonale sprężyste, a więc wtedy, gdy ciała te po uderzeniu odskakują od siebie, nie zachowując pierwotnej szybkości. Wogóle, gdy ruch widzialny zostanie zniweczony przez jakikolwiek bądź opór i gdy zdawaćby się mogło, że energia tego ruchu całkowicie stracona została, wtedy w rzeczywistości wywiązuje się pewna ilość ciepła, co jest dowodem, że kinetyczna energia nie zginęła, lecz z postaci widzialnej — z energii ruchu skoordynowanego — przeistoczyła się w postać niewidzialną, w postać nieskoordynowanego ruchu cząsteczek.

Rozważmy wreszcie, co się dzieje, gdy ciała ogrzewamy, gdy np. kulę mosiężną dotykamy płomieniem palnika? Płomień wykonywa nad kulą pracę, ale oczywiście w sposób odmienny od tego, w jaki skutecznia ją wciskany do walca tłok. Cząsteczki względnie atomy żarzącego się płomienia, nie pracują tu wspólnie, posuwając się razem w jednym oznaczonym kierunku, lecz przeciwnie każda cząsteczka, każdy atom wykonywa pracę z osobna, niezależnie od drugiego, oczywiście nad temi częstkami ciała, które leżą w jego sferze działania. Przenoszenie energii z po-

jedynczych cząstek płomienia na pojedyncze cząstki przedmiotu odbywa się jednak zawsze w ten sam sposób, w jaki jedna kula sprężysta przy zderzeniu się z drugą oddaje jej swą zdolność pracy. Ten osobliwy rodzaj wykonania pracy albo przenoszenia energii, zwykliśmy nazywać «przewodzeniem ciepła».

Rozumiemy też doskonale, jak ogromnej wagi dla poznania zjawisk natury jest odpowiedź na pytanie, ile pracy należy włożyć w dane ciało, by temperaturę jego podnieść o pewną oznaczoną ilość stopni? Pytaniu temu możemy nadać następującą formę konkretną: «ile potrzeba ergów, by temperaturę jednego grama wody podnieść o jeden stopień Celsiusa», np. od temperatury  $15^{\circ}\text{C}$  do  $16^{\circ}\text{C}$ . Otrzymawszy na pytanie to odpowiedź, mamy również odpowiedź i na liczne inne pytania tegoż rodzaju. Zapomocą dokładnych pomiarów znaleziono mianowicie, w jakim stosunku znajduje się ciepło potrzebne do podniesienia temperatury jednego g wody o  $1^{\circ}\text{C}$  — ilość tę obrano za jednostkę ciepła (kaloryę) — do ciepła, zużytego w tym samym celu na 1 g innego jakiegoś ciała, np. miedzi, szkła, rtęci i t. d. Zmierzono np., że do ogrzania 1 g miedzi od  $15^{\circ}$  do  $16^{\circ}\text{C}$  potrzeba 0.094, a na stopienie 1 g lodu — 79 jednostek ciepła, natomiast na przemianę wody o  $100^{\circ}\text{C}$  w nasyconą parę

o tej samej temperaturze — 537 kaloryj. Gdyby więc wiadoma była ilość ergów, odpowiadająca jednostce ciepła, nie byłoby żadnej trudności w ocenie różnic energii zimnej i gorącej miedzi, lodu i wody, wody i pary i t. d.

Na podstawie licznych i możliwie dokładnie przeprowadzonych pomiarów wyliczono, że liczba ergów, która odpowiada powyżej określonej jednostce ciepła (kaloryi gramowej) wynosi 41900000. Odpowiada to zdolności pracy, jaką ciało o masie 1 g, t. j. o ciężarze 981 dyn, posiada na wysokości 427 metrów. Gdyby więc 1 g wody z wysokości tej spadł swobodnie na podstawę, a całkowita jego energia kinetyczna zamieniła się w ciepłą i wytworzone ciepło nie uszło z wody nazewnątrz, wtedy temperatura grama wody podniosłaby się o 1° Celsiusa.

