

537.8

ZASADNICZE POJĘCIA

I TEORYE

Współczesnej Nauki o Elektromagnetyzmie.

PRZEZ

M. POŻARYSKIEGO

Inżyniera.

Odbitka z „Przeglądu Technicznego”; r. 1905.

~~Władysław Łoziński~~



WARSZAWA,

Druk Rubieszewskiego i Wrotnowskiego, Włodzimierska 3.

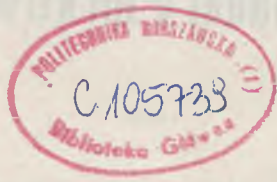
1905.

Skład Główny w księgarni

WIEDZA I S-ka w WARSZAWIE.



ZASADNICZE POLSKIE



Дозволено Цензурою
Варшава, 31 Августа 1905 г.



00157

BG05A/004-39

213-11-987D (A)

Spis rzeczy.

	Str.
I. Masa elektryczna i magnetyczna	1
II. Pole elektryczne i magnetyczne	3
III. Prąd elektryczny stały	10
IV. Powstawanie i znikanie prądu elektrycznego	15
V. Prąd zmienny	20
VI. Dwa układy miar elektromagnetycznych	23
VII. Fale elektromagnetyczne	25
VIII. Jony i elektrony	31
IX. Cząstka naelektryzowana w ruchu	41
X. Promieniowanie	51
XI. Budowa atomów	56
XII. Wyjaśnienie niektórych własności atomów na zasadzie elektromagnetycznej teorii ich budowy	61

Nauka o elektromagnetyzmie znalazła w ciągu ostatnich lat dwudziestu nie tylko szerokie zastosowanie praktyczne, ale stała się zarazem podwaliną dla całokształtu pojęć fizyki ogólnej i chemii. Sądzę zatem, że będzie na czasie dać czytelnikowi krótki i możliwie popularny szkic, obejmujący współczesne pojęcia nauki o elektromagnetyzmie i najnowsze postępy, jakie uczyniło ich zastosowanie w fizyce teoretycznej. Przedewszystkiem zwróćmy się do pojęć zasadniczych.

1. Masa elektryczna i magnetyczna. Teoria elektryczności i magnetyzmu zaczyna się od oznaczenia tak zwanych mas elektrycznych i magnetycznych; masa elektryczna bywa dodatnia lub ujemna, magnetyczna północna lub południowa.

Pojęcie tych mas powstało przez analogię zjawisk przyciągania powszechnego z przyciąganiem elektrycznym i magnetycznym, dla których istnieje nawet jednakowe prawo

określone wzorem: $f = k \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$.

Dla wyjaśnienia zaś zjawiska odpychania elektrycznego i magnetycznego, utworzono pojęcie dwóch mas różnego gatunku: dodatniej i ujemnej masy elektrycznej, północnej (dodatniej) i południowej (ujemnej), masy magnetycznej. Podobnie jak masa materyalna, masy elektryczne i magnetyczne są niezniszczalne i nie mogą być stworzone. W ciałach znajdujących się w stanie normalnym obie różnoimienne masy znajdują się zawsze w jednakowej ilości, nie wyróżnicowane i przez to niczem nie zdradzają swojej obecności. Przy namagnesowywaniu lub elektryzowaniu masy różnoimienne rozdzielają się.

¹⁾ f — siła, m_1 i m_2 — masy, r — odległość jednej masy od drugiej, k — wielkość stała.

Ze względu na źródło rozważanych pojęć, masy elektryczne i magnetyczne są *nieodłączne* od masy materyalnej, a więc, właściwie mówiąc, rozważamy je jako wielkości charakterystyczne dla elektrycznego lub magnetycznego stanu materyi.

Magnetyczne i elektryczne własności ciał, są do siebie podobne pod względem mechanicznego oddziaływania na odległość. Ciała jednoznacznie naelektryzowane odpychają się tak samo, jak jednakowe bieguny magnesów, ciała zaś różnoznacznie naelektryzowane przyciągają się tak samo jak różnoimienne bieguny magnesów.

Poza tem podobieństwem istnieje zasadnicza różnica: chociaż przy elektryzacji zawsze powstaje elektryczność ujemna i dodatnia w jednakowej ilości, każde ciało wzięte oddzielnie może się jednak znajdować w stanie elektrycznym dodatnim lub ujemnym; magnetyczny zaś stan ciała przejawia się w tem, że zawsze jedna część jego jest w stanie namagnesowania północnego, a druga południowego; słowem, używając pojęcia masy, powiemy, że ciało może posiadać elektryczność ujemną lub dodatnią, masy zaś magnetyczne posiadają zawsze obie.

Zaznaczymy jeszcze, że możnaby uniknąć pojęcia podwójnych mas elektrycznych i magnetycznych, wyjaśniając rozmaite stany elektryczne i magnetyczne przez nadmiar lub brak masy elektrycznej lub magnetycznej; próbowano to uczynić dla zjawisk elektrycznych, lecz przy szczegółowem rozważaniu przedmiotu wypada w tym razie stworzyć hipotezę sił, działających między masą elektryczną i materyalną, co w znacznym stopniu zaciemnia wyobrażenia o zjawiskach, nie zmieniając istoty rzeczy.

Wobec tego w całej teorii elektromagnetyzmu będziemy nadal mieli do czynienia z dwoma rodzajami mas elektrycznych i magnetycznych.

Energietyka zjawisk elektromagnetycznych przedstawia się przy stosowaniu pojęcia mas elektrycznych i magnetycznych jako przejście rozmaitych innych rodzajów energii w stan energii potencyalnej elektrycznej lub magnetycznej, które są pojęte zupełnie analogicznie do potencyalnej energii mechanicznej, np. kamienia umieszczonego tak, że może spaść niżej. W ten sposób pojmujemy elektryzowanie i namagnesowywanie ciał; znikanie zaś własności elektrycznych i magnetycznych rozumiemy, jako przejście potencyalnej energii elektrycznej lub magnetycznej w inną postać.

Miejszem, gdzie tkwi energia elektryczna lub magnetyczna, jest oczywiście ciało naelektryzowane lub namagnetowane; podobnie jak potencjalna energia mechaniczna kamienia znajduje się właśnie w tym kamieniu.

II. Pole elektryczne i magnetyczne. Poza rozważanemi pojęciami elektrycznych i magnetycznych *mas* nauka o elektromagnetyzmie posługuje się obecnie pojęciami *pól* elektrycznych i magnetycznych. Polem nazywamy przestrzeń naokoło masy elektrycznej lub magnetycznej. Cechą znamionową pola jest jego natężenie, pojęte jako stosunek siły do masy, na jaką ta siła w danem miejscu pola działa. Inaczej mówiąc, natężenie jest to siła, z jaką pole działa na jednostkę masy elektrycznej lub magnetycznej, umieszczonej w danem miejscu pola. Natężenie pola, pochodząc od siły, ma również jak ona oznaczoną wielkość i kierunek w przestrzeni.

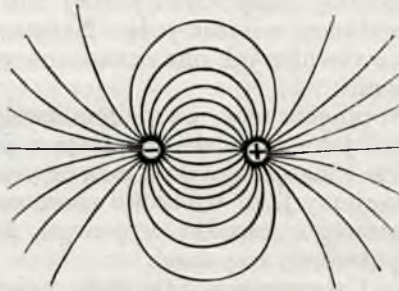
Mówiąc o pojęciu *mas*, zwróciłem uwagę na to, że należy je rozumieć jako wielkości wyrażające pewien stan materji; podobnież i natężenie pola magnetycznego lub elektrycznego pojmujemy jako wielkości znamionujące stan eteru wszechświatowego, ośrodka urojonego, którego nie spostrzegamy bezpośrednio zmysłami.

Powstanie i rozwinięcie idei ściśle pojętego pola elektrycznego i magnetycznego, zawdzięczamy angielskim uczonym FARADAY'OWI i MAXWELL'OWI. MAXWELL dał szatę matematyczną tym ideom, które FARADAY pierwszy wyraźnie podał, wychodząc z założenia, że dobrze uzmysłowić możemy sobie zjawiska elektromagnetyczne dopiero wtedy, gdy wytworzymy sobie pojęcie o tem, jaką drogą przenoszą się działania od jednego ciała do drugiego na odległość.

Opierając się na wyobrażeniu zmian w eterze, mamy w nauce o elektromagnetyzmie do czynienia z trzema zasadniczymi rodzajami tak zwanych pól: pole elektryczne jest to przestrzeń wypełniona eterem w takim stanie, że spostrzegamy w tej przestrzeni siły elektryczne; pole magnetyczne jest to przestrzeń wypełniona eterem, którego stan niezwykły przejawia się w działaniu sił magnetycznych, wreszcie gdy w tej samej przestrzeni działają siły elektryczne i magnetyczne jednocześnie, mamy pole elektromagnetyczne.

Zwróćmy teraz uwagę na niektóre zasadnicze cechy tych pól. Pole elektryczne spostrzegamy w obecności ciał naelektryzowanych. Ponieważ nie możemy otrzymać ładunku

dodatniego nie tworząc jednocześnie równej wielkości ładunku ujemnego, więc mamy zawsze ciała dodatnio i ujemnie naelektryzowane. Masa elektryczna dodatnia odpycha się od ciał dodatnio naelektryzowanych, a ponieważ za kierunek natężenia pola uważamy ten, w którym działa siła na masę dodatnią, więc w każdym polu elektrycznym mamy natężenia skierowane od ciał naelektryzowanych dodatnio do ciał naelektryzowanych ujemnie. Zgodnie z FARADAY'EM, dla uźmysłowienia wzorów matematycznych, dotyczących pola elektrycznego, wyobrażamy sobie szereg jednostkowych rurek (linii) sił elektrycznych idących w kierunku natężenia od jedne-



Rys. 1.

go ciała do drugiego; gęstość tych rurek ma wyobrażać natężenie pola w danym miejscu. Teorya wykazuje na zasadzie własności pola elektrycznego, że w wiązce tych rurek działają dwojakiego rodzaju siły: jedne ściągają rurki, drugie je rozpychają; te własności rurek w polu wyjaśniają w sposób prosty przyciągania i odpychania elektryczne.

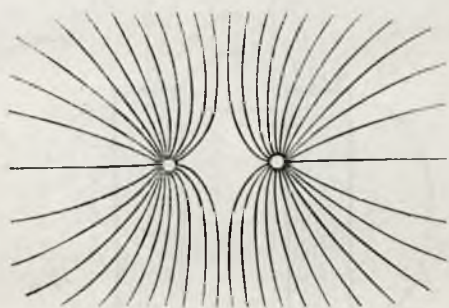
Na rys. 1 przedstawione są rurki wokoło dwóch ciał różnoznacznie naelektryzowanych. Jeżeli ciała mogą swobodnie poruszać się, to oczywiście zbliżają się pod wpływem dążących do skrócenia się rurek.

Na rys. 2 pokazane są rurki sił wokoło dwóch ciał naelektryzowanych jednoznacznie. Wobec tego, że istnieją siły rozpychające rurki, przez co one starają się możliwie oddalić od siebie, ciała naelektryzowane na rysunku drugim będą się oczywiście od siebie oddalały. Można jeszcze wyjaśnić oddalanie się ciał jednoznacznie naelektryzowanych przez to, że

rukki sił widoczne na rysunku idą na lewo i na prawo do ciał odwrotnie naelektryzowanych i nie widocznych na rysunku; skracając się, rurki oczywiście rozsuną ciała jednoznacznie naelektryzowane, które widzimy na rysunku.

Te siły ściągające i rozpychające rurki uwarunkowują także ich postać. Rys. 1 i 2 właśnie wyobrażają tę postać w wypadku, gdy ciała są unieruchomione i rurki wygięły się tak, że działanie sił rozpychających i ściągających wzajemnie się równoważy.

Pole magnetyczne mamy wokół jednego lub kilku magnesów i wyobrażamy sobie również rurki sił magnetycznych przechodzące w polu, ale rurki te uważamy nie jako wiązki



Rys. 2.

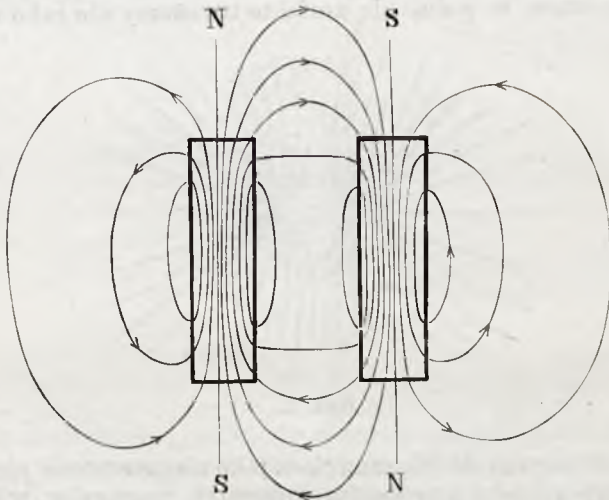
idące od bieguna do bieguna, lecz jako nieprzerwane pierścienie, które w części przechodzą wewnątrz magnesów, w części zaś na zewnątrz. Wewnątrz magnesów rurki tworzą ściśle pęczki, zewnątrz zaś układają się znacznie luźniej. Na rys. 3 widzimy dwa magnesy i rurki sił magnetycznych, które tworzą szereg pierścieni.

A więc zasadniczą różnicą pomiędzy rurkami sił elektrycznych i magnetycznych jest ta, że rurki elektryczne nie tworzą pierścieni zamkniętych, lecz biegną od jednego naelektryzowanego ciała do drugiego, rurki zaś magnetyczne zawsze tworzą pierścienie. Różnica ta wypływa oczywiście z tego, że istnieją ciała, posiadające jedną tylko masę elektryczną dodatnią lub ujemną, gdy natomiast ciało namagnetowane posiada zawsze jednocześnie zarówno magnetyzm północny jak i południowy.

Poza różnicą wspomnianą rurki magnetyczne mają podobne własności jak i elektryczne: działają w nich siły ściągające i rozpychające.

Obecność pola elektromagnetycznego przejawia się w istnieniu jednoczesnym sił elektrycznych i magnetycznych.

Wokoło prądu elektrycznego spostrzegamy pole elektromagnetyczne, a więc w eterze otaczającym są rurki sił elektrycznych i rurki sił magnetycznych. W najprostszym wypadku, gdy przewodnik ma znikomo mały opór ohmiczny,

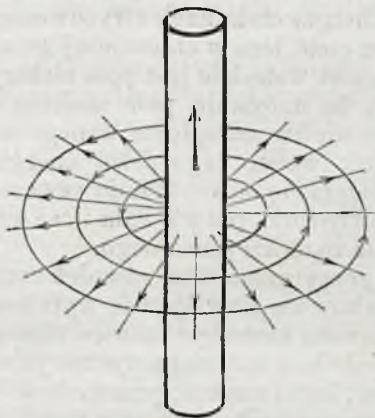


Rys. 3.

rurki sił magnetycznych i elektrycznych w każdej płaszczyźnie prostopadłej do przewodnika będą miały postać wyobrażoną na rys. 4. Rurki sił elektrycznych są to linie proste, prostopadłe do powierzchni przewodnika, rurki zaś magnetyczne tworzą koła współśrodkowe, których wspólny środek znajduje się na osi przewodnika. Odpowiednie kierunki prądu i natężeń obu pól wskazane są na rysunku. Jeżeli przewodnik ma pewien opór ohmiczny, to rurki magnetyczne pozostaną i w tym wypadku kołami współśrodkowymi, rurki zaś elektryczne wykrzywią się i wewnątrz przewodnika będą przebiegać równoległe do osi.

Względem siebie rurki sił elektrycznych i magnetycznych dokoła przewodnika z prądem są zawsze prostopadłe.

Energetyka zjawisk elektromagnetycznych przedstawia się zupełnie w innej postaci przy użyciu pojęcia pola elektrycznego, magnetycznego i elektromagnetycznego. Zastępując w matematycznych wyrazach energii ciał naelektryzowanych i magnesów, wielkości służące do wyrażenia zwykłej energii potencjalnej przez wielkości znamionujące pole, dochodzimy do pewnej całki określonej, która daje nam ilość odnośnej energii. Ponieważ całka ma obejmować całą przestrzeń



Rys. 4.

pola, można więc przypuścić, że energia znajduje się wszędzie w polu, można także na zasadzie wzoru pod całką przyjąć, że w każdej jednostce objętości pola znajduje się ilość energii elektrycznej wyrażona wzorem:

$$E_e = \frac{\epsilon \cdot F^2}{8\pi},$$

gdzie F oznacza natężenie pola w danym miejscu, ϵ — stałą dielektryczną, a $\pi = 3,14 \dots$

Podobnie ilość energii magnetycznej w jednostce objętości wyraża się przez wzór:

$$E_m = \frac{\mu \cdot H^2}{8\pi},$$

gdzie H oznacza natężenie pola magnetycznego w danym miejscu, μ — przenikliwość magnetyczną.

W polu elektromagnetycznym cała ilość energii w jednostce objętości wyrazi się przez

$$E_{em} = \frac{\epsilon \cdot F^2}{8\pi} + \frac{\mu \cdot H^2}{8\pi}.$$

Na zasadzie takiego pojmowania energetycznej strony zjawisk elektromagnetycznych, będziemy uważać elektryzującą ciał jako przejście pewnej postaci energii w energię pola elektrycznego, wyładowanie zaś — jako przejście tej energii w inną postać. Energia ciała naelektryzowanego znajduje się więc nie w samym ciele, lecz w otaczającej go nieograniczonej przestrzeni, ponieważ wszędzie jest pole elektryczne. Należy jednak zauważyć, że natężenie pola zmienia się w stosunku odwrotnym do kwadratu odległości danego miejsca od ciała naelektryzowanego; wobec tego ilość energii w jednostce objętości pola zmienia się odwrotnie do czwartej potęgi odległości, a więc praktycznie prawie cała ilość energii znajduje się w *pobliżu* ciała naelektryzowanego.

W polu magnetycznym tkwi również zapas energii; gdy ono powstaje, nie zawsze zjawiają się wyraźne masy magnetyczne, t. j. nie zawsze może być mowa o namagnesowywaniu jakiegoś ciała (pole bowiem magnetyczne powstaje nie tylko naokoło magnesów, lecz i naokoło przewodnika z prądem elektrycznym); ale zawsze znika pozornie pewna postać energii, a właściwie przyjmuje postać energii pola magnetycznego. Odwrotnie, gdy pole magnetyczne znika, otrzymujemy zawsze odpowiednią ilość energii w innej postaci.

Pole złożone elektromagnetyczne, powstając i znikając, oczywiście również pochłania i wydziela energię w jakiejś innej formie. Poza tem energia, tkwiąca w polu elektromagnetycznym, posiada jeszcze jedną niezwykłą własność. Na zasadzie rozstrząsań teoretycznych prof. POYNTING'A, rozważając matematycznie przyrost energii w pewnej ograniczonej przestrzeni pola elektromagnetycznego w ciągu jednostki czasu, dochodzimy do całki określonej, obejmującej powierzchnię ograniczającą wyżej wspomnianą przestrzeń pola. Według postaci wyrazu pod całką można przyjąć, że ilość energii dopływającej przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu jest proporcjonalna do natężeń pola magnetycznego i elektrycznego i do sinusa kąta, który tworzą kierunki natężeń

magnetycznego i elektrycznego, ruch zaś energii odbywa się prostopadle do obu nateżeń i kierunek jego jest taki, że nateżenie pola magnetycznego, nateżenie pola elektrycznego i ruch energii są skierowane odpowiednio wzdłuż trzech palców prawej ręki: palca wskazującego, dużego i średniego, który to ostatni ustawia się prostopadle do dwóch poprzednich. Ponieważ całka daje tylko całkowitą *zmiannę* ilości energii wewnątrz danej ograniczonej przestrzeni, więc nie można stanowczo sądzić o tem ile energii weszło, a ile wyszło z tej przestrzeni, powyższe zatem oznaczenie energii przechodzącej przez jednostkę powierzchni, jest tylko hipotezą, dosyć jednak zgodną z rozmaitemi zjawiskami elektromagnetyzmu.

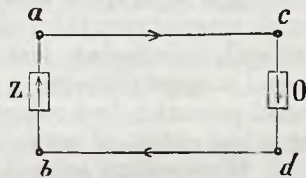
Opierając się na powyższej hipotezie, zgodnie z teoretycznymi wyobrażeniami o polu elektromagnetycznym, można przyjąć, że w polu nawet *niezmiennem w czasie* odbywa się ruch energii, nie skupia się wprawdzie ona nigdzie, t. j. ile energii w daną objętość pola wejdzie, tyle i wyjdzie, ale energia ciągle wędruje w kierunku prostopadłym do obu układów rurek magnetycznych i elektrycznych. Aby ten ruch energii nastąpił, niezbędna jest obecność obu nateżeń, elektrycznego i magnetycznego, a poza tem, kąt który tworzą ich kierunki powinien być różny od 0° i 180° (czyli sinus tego kąta musi być różny od zera).

Wyobraźmy sobie naprzykład dynamomaszynę połączoną z motorem przewodnikami o nieznacznym oporze. Rurki sił elektrycznych i magnetycznych wzdłuż każdego z przewodników mieć będą postać wskazaną na rysunku 4-ym, kierunek ruchu energii jest prostopadły do obu układów rurek, a więc równoległy do przewodników; Stąd wynika, że energia z dynamaszyny, t. j. z generatora, wędruje do motoru przez izolator otaczający przewodniki. Na dowód zgodności takiego pojmowania rozważanego zjawiska, z innymi zjawiskami, przytoczył prof. G. FERRARIS bardzo prosty, a zarazem przekonujący przykład w swoich wykładach naukowych podstaw elektrotechniki ¹⁾. Wyobraźmy sobie, że dynamomaszyna jest umieszczona w szczelnie zamkniętej skrzyni metalowej o ściankach dosyć grubych. Czy moglibyśmy na zewnątrz skrzyni skorzystać z prądu wytworzonego przez taki generator? Oczywiście,

¹⁾ Galileo Ferraris. Wissenschaftliche Grundlagen der Elektrotechnik.

że nie, bo napięcie, które jeżeli dałoby się wytworzyć między dwoma punktami powierzchni skrzyni, byłoby bardzo nieznaczne (wobec nieznacznego oporu elektrycznego grubych ścian metalowych skrzyni). Aby otrzymać energię na zewnątrz skrzyni, musielibyśmy przeprowadzić przez jej ścianki przewodniki, czyli zrobić otwory w ściankach skrzyni i izolować przewodniki przy przejściu przez te otwory; słowem, istotną częścią urządzenia, umożliwiającą przenoszenie energii na zewnątrz skrzyni, byłaby izolacja w otworach, która grałaby rolę okien dla wyjścia energii elektromagnetycznej ze skrzyni. Widzimy zatem, że przy takim pojmowaniu rzeczy energia elektryczna wędruje nie, jak potocznie się przyjmuje, wewnątrz przewodników, lecz przez izolator otaczający przewodniki.

III. Prąd elektryczny stały. Prąd elektryczny stały może powstać tylko w obwodzie elektrycznym zamkniętym, t. j. w takim, którego wszystkie części są przewodnikami elektryczności; zjawisko stałego prądu wyobrażamy sobie jako ciągły ruch elektryczności w obwodzie wzdłuż przewodników (rys. 5). Ruch ten odbywa się pod wpływem tak zwanej siły elektromotorycznej źródła prądu, t. j. np. baterii galwanicznej lub dynamomaszyny Z . Co się zaś tyczy kwestyi, jaka elektryczność porusza się wzdłuż obwodu, to jest rzeczą zupełnie obojętną, czy przypuścimy ruch tylko dodatniej elektryczności w pewnym kierunku, czy też ruch ujemnej w przeciwnym, lub też wreszcie przyjmiemy współczesne istnienie dwóch prądów: dodatniego i ujemnego, w dwóch przeciwnych kierunkach.



Rys. 5.

Wobec tego przyjmiemy przypuszczenie dla rozważań teoretycznych najprostsze, mianowicie ruch tylko dodatniej elektryczności.

Najważniejszą i najistotniejszą stroną zjawiska prądu elektrycznego jest jego energetyka, zwróćmy się więc do niej.

Doświadczenie wskazuje, że zjawisko prądu elektrycznego jest podwójną przemianą energii: w tej części obwodu, którą zwykle nazywamy źródłem prądu (element galwaniczny, dynamomaszyna), odbywa się przetwarzanie energii chemicznej lub mechanicznej w energię prądu elektrycznego; w tym stanie wędruje ona do drugiej części obwodu, t. j. do odbie-

racza O (lampa elektryczna, motor), gdzie znowu przetwarza się w postać inną, w energię ciepłą lub mechaniczną. Aby sobie ułatwić zrozumienie tego, w jaki sposób prąd elektryczny wykonywa pracę i obliczyć jego energię, stworzono pojęcie napięcia elektrycznego lub też różnicy potencjałów, które najłatwiej zrozumieć, posiłkując się pewną analogią względem zjawisk ciężenia powszechnego. Gdy kamień pada na ziemię, to spadając nabiera coraz więcej energii kinetycznej, która zamienia się w ciepło w chwili, gdy kamień uderzy o powierzchnię ziemi. Jeżeli ten sam kamień będziemy podnosić do góry, przysporzymy mu, jak się zwykle mówi, energii potencjalnej. Wielkość energii potencjalnej i kinetycznej zależy od masy ciała, wysokości, na której się znajduje nad powierzchnią ziemi, lub z której spada, oraz przyspieszenia siły ciężkości. Energia potencjalna i kinetyczna jest w prostym stosunku do wszystkich wyżej wspomnianych czynników, ponieważ z powiększeniem masy, przyspieszenia i wysokości, z której ciało spada lub na jaką zostało podniesione, energia jego wzrasta.

Stosownie do wyłuszczonej zależności, oznaczając przez h_1 i h_2 odległość punktów A i B (rys. 6) od powierzchni ziemi, przez g — przyspieszenie siły ciężkości, przez m — masę ciała, przedstawimy za pomocą wzorów przyrost energii potencjalnej E_{BA} ciała przy podniesieniu od B do A w ten sposób:

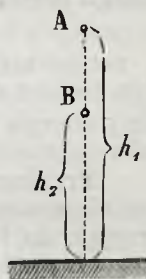
$$E_{BA} = m g h_1 - m g h_2 = m (g h_1 - g h_2).$$

Przy spadku ciała z A do B przyrost energii kinetycznej wyraża się również w ten sam sposób, gdyż na zasadzie prawa zachowania energii, ilość powstającej energii kinetycznej jest równa ilości znikającej energii potencjalnej.

Oznaczając $g h_1$ przez V_A i $g h_2$ przez V_B , otrzymamy

$$E_{BA} = m (V_A - V_B).$$

Wielkości V_A i V_B nazwiemy potencjałami siły ciężkości w punktach A i B . Jak widać ze wzoru, różnica potencjałów mnożona przez masę ciała daje wielkość przyrostu energii potencjalnej przy podniesieniu ciała z punktu A do B , lub też przyrostu energii kinetycznej przy spadku ciała z A do B (V_A jest większe od V_B).



Rys. 6.

Zwracając się teraz do obwodu elektrycznego, w którym przepływa prąd, wiemy z doświadczenia, że w części obwodu stanowiącej źródło prądu Z (rys. 5) odbywa się zamiana energii chemicznej lub mechanicznej w energię prądu, w części zaś obwodu, stanowiącej odbieracz prądu O , energia prądu zamienia się w inną postać. Możemy zatem wyobrazić sobie, że elektryczność dodatnia, krążąc wzdłuż obwodu, wewnątrz źródła prądu płynie od b do a w kierunku wzrastającego potencjału elektrycznego, czyli, że potencjał w a jest większy niż w b . Oznaczając potencjały w punktach a i b przez V_a i V_b , energię prądu elektrycznego, wypływającego ze źródła, przez E , a ilość elektryczności (która odpowiada pojęciu masy materialnej) przez q , otrzymamy na zasadzie analogii potencjału elektrycznego z potencjałem ciężkości następujący wzór dla energii prądu elektrycznego:

$$E = q (V_a - V_b).$$

A zatem mnożąc różnice potencjałów elektrycznych na końcówkach źródła prądu przez ilość elektryczności, otrzymujemy energię prądu powstałą w dynamomaszynie lub ogniwie galwanicznym z innej postaci energii.

Przyjmując, że w przewodnikach, łączących źródło prądu z odbieraczem, żadnych strat energii nie będzie, wypadnie przyjąć, że $V_c = V_a$, a $V_d = V_b$, $V_c > V_d$. Ponieważ w odbieraczu L prąd płynie od c do d , t. j. od końcówki mającej potencjał wyższy do końcówki mającej potencjał niższy (odwrotnie niż w Z), mamy tu zjawisko odwrotne: energia prądu

$$E = q (V_c - V_d) = q (V_a - V_b)$$

zamienia się niezwłocznie w inną postać, w energię ciepłą, świetłą, pracę mechaniczną i t. p. (kamień gdy spada z miejsca o wyższym potencjale do miejsca o potencjale niższym, na razie zamienia swoją energię potencjalną na kinetyczną i dopiero w końcu ruchu cały zapas energii zamienia się w ciepło; przy prądzie elektrycznym taka zamiana odbywa się wzdłuż całej drogi cd).

Różnicę potencjałów zwykle nazywamy napięciem i oznaczamy głoską e ; energia prądu wyraża się wobec tego iloczynem:

$$E = q \cdot e.$$

Ponieważ zwykle posługujemy się nie pojęciem ilości elektryczności, lecz siły prądu, należy więc wyrazić energię prądu jeszcze w innej postaci.

Pojęcie siły prądu elektrycznego powstało na zasadzie ilościowego rozważania pola magnetycznego wokoło prądu; siłą prądu nazwano wielkość wprost proporcjonalną do natężenia pola magnetycznego wokoło prądu i prąd ten charakteryzująca; na zasadzie powstania tego pojęcia widzimy, że ono jest zupełnie niezależne od czasu.

Badania doświadczalne wykazały, że ilość energii otrzymywanej z prądu elektrycznego w ciągu oznaczonego czasu przy stałym napięciu jest wprost proporcjonalna do siły prądu, przy stałej zaś sile prądu i zmiennem napięciu wprost proporcjonalna do tego napięcia. Na zasadzie tego, energia prądu daje się wyrazić przez iloczyn:

$$E = e i t,$$

gdzie oznaczono przez e — napięcie, i — siłę prądu, t — czas. Wzór poprzedni dla energii $E = q \cdot e$ nie zawierał współczynnika t , gdyż czas znajduje się nie jawnie w wielkości q .

Zestawiając ten wyraz z poprzednim wyrazem energii prądu, widzimy, że:

$$q = i t, \text{ czyli } i = \frac{q}{t}.$$

Stąd wynika, że siłę prądu można rozważać jako ilość elektryczności, przebiegającej w jednostce czasu przez każdy przekrój przewodnika w obwodzie. Sprawność (moc) prądu na zasadzie wyrazu energii, przedstawi się jak następuje:

$$w = e i.$$

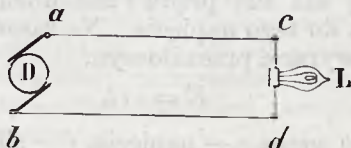
Aby uzupełnić całokształt poglądu na ergietykę prądu stałego, zwróćmy jeszcze uwagę na to, że przy wszelkiej zamianie jednej postaci energii na inną, część energii zawsze przyjmuje postać ciepła; przy zjawisku prądu elektrycznego otrzymujemy również zawsze pewną ilość ciepła, która pochodzi popierwsze z części tej energii, która w źródle prądu przetwarza się na energię prądu, a powtórnie z energii prądu elektrycznego, która nie w całości zamienia się na inną postać w odbieraczu.

Jako przyczynę powstania tej drugiej części ciepła uważamy opór przewodników. Ponieważ zaś nie znamy przewodników elektryczności pozbawionych oporu, więc zawsze, gdy prąd elektryczny przechodzi przez przewodnik, część jego energii zamienia się na ciepło. Tak na przykład, jeżeli przewodniki ac i db na rys. 5 posiadają pewien opór, potencjały



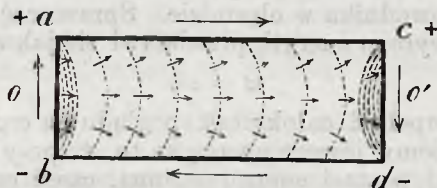
V_a i V_c , V_d i V_b nie będą sobie równe, jak powyżej przyjęto, lecz $V_a > V_c$, a $V_d > V_b$, przez co prąd traci część swojej energii: $(V_a - V_c)q$, przechodząc przez przewodnik ac , i $(V_d - V_b)q$, przepływając przez przewodnik db .

Dotychczas nie mówiliśmy o polu elektrycznym i polu magnetycznym, które otaczają przewodniki z prądem i widzieliśmy, że, przedstawiając zasadnicze energetyczne własności prądu stałego, można pominąć pojęcie pola. Przyjawszy jednak pogląd, że właściwie energia prądu wędruje zewnątrz



Rys. 7.

przewodników w polu elektromagnetycznym, należy wykazać, że kierunek ruchu energii, określony prawem przedstawionem w poprzednim rozdziale, zgadza się z rzeczywistymi energetycznymi przejawami, jakie spostrzegamy i które były poprzednio szczegółowo objaśnione.



Rys. 8.

W tym celu rozważymy prosty przykład. Obwód składa się z dynamo D (rys. 7), lampy L i przewodników, łączących dynamo z lampą. Obwód taki możemy przedstawić schematycznie nie zmieniając istoty rzeczy za pomocą czterech prostych przewodników (rys. 8): ab —dynamo, ac i db —przewodniki doprowadzające prąd, cd —lampa. Jeżeli a jest biegunem dodatnim, b —ujemnym, a strzałki zewnątrz czworoboku wskazują kierunek prądu, to, dla ułatwienia sobie przedstawienia kwestyi możemy przyjąć, że jedna połowa

obwodu $oaco'$ jest dodatnio naelektryzowana, część zaś obwodu $o'dbo$ jest naelektryzowana ujemnie i wyobrażać sobie prąd elektryczny jako prąd dodatniej elektryczności, płynący z o przez a, c do o' , oraz prąd ujemnej elektryczności, płynący z o przez b, d do o' .

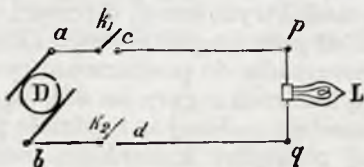
W płaszczyźnie rysunku rurki sił pola elektrycznego (linie kropkowane) będą biegły, jak to widać na rysunku, od części dodatnio naelektryzowanej, do części naelektryzowanej ujemnie. Rurki sił pola magnetycznego skierowane są w każdym miejscu prostopadle do powierzchni rysunku i wewnątrz prostokąta mają kierunek z góry na dół, zewnątrz zaś z dołu do góry. Na zasadzie podanej w rozdziale poprzednim zależności, istniejącej pomiędzy kierunkiem ruchu energii w polu elektromagnetycznym a kierunkami natężeń pól elektrycznego i magnetycznego, otrzymują się kierunki ruchu energii, wskazane w rozmaitych miejscach pola elektrycznego za pomocą małych strzałek. Z układu i kierunku tych strzałek wyraźnie widać, że energia wypływa z przewodnika ab , stanowiącego dynamomaszynę, następnie energia wyraźnie wchodzi w przewodnik cd , który jest lampą elektryczną, wreszcie wszystkie strzałki wzdłuż przewodników, oprócz tych, które znajdują się w samym środku czworoboku, są pochylone lekko względem przewodników ac i bd , co wskazuje na to, że część energii, zwykle nieznaczna, wchodzi z pola w przewodniki prowadzące prąd (jest to właśnie strata energii wskutek oporu przewodników ac i bd).