Znajomość liczby, wyrażającej ilość jednostek pracy, którą zawiera w sobie jedna kalorya, czyli znajomość «mechanicznego równoważnika jednostki ciepła» zawdzięczamy badaniom i pomiarom licznych fizyków, a dzieło to zaliczyć śmiało można do najlepszego, jakie eksperymentalna fizyka XIX stulecia w spuściźnie nam przekazała. Zgodność rezultatów, otrzymanych na rozmaitych drogach i rozmaitymi sposobami, przekonywa nas przytem, że niema mowy o tem, by przez tarcie w różnych warunkach można było otrzymać raz

tą, a drugi raz inną ilość ciepła w stosunku do włożonej pracy. Ta zgodność wyników staje się więc zarazem bardzo cennym i przekonującym dowodem prawdziwości zasady o zachowaniu energii.

Niech mi będzie wolno zrobić tu jeszcze uwagę, że dowód taki nie jest zbyt cenny. W powyższych rozważaniach, mając na widoku możliwą jasność wykładu, ująłem go w taką formę, że zdawaćby się mogło, iż wszystko to, o czym tu była mowa, jest naturalne i samo przez się zrozumiałe. Tak jednak żadną miarą nie jest. Że żadne ciało trwale pracy wytwarzać nie może, o ile nie będzie mu dostarczona energia z zewnątrz, że innymi słowy *«perpetuum mobile»* jest niemożliwe, że nawet siła ciężkości nie jest w stanie w żadnym razie podnieść ciało wyżej ponad punkt, z którego spadać poczęło — wszystko to, tylko dzięki bardzo starannym i głęboko wnikającym w rzecz badaniom stosunków rzeczywistych, zostało raz na zawsze ustalone i stwierdzone.

Wyposażeni znajomością mechanicznego równoważnika ciepła, jesteśmy w stanie w wielu bardzo razach zmierzyć zdolność pracy ciała, przeprowadzając jego energię w ciepło i oznaczając termometrycznie zmianę temperatur, wywołaną tem ciepłem w określonej ilości wody. Wystawmy np. na promienie słońca metalowe naczynie wypeł-



nione oznaczoną ilością wody, a pokryte nazewną warstwą sadzy w celu uniknięcia odbicia. Obserwowane podniesienie temperatury pozwoli nam ocenić, jak wielka jest energia, którą jednostka powierzchni ciała, np.  $1\text{ cm}^2$  pobiera w ten sposób od słońca. Tą drogą dochodzimy do obliczenia pracy, którą wykonać mogą promienie słoneczne w razie całkowitego wykorzystania ich energii. Przekonamy się przytem, jak niezmiernie wielki jest zasób energii, którą rok rocznie pobiera ziemia od słońca — energii, która powoduje wzrost roślin, wytwarza wiatry, destyluje wodę, przenosząc ją na najwyższe szczyty gór, — słowem tej energii od której zależy wszelki ruch i życie na ziemi.

Oceniamy więc doskonale pierwszorzędne znaczenie nagromadzonej w słońcu energii dla naszego bytu na ziemi, uderza nas jednak przytem, jak nieoszczędną i rozrzutną jest natura pod tym względem. Nie ulega bowiem wątpliwości, że tylko drobna część promieni słońca trafia na ziemię i inne planety układu słonecznego, planety te bowiem widziane ze słońca przedstawiałyby się jako drobne krążki na firmamencie niebieskim. Wobec tego tylko bardzo nieznaczna część wysyłanej przez słońce energii może przypaść tym planetom w udziale. Niezrównanie większa jej część przenika nieskończoność przestworów wszechświata, skąd, o ile nam wiadomo, nigdy już nie wraca.

Jest ona więc dla nas stracona. Być może, że nadzwyczaj drobną jej część otrzymują domniemani mieszkańcy innych układów słonecznych, podobnie jak i my zapomocą siatkówki oka lub płyty fotograficznej przejmujemy ślady energii, pochodzącej np. od słońc drogi mlecznej.

Jakie zmiany zachodzą na słońcu samem, przez co jest ono w stanie bezustannie wysyłać energię, jaki los spotka kiedyś układ słoneczny po wyczerpaniu tego ogromnego ale nie nieskończonego zapasu ożywczej energii słońca — są to pytania, których roztrząsać tu nie możemy i pozostawić musimy bez odpowiedzi. Zresztą nie potrzebujemy nawet pytań tych zadawać sobie, by dojść do przekonania, że prawo zachowania energii żadną miarą nie może nam zapewnić wiecznej niezmienności dzisiejszego stanu świata.