Pominęliśmy na rysunku pole zewnątrz prostokąta utworzonego przez przewodniki, ponieważ ono nic nowego nie daje i jest w każdym razie znacznie słabsze od tego, które występuje wewnątrz między przewodnikami.

Powyższe rozważanie, jak widzieliśmy, potwierdza w zupełności zgodność teoretycznie przyjętego kierunku wędrówki energii w polu elektromagnetycznym z wynikami bezpośredniego doświadczenia.

IV. Powstawanie i znikanie prądu elektrycznego. Rys. 9 przedstawia prosty schemat połączenia dynamomaszyny D z lampą L za pomocą przewodników, w których są dwie przerwy, zaopatrzone w wyłączniki k_1 i k_2 . Gdy dynamo jest czynna, istnieje na jej biegunach napięcie elektryczne, prąd jednak zacznie płynąć do lampy dopiero z chwilą, gdy zamkniemy oba wyłączniki k_1 i k_2 .

Zastanówmy się teraz nad przebiegiem zjawiska w pierwszej chwili po zamknięciu tych wyłączników: Stan napięcia elektrycznego na końcówkach a i b udzieli się przewodnikom c i d ; odbywa się to przez spływanie elektryczności na te przewodniki, t. j. zaczyna płynąć prąd elektryczny, który stopniowo posuwa się coraz dalej wzdłuż przewodników cp i dq , aż w końcu obiega cały obwód.



Rys. 9.

Przy powstawaniu prądu mamy dwie charakterystyczne cechy stanu przewodników cp i dq , na które trzeba zwrócić uwagę: przewodniki te, poprzednio obojętne pod względem elektrycznym, teraz stają się naelektryzowanymi, a pozatem przez nie przebiega prąd. Stan elektryczny przewodników wzbudza w otaczającej przestrzeni pole elektryczne, pod wpływem zaś prądu powstaje pole magnetyczne; jak jedno tak i drugie pole przedstawia pewien zasób energii, której źródłem jest dynamomaszyna; widzimy więc, że w chwili powstawania prądu, pewien zasób energii zużywa się na stworzenie tych pól. Prąd elektryczny, który w pierwszej chwili płynie, ładuje tylko elektrycznością przewodniki cp i dq , dopiero zaś wtedy, gdy one już zostały naładowane do odpowiedniego napięcia, zaczyna płynąć normalny prąd stały przez przewodniki i lampę.

Ciekawą jest rzeczą obliczyć dla pewnego wypadku praktycznego, jaka ilość energii zużywa się na powstanie prądu, t. j. na wytworzenie pola elektromagnetycznego.

Weźmy przykład następujący: przewodniki cp i dq mają przekrój 6 mm^2 , odległość między przewodnikami wynosi 40 cm ; napięcie na końcówkach dynamo niech będzie 200 v . Obliczmy energię pola elektromagnetycznego zawartego pomiędzy dwiema płaszczyznami prostopadłymi do przewodników i znajdującymi się w odległości 1 cm jedna od drugiej.

Energia pola elektrycznego pomiędzy powyższymi płaszczyznami jest oczywiście energią dwóch jednocentymetrowych odcinków przewodników cp i dq naelektryzowanych do napięcia wynoszącego pomiędzy nimi 200 v . Z elementarnych

wzorów elektrostatyki wiadomo, że energia dwóch przewodników naelektryzowanych różnoznacznie do różnicy potencjałów e , wyraża się w następujący sposób:

$$E = \frac{e^2 \cdot c}{2},$$

gdzie E oznacza energię, c — pojemność elektryczną przewodników (t. j. ilość elektryczności, jaką należy wprowadzić na każdy z przewodników, aby różnica potencjałów stała się równą jednostce).

Na zasadzie rozumowań teoretycznych można obliczyć pojemność dwóch naszych przewodników, a mianowicie:

$$c = \frac{l}{4 \cdot \log. \text{nat.} \frac{D}{r}},$$

gdzie l oznacza długość każdego z przewodników, D — odległość pomiędzy środkami przewodników, r — połowę średnicy każdego z przewodników.

Z powyższego wyrazu wypada, że pojemność

$$c = 0,0743 \text{ abs. elektrostacyjnych jednostek,}$$

lub też

$$c = 8,27 \cdot 10^{-14} \text{ faradów}^1).$$

Na podstawie wyżej przytoczonego wzoru dla energii, otrzymujemy wobec tego:

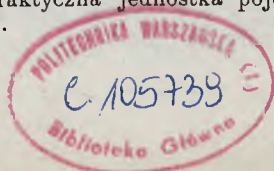
$$E = \frac{200^2 \cdot 8,27 \cdot 10^{-14}}{2} = 16,54 \cdot 10^{-10} \text{ joulów,}$$

co stanowi mniej więcej $1,645 \cdot 10^{-10} \text{ kgm.}$

Taka jest energia pola elektrycznego w tej warstwie pomiędzy płaszczyznami.

Energia pola magnetycznego daje się oznaczyć przez obliczenie energii prądu, jaka zużywa się na utworzenie pola magnetycznego. Porównanie wyrazów matematycznych, oznaczających energię pola elektrycznego i magnetycznego, wykazuje, że w rozpatrywanych warunkach układu przewodników, ilość energii pola elektrycznego równa się ilości energii pola magnetycznego, wobec tego, podwajając powyż-

¹⁾ Farad jest to praktyczna jednostka pojemności, odpowiada jąca voltowi i amperowi.



szą liczbę, otrzymamy całkowitą energię pola elektromagnetycznego:

$$2 \cdot 1,645 \cdot 10^{-10} = 3,29 \cdot 10^{-10} \text{ kgm},$$

czyli

$$33,08 \cdot 10^{-10} \text{ joulów}.$$

Jeżeli cała długość przewodników będzie wynosiła nawet 10 km, to cała energia pola elektromagnetycznego wynosi zaledwie $3,29 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}$. Dla wytworzenia takiej małej ilości energii dynamomaszyna, która jest jej źródłem, musi jednak wywiązać względnie znaczną sprawność. Albowiem pole elektromagnetyczne powstaje nader szybko. Na zasadzie doświadczeń stwierdzono, że szybkość rozchodzenia się impulsów elektromagnetycznych w eterze równa się szybkości światła, t. j. wynosi $3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$. Wobec tego dynamo musi rozwinąć taką sprawność, jakby wytwarzała na sekundę $3 \cdot 10^{10}$ takich pól elektromagnetycznych, odpowiadających długości 1 cm przewodnika, a więc zawierających energię pola warstwy nieograniczonej szerokości, przy grubości 1 cm. Według poprzedniego obliczenia energia w takiej warstwie wynosi: $33,08 \cdot 10^{-10}$ joulów, a więc energia na sekundę, czyli sprawność dostarczana przez dynamomaszynę będzie wynosiła:

$$33,08 \cdot 10^{10} \cdot 3 \cdot 10^{-10} = 99,24 \text{ wat.},$$

czyli około 0,135 k. p.

Sprawność ta będzie znacznie większa, jeżeli napięcie prądu będzie wyższe. Z wzoru energii widzimy, że ilość energii jest wprost proporcjonalna do drugiej potęgi napięcia. Jeżeli więc napięcie będzie wynosiło nie 200, lecz np. 2000 v., to powyższa sprawność wyniesie: 13,5 k. p., przy napięciu 20000 v. sprawność wyniesie 1350 k. p.

Zwróćmy się raz jeszcze do przebiegu zjawiska powstawania prądu i zastanówmy się nad niem, korzystając ze zdobytych wyobrażeń. W chwili zamknięcia wyłączników k_1 i k_2 (rys. 9) bodziec elektromagnetyczny z szybkością światła przenosi się w eterze wzdłuż przewodników i pozatem rozchodzi się na wszystkie strony, że tak powiem promieniuje; część (wprawdzie znikomo mała) tej energii, wybiegającej w nieograniczoną przestrzeń otaczającą, jest stracona na zawsze, reszta zaś, w postaci pola elektromagnetycznego przewodników, zostaje w przestrzeni blizkiej otaczającej przewodniki, a głównie między nimi.

Gdy napięcia wzdłuż przewodników i siła prądu ustalą się, pole elektromagnetyczne w ciągu całego czasu przebiegu zjawiska prądu stałego pozostaje niezmiennie i żadne energetyczne przemiany poza temi, które były przedstawione przy omawianiu prądu stałego, tu nie zachodzą.

Otwierając wyłączniki k_1 i k_2 przerywamy, jak zwykle się mówi, prąd w obwodzie, ale w rzeczywistości taka przerwa, raczej zniknięcie prądu, nigdy nie odbywa się raptownie.

Zasób energii pola elektromagnetycznego spływa do przewodnika $epqd$ i wytwarza tu prąd chwilowy w tym samym kierunku, w którym płynął prąd stały; za pośrednictwem tego prądu energia pola zamienia się na ciepło i światło w lampie a tylko na ciepło w przewodnikach. Ta energia więc, która była zużyta na wzbudzenie pola, obecnie, w chwili przerywania prądu, wraca z powrotem, chociaż nie cała; część tej energii, mianowicie ta, co wybiegła w przestrzeni, niezawodnie trafiła na przewodniki inne, obce i wzbudziła w nich prąd elektryczny (indukcyjny), który pochłonął część tej energii i przetworzył w ciepło, pozatem część energii naszego pola zginęła w nieograniczonej przestrzeni, bo fala powrotna nigdy nie dogoni fali wybiegającej, zawsze jedna od drugiej będzie na odległości, równej szybkości światła, pomnożonej przez czas trwania prądu stałego w naszych przewodnikach.

Oczywiście omawianie istnienia tej niewracającej części energii w wypadku oświetlenia elektrycznego i t. p. urządzeń przy stałym prądzie nie ma żadnego praktycznego znaczenia; powstała jednak niedawno zupełnie nowa dziedzina elektrotechniki, telegrafia bez drutu (iskrowa), która właśnie osiąga praktyczną korzyść z tej części energii elektromagnetycznej, która już nigdy nie wraca do swego źródła.

Pozatem niektóre przyrządy w instalacjach prądu zmiennego posługują się również tą właśnie częścią energii, o której mowa.

Zjawiska powstawania i znikania prądu elektrycznego nie zawsze odbywają się względnie tak prosto, jak to przedstawiliśmy poprzednio. Zwróćmy się do rys. 9 i zauważmy, że przy pewnym stosunku pomiędzy wielkościami oporu przewodników, ich pojemności elektrycznej i zdolności wzbudzenia pola magnetycznego (współczynnika samoindukcyi), prąd elektryczny, zanim osiągnie swą normalną stałą wielkość, wykonywa szereg wahań peryodycznych, których wychylenia (amplitudy) są coraz mniejsze: mamy tu zjawisko wahadło-

wego ładowania (przy zamykaniu obwodu) i wahadłowego wyładowywania (przy przerywaniu obwodu) przewodników, prowadzących prąd. Daje się to wyjaśnić w sposób następujący: w pierwszej chwili po zamknięciu wyłączników k_1 i k_2 siła prądu jest równa zeru, następnie szybko wzrasta i, gdy przewodniki już są blisko odpowiedniego naładowania elektrycznością, natężenie prądu tego, który ładuje przewodniki, zaczyna się zmniejszać i wówczas część energii magnetycznej pola wzmacnia ten prąd zanikający tak dalece, że na przewodnikach zbiera się ilość elektryczności, większa niż ta, która odpowiada napięciu istniejącemu na biegunach dynamomaszyny; gdy wobec tego prąd ładujący przewodniki zupełnie ustanie, one zaczynają wyładowywać się, dając prąd w kierunku przeciwnym i zamieniając część energii pola elektrycznego na energię pola magnetycznego (prąd), która potem znowu przy znikaniu ładuje przewodniki w odwrotnym kierunku i zamienia się w energię pola elektrycznego. Słowem, jest to wahanie energii pomiędzy polem elektrycznym i magnetycznym. Podobne wahanie energii zachodzi przy przerywaniu obwodu.

Praktyczne znaczenie mają takie wahania prądu przy zamykaniu i przerywaniu obwodu tylko przy obwodach posiadających znaczną samoindukcję i napięciach wysokich, wynoszących kilka lub kilkadziesiąt tysięcy voltów, ponieważ w tych warunkach powstają nieraz między przewodnikami napięcia chwilowe, przewyższające znacznie napięcie robocze, przez co izolacja przewodników bywa narażona na przebicie.

V. Prąd zmienny. Poza prądem stałym, o którym była mowa poprzednio, ważne znaczenie teoretyczne i praktyczne ma jeszcze t. zw. *prąd zmienny*; tą nazwą określa się zwykle prąd elektryczny, który periodycznie zmienia swą wielkość i kierunek, zachowując stałą ilość okresów i stałą wielkość amplitudy. Wytwarza się prąd zmienny, jak wiadomo, w dynamomaszynach prądu zmiennego i służy, podobnie jak prąd stały, do zasilania lamp, motorów i t. p. Ze względu na swą ciągłą zmienność posiada taki prąd kilka charakterystycznych właściwości, które pokrótce rozważymy.

Wszystkie właściwości prądu zmiennego, odmienne w porównaniu z prądem stałym, wynikają z ciągłej zmienności pola elektromagnetycznego, t. j. pola elektrycznego i pola magnetycznego. Przy zmiennym prądzie napięcie elektryczności, jako bezpośrednio związane z prądem, również zmienia

się peryodycznie. Gdy napięcie elektryczne spada, zmniejsza się energia pola elektrycznego; gdy słabnie siła prądu, zmniejsza się energia pola magnetycznego. W obu wypadkach znikające pole wywołuje prąd, lecz energia pola elektrycznego daje prąd w kierunku przeciwnym względem tego prądu, który wywołał wzrost napięcia, a więc zwiększenie energii pola, gdy tymczasem pole magnetyczne znikając, wytwarza prąd w tym samym kierunku, w jakim płynął prąd, który to pole stworzył.

Mając na widoku powyższą własność prądu zmiennego, łatwo przewidzieć, że do tych przemian energii, jakie zachodzą przy prądzie stałym, przybývają jeszcze ciągłe wahania energii w polu elektromagnetycznym. Jeżeli rozważymy np. układ przyrządów wyobrażony na rys. 9, to poza przejściem energii mechanicznej przez dynamomaszynę i lam-



Rys. 10.

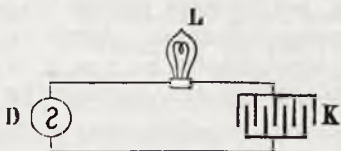
pę w światło i ciepło, będziemy mieli zjawiska ciągłej wahałowej wymiany energii pomiędzy polem elektrycznym a dynamomaszyną: peryodycznie będą powtarzać się okresy czasu, w których energia pola elektromagnetycznego będzie zamieniać się na energię mechaniczną w dynamo (będzie ją pędzić jako motor) naprzemian z takimi okresami czasu, kiedy energia mechaniczna dynamo będzie przechodzić w energię pola elektromagnetycznego.

Zjawisko prądu elektrycznego zmiennego możemy wywołać nie tylko w obwodzie zamkniętym, lecz i w otwartym. Łącząc dynamomaszynę prądu zmiennego z dwoma przewodnikami odosobnionymi jeden od drugiego na całej długości (rys. 10), otrzymamy obwód, w którym prąd będzie przechodził, o ile tylko dynamo będzie dawać napięcie. Prąd taki wyobrażamy sobie jako ruch wahałowy elektryczności z dynamomaszyny na przewodniki i z powrotem z przewodników do dynamo. Siła tego prądu będzie tem większa, im większa będzie pojemność elektryczna przewodników, t. j. im więcej będzie musiało wejść elektryczności na przewodniki, aby na-

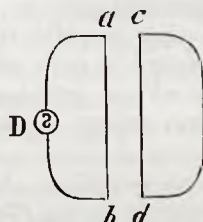
pięcie na nich stało się równem napięciu, istniejącemu na końcówkach dynamomaszyny.

Jeżeli powiększymy pojemność przewodników przez przyłączenie odpowiedniego kondensatora ¹⁾ K (rys. 11), to prąd może być dostatecznie silny, aby włączona w obwód lampa L świeciła normalnie.

Pozatem charakterystyczną cechą prądu zmiennego jest własność przenoszenia energii w polu elektromagnetycznym nie tylko wzdłuż przewodników, ale i w kierunku prostopadłym do nich.



Rys. 11.



Rys. 12.