Poprzednio już doszliśmy do przekonania, że moglibyśmy obliczyć kinetyczną energię poruszających się cząstek gazu, gdybyśmy poznali liczbową wartość wzoru  $\frac{m}{2} \cdot v^2$  dla każdej pojedynczej cząstki i wszystko razem dodali. Ten zasób energii gazu dałby się jednak przeprowadzić całkowicie w pracę użyteczną tylko wtedy, gdybyśmy byli w stanie operować każdą pojedynczą cząstką z osobna, t. j. każdą z cząstek osobno zaprzęgać do pracy aż do całkowitego wyczerpania jej energii, jak to ma miejsce np. w przypadku pędzącej

kuli. W rzeczywistości jednak jesteśmy bardzo dalecy od takiego stanu rzeczy, a zdolność pracy, zawarta w ruchach cząsteczkowych t. j. energia cieplna ciał jest dla nas mniej dostępna, aniżeli energia prądów powietrza lub wody. Wprawdzie zmuszamy ciepło do oddawania nam pracy w powszechnie używanych motorach termicznych (maszynie parowej, motorze gazowym i t. d.), lecz bliższe rozważanie tej sprawy poucza nas, że nigdy nie jesteśmy w stanie zapasu ciepła zawartego w ogrzanej ciele całkowicie zamienić na pracę użyteczną. Najlepiej udaje się to nam wtedy, gdy w pewnych ciałach ciepło nagromadzone jest niezwykle i przeciwnie im ciepło jest równomierniej rozmieszczone w ciałach, tem trudniej zużytkować się daje. Gdy zważymy nadto, że jak wskutek różnorodnych przeszkód widoma kinetyczna energia ciał bezustannie przemienia się w ciepło, że wskutek przewodzenia i promieniowania różnice temperatur stale znikają, — przyjdziemy do wniosku, iż, aczkolwiek zasób energii wszechświata pozostaje bez zmiany, to jednak jakość tej energii zmienia się ustawicznie i energia dąży do postaci, która jest dla nas najmniej dostępna i korzystna.

Niech mi będzie wolno wykonać tu jeszcze pewno doświadczenie, przy pomocy którego zapoznany się ze zjawiskami, dotychczas przez nas

nierozważanemi. Oto na jednym ramieniu wagi zawieszam pionowo sztabkę magnesu i równoważę ciężarkami po przeciwnej stronie. Sztabka ta zanurza się do połowy w wydrążeniu pionowo ustawionej szpulki, obwiniętej na zewnątrz zwojami grubego drutu miedzianego. Końce tego drutu łączę ze zwojami drutu w galwanometrze. Galwanometr tu użyty jest mniej czuły od znanego już nam galwanometru zwierciadłowego, opiera się jednak na tej samej zasadzie. Składa się on ze zwojów izolowanego drutu, biegnących dokoła igły magnetycznej, tym razem jednak osadzonej na osi poziomej. Ruch igły zaznacza przytwierdzona do jej ramienia wskazówka. Każde poruszenie zawieszonego na ramieniu wagi magnesu, wywołane potrąceniem ramienia wagi, powoduje, jak widzimy, powstanie prądu w zwojach otaczającego szpulkę drutu. Prąd ten przebiega następnie przez zwoje galwanometru. Zmienia on w dodatku swój kierunek wraz z każdorazową zmianą kierunku ruchu magnesu, co uwiadczenia nam wskazówka galwanometru, wychylająca się kolejno to w jedną to w drugą stronę.

Prąd elektryczny wywołać może najrozmaitsze skutki — w danym przypadku działanie jego polega na poruszaniu igły magnesu — a więc posiada on pewną zdolność pracy. Ta zdolność pracy prądu powstać mogła wyłącznie kosztem pracy, wykonanej ręką przy poruszeniu wagi. Postaram się to zaraz wykazać. Ponieważ magnes jest zrównowa-

żony ciężarkami, nie mamy więc tu do czynienia z jego ciężarem własnym; musi tu w grę wchodzić inna jeszcze siła. Przerwijmy połączenie szpulki z galwanometrem, a natomiast połączymy ją z biegunami ogniwa elektrycznego, czyli innemi słowy przepuśćmy przez jej zwoje prąd. Widzimy, że wskutek prądu sztabka magnesu zostaje wciągnięta do wnętrza szpulki. Zmieńmy teraz kierunek prądu, a zobaczymy objaw wprost przeciwny: sztabka magnesu zostaje ze szpulki wyrzucona. Badając dokładniej wpływ kierunku prądu na przebieg zjawiska, dochodzimy do następującego wniosku. Gdy w pierwotnem doświadczeniu posuwamy magnes ku dołowi, ku zwojom szpulki, wytwarzamy w nich prąd o kierunku, który powoduje odpychanie magnesu. By mimo to magnes można było wprowadzić do wnętrza szpulki, należy użyć pewnej siły, którą przewyżczamy siłę oddziaływania prądu i wbrew niej przesuwamy sztabkę magnesu. Siłą tą wykonujemy więc pewną pracę. Również wykonujemy pracę i wtedy, gdy magnes podnosimy do góry. Wtedy bowiem przewyżczamy działanie prądu o wprost przeciwnym kierunku. W ten sposób przekonujemy się, że prądy wytworzone w zwojach szpulki i ich energia zawdzięczają swe istnienie pracy włożonej przez nas podczas przesuwania magnesu z góry na dół i z powrotem.

Przyrząd, który tu widzimy, jest to t. zw. magneto-elektryczna maszyna Gramme'a. Służy



ona również do wytwarzania elektrycznych prądów na drodze dynamicznej. Tym razem jednak powstały prąd trwa tak długo, jak tego sobie życzymy, i zachowuje trwale ten sam kierunek. Mamy oto żelazny pierścień, owinięty w odpowiedni sposób izolowanymi drutami, który zapomocą korby kręcić możemy w silnem polu magnetycznem. Że przez szybki obrót pierścienia wytwarzamy w przewodach prąd elektryczny, o tem łatwo przekonać się można, włączając w obieg prądu cienki drut platynowy, który wskutek prądu rozżarza się i świeci. Zamieńmy cienki drucik platynowy na gruby drut miedziany, a prąd wzmoże się jeszcze bardziej, i również wytwarzać będzie w drucie ciepło, aczkolwiek drutu nie rozżarzy. Wywołanie tych zjawisk odbywa się kosztem zużytej przytem pracy. Odczuwamy to bezpośrednio z wysiłku, jaki robimy wtedy, gdy, obracając maszynę, rozżarzamy drucik. Wysiłek ten w jednej chwili ustaje, gdy przewody rozłączymy i przerwiemy wytwarzanie prądu i ciepła, aczkolwiek pierścień dalej będziemy obracać. Nawet niema potrzeby próby tej dokonywać samemu, występującą tu różnicę można wprost widzieć. Oto puszczam korbę rozpędzonego pierścienia podczas, gdy maszyna prąd wytwarza; ruch pierścienia ustaje prawie natychmiast i światło w drucie gaśnie. Teraz przerywam przewody, rozpędzam powtórnie pierścień i puszczam: pierścień i korba obracają się jeszcze czas pewien. In-

nemi słowy, kinetyczna energia pierścienia wy-czerpuje się daleko prędzej, gdy maszyna wytwarza pracę w przewodach, aniżeli wtedy, gdy się energia zużywa jedynie na pokonanie tarcia w poruszających się częściach maszyny.