Rozważmy zjawisko, zachodzące wokoło przewodnika ab (rys. 12), zasilanego prądem zmiennym z dynamomaszyny D . Zatrzymajmy się na razie na tej chwili, gdy prąd stopniowo od zera wzrasta w pewnym kierunku; przy wzrastającej sile prądu wzmaga się ciągle pole magnetyczne, które rozchodzi się z szybkością światła w przestrzeni otaczającej; oczywiście przy takim rozszerzaniu się pola, energia z przewodnika rozchodzi się w kierunku prostopadłym do jego długości; jeżeli ta, że tak powiem, fala pola magnetycznego, biegnąca od przewodnika, nie spotka na drodze innego przewodnika, to przy zmniejszaniu się siły prądu prawie cała energia pola wraca nazad do dynamo; gdy jednak umieścimy w pobliżu pierwszego przewodnika ab z prądem zmiennym, drugi przewódnik cd , stanowiący część zamkniętego obwodu, to pole magnetyczne, przebiegając koło tego drugiego przewodnika, wzbudzi w nim prąd indukcyjny i odda swoją energię temu drugiemu obwodowi, gdzie ta energia za pomocą prądu prze-

¹⁾ Kondensator jest to przyrząd, składający się z dwóch szeregowych płytek metalowych; płytki każdego z szeregowych połączone są pomiędzy sobą, ale jeden szereg od drugiego jest zupełnie izolowany.

6-go Sierpnia 24

tworzy się w inną postać: ciepło, światło i t. p. Również w podobny sposób może się odbywać przenoszenie energii z jednego przewodnika na drugi za pomocą pola elektrycznego.

Na przedstawionej własności prądu zmiennego oparte jest urządzenie transformatorów prądu zmiennego, w których energia prądu elektrycznego zwojów pierwotnych przenosi się na zwoje wtórne za pomocą pola przede wszystkim magnetycznego. Transformatory takie w praktyce stosują się do przetwarzania prądu o wysokim napięciu w prąd o niskim napięciu, lub odwrotnie.

VI. Dwa układy miar elektromagnetycznych. Mając na względzie doniosłe teoretyczne i praktyczne znaczenie powstania dwóch układów miar w nauce o elektromagnetyzmie, postaram się istotę rzeczy w krótkości przedstawić.

Już w rozdziale pierwszym zaznaczyłem, że podstawowe pojęcia teoretyczne powstały z rozważania wzajemnego oddziaływania mas magnetycznych i elektrycznych. Wzory, wyrażające matematycznie te oddziaływania, przyjęto jako podstawowe dla utworzenia dwóch układów jednostek znajdujących się w związku z układami jednostek mechanicznych,

Siła (f) wzajemnego oddziaływania na siebie (przyciągania lub odpychania) mas elektrycznych e lub magnetycznych m , jest wprost proporcjonalna do mas i odwrotnie proporcjonalna do drugiej potęgi odległości r

$$f_1 = \frac{1}{\epsilon} \frac{e \cdot e'}{r^2}; \quad f_2 = \frac{1}{\mu} \frac{m \cdot m'}{r^2},$$

gdzie ϵ i μ — współczynniki charakteryzujące ośrodek, w którym działania mają miejsce.

Przyjmując $e=e'$, $f=1$ dynie, $r=1$ cm, a $\epsilon=1$ (dla powietrza), otrzymamy podstawową jednostkę masy elektrycznej

$$1. \text{ masy elek.} = 1 \text{ cm} \cdot \sqrt{1 \text{ dyny}}.$$

Taka jednostka masy elektrycznej nazywa się *elektrostatyczną*. Na zasadzie związków algebraicznych, istniejących pomiędzy masą elektryczną a wszystkimi innymi wielkościami w elektromagnetyzmie, otrzymujemy szereg jednostek tworzących *absolutny układ elektrostatyczny*, który się zwykle stosuje tylko do wielkości elektrycznych.

Przyjmując $m = m'$, $f = 1$ dynie, $r = 1$ cm, a $\mu = 1$ (dla powietrza), otrzymamy podstawową jednostkę masy magnetycznej:

$$1 \text{ masy magn.} = 1 \text{ cm} \cdot \sqrt{1 \text{ dyny}};$$

taka jednostka masy magnetycznej nazywa się *elektromagnetyczną*. Od tej jednostki jako pochodne otrzymują się również wszystkie inne w całej nauce o elektromagnetyzmie; jest to *absolutny układ elektromagnetyczny*. Różne pojęcia, jak np. masa magnetyczna i elektryczna mają w tych układach te same wymiary, t. j. wyrażają się temi samymi wielkościami zasadniczymi w jednakowej formie; jest to sprzeczność, która jednak daje się łatwo wyjaśnić przez zwrócenie uwagi na przypuszczenia zrobione przy określaniu zasadniczych jednostek. Dla jednego i tegoż samego ośrodka przyjęliśmy wielkość ϵ równą jednostce, charakteryzującą jego własności elektryczne, także równą jednostce przyjęliśmy jego przenikliwość magnetyczną. Otóż, ściśle biorąc, wielkości ϵ i μ nie można uważać za liczby *niemianowane*, a pozatem przyjmując własności elektryczne jako wyrażające się przez jednostkę, łatwo przewidzieć, że własności magnetyczne, jako znajdujące się w pewnym związku z elektrycznymi, wyrażą się przez liczbę różną od jednostki. Stosunek pomiędzy wielkością absolutnej jednostki elektromagnetycznej ilości elektryczności do takiejże jednostki elektrostatycznej, jak wykazały doświadczenia, równa się $v = 3 \cdot 10^{10}$, stąd daje się łatwo wyprowadzić, że:

$$\epsilon \cdot \mu = \frac{1}{v^2};$$

$v = 3 \cdot 10^{10}$ jest to szybkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w powietrzu, a dokładniej w próżni.

Stąd, przyjmując np. według układu jednostek elektromagnetycznych $\mu = 1$, otrzymamy dla ϵ w powietrzu wielkość:

$$\frac{1}{(3 \cdot 10^{10})^2} = \frac{1}{9 \cdot 10^{20}} \frac{s^2}{cm^2}.$$

Oba jednak układy jednostek, elektromagnetycznych i elektrostatycznych, znajdują się w prostej zależności pomiędzy sobą i w bezpośrednim związku z absolutnym układem jednostek mechanicznych; wszystkie obliczenia pracy lub sprawności w elektromagnetyzmie w dowolnym z dwóch powyższych układów doprowadzają do liczb w zwykłych absolutnych jednostkach mechanicznych.

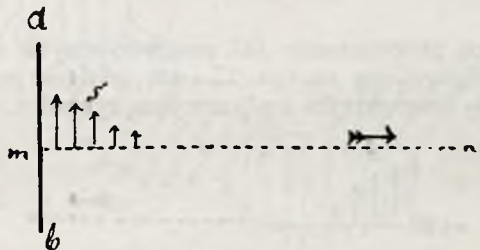
Praktyczne jednostki w elektrotechnice powstały z układu elektromagnetycznego przez zwiększenie lub też zmniejszenie ich 10^n razy, gdzie n jest liczbą całą.

Dla przykładu niżej podana jest zależność między jednostkami napięcia i siły prądu w rozmaitych układach:

Jednostka napięcia 1 volt (układ prakt.) = 10^8 absol. elektromagnetycznym jedn. = $\frac{10^8}{3 \cdot 10^{10}}$ abs. elektrostat. jednostek.

Jednostka siły prądu 1 amper (układ prakt.) = 10^{-1} absol. elektromagn. jednostek = $3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-1}$, czyli $3 \cdot 10^9$ absol. elektrostat. jednostek.

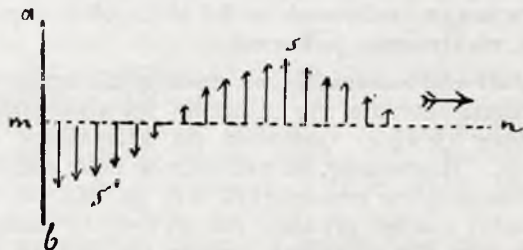
VII. Fale elektromagnetyczne. Szczególne znaczenie w teorii elektromagnetyzmu ma zjawisko fal elektromagnetycznych. Istotę zjawiska postaram się uzmysłowić w sposób następujący. Rozważmy, co zachodzi w polu elektromagnetycznym otaczającym przewodnik ab , po którym przebiega prąd zmienny, a więc płynący raz od a do b , następnie od b do a i t. d. (rys. 13); zwróćmy uwagę na punkty wzdłuż li-



Rys. 13.

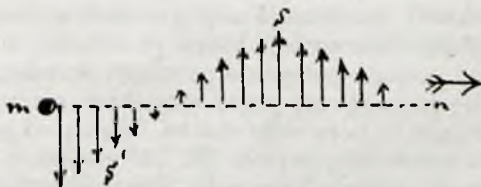
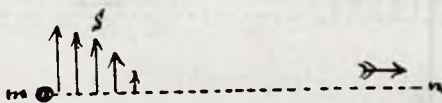
nii mn w chwili wzrastania napięcia elektrycznego w przewodniku. Pole *elektryczne*, które powstanie w około tego przewodnika, posiada natężenie pewnego określonego kierunku i daje się przedstawić przez strzałki s ; zmiany w eterze, charakteryzujące to pole elektryczne, biegną od przewodnika wzdłuż mn z szybkością światła ($3 \cdot 10^{10}$ cm/sek.); po pewnym czasie napięcie zmienia kierunek, powstaje pole elektryczne przeciwnego kierunku a więc i zmiany w eterze o kierunku przeciwnym, wyobrażone na rys. 14 strzałkami s' ; one również biegną za pierwszymi z tą samą szybkością co poprzednie wzdłuż linii mn i t. d. W ten sposób kolejno, że tak powiem, wylaniają się z przewodnika naprzemian warstwy pola elektrycznego o natężeniu jednego i drugiego kierunku; takie dwie warstwy razem wzięte tworzą jedną falę elektryczną. Poza zmianami elektrycznymi eteru powstają jednocześnie

i zmiany magnetyczne; kierunek natężenia pola magnetycznego zależy również od kierunku prądu, i przez to w przestrzeni rozchodzą się fale magnetyczne, składające się z warstw pola, w których kierunek natężenia naprzemian się zmienia. Wobec tego, że kierunek sił magnetycznych leży w płaszczyźnie prostopadłej do przewodnika z prądem, to schematy



Rys. 14.

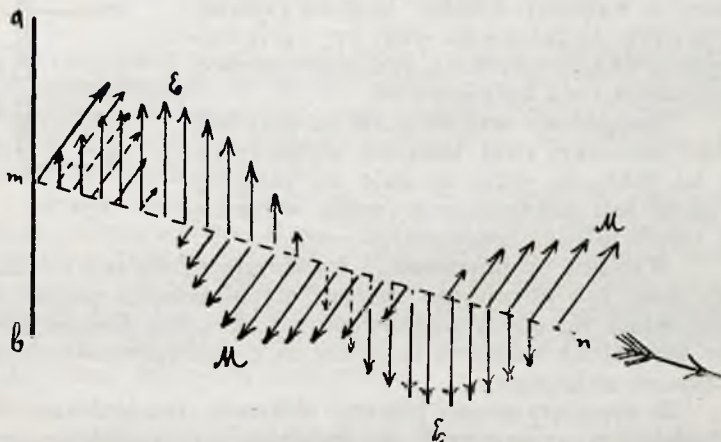
wyobrażające powstawanie fal magnetycznych będą miały postać przedstawioną na rys. 15 i 16, gdzie m jest to punkt przecięcia się przewodnika z płaszczyzną rysunku, s i s' strzał-



Rys. 16.

ki wyobrażające natężenie pola magnetycznego wzdłuż linii. Zestawiając natężenia pola magnetycznego i elektrycznego należy zauważyć przedewszystkiem, że kierunki tych natężeń są do siebie prostopadłe, a pozatem w tem miejscu przestrzeni, gdzie jest najsilniejsze natężenie pola magnetycznego, natężenie pola elektrycznego jest zwykle najsłab-

sze. Przyczyna tego ostatniego zjawiska leży w tem, że, jak wiadomo, gdy prąd zmienny przebiega po przewodniku o bardzo małym oporze w stosunku do współczynnika samoindukcji, to chwilowa siła prądu zmiennego jest największa wtedy, gdy napięcie na końcówkach jest najmniejsze. Dla uzmysłowienia przedstawionej zależności pomiędzy falami elektryczną i magnetyczną, biegnącymi wzdłuż linii mn od przewodnika ab , wyobrażone są na rys. 17 kierunki i wielkości natężeń perspektywicznie: ϵ —są strzałki wyobrażające natężenie pola elektrycznego, M —strzałki wyobrażające natężenie pola magnetycznego.



Rys. 17.

Różnorodność zjawisk w przyrodzie, które obecnie uważamy za fale elektromagnetyczne, daje się wyjaśnić przez kilka charakterystycznych cech tych fal; zasadnicze cechy są następujące: *dlugość fali*, t. j. grubość dwóch warstw, zawierających części pola o przeciwnych sobie kierunkach natężenia, następnie *postać fali*, określająca prawo, według którego zmienia się natężenie pól elektrycznego i magnetycznego, czyli, wyrażając się geometrycznie, formę krzywej, wyobrażającej zmianę natężenia wzdłuż fali; pozatem są fale, mające kierunki natężeń pól, nie leżące stale w jednej płaszczyźnie, a więc np. pierwsza fala magnetyczna tak jak na rys. 17 jest pozioma, następne zaś leżą w płaszczyznach rozmaicie pochylonych do poziomu. Fale, biegnące stale w określonej płaszczyźnie, takie jak na rys. 17, noszą nazwę fal *spolaryzowanych*

Fale elektromagnetyczne, które otrzymują się w przestrzeni otaczającej przewodniki ze zwykłym prądem zmiennym, są niezmiernie długie. Jeden okres prądu zmiennego zwykłego trwa 0,02 sekundy (50 okresów na sekundę). W tym czasie zmiany w eterze rozchodzą się na przestrzeni $3 \cdot 10^{10} \cdot 0,02 \text{ cm} = 6 \cdot 10^8 \text{ cm}$, co wynosi 6000 km; taką więc długość zajmuje jedna fala. Dla otrzymania fal krótszych posługujemy się wahadłowem wyładowaniem przez iskrę. Przyrządy, w których takie wyładowania mają miejsce, noszą nazwę oscylatorów i w zasadzie składają się z dwóch przewodników (rys. 18) *a* i *b*, np. drążków zakończonych kulkami, między którymi przeskakuje iskra; do ładowania służy zwykle indukcyjna cewka RUMKORF'A, połączona przewodnikami *m* i *n* z kulkami *a* i *b*.

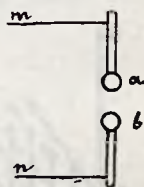
Wahadłowe wyładowania między kulkami zmieniają swój kierunek miliardy razy na sekundę, przez co daje się osiągnąć długość fali elektromagnetycznej, wynoszącą zaledwie kilka centymetrów.

Wszelkie promieniowanie wywierające działanie ciepłne, świetlne, lub chemiczne według współczesnych pojęć jest zjawiskiem fal elektromagnetycznych, których długość mierzy się jednak zaledwie tysięcznymi i dziesięciotysięcznymi częściami milimetra.

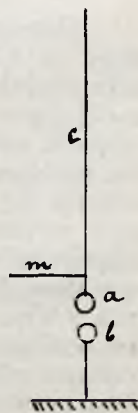
Z energetycznego punktu widzenia rozchodzenie się fal elektromagnetycznych w przestrzeni jest zjawiskiem wpływania lub też wypromieniowywania energii z ciała stanowiącego źródło fal.

Dla przykładu rozważymy według KENNELLY'EGO przenoszenie się energii przy telegrafii iskrowej.

Stacya wysyłająca zaopatrzona jest w oscylator (rys. 19), składający się z dwóch kulek *a* i *b*, z których jedna *b* jest połączona z ziemią, a druga z wysokim drutem *ac* (antena) i z jednym biegunem źródła prądu, którego drugi biegun jest połączony z ziemią. Gdy kulka *a* z drutem *ac* naładowuje się do odpowiedniego potencjału (prężności elektrycznej), następuje wyładowanie wahadłowe, z przewodnika *ac* wybiegają fale elektromagnetyczne, które jednak bardzo szybko zanikają z powodu wyczerpania



Rys. 18.



Rys. 19.

się energii. Ponieważ pierwsza fala będzie zawierać energii najwięcej, więc w przybliżeniu można przyjąć, że cała energia zawarta w naładowanym przewodniku ac znajduje się w pierwszej fali.

Weźmy przykład określony. Przewodnik ac został naładowany do potencjału wynoszącego $3 \cdot 10^4$ v.; pojemność tego przewodnika jest 0,01 mikrofaradów, czyli 10^{-8} faradów; na zasadzie wzoru, przytoczonego w rozdziale IV dla obliczenia energii przewodnika naładowanego, otrzymujemy:

$$E = \frac{e^2 \cdot c}{2} = \frac{(3 \cdot 10^4)^2 \cdot 10^{-8}}{2} = 4,5 \text{ joulów,}$$

co wynosi mniej więcej 0,46 kgm lub też $4,5 \cdot 10^7$ ergów. Przy wyładowaniu cała ta energia przechodzi do fali elektromagnetycznej, wybiegającej z przewodnika, jeżeli przypuszczamy, że ilość ciepła i światła, wydzielająca się przy tem zjawisku, jest znikomo mała.