Lecz maszyna Gramme'a może być użyta jeszcze i do innych celów. Zastosujmy ją do ogniw elektrycznych zwanych «akumulatorami». Ogniwa te składają się z płyt ołowianych, pokrytych na powierzchni, pewnemi związkami ołowiu i zanurzonych w rozcieńczonym kwasie siarkowym. W tym stanie, jak się tu znajdują, dostarczyć one nam mogą prądu elektrycznego podobnie jak i inne ogniwa elektryczne, aczkolwiek tylko wskutek tego, że poprzednio w pracowni zostały «naładowane». To ładowanie akumulatorów odbywa się również zapomocą maszyny Gramme'a tylko nieco większych rozmiarów, poruszanej nie siłą ręki, lecz zapomocą maszyny parowej. Prąd elektryczny, który maszyna Gramme'a dostarcza, przebiega ogniwa akumulatorów i dokonywa w nich pewnych zmian chemicznych, przez co akumulatory nabierają zdolności oddawania prądu z powrotem. Po «naładowaniu» jest więc w akumulatorach nagromadzony pewny zasób energii, pewna ilość ergów.

A teraz przeprowadźmy prąd od akumulatorów w zwoje pierścienia maszyny Gramme'a. Z chwilą zamknięcia prądu pierścień zaczyna się obracać

i pędzi wciąż dalej mocą nagromadzonej w akumulatorach energii. Włączmy w obwód prądu cienki platynowy drucik, a pocznie się on żarzyć. Akumulatory wykonują więc podwójną pracę: z jednej strony w przewodach wytwarzają ciepło, z drugiej zaś poruszają pierścień maszyny Gramme'a. Zatrzymajmy siłą ręki korbę maszyny. Praca akumulatorów zużywa się teraz wyłącznie na wytworzenie ciepła w przewodach i platynowy drucik żarzy się znacznie silniej. Włączmy następnie w obieg prądu drugi platynowy drucik, żarzenie się obu drucików osłabnie. Zmieniając długość nowowłączanego drucika, możemy doprowadzić siłę żarzenia obu drucików do pierwotnego stanu.

Chodzi mi tu o porównanie przypadku pierwszego, gdy prąd żarzył jeden tylko drucik platynowy i jednocześnie poruszał pierścień maszyny, z przypadkiem drugim, gdzie żarzyły się dwa druciki, a ruch pierścienia był powstrzymany siłą ręki. Ponieważ światło w obu doświadczeniach doprowadziliśmy do tego samego natężenia, można być pewnym, że i siła prądu w obu razach pozostała ta sama. W akumulatorach w obu więc przypadkach musiały się odbywać te same przemiany. Musiały one w ciągu 1 sekundy wytwarzać tę samą ilość pracy i tyleż samo tracić z zapasu swej energii. Jeżeli tę stronę zjawiska weźmiemy właśnie pod uwagę, będziemy widzieli w niem nowe potwierdzenie zasady zachowania energii.

W pierwszym przypadku prąd z akumulatorów wykonywał pracę nad pierścieniem maszyny i żarzył jeden tylko drut platynowy, w drugim zaś pierścień nie pobierał pracy od akumulatorów, natomiast energią prądu żarzyły się aż dwa druty platynowe.

Zatrzymałem się nad temi zjawiskami nieco dłużej, a to dlatego, że chciałem pokazać, w jaki sposób można zjawiska elektryczne i magnetyczne opanować zapomocą zasady zachowania energii. Oprócz tego zamiarem moim było zwrócić uwagę na wynikający z zasady tej związek pomiędzy różnorodnemi kategoriami zjawisk — związek, który czyni zjawiska te w pewnym stopniu zrozumiałemi, bez względu na to, czy mechanizm ich powstawania jest nam bliżej znany, czy też nie. Z faktu, że magnes, wprowadzany do wnętrza zwojów drutu, wywołuje w nich prąd, wnioskujemy o sile, którą naodwrot wywierają zwoje, zasilane prądem z zewnątrz, na magnes. Gdy, przepowiadając przebieg dowolnego zjawiska, w wnioskach swych opierać się będziemy na prawie o zachowaniu energii, nie potrzebujemy się obawiać, by nas mógł spotkać zarzut ze strony fachowego fizyka. Do zasady o zachowaniu energii mamy tak głębokie zaufanie, że uważamy ją za najniezawodniejszego przewodnika, jaki posiadamy w wykrywaniu nowych zjawisk, a do wskazówek wynikających z tej zasady przywiązujemy wagę niezmniejszoną, niż —

dajmy na to — do wskazówek wypływających z teorii elektronów lub jakiegokolwiek innej teorii.