Fala elektromagnetyczna od przewodnika ac rozchodzi się w postaci półkuli, której środek znajduje się u podstawy drutu ac ; długość fali, jak wskazują doświadczenia i teoretyczne rozważania, wynosi w tym razie poczwórną wziętą długość drutu ac , czyli długość tego drutu wynosi czwartą część długości fali. Przyjmując długość drutu ac za 30 m, otrzymamy całkowitą długość fali:

$$30 \cdot 4 = 120 \text{ m.}$$

Kiedy odległość przodu fali od wysyłającego drutu będzie wynosiła 10 km , to objętość przestrzeni zajętej przez falę oblicza się w przybliżeniu według wzoru:

$$2 \pi \cdot (10^6)^2 \cdot 12 \cdot 10^3 = 7,54 \cdot 10^{16} \text{ cm}^3.$$

Ilość energii przypadająca na 1 cm^3 objętości fali wynosi:

$$\frac{4,5 \cdot 10^7}{7,54 \cdot 10^{16}} = 6 \cdot 10^{-10} \text{ ergów.}$$

Energia ta zawiera się w połowie ($3 \cdot 10^{-10}$ ergów) w polu magnetycznym i w połowie w polu elektrycznym. Przyjmując dla uproszczenia obliczeń równomierny rozkład energii w fali, otrzymamy wzory dla obliczenia natężeń elektrycznego i magnetycznego. Energia w jednostce objętości wyraża się przeznatężenie pola za pomocą wzorów, wskazanych poprzedniow rozdziale II-gim. Korzystając z tych wzorów i uważając przenikliwość magnetyczną i stałą die-

lektryczną dla powietrza za równe jednostce, otrzymamy:

$$\frac{F^2}{8\pi} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ ergów}$$

$$\text{i} \quad \frac{H^2}{8\pi} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ ergów,}$$

stąd wypada $H = 8,68 \cdot 10^{-5}$ absolutnych jednostek elektromagnetycznych a $F = 8,68 \cdot 10^{-5}$ absolutnych jednostek elektrostacyjnych.

Na stacyi odbiorczej znajduje się także pionowy drut c (rys. 20), połączony przez koherer¹⁾ z ziemią. Fala elektromagnetyczna uderzając w drut odbieracza, wzbudza w tym drucie siłę elektromotoryczną, która pochodzi w części od działania pola elektrycznego, w części zaś od działania pola magnetycznego. Dla obliczenia siły elektromotorycznej, pochodzącej od pola magnetycznego, możemy posługiwać się tym samym wzorem, który stosuje się w teorii działania dynamomaszyn. Siła elektromotor. w drucie twornika wyraża się ilością linii sił przecinanych na sekundę przez przewodnik.

Ilość linii lub jednostkowych rurek sił magnetycznych przypadających na 1 cm^2 płaszczyzny prostopadłej do linii równa się ilości jednostek natężenia pola magnetycznego w tem miejscu.

W rozważanej fali ilość linii sił, przypadająca na 1 cm^2 płaszczyzny leżącej wzdłuż kierunku ruchu fali wynosi:

$$8,68 \cdot 10^{-5};$$

linie te biegają z szybkością $3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sek}$. Jeżeli wysokość drutu odbierającego wynosi 30 m , a odległość od stacyi wysyłającej 10 km , to siła elektromotoryczna, powstająca w tym drucie od pola magnetycznego, wyniesie:

$$8,68 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{10} = 78,12 \cdot 10^3$$

absolutnych jednostek elektromagnetycznych, czyli $78,12 \text{ v}$.



Rys. 20.

¹⁾ Koherer jest to rurka szklana napelniona opiłkami metalowemi, w końcach rurki są zatopione dwa druty. W normalnych warunkach prądu z ogniwa elektrycznego taka rurka nie przepuszcza; gdy jednak przez nią przejdzie wyładowanie elektryczności o wyższym napięciu, rurka staje się przewodnikiem i dla prądu z ogniwa.

Elektryczna część fali wzbudza również siłę elektromotoryczną, którą możemy obliczyć, przyjmując pod uwagę, że natężenie pola elektrycznego jest to siła elektromotoryczna, przypadająca na długość 1 *cm*. Kierunek natężenia pola elektrycznego w fali jest pionowy, odpowiada więc kierunkowi drutu odbiorczego, który jest również pionowy. Na zasadzie powyższego wypada, że w każdym *cm* drutu pole elektryczne wzbudza siłę elektromotoryczną, wynoszącą $8,68 \cdot 10^{-5}$ absolutnych elektrostatycznych jednostek, czyli $8,68 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-8} = 0,02604$ v. Ponieważ długość całkowita drutu wynosi 3000 *cm*, całkowita siła elektromotoryczna wyniesie $0,02604 \cdot 3000 = 78,12$ v., t. j. tyleż co i od części magnetycznej fali.

Pod wpływem tej siły elektromotorycznej powstaje w drucie odbierającym ruch elektryczności, który wprawia w działanie przyrządy sygnalizacyjne. Zależność wielkości omawianej siły elektromotorycznej od odległości pomiędzy stacją odbiorczą i wysyłającą daje się łatwo wyprowadzić z tego, że ilość energii przypadająca na 1 *cm*³ fali zmienia się w odwrotnym stosunku do drugiej potęgi odległości fali od źródła; natężenie więc pól elektrycznego i magnetycznego pozostaje w odwrotnym stosunku do pierwszej potęgi tej odległości, a stąd wypada, że i siła elektromotoryczna w drucie odbiorczym zmniejszy się tyle razy, ile razy wzrośnie odległość dwóch stacyi.

Z tego przykładu widzimy, że przesyłając energię elektromagnetyczną za pomocą fal, otrzymujemy na stacyi odbiorczej względnie tylko małą cząstkę napięcia elektrycznego, które zastosowaliśmy na stacyi wysyłającej, przyczyną tego jest przede wszystkim rozpraszanie się energii z drutu wysyłającego we wszystkie strony.

VIII. Jony i elektrony. Ścisły związek pomiędzy materią ważką a elektrycznością spostrzegamy w każdym zjawisku elektrycznym, trudno jednak jest wytworzyć sobie o tym związku jakies określone wyobrażenie na zasadzie jedynie pojęć przedstawionych w poprzednich rozdziałach; aby ten cel osiągnąć, wytworzono pojęcia nowe, oparte na badaniu zjawisk takich, w których przemiany materyi odbywają się pod wpływem elektryczności. Pojęcia te zostały w ostatnich czasach o tyle opracowane, że dają możność podjęcia próby

skojarzenia w jedną całość zasadniczych podstaw fizyki, fizykochemii i chemii.

Pojęcie *jonów* stworzył FARADAY, któremu zawdzięczamy pierwsze ścisłe zbadanie zjawiska elektrolizy i określenie zasadniczych praw jęgo.

Według FARADAY'A jony są to cząstki roztworu poddanego elektrolizie, wędrujące do końcówek, doprowadzających prąd do danego płynu. Ponieważ rozmaite jony przyciągane są do różnoznacznie naelektryzowanych płytek metalowych, więc muszą same posiadać ładunek elektryczny: jedne — dodatni, drugie — ujemny; np. przy elektrolizie roztworu kwasu siarczanego cząstki H_2 mają ładunek dodatni, SO_4 zaś — ujemny. Na zasadzie powyższego wyjaśnienia wypada, że jony są to cząstki zwykłej materii naładowane elektrycznością dodatnią lub ujemną (H_2 — jon dodatni, SO_4 — ujemny).

Prawo elektrolizy twierdzi, że masa jonów pewnego ciała, wydzielonych z roztworu na elektrodach (biegunach), jest proporcjonalna do ilości elektryczności, która przepłynęła przez roztwór i do chemicznego równoważnika tego ciała.

Z doświadczeń wypada, że 1 kulon (coulomb) elektryczności wydziela około $10^{-5} g$ wodoru, $8 \cdot 10^{-5} g$ tlenu, $50,5 \cdot 10^{-5} g$ platyny i t. d.; liczby te są to stosunki masy jonów do ilości elektryczności, znajdujące się na jonach; oznaczając ilość elektryczności przez e i masę materalną przez m , otrzymamy:

$$\text{dla wodoru: } \frac{m}{e} = 10^{-5} \text{ g/coul.}$$

$$\text{„ tlenu } \frac{m}{e} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ g/coul.}$$

$$\text{„ platyny } \frac{m}{e} = 50,5 \cdot 10^{-5} \text{ g/coul.}$$

przyczem 8 i 50,5 — są to równoważniki chemiczne tlenu i platyny.

Na zasadzie rozumowań lord KELVIN i inni badacze przyszli do wniosku, że masa jednego atomu wodoru wynosi $10^{-25} g$, stąd masa atomu tlenu — $16 \cdot 10^{-25} g$, masa atomu platyny $194,8 \cdot 10^{-25} g$, ponieważ 16 i 194,8 są to ciężary atomowe tlenu i platyny.

Mając powyższe liczby, można znaleźć dla rozmaitych ciał ładunek jednego atomu. Naprzykład ładunek atomu wo-

doru, jeżeli przyjąć w powyższym wyrazie m za 10^{-25} , wypadnie

$$e = \frac{10^{-25}}{10^{-5}} = 10^{-20} \text{ kulonów,}$$

podobnie dla tlenu:

$$e' = \frac{16 \cdot 10^{-25}}{8 \cdot 10^{-5}} = 2 \cdot 10^{-20} \text{ kulonów,}$$

a dla platyny:

$$e'' = \frac{194,8 \cdot 10^{-25}}{50,5 \cdot 10^{-5}} = \text{w przybliżeniu } 4 \cdot 10^{-20} \text{ kulonów.}$$

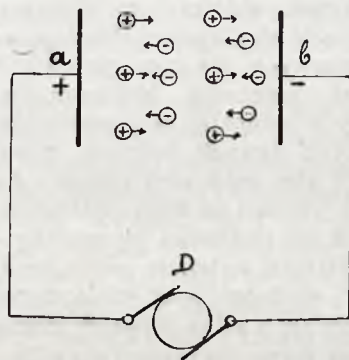
Z tych obliczeń widzimy, że atomy-jony rozmaitych ciał posiadają ładunki elektryczne składające się z *całej* liczby ładunków elementarnych, wynoszących 10^{-20} kulonów, czyli 10^{-21} absolutnych jednostek elektromagnetycznych, albo $3 \cdot 10^{-11}$ absolutnych jednostek elektrostatycznych (dokładniej według przeciętnych danych ładunek atomu elektrycznego wynosi $4,69 \cdot 10^{-10}$ abs. jedn. elektrost.); na tej zasadzie ładunek taki można uważać za *atom elektryczności*, t. j. za najmniejszą, dalej już nie podzielną jej cząstkę; atom elektryczności jest elementarnym nabojem elektrycznym jednowartościowego jonu (np. wodoru); jony wielowartościowe posiadają ładunki, składające się z kilku atomów elektrycznych.

Zwróćmy się teraz do innego zjawiska, mianowicie do przepływania prądu elektrycznego przez gaz. W normalnych warunkach przy odpowiedniej odległości biegunów doprowadzających prąd i przy odpowiednim napięciu elektryczności wszystkie gazy są zupełnymi izolatorami i prądu nie przepuszczają, nabywają jednak własności przewodników np. pod wpływem promieni RÖNTGEN'A (por. dalej). Ponieważ własności przewodnicze gazów dają się łatwo zniszczyć (po prostu za pomocą filtrowania przez watę lub wodę), więc można przyjąć, że przyczyną własności przewodniczej gazów są cząstki naelektryzowane, które, znajdując się w polu elektrycznym elektrod a i b (rys. 21), biegną w jedną lub w drugą stronę, stosownie do znaku swego ładunku.

Pytanie jednak, skąd się takie cząstki tam biorą? Ponieważ promienie RÖNTGEN'A uważamy za biegnące zaburzenia eteru, więc nie materialnego do gazu nie dodajemy, można zatem przyjąć, że cząstki naelektryzowane powstały z nie-naelektryzowanych cząstek gazu przez dzielenie się. Przyj-

mujemy, że atomy gazu dzielą się każdy na dwie części: jon dodatni i jon ujemny i że wielkości ładunków tych jonów są jednakowe. Jest to wyobrażenie zupełnie analogiczne do tego, jakie mamy w przewodnictwie roztworów. Na przykład roztwór kwasu siarczanego dlatego przeprowadza prąd elektryczny, że pewna ilość cząsteczek kwasu w roztworze jest podzielona na jony: dodatnie H_2 i ujemne SO_4 .

W gazach mamy do czynienia oczywiście z podziałem subtelniejszym; tam atom dzieli się na cząstki jeszcze drobniejsze, traci więc, do pewnego stopnia, swoją najbardziej charakterystyczną własność.



Rys. 21.

Badanie przewodnictwa gazów daje możliwość przybliżonego obliczenia ładunku elektrycznego jonów. J. J. THOMSON zmierzył ten ładunek w sposób następujący. Oznaczając przez n — ilość jonów dodatnich lub ujemnych, przez e — ładunek jonu, przedstawimy ilość elektryczności dodatniej lub ujemnej przez iloczyn: ne .

Ilość elektryczności, czyli cały ładunek jonów pewnego znaku mierzy się za pomocą elektrometru, połączanego z płytką metalową izolowaną. Na płytce tej pod działaniem silnego pola elektrycznego osiadają wszystkie jony dodatnie gazu i oddają jej swój ładunek.

Ilość jonów n została zmierzona za pomocą zjawiska, odkrytego przez C. T. R. WILSON'A. Zjawisko to odbywa się w gazie nasyconym parą wodną; gdy taki gaz oziębimy, np. przez raptowne rozprężenie, to para skropli się tylko wtedy,

gdy w gazie będą się znajdowały zawieszona cząstki stałe, lub gazowe naelektryzowane, t. j. jony gazu; w takim razie kropelki tworzą się właściwie wokoło tych cząstek.

Badany gaz zjonizowany (posiadający własność przewodnictwa) i oczyszczony starannie od wszelkich cząstek stałych, nasyca się parą wodną i poddaje raptownemu rozszerzeniu; pod wpływem obniżenia temperatury, część pary skrapla się i tworzy się mgła. Bezpośrednio policzyć ilość kropelek, które utworzyły się wokoło jonów, niema możliwości. Ze stopnia obniżenia temperatury można jednak obliczyć masę wody skroplonej, a przez zmierzenie prędkości z jaką mgła opuszcza się na dno naczynia znajduje się średnica kropelek wody.

Badania G. STOKES'A doprowadziły do następującego wyrazu określającego prędkość spadania bardzo drobnych kulek w powietrzu:

$$v = \frac{2}{9} \frac{g \cdot a^2}{\mu}.$$

gdzie: v — prędkość spadania, $g = 981$ — przyspieszenie siły ciężkości, μ — współczynnik lepkości powietrza = 0,00018, a — promień kulki; stąd:

$$v = 1,21 \cdot 10^6 \cdot a^2.$$

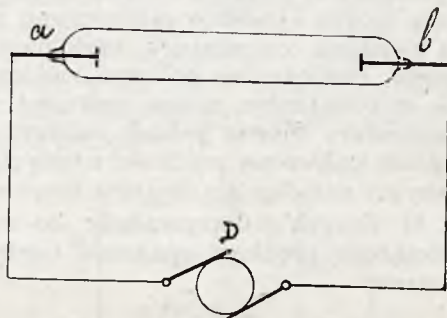
Znając v , łatwo obliczyć a , a więc i masę jednej kropelki wody; z całej masy wody i z masy jednej kropelki oblicza się ilość kropelek, a więc i jonów w powietrzu. Określiwszy w taki sposób cały ładunek jonów $n \cdot e$ oraz ilość jonów n , otrzymujemy ilość elektryczności na jednym jonie, dzieląc cały ładunek przez ilość jonów.

Według doświadczeń J. J. THOMSON'A wypada: $3,4 \cdot 10^{-10}$ absolutnych jednostek elektrostatycznych, co wynosi mniej więcej 10^{-20} kulonów.

Stąd widać, że i w zupełnie innym zjawisku mamy do czynienia z tym samym atomem elektryczności, który stanowi ładunek jonów przy elektrolizie roztworów.

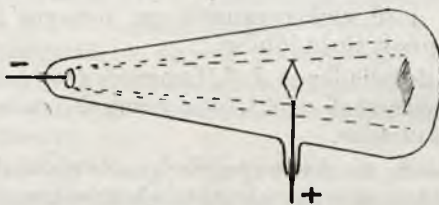
Wszechstronniejsze badania przewodnictwa gazów przeprowadzono w rurkach szklanych (rys. 22) z elektrodami metalowymi a i b , zatopionymi na końcach tych rurek (D — źródło prądu). Gdy ciśnienie gazu w takiej rurce jest zwykle atmosferyczne, to gaz nie świeci. Przy niewielkiem nawet rozrzedzeniu zjawia się smuga świetlna pomiędzy elektrodami,

następnie przy dalszem rozrzedzaniu gazu smuga ta dzieli się na poprzeczne paski świecące, których szerokość ciągle się zmniejsza razem ze zmniejszeniem się ciśnienia gazu, jednocześnie ciemna przestrzeń przy elektrodzie ujemnej szybko się rozszerza.



Rys. 22.

Gdy ciśnienie gazu spadnie mniej więcej do $0,1 \text{ mm}$, gaz przestaje świecić, świeci tylko szkło pod wpływem t. zw. promieni katodalnych, wypływających z bieguna ujemnego; szkło rurki wysyła poza promieniami świetlnymi jeszcze promienie RÖNTGEN'A, których charakterystyczna cecha polega na wzbudzeniu fluorescencji (świecenia) ekranu pokrytego solami baru lub strontu. Obecność promieni katodalnych w rurce (rys. 23) łatwo stwierdzić, ustawiając wewnątrz rurki



Rys. 23.

jakąś przeszkodę, np. płytkę aluminiową; płytka taka rzuca wyraźny cień na szkło rurki, ponieważ te miejsca szkła, na które promienie katodalne nie trafiają, przestają świecić.

Zjawisko to wskazuje zarazem, że promienie katodalne biegną po liniach prostych, niezależnie od położenia elektrody

dotatniej; można jeszcze przekonać się o prostolinijnym kierunku tych promieni, umieszczając wewnątrz rurki w odpowiednim położeniu ekran fluoryzujący, który pod działaniem tych promieni świeci.

Oprócz promieni katodalnych dają się spostrzegać, chociaż znacznie trudniej, promienie anodalne, wypływające z bieguna dodatniego (anoda—biegun dodatni). Najważniejszą wspólną cechą charakterystyczną promieni katodalnych i anodalnych jest własność odchylenia się od prostego kierunku pod wpływem pola magnetycznego lub elektrycznego; odchylenie się jednak promieni anodalnych zachodzi w stronę przeciwną w porównaniu do kierunku odchylenia się promieni katodalnych.

Na zasadzie tego zjawiska ustalił się obecnie pogląd, że promienie rzeczone są strumieniem cząstek dodatnio lub ujemnie naelektryzowanych; promienie katodalne, jako wypływające z bieguna ujemnego, są to cząstki ujemnie naelektryzowane w ruchu, anodalne zaś promienie — cząstki dodatnie.

Zbaczanie z drogi poruszających się cząstek naelektryzowanych pod wpływem pola elektrycznego, którego napięcie jest skierowane pod kątem do ich drogi, jest zupełnie zrozumiałe, albowiem charakterystyczną właśnie cechą każdego pola elektrycznego jest działanie mechaniczne na cząstki naelektryzowane. Wpływ pola magnetycznego daje się wyjaśnić przez to, że cząstka naelektryzowana w ruchu posiada własności prądu elektrycznego; na szereg bowiem doświadczeń przekonano się, że ciało naelektryzowane w ruchu podlega zewnętrznemu działaniu i samo działa w taki sposób jak prąd przepływający wzdłuż drogi, którą przebiega ciało. Prąd zaś elektryczny, jak wiadomo, pod wpływem pola magnetycznego odchyła się w kierunku prostopadłym do kierunku prądu i pola, przy zmianie kierunku prądu zmienia się również kierunek odchylenia.

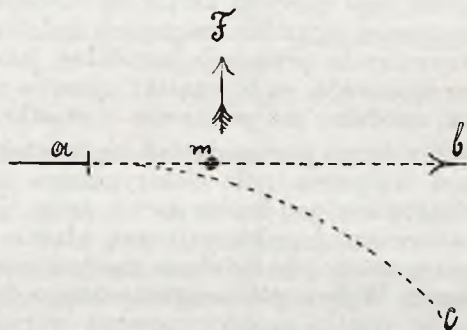
Na podstawie już wyżej przedstawionych własności, można więc uważać pogląd na promienie katodalne i anodalne jako na strumienie cząstek naelektryzowanych, za dostatecznie umotywowany; pozatem jednak przekonano się jeszcze doświadczalnie, że promienie katodalne udzielają ładunku ujemnego temu ciału, na które padają.

Zestawiając rozważane zjawiska w rurce wypełnionej gazem rozrzedzonym z poprzednio omawianymi doświadcze-

niami z przewodnictwem powietrza, łatwo dojść do wniosku, że cząstki promieni katodowych i anodowych są to jony gazu ujemne i dodatnie, na które rozszczepiają się jęgo atomy.

Korzystając z nowych własności jonów, znajdujących się w szybkim ruchu w bardzo rozrzedzonym gazie, można obliczyć stosunek masy jonów do ładunku elektrycznego.

Sposób określenia tego stosunku jest następujący. Wykonywamy dwa doświadczenia: rurkę z silnie rozrzedzonym gazem (t. zw. CROOKES'A), w której przebiegają promienie katodowe, kreślące drogę świetlną na odpowiednio ustawionym ekranie, poddajemy działaniu pola magnetycznego, skierowanego prostopadle do drogi promieni. W takim razie ujemnie naelektryzowana cząstka m (rys. 24), wybiegająca z ka-



Rys. 24.

tody a w kierunku ab , zboczy i będzie się poruszała wzdłuż drogi ac . Pole magnetyczne jest prostopadłe do płaszczyzny rysunku, a więc siły działania pola na cząstkę będą skierowane zawsze prostopadle do drogi cząstki; ponieważ pole stosuje się jednorodne (o jednakowym napięciu we wszystkich punktach), więc wielkość siły będzie jednakowa; w takich warunkach droga ac będzie łukiem koła, którego promień według praw mechaniki wyraża się wzorem:

$$a = \frac{mv^2}{f}, \text{ gdzie}$$

a — promień drogi, v — prędkość ruchu, f — siła dośrodkowa, m — masa cząstki.

Wielkość siły f zależna jest od napięcia pola H , wielkości ładunku elektrycznego cząstki e i prędkości ruchu; mianowicie z teoretycznych rozumowań wypada, że:

$$f := H \cdot e \cdot v.$$

Stąd:

$$a = \frac{mV}{H \cdot e}.$$

Promień a daje się zmierzyć bezpośrednio, H również, pozostaje jeszcze do określenia v . W tym celu wykonywamy doświadczenie drugie. Oprócz poprzedniego pola magnetycznego poddajemy promienie katodalne działaniu pola elektrycznego, którego kierunek leży w płaszczyźnie rysunku i oznaczony jest strzałką F ; napięcie pola elektrycznego dobiera się takie, żeby droga cząstki została prosta, t. j. taką, jaką była wtedy, gdy ani elektrycznego ani magnetycznego pola nie było. W takim razie siły działające pól magnetycznego i elektrycznego są równe. Oznaczając napięcie pola elektrycznego przez F , otrzymamy dla siły działającej na cząstkę wyraz:

$$F \cdot e,$$

a na zasadzie równości sił $F \cdot e$ i f :

$$F e = H e v,$$

skąd

$$v = \frac{F}{H}.$$

F i H dają się zmierzyć bezpośrednio. Z wyników dwóch wyżej opisanych doświadczeń według wzoru:

$$a = \frac{m v}{H e}$$

wypada

$$\frac{m}{e} = \frac{a H}{v}.$$

Wyniki obliczeń są następujące:

Dla promieni katodalnych (jony ujemne):

$$\frac{m}{e} = 10^{-8} \text{ g/coul.}$$

$$v = 3 \cdot 10^9 \text{ cm/sek.}$$

Dla promieni anodalnych (jony dodatnie):

$$\frac{m}{e} = 10^{-5} \text{ g/coul. (dla wodoru),}$$

v — znacznie mniejsze od $3 \cdot 10^9 \text{ cm/sek.}$

Pozatem przekonano się, że stosunek $\frac{m}{e}$ dla jonów ujemnych zawsze jest stały, niezależnie od rodzaju gazu w rurce i elektrod. Stosunek zaś $\frac{m}{e}$ dla jonów dodatnich zależy wyraźnie od chemicznego składu gazu i elektrod, najmniejszą liczbą wyraża się stosunek ten dla wodoru.

Są jeszcze inne zjawiska, które obecnie wyobrażamy sobie jako wypływanie naelektryzowanych jonów. Ciała ujemnie naelektryzowane tracą bardzo szybko ładunek pod wpływem promieni nadfioletowych, co się daje wytłumaczyć tak, że pod działaniem tych promieni z ciała wybiegają jony naelektryzowane ujemnie, które zabierają i rozpraszają ładunek i, podobnie jak cząstki w rurce CROOKES'A, poddają się działaniu pól elektrycznych i magnetycznych; korzystając z wspomnianej własności i dla tych jonów określono stosunek masy do ładunku elektrycznego; według ELSTER'A i GEITEL'A wypadło:

$$\frac{m}{e} = 10^{-8} \text{ g/coul. (dokładniej } 1,4 \cdot 10^{-8} \text{).}$$

Znane jest także zjawisko wypływania jonów z ciał silnie ogrzanych (np. z nitki węglowej w żarówce); dla ujemnych jonów ELSTER i GEITEL znaleźli stosunki następujące:

$$\frac{m}{e} = 10^{-8} \text{ g/coul. (dokładniej: } 1,15 \cdot 10^{-8} \text{).}$$

J. J. THOMSON dla dodatnich jonów znalazł:

$$\frac{m}{e} > 10^{-5} \text{ g/coul.}$$

Rozważając wyniki przytoczonych doświadczeń, przychodzi nam do wniosku, że dodatnie i ujemne jony w całym szeregu zjawisk są to naelektryzowane cząstki materii, posiadające stały stosunek masy do ładunku; ujemne jednak jony od dodatnich różnią się znacznie. Stosunek masy do ładunku w jonach ujemnych jest stały, *niezależny od składu chemicznego materii*, z której te jony powstały, w jonach zaś dodatnich stosunek masy do ładunku zmienia się z rodzajem materii, która je wytworzyła. Przyjmując na zasadzie badań z przewodnictwem gazów, że we wszystkich tych jonach mamy do czynienia z atomem elektryczności, wynoszącym, jak wyżej

wskazano, 10^{-20} kulonów, łatwo obliczyć masę jonów dodatnich i ujemnych:

Masa jonu ujemnego będzie:

$$m = 10^{-20} \cdot 10^{-8} = 10^{-28} \text{ g.}$$

Masa jonu dodatniego dla wodoru wynosi:

$$m = 10^{-20} \cdot 10^{-5} = 10^{-25} \text{ g.}$$

Z powyższego obliczenia widzimy, że masa jonu ujemnego jest *tysiąc razy mniejsza* od masy jonu dodatniego; oprócz tego widać, że masa jonu dodatniego jest wprost równa masie atomu materii, z której ten jon powstał (masa atomu wodoru = 10^{-25} g).

W rzeczywistości masa obu jonów razem wziętych stanowi dopiero masę atomu, ale obecna dokładność pomiarów nie jest w stanie wykazać różnicy pomiędzy masą dodatniego jonu i masą atomu.

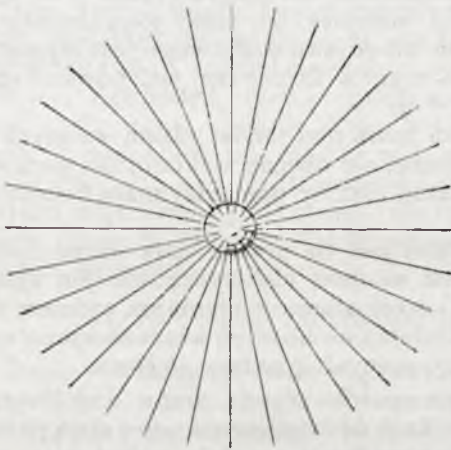
A więc jon dodatni jest to prawie cały atom materii skojarzony z dodatnim atomem elektryczności; jon ujemny jest to drobna ($1/1000$) część atomu z ujemnym atomem elektryczności. Dla wyróżnienia osobliwych własności jonu *ujemnego* przyjęto dla niego specjalną nazwę: *elektron*.

Stworzone w ten sposób pojęcia jonów i elektronów, oparte na ścisłych wynikach doświadczenia, pozwalają powziąć pewne jednolite chociaż może nie zupełnie wykończone wyobrażenie o zjawiskach przewodnictwa elektrycznego w związku z budową materii; oprócz tego dają możność uzupełnienia elektromagnetycznej teorii promieniowania w eterze.

IX. Cząstka naelektryzowana w ruchu. Ze względu na doniosłe znaczenie cząstek naelektryzowanych w zjawiskach elektromagnetycznych, niezbędnym jest poznać bliżej własności takiej cząstki w ruchu. Cząstkę będziemy wyobrażali sobie w postaci kuli (rys. 25); gdy taka kulka naelektryzowana znajduje się w spokoju, to nic innego oprócz pola elektrycznego wokoło tej kuli nie spostrzegamy; jeżeli przyjmiemy, że druga cząstka, naładowana elektrycznością przeciwnego znaku, znajduje się na odległości nieskończenie dalekiej od tej kulki, to rurki (linie) sił elektrycznych będą wybiegały z kulki we wszystkie strony równomiernie wzdłuż promieni (por. ustęp II.). Rozważmy teraz co zajdzie, gdy taką kulę naelektryzowaną wprawimy w ruch; razem z nią będą

się oczywiście poruszały i linie sił, a w tych warunkach wokół kuli powstaje pole magnetyczne.

Aby lepiej uzmysłowić to zjawisko, rozpatrzmy przede wszystkim inne nieco prostsze. Dwie płytki metalowe (rys. 26) a i b naładowane są elektrycznością, a — dodatnią, b — ujemną; gdy je połączymy przewodnikiem p , nastąpi wyładowanie elektryczności: dodatnia spłynie w kierunku strzałki 1, ujemna zaś w kierunku strzałki 2 i oba ładunki zrównoważą się



Rys. 25.



Rys. 26.

w przewodniku p . Pomiedzy płytkami, jako dwoma ciałami naelektryzowanymi różnocoznacznie, będą przebiegały rurki sił tak, jak to wskazano na rysunku; razem z poruszającymi się ładunkami będą poruszały się i te rurki sił elektrycznych. Inaczej możemy określić rozpatrywane zjawisko jako chwilowy prąd elektryczny w płytkach a i b i przewodniku p . W przestrzeni otaczającej przewodnik z prądem, jak wiadomo z elementarnych zasad nauki o elektromagnetyzmie, spostrzegamy zawsze pole magnetyczne, więc i w danym wypadku między płytkami a i b będzie istniało pole magnetyczne tak długo, jak długo będzie trwał prąd, t. j. dopóki rurki pola elektrycznego będą w ruchu; wobec tego pole magnetyczne, powstające wokół prądu, można rozpatrywać jako wynik ruchu rurek sił elektrycznych. Kierunek powstającego pola magnetycznego jest zawsze prostopadły do rurek sił i do kierunku ich ruchu.

Dla danego wypadku łatwo jest obliczyć napięcie pola magnetycznego i elektrycznego w punkcie znajdującym się w środku między płytkami w przypuszczeniu, że płytki są bardzo duże względnie do odległości pomiędzy nimi. Dla napięcia pola elektrycznego wypada wyraz $4\pi\sigma$, gdzie σ jest ilość elektryczności na jednostce powierzchni każdej płytki.

Dla napięcia pola magnetycznego wypada wyraz $4\pi\sigma v$, gdzie v — prędkość ruchu elektryczności w płytkach lub prędkość rurek elektrycznych.

Zestawiając te wyrazy widzimy, że napięcie pola elektrycznego pomnożone przez prędkość ruchu jego rurek daje napięcie pola magnetycznego. Jest to oznaczenie nie zupełnie ogólne, stosuje się ono tylko do wypadku, gdy rurki sił elektrycznych i kierunek ruchu są pod prostym kątem, w przeciwnym razie powyższy iloraz należy jeszcze pomnożyć przez wstawę (sinus) kąta pomiędzy rurkami sił elektrycznych i kierunkiem ich ruchu; stąd wypada, że np. rurka sił elektrycznych, poruszająca się wzdłuż swojej długości, nie wywołuje pola magnetycznego, ponieważ wstawa wyżej wspomnianego kąta będzie zero.

Zwróćmy się teraz do kulki naelektryzowanej (rys. 27) która porusza się wzdłuż linii AB . Ponieważ z kulką będą się poruszały i jej rurki sił, stąd wniosek, że w przestrzeni otaczającej kulkę powstanie pole magnetyczne. Kierunek sił pola magnetycznego będzie prostopadły do drogi ruchu AB i do kierunku rurek sił elektrycznych w danym miejscu; mając to na uwadze, łatwo spostrzedz, że kierunki sił magnetycznych (rys. 28), a właściwie linie tych sił będą tworzyły koła, leżące w płaszczyznach prostopadłych do AB ; środki tych kół będą na prostej AB . Oznaczając przez F napięcie pola elektrycznego w punkcie P (rys. 27 i 28), otrzymamy według wzoru poprzedniego napięcie pola magnetycznego w tymże punkcie: $H = F \cdot v \cdot \sin \alpha$, gdzie v — szybkość ruchu kulki, α — kąt pomiędzy rurkami sił elektrycznych i kierunkiem AB .

Pole magnetyczne, które powstało wokoło kulki przedstawia, jak wiadomo, pewien zasób energii. Energia w jednostce sześcienniej objętości pola według wzoru poprzednio przytoczonego wyraża się w sposób następujący:

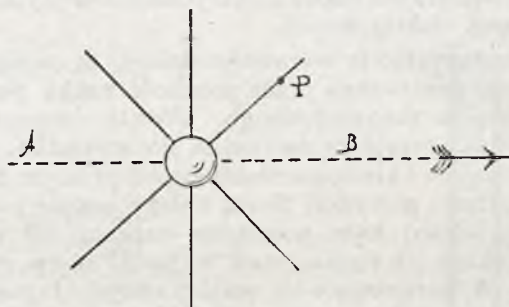
$$E = \frac{\mu \cdot H^2}{8\pi}.$$

Przyjmując $\mu = 1$ (dla powietrza), otrzymamy

$$E = \frac{H^2}{8\pi} \text{ ergów na } cm^3.$$

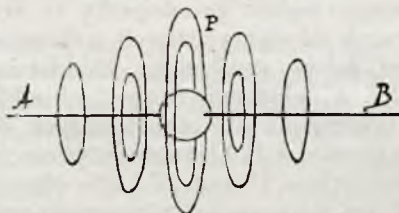
Ponieważ $H = F v \sin \alpha$, więc

$$E = \frac{F^2 v^2 \sin^2 \alpha}{8\pi} \text{ ergów na } cm^3.$$



Rys. 27.

Chcąc oznaczyć całą energię pola magnetycznego, powstającego przy ruchu kulki naelektryzowanej, należy zsumować podobne wyrazy dla całej nieograniczonej przestrzeni,



Rys. 28.

przyjmując pod uwagę, że napięcie pola elektrycznego w danym punkcie P , na odległości r od środka kulki, wyraża się wzorem:

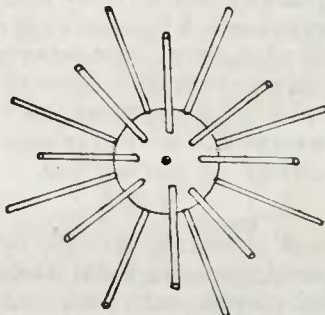
$$F = \frac{e}{r^2},$$

gdzie e — wielkość ładunku kulki.