A jednak w ocenieniu doniosłości tej zasady nie należy iść za daleko. Różnorodność zjawisk natury, nawet w dziedzinie zagadnień fizyki, jest tak wielka, a wpływ ich na siebie tak wielostronny, że jedna zasada nawet najbardziej ogólna i obszerna nie jest w stanie objąć wszystkich zachodzących tu przypadków. Rozważania oparte na prawie zachowania energii nie mogą nas pouczyć np. o tem, dla czego tarcie wewnętrzne gazu nie zależy od jego gęstości. Również nie daje ona nam odpowiedzi na to, dla czego linie widmowe wskutek ruchu źródła światła zostają przesunięte, a niekiedy nawet—pod wpływem sił magnetycznych—rozdwójone. O tem wszystkim, a także i o wielu innych zdobyczach naszych doświadczeń i spostrzeżeń możemy wytworzyć sobie pewny pogląd na istotę rzeczy tylko wtedy, gdy usuniemy zewnątrz powłokę zjawisk i postaramy się przedstawić rzecz samą w najdrobniejszych jej szczegółach.

W przekonaniu, że wniknięcie w mechanizm zjawisk stanowić musi cel, do którego dążyć należy, w szeregu wykładów niniejszych nie unikałem zgoła spekulacji o eterze, cząsteczkach, atomach i elektronach. Wprawdzie, im dalej wchodzimy w rozważania tego rodzaju, tem większej nabieramy świadomości, jak nieskończone i niezupełne jest jeszcze dzieło nasze i jak teorye, które



ustawicznie rozszerzamy, polepszamy, a nawet wymieniamy na nowe, tylko w najgrubszych zarysach są odbiciem istotnego przebiegu zjawisk prawdziwej rzeczywistości. I im więcej przekonany jestem o słuszności tego poglądu na właściwość i charakter panujących w nauce teoryj i hipotez, tem bardziej czułem się zobowiązany w wykładach niniejszych przedstawić je Słuchaczom.

....

## SPIS RZECZY.

---

|                                                | Str. |
|------------------------------------------------|------|
| Przedmowa tłumacza . . . . .                   | 1    |
| Wykład I. Ruchy prostolinijne . . . . .        | 3    |
| Wykład II. Ruchy krzywolinijne . . . . .       | 40   |
| Wykład III. Ruchy drgające. Promienie świetlne | 82   |
| Wykład IV. Drgania świetlne . . . . .          | 126  |
| Wykład V. Ruchy cząsteczkowe . . . . .         | 171  |
| Wykład VI. Zjawiska elektryczne . . . . .      | 208  |
| Wykład VII. O zachowaniu energii . . . . .     | 251  |

# WYDAWNICTWA KSIĘGARNI E. WENDE I SKA WARSZAWA

|                                                                                                                                                                                                        | Rb. k. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Balicki Zygmunt.</b> Metody nauk społecznych i ich rozwój w XIX stuleciu . . . . .                                                                                                                  | — 40   |
| <b>Boutreaux Emil.</b> Pojęcie prawa przyrody w nauce i filozofii społecznej. Wykłady miane w Sorbonie w roku 1892—93, z francuzkiego przełożył W. Spasowski. Przedmowę napisał Ad. Mahrburg . . . . . | 1 20   |
| <b>Cossa Louige.</b> Początki ekonomii politycznej, przełożył Jan Budkiewicz . . . . .                                                                                                                 | 1 —    |
| — Początki nauki finansów, przełożył J. Budkiewicz . . . . .                                                                                                                                           | 1 —    |
| <b>Demolins E.</b> Nowe wychowanie, tłóm. z franc. J. Wł. Dawid . . . . .                                                                                                                              | — 75   |
| <b>Domański Wład.</b> Wolność, Równość, Braterstwo. Studium krytyczne. Przekład z francuskiego . . . . .                                                                                               | — 40   |
| <b>Fabian A. Dr.</b> Z nauki o życiu, odczyty publ.: I. U schyłku wieku — II. Dziedziczność. — III. Życie i śmierć. — IV. Mechanizm i witalizm . . . . .                                               | 1 —    |
| <b>Hora J. A. Prof.</b> Słownik czesko-polski kieszonkowy . . . . .                                                                                                                                    | 4 —    |
| <b>Kempner St. A.</b> Józef Supiński. Notatka z powodu setnej rocznicy urodzin . . . . .                                                                                                               | — 30   |
| <b>Korzon i Kempner.</b> Handel w przeszłości i w stanie dzisiejszym świata. Z 7ma ilustr . . . . .                                                                                                    | 1 —    |
| <b>Kozicki St. i J. Lutosławski.</b> Przewodnik po ważniejszych wyższych zakładach rolniczo-naukowych zagranicą . . . . .                                                                              | — 60   |
| <b>Kramsztyk St.</b> Wiadomości początkowe z fizyki. Książeczka I. Z 61 ilustracyami w tekście. Wydanie trzecie . . . . .                                                                              | — 60   |
| <b>Kucharzewski Feliks.</b> Z dziejów techniki: Leonard Vinci, Jerzy Stephenson, S. Benezet i Eifel. Sławni garncarze. Filip de Girard . . . . .                                                       | 1 —    |
| <b>Kwieciński A. Ks.</b> Atlas archeologiczny do historii świętej, według zabytków dawnych dla użytku młodzieży szkolnej z X. tablicami . . . . .                                                      | — 30   |