Wynik tego całkowania jest następujący:

Cała energia pola magnetycznego wokoło kulki naelektryzowanej w ruchu wynosi $\frac{e^2 \cdot v^2}{3a}$, gdzie a —promień kulki.

Zastanawiając się nad stroną energetyczną rozważanego zjawiska, łatwo spostrzedz, że powstawanie pola magnetycznego odgrywa taką samą rolę w tem zjawisku, jak zwykła bezwładność (inercya) mechaniczna masy kulki. Jeżeli rozważana kulka posiada masę m , to dla nadania jej stałej prędkości v zużywa się energia w ilości $\frac{mv^2}{2}$, która stanowi energię ki-



Rys. 29.

netyczną kulki w ruchu; ponieważ kulka jest naelektryzowana, więc powstaje jeszcze pole magnetyczne, którego energia pochodzi oczywiście z tego samego źródła co energia kinetyczna zwykła i wynosi $\frac{e^2 v^2}{3a}$.

Wobec tego cała energia ruchu kulki będzie:

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{e^2 v^2}{3a} = \frac{1}{2} \left(m + \frac{2}{3} \frac{e^2}{a} \right) v^2.$$

Z tego wyrazu widzimy, że jako wynik powstawania pola magnetycznego wokoło kulki naelektryzowanej w ruchu, możemy uważać pozorny przyrost masy kulki, o wielkości $\frac{2}{3} \frac{e^2}{a}$. Słowem, kulka naelektryzowana w ruchu posiada pozornie większą masę, niż ta sama kulka bez ładunku elektrycznego.

Korzystając z przedstawienia omawianej sprawy przez

J. J. THOMSON'A w książce: „Electricity and matter“, zwróć uwagę na zjawisko analogiczne, łatwiejsze do uzmysłowienia. Wyobraźmy sobie kulkę drewnianą, na której wokoło, wzdłuż promieni, osadzono cienkie i długie patyczki (rys. 29). Jeżeli taka kula będzie się poruszała w płynie, to obecność patyczków w znacznym stopniu zwiększy opór cieczy przy ruchu kuli, największy opór będzie spotykał ten patyczek, który porusza się w kierunku prostopadłym do swojej długości, najmniejszy opór zaś — taki, co się porusza w kierunku swojej długości. Wprawiając w ruch kulę w cieczy, wprawia się także w ruch pewną ilość cieczy, zagarniętą przez patyczki, a więc i tu mamy pozorny wzrost masy kuli. Rozważana wyżej kulka naelektryzowana z liniami elektrycznymi wokoło doznaje podobnegoż oporu przy *wprawianiu jej w ruch*, i linie sił elektrycznych, prostopadłe dokierunku ruchu, wytwarzają najsilniejsze pole magnetyczne, jak to widać z powyższych wzorów (we wzorze $H = F \cdot v \sin \alpha$ przy $\alpha = 90^\circ \sin \alpha = 1$).

Jeżeli zastanowimy się nad wzorem

$$\frac{1}{2} \left(m + \frac{2}{3} \frac{e^2}{a} \right) v^2,$$

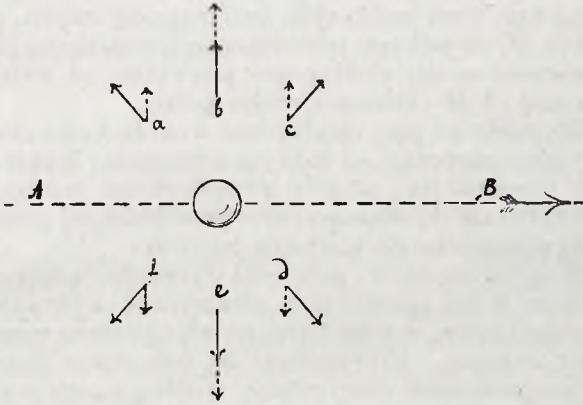
wyrażającym całą energię ruchu kulki naelektryzowanej, powstanie pytanie, czy czasem cała masa ciał nie jest ostatecznie tylko zjawiskiem elektromagnetycznym; można bowiem przypuszczać, że ciała składają się z cząstek naelektryzowanych tak ułożonych, że w zwykłych warunkach własności elektryczne nie dają się odczuć, ale ich bezwładność polega tylko na powstawaniu pola magnetycznego przy przejściu w ruch ze stanu spoczynku. W takim razie energia kinetyczna

kulki naelektryzowanej byłaby $\frac{1}{3} \frac{e^2}{a} v^2$ w przypuszczeniu, że owa kulka jest tą najdrobniejszą cząstką materii, z których skupienia składają się ciała w przyrodzie.

Spróbowano poprzeć ten pogląd doświadczalnie; drogę, na której to uczyniono, i wyniki otrzymane przedstawię pokrótce.

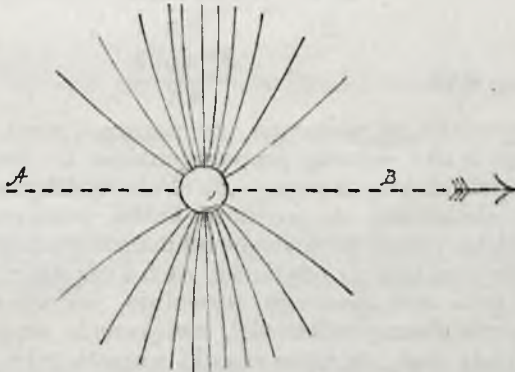
Powyższe wyrazy matematyczne, dotyczące pola magnetycznego wokoło cząstki naelektryzowanej w ruchu, są ściśle tylko w tym wypadku, gdy cząstka porusza się wolno z małą prędkością, a to ze względu na powstające wtórne pole elektryczne przy ruchu linii sił magnetycznych. Wiadomą bowiem jest rzeczą, że w dynam maszynie powstaje siła

elektromotoryczna na skutek przecinania drutów liniami sił magnetycznych; jeżeli linie sił przecinają nieprzewodniki (np. przy ruchu w powietrzu), to siła elektromotoryczna również



Rys. 30.

powstaje, tylko prąd płynąć nie może; tam zaś, gdzie jest siła elektromotoryczna, jest i pole elektryczne. Słowem, zrozumiałą jest rzeczą, że gdzie poruszają się linie magnetyczne,



Rys. 31.

tam powstają siły elektryczne, a więc i pole elektryczne. Kierunek takiego pola elektrycznego jest prostopadły do kierunku sił pola magnetycznego i do kierunku ruchu linii tych sił.

Wokoło naelektryzowanej cząstki w ruchu linie magnetyczne mają postać wyobrażoną na rys. 28; linie te poruszają się razem z cząstką, nie zmieniając względem niej swego położenia. Siły elektryczne w punktach a, b, c, d, e, f , powstające pod wpływem ruchu tych linii magnetycznych, pokazane są na rys. 30 strzałkami przerywanymi, strzałkami zaś ciągłymi oznaczone są siły elektryczne pierwotne od kulki naelektryzowanej ($A B$ —kierunek ruchu kulki).

Wypadkowe pole elektryczne wokoło kulki utworzy się z sumy geometrycznej sił jednych i drugich. Wykreślając na rys. 31 kierunek linii sił pola wypadkowego, widzimy, że linie zbliżyły się do płaszczyzny, przechodzącej przez środek kulki i prostopadłej do kierunku jej ruchu.

Wogóle napięcie pola elektrycznego zwiększyło się; zwiększone w ten sposób pole elektryczne wywoła silniejsze pole magnetyczne, a więc zwiększy się i pozorna masa cząstki naelektryzowanej. Przyjmując, że cała masa cząstki jest elektromagnetyczna, otrzymamy, według wzoru poprzedniego, ilość energii kinetycznej w jednostce objętości pola magnetycznego: $\frac{(F'v \sin \alpha)^2}{8\pi}$ ergów na cm^3 .

Jeżeli masa, odpowiadająca tej energii w zwykłym wzorze energii kinetycznej, będzie m' , to otrzymamy równanie:

$$\frac{m' v^2}{2} = \frac{(F'v \cdot \sin \alpha)^2}{8\pi},$$

$$\text{stąd} \quad m' = \frac{F'^2 \sin^2 \alpha}{4\pi}.$$

Wyraz dla m' wskazuje, że pozorna masa elektromagnetyczna kulki wzrasta proporcjonalnie do drugiej potęgi napięcia pola elektrycznego — F' . Pole elektryczne F' wzrasta ze zwiększeniem się prędkości kulki, ponieważ dodatkowe pole elektryczne, pochodzące od magnetycznego, zwiększa się proporcjonalnie do prędkości ruchu cząstki. Wzrost zaś napięcia pola elektrycznego wywołuje, jak widać z poprzednio wyprowadzonej zależności, zwiększenie się pozornej masy. Wypada stąd, że masa cząstki wzrasta z jej prędkością; mechanika jednak takiej zależności nie zna. Ale wystarczy wykonać krótkie obliczenie, aby wykazać, że mechanika może nie znać tej zależności, pomimo, iż ona istnieje.

Wyrażając wielkość napięcia dodatkowego pola elektrycznego przez napięcie pola magnetycznego w punktach

na płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu cząstki i przechodzącej przez jej środek, otrzymujemy wyraz

$$f = \frac{Hv}{V^2} \quad 1)$$

Ponieważ $H = Fv$, więc

$$f = \frac{Fv^2}{V^2}.$$

Z tego wyrazu widzimy, że f stanowi taką część F , jaką część jedności wynosi stosunek $\frac{v^2}{V^2}$; dopiero przy $v = V$, f staje się równem F ; ponieważ w zwykłych warunkach prędkość ciał, znajdujących się w ruchu, jest znacznie mniejsza od prędkości światła V , wobec tego nic dziwnego, że mechanika, mająca do czynienia z prędkościami bardzo małymi w porównaniu z prędkością światła, nie wie o zależności masy od prędkości.

Doświadczenia KAUFMANN'A, za których pomocą obliczył on stosunek ładunku elektrycznego do masy drobnych cząstek, wybiegających z ciał radioaktywnych i poruszających się z prędkością bliższą do prędkości światła, wykazały wyraźną zależność masy od prędkości, jak widać z poniżej podanej tablicy:

1) Ogólny wzór siły elektromotorycznej indukcji jest następujący:

$$E = Hvl \quad \text{skąd} \quad \frac{E}{l} = Hv, \quad \text{gdzie}$$

E —siła elektromotoryczna, H — napięcie pola magnetycznego, v — prędkość, l — długość przewodnika.

Zależność pomiędzy napięciem pola elektrycznego a siłą elektromotoryczną znajduje się przez zrównanie wyrazów pracy, niezbędnej do przesunięcia ilości elektryczności q na odległość l .

$$Elq = \frac{f \cdot q \cdot l}{\epsilon}, \quad \text{gdzie:}$$

f — natężenie pola elektrycznego w jednostkach elektromagnetycznych, ϵ — stała dielektryczna dla powietrza $= \frac{1}{(3 \cdot 10^{10})^2} = \frac{1}{V^2}$ (V — prędkość światła).

$$\text{Z powyższych równań: } f = \frac{E \cdot \epsilon}{l} = Hv \epsilon = \frac{Hv}{V^2}.$$

v	$\frac{e}{m}$
$2,83 \cdot 10^{10}$	$0,62 \cdot 10^{-7}$
$2,72 \cdot 10^{10}$	$0,77 \cdot 10^{-7}$
$2,59 \cdot 10^{10}$	$0,975 \cdot 10^{-7}$
$2,48 \cdot 10^{10}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$
$2,36 \cdot 10^{10}$	$1,31 \cdot 10^{-7}$

Stosunek $\frac{e}{m}$ przy wzrastaniu V zmniejsza się, skąd należy wnosić, że przy stałym e —masa m wzrasta.

Prawo, według którego odbywa się zwiększenie się masy, pozwala odpowiedzieć na pytanie: czy masa tych drobnych naelektryzowanych cząstek jest rzeczywiście w całości elektromagnetyczną?

J. J. THOMSON znalazł liczby, wskazujące ile razy wzrasta masa cząstki naelektryzowanej przy wyżej wskazanych prędkościach względem masy przy ruchu *powolnym*; posługiwał się przytem wzorem teoretycznym, określającym wielkość masy elektromagnetycznej w zależności od prędkości cząstki. W poniżej podanej tablicy zestawione są obliczenia J. J. THOMSON'A z wynikami doświadczalnymi KAUFMANN'A

V	Stosunek	
	obliczony	spostreżony
$2,85 \cdot 10^{10}$	3,1	3,09
$2,72 \cdot 10^{10}$	2,42	2,43
$2,59 \cdot 10^{10}$	2,0	2,04
$2,48 \cdot 10^{10}$	1,66	1,83
$2,36 \cdot 10^{10}$	1,5	1,65

Zgodność obliczeń z wynikami badań doświadczalnych jest zadawalniająca. W ten sposób potwierdza się przypuszczenie, że drobne cząstki naelektryzowane (elektrony), które wysyłane są przez ciała promieniotwórcze, nie posiadają jakiegokolwiek innej masy niezależnej od prędkości, lecz tylko masę elektromagnetyczną.

Wzór dla masy elektromagnetycznej przy ruchu powolnym (w porównaniu z prędkością światła) podany jest wyżej; ma on postać następującą:

$$m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{a},$$

gdzie: m — masa, e — ładunek poruszającej się kulki, a — promień kulki.

Z tego wzoru, znając $\frac{m}{e}$ i e , można obliczyć a . Dla elektronu (t. j. jonu naelektryzowanego ujemnie), jak widzieliśmy w poprzednim rozdziale,

$$\frac{m}{e} = 10^{-8} \frac{g}{\text{kul}} = 10^{-7} \frac{g}{\text{abs. jedn. elektromagn.}}$$

ładunek zaś $e = 10^{-20}$ kul. = 10^{-21} abs. jedn. elektromagn.

Obliczając według tych danych promień kulki, otrzymamy:

$$a = 10^{-14} \text{ cm.}$$

Promień cząsteczki (molekuły) ciał podług rozważań teoretycznych wynosi 10^{-8} cm. Przy porównaniu tych wielkości widać, że elektron jest od cząsteczki bez porównania mniejszy.

W końcu należy jeszcze zwrócić uwagę na następującą charakterystyczną cechę masy elektromagnetycznej. Energia pola magnetycznego znajduje się w przestrzeni nieograniczonej, otaczającej cząstkę, a więc i siedliskiem masy elektromagnetycznej cząstki będzie także przestrzeń nieograniczona; należy jednak zwrócić uwagę na to, że ilość energii w jednostce objętości przestrzeni otaczającej wyraża się, jak

to widzieliśmy poprzednio, wzorem $\frac{F^2 v^2 \sin^2 \alpha}{8 \pi}$ ergów na cm^3

a masa elektromagnetyczna odpowiadająca 1 cm^3 przestrzeni, wynosi $\frac{F^2 \sin^2 \alpha}{4 \pi}$ gramów.

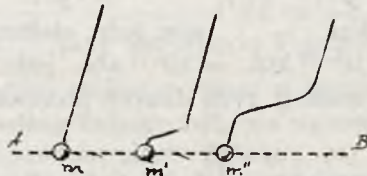
Napięcie pola elektrycznego F zmniejsza się proporcjonalnie do drugiej potęgi odległości od cząstki naelektryzowanej, masa więc odpowiadająca 1 cm^3 przestrzeni zmniejsza się w stosunku do czwartej potęgi odległości; wobec tego prawie cała masa np. elektronu zawiera się w przestrzeni znacznie mniejszej od wymiarów cząsteczki (molekuły).

Na podstawie przeprowadzonych tu rozumowań można stworzyć elektromagnetyczną teorię budowy materii.

X. Promieniowanie. W poprzednim rozdziale rozważaliśmy kulkę naelektryzowaną, poruszającą się ze stałą prędkością; obecnie zaś rozpatrzmy zjawiska, jakie zachodzą w chwili, gdy kulka staje lub w jakikolwiek sposób zmienia prędkość ruchu, t. j. gdy ruch jej posiada przyspieszenie.

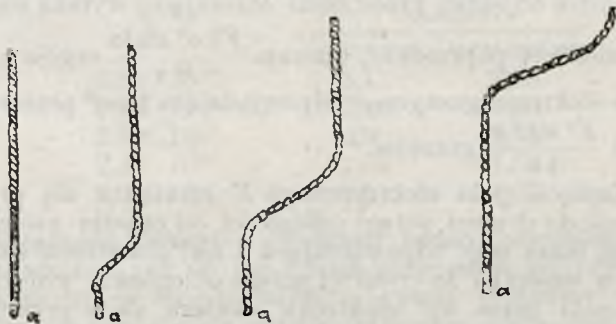
Zacniemy od rozpatrzenia wypadku pierwszego, bardziej prostego.

Gdy poruszająca się kulka naelektryzowana zaczyna bieg zwalniać, linie sił elektrycznych wykrzywają się, ponieważ działanie od kulki naelektryzowanej nie przechodzi w przestrzeń w ciągu nieskończenie małego czasu, lecz roz-



Rys. 32.

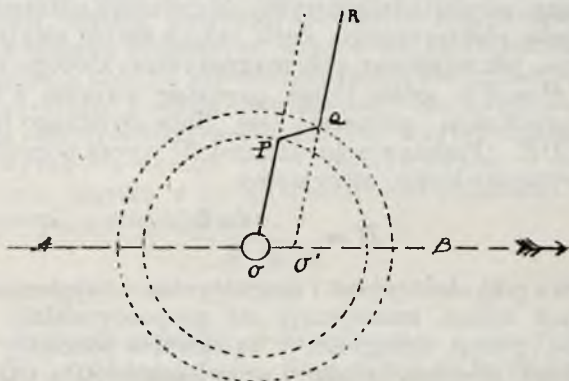
chodzi się w eterze z prędkością skończoną, mianowicie z prędkością światła $V=3 \cdot 10^{10}$ cm/sek.; kilka położenia kulki m , m' i t. d., poruszającej się po linii AB , od A do B , i zwalnającej swój bieg, wskazano na rys. 32; widoczny tu jest także kształt jednej z linii sił. Coś podobnego można spostrzedz przy zatrzymywaniu z jednego końca a (rys. 33) sznurka



Rys. 33.

ka, znajdującego się w ruchu; nie cały mianowicie sznurek zwalnia odrazu i zatrzymuje się, gdy zwalnia i zatrzymuje się dolny jego koniec; na sznurku takim otrzymuje się przegięcie podobne do przegięcia na linii sił elektrycznych; przegięcie to stopniowo posuwa się w kierunku do drugiego końca sznurka.

Rys. 34 odpowiada chwili w t sekund po zatrzymaniu się kulki. O jest punkt, w którym kulka się zatrzymała, O' — punkt, do którego kulka w tym czasie dobiegłaby, gdyby wogóle ruchu swego nie zwolniła. Ponieważ od chwili zatrzymania się kulki upłynęło t sekund, więc na długości $OP = V \cdot t$ linia sił ma postać taką, jaka odpowiada położeniu kulki w O ; dalszy zaś ciąg linii jest PQR , ponieważ, poczynając od pewnej odległości, linia zachowuje taki kierunek, jak gdyby kulka znajdowała się ciągle w ruchu ze stałą prędkością; odległość ta $OQ = V(t+t')$, gdzie $(t+t')$ jest czas, który upłynął od chwili, kiedy kulka zaczęła zwalniać. W war-



Rys. 34.

stwie między dwiema powierzchniami sferycznymi o promieniach OP i OQ znajdują się skośne części linii sił; części te wogóle są krzywe, jeżeli jednak grubość wyżej wspomnianej warstwy $\delta = OQ - OP$ jest mała, t. j. zatrzymanie się kulki nastąpiło bardzo prędko, to można przyjąć, że część linii między warstwami ma postać prostego odcinka PQ .

Siła elektryczna, a właściwie natężenie pola, działające wzdłuż PQ , daje się rozłożyć na dwie składowe: jedną T , styczną do powierzchni sferycznej, drugą R — skierowaną wzdłuż promienia. Łatwo spostrzedz, że stosunek T do R wyraża się jak następuje:

$$\frac{T}{R} = \frac{OO' \sin \theta}{\delta} = \frac{v \cdot t \cdot \sin \theta}{\delta},$$

gdzie v — prędkość ruchu kulki, θ — kąt BOP .

Składowa wzdłuż promienia będzie $R = \frac{e}{r^2}$, gdzie e — ładunek kulki, r — odległość punktu P , w którym rozważamy natężenie pola, powstałego od naładowanej elektrycznością cząstki; $r = OP = V \cdot t$.

Wobec tego

$$T = \frac{ev}{V} \cdot \frac{\sin \theta}{r \cdot \delta}.$$

Ponieważ przegięcie PQ na linii sił oddala się od O z prędkością światła, a więc z taką prędkością biegną w eterze zmiany, odpowiadające wyżej obliczonemu natężeniu stycznemu pola elektrycznego; ruch takich zmian elektrycznych wywołuje, jak wiadomo, pole magnetyczne, którego natężenie będzie $H = TV$, gdzie V jest prędkość światła; z taką bowiem prędkością poruszają się linie stycznego natężenia wzdłuż OP . Podstawiając zamiast T wyraz poprzednio dla niego wyprowadzony, otrzymamy

$$H = \frac{e \cdot v \sin \theta}{r \cdot \delta}.$$

Dwa pola elektryczne i magnetyczne o natężeniach T i H , które, jak widać, zmniejszają się proporcjonalnie *tylko* do pierwszej potęgi odległości i są zawarte pomiędzy dwiema sferycznymi powierzchniami o promieniach OP i OQ , biegną w przestrzeń otaczającą z prędkością światła. Zjawisko to jest najprostszym wypadkiem promieniowania; takiego rodzaju promieniowaniem są prawdopodobnie promienie RÖNTGENA, ponieważ, jak wiadomo, powstają pod wpływem elektronów, uderzających w ścianki rurki CROOKS'A. Pola o natężeniach T i H przedstawiają pewien zasób energii, a zatem zjawisko promieniowania jest to rozpraszanie się energii z pola, otaczającego kulkę w ruchu. Mając wyrazy natężeń pól i wiedząc, że one zawierają się między dwiema powierzchniami sferycznymi o promieniach OP i OQ , łatwo obliczyć wielkość energii, wybiegającej z tą, że tak powiem, falą eteru, korzystając z wzorów dla ilości energii pól, wypadającej na 1 cm^3 , podanych w rozdziale II-gim (por. № 4 r. b., str. 51); całkując mianowicie te wzory dla całej warstwy, otrzymamy

$$\frac{2}{3} \frac{e^2 v^2}{\delta}$$

jako wyraz całkowitej energii fali. Jak widać, ilość energii promieniowania zależy od grubości δ wyżej wspomnianej warstwy; gdy kulka zatrzymuje się prędko, to δ jest małe, gdy zaś powoli, to δ jest duże. Energia, którą traci kulka naelektryzowana, zatrzymując się, zamienia się w jednej części tylko w promieniowanie, w drugiej zaś — w ciepło; im prędzej kulka się zatrzymuje, tem więcej energii przyjmuje postać promieniowania. Przykład takiej zamiany energii mamy w rurce Crooks'a, gdzie *cząstki naelektryzowane* (elektrony) promieni katodowych, uderzając w szkło, wywołują *promienie RÖNTGEN'A* i jednocześnie *ogrzewają* ścianki rurki. Właściwe fale eteru otrzymuje się przy peryodycznie zmienym ruchu cząstek naelektryzowanych; fale te wtedy składają się z szeregu biegnących warstw pól elektrycznego i magnetycznego, z kolejno przeciwnymi sobie kierunkami natężeń.

Korzystając z wzoru poprzedniego dla natężenia stycznego pola elektrycznego i natężenia pola magnetycznego, znajdziemy wyraz dla energii wypromieniowywanej w jednostkę czasu przez cząstkę w ruchu o prędkości zmiennej. Wyraz ten ma postać następującą:

$$\frac{2}{3} \frac{e^2 f^2}{V}$$

gdzie e — ładunek cząstki naelektryzowanej, f — przyspieszenie cząstki, V — prędkość światła. Stąd widać, że promieniowanie zawsze się zdarza, kiedy jest przyspieszenie, czyli zmienia się wielkość albo kierunek prędkości; a więc naprzykład cząstka naelektryzowana, poruszająca się ze stałą prędkością po obwodzie koła, będzie wypromieniowywała ilość energii na sekundę, wyrażającą się wzorem następującym:

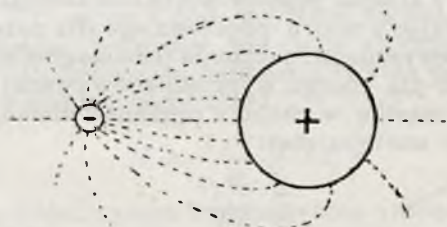
$$\frac{2}{3} \frac{e^2 \cdot v^4}{V a^2}$$

Albowiem $\frac{v^2}{a} = f$ jest przyspieszenie ruchu kołowego, jeżeli v oznacza prędkość ruchu cząstki, a — promień koła, po którym porusza się cząstka.

Na szczególną uwagę zasługuje to, że ilość energii wypromieniowanej w jednostkę czasu zależy od czwartej potęgi prędkości, a więc energia wypromieniowywana wzrasta znacznie prędzej niż energia kinetyczna. Jako wynik powyższego rozważania wypada, że, ponieważ promieniowanie przez eter

uważane jest za rozchodzenie się zaburzeń elektromagnetycznych w tym ośrodku, więc źródłem takiego promieniowania mogą być cząstki naelektryzowane w ruchu nierównomiernym.

XI. Budowa atomów. Dosyć szczegółowe opracowanie elektromagnetycznej teorii materii znajdujemy w książce J. J. THOMSON'A „Electricity and Matter“; korzystając z niej, postaramy się przedstawić istotę poglądów tego uczonego. Według J. J. THOMSON'A za najprostsze składniki czyli najpierwotniejsze elementy, z których powstały atomy rozmaitych ciał w przyrodzie, należy uważać t. zw. „dwojaczki elektryczne“ (a. electrical doublet); wszystkie one są jednokowe i składają się z dwóch głównych ładunków elektrycznych, ujemnego i dodatniego, przytem ładunek ujemny zaj-



Rys. 35.

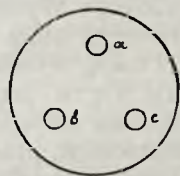
muje objętość daleko mniejszą od ładunku dodatniego (rys. 35); oba ładunki są połączone liniami sił elektrycznych, wyobrażającymi szczególny stan eteru wokoło tych ładunków. Przypominając sobie własności jonów i elektronów, łatwo się domysleć, że ładunek ujemny jest to właśnie *elektron*¹⁾. Masa tych dwojaczek elektrycznych jest elektromagnetyczna i zależy wyłącznie od ładunku i wymiarów elektronu, t. j. składnika ujemnego, nie zależy zaś prawie zupełnie od względnego położenia części dodatniej, a to dlatego, że najbardziej skupione są linie w pobliżu elektronu, a więc tam jest największe natężenie pola i tylko znikomo mała część masy elektromagnetycznej może się znajdować w nieznacznym nawet już oddaleniu od elektronu. (Masa elektronu, jak wiadomo z rozdziału VIII, wynosi 10^{-28} g, średnica 10^{-14} cm).

¹⁾ Według terminologii J. J. Thomson'a: „corpuscle“.

Słowem, główną częścią składową dwojaczków elektrycznych jest elektron; najbliższe jego otoczenie przedstawia pewną stałą masę, od zewnętrznych wpływów niezależną; część dodatnia zaś istnieje, że tak powiem, tylko po to, aby miały gdzie wchodzić linie sił elektrycznych, wybiegające z elektronu. Z takich to dwojaczków elektrycznych tworzą się atomy przez połączenie w rozmaitej ilości: gęstsze (cięższe) atomy zawierają tych składników więcej, lżejsze – mniej.

Przypuszczamy, że początkowo dwojaczki elektryczne znajdowały się w bardzo prędkim ruchu, co utrudniało kojarzenie się ich przez przyciąganie odpowiednimi stronami. W każdym jednak razie oddziaływały one na siebie, wywołując zmiany prędkości ruchu, przez co wypromieniowywały w nieograniczoną przestrzeń część swojej energii kinetycznej. Po pewnym czasie energia kinetyczna zmniejszyła się o tyle, że poczęły się tworzyć pary dwojaczków, następnie w podobny sposób z tych par powstawały układy coraz bardziej złożone.

Budowę atomu, składającego się z trzech dwojaczków można sobie wyobrażać w ten sposób (rys. 36): części dodatnie dwojaczków utworzyły jedną dużą kulę, wypełnioną w całej swojej objętości elektrycznością dodatnią, pozatem wewnątrz tej kuli znajdują się drobne części ujemne – elektrony *a*, *b* i *c*. Jeżeli elektrony te są nieruchome, to układają się w taki sposób, aby siły odpychające je od siebie równoważyły się z siłą przyciągającą elektrony do środka kuli i pochodzącą od ładunku dodatniego; w tych



Rys. 36.

warunkach elektrony ustawiają się w punktach, stanowiących wierzchołki trójkąta równobocznego. Ponieważ jednak elektrony muszą być w ruchu, jeżeli atom ma posiadać wszystkie własności materii, to, gdy przyjmiemy, że ruch ten jest obrotowy naokoło środka kuli, położenie równowagi elektronów wypadnie dalej od środka; przy ruchu bowiem kołowym musi istnieć odpowiednia siła dośrodkowa, która powstanie, przy oddalaniu się elektronów, z nadwyżki siły przyciągającej ładunku dodatniego nad siłą odpychającą elektrony jedne od drugich; jest to możliwe, gdyż siła przyciągająca zwiększa się proporcjonalnie do pierwszej potęgi odległości elektronów od środka, a siła odpychania się wzajemnego dwóch elektronów

zmniejsza się proporcjonalnie do drugiej potęgi odległości pomiędzy nimi. Gdy prędkość ruchu obrotowego elektronów znacznie wzrastać, będą one ciągle się oddalały od środka kuli, aż wyjdą na jej powierzchnię; tutaj już siła przyciągająca kuli zmienia się *odwrotnie proporcjonalnie* do drugiej potęgi odległości od środka i przez to wkrótce potem, jak drogi kołowe jonów znajdują się nazewnątrz kuli, siła przyciągająca nie będzie w stanie utrzymać ich w ruchu kołowym—atom się rozpadnie; energię kinetyczną elektronów w atomie można uważać jako charakteryzującą, że tak powiem, temperaturę elektronową atomu, a więc gdy temperatura elektronowa przechodzi pewne granice, to układ atomu przestaje być stałym.

Poza temperaturą elektronową atomu należy rozważać jeszcze temperaturę cząsteczkową, która określa się ilością energii kinetycznej ruchu atomu jako jednolitej całości. Ta druga temperatura prawdopodobnie nie ma ścisłego związku z pierwszą.

Przy powstawaniu atomów coraz bardziej złożonych pierwszorzędne znaczenie ma temperatura elektronowa składników. Wyobraźmy sobie, że dwa atomy ciał *A* i *B* mają utworzyć atom trzeciego ciała *C* i przypuścmy, że atomy *A* i *B* mają wysoką temperaturę elektronową (elektrony znajdują się w prędkim ruchu). Przy zetknięciu się następuje zamiana energii kinetycznej atomów na energię kinetyczną elektronów, przez co temperatura elektronowa podwyższa się i łatwo może osiągnąć tej granicy, przy której atomy rozpadają się a elektrony oddzielają się; gdy to nastąpi, równowaga ładunków elektrycznych zostaje naruszona, pozostałe części atomów mają przeważający ładunek dodatni i przez to odpychają się; słowem, gdy temperatura elektronowa atomów jest *wysoką*, połączenie tych ostatnich nastąpić *nie może*.

Energia kinetyczna elektronów ciągle się jednak zmniejsza przez promieniowanie; ilość energii wypromieniowywanej przez atom zależy od ilości elektronów w ruchu, od ich układu i rodzaju ruchów. Naprzykład łatwo jest stwierdzić zapomocą obliczenia, że energia wypromieniowywana z każdego elektronu znacznie się zmniejsza wraz z ilością elektronów, jeżeli wszystkie elektrony krążą po jednym obwodzie z jednakową prędkością i są rozłożone równomiernie.

Liczby podane w tablicy poniższej najwyraźniej to wskazują:

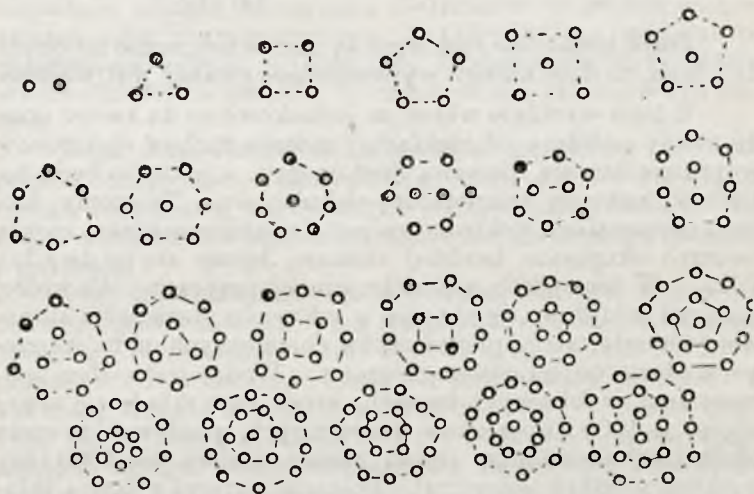
Ilość elektronów	Energia wypromieniowywana przy $v = 3 \cdot 10^{-6}$
1	1
2	$9,6 \cdot 10^{-4}$
3	$4,6 \cdot 10^{-7}$
4	$1,7 \cdot 10^{-10}$
5	$5,6 \cdot 10^{-13}$
6	$1,6 \cdot 10^{-17}$

Jeżeli elektrony rozłożone są nierównomiernie na obwodzie koła, to ilość energii wypromieniowywanej jest większa.

Z tego wyraźnie widać, że jednakowe co do swego składu atomy zależnie od rozkładu i rodzaju ruchów elektronów wypromieniowują różną ilość energii, a przez to będą posiadały różną temperaturę elektronową. Te atomy, których temperatura elektronowa jest dostatecznie niska, zaczęły tworzyć skupienia bardziej złożone, łącząc się po dwa lub kilka. W ten sposób można zrozumieć przyczynę, dla której materya znajduje się obecnie w tak wielu postaciach, stanowiących cały szereg pierwiastków chemicznych od najłżejszego wodoru do najcięższego uranu. Wodór jest ciałem najprostszym w obecnych czasach, atom jego składa się mniej więcej z 1000 dwojaczeków pierwotnych, ponieważ zawiera około 1000 elektronów (masa atomu wodoru jest 1000 razy większa od masy elektronu). Postacie materyi z ilością składników pierwotnych mniejszą niż 1000 zniknęły już zupełnie