|                                                                                                                                                                                                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| uwieńczone przez akademię francuską. Przekład St. Bouffala. Z przedmową St. Dicksteina. Z pięcioma portretami . . . . .                                                                        | 1 60 |
| <b>Lorentz H. A.</b> Poglądy i teorye fizyki współczesnej ruchu widoczne i niewidoczne, przeł. dr. St. Tolłoczko .                                                                             | 1 35 |
| <b>Lutosławski Maryan.</b> Prąd elektryczny, jego wytwarzanie i zastosowanie w technice. Podręcznik dla techników niespecjalistów. Część I. Wytwarzanie prądu elektrycznego . . . . .          | 1 80 |
| <b>Łapińska Aleksandra.</b> Z ludzkich dróg . . . . .                                                                                                                                          | 1 20 |
| <b>Majewski Erazm.</b> Starożytni Słowianie na ziemiach dzisiejszej Germanii. Wydanie drugie . . . . .                                                                                         | — 25 |
| <b>Paprocka Marya (Znicz).</b> Nowele. — Przestrzeń. — Kartki z dziennika. — Kwiat paproci. — Zemsta. — Marzenie. — Lewa ręka. — Z pamiątek brylantowego kółczyka. — Perły . . . . .           | 1 —  |
| <b>Piotrowski Stanisław.</b> Niemcy o Niemczech. . . . .                                                                                                                                       | — 30 |
| — Wspólna własność ziemska w gminie wielkomejskiej. Studium ekonomiczno-społeczne . . . . .                                                                                                    | 2 —  |
| <b>Queyrat Fryderyk.</b> Wyobrażenia u dzieci i jej odmiany. Studium psychologiczno-patologiczne, przełożyła z francuskiego Eugenia Piltz . . . . .                                            | — 80 |
| <b>Seignette.</b> Zwierzęta epok ubiegłych, przełożył Jan Lewiński, z 167 rycinami . . . . .                                                                                                   | — 90 |
| <b>Sempołowski A. dr.</b> Hodowla i uszlachetnianie roślin gospodarskich. (Z 29-ciu rycinami w tekście) . . .                                                                                  | 1 50 |
| — Nasze trawy łąkowe, ich opis, produkcya nasienia i układanie mieszanek. (Z 77miu rycinami) . . .                                                                                             | 1 50 |
| <b>Szlagowski Antoni ks.</b> Nowy Testament Jezusa Chrystusa. Wydanie zaopatrzone w aprobatę J. E. Księdza Popieła Arcybiskupa, Metropolity Warszawskiego. Z 3-ma planami. W oprawie . . . . . | 1 20 |
| <b>Zdziarski St.</b> Pierwiastek ludowy w poezyi polskiej XIX. wieku. Studya porównawczo-literackie. . . . .                                                                                   | 4 —  |

**Skład główny wydawnictw z zapomogi kasy  
im. Dra Józefa Mianowskiego.**

Katalogi gratis i franco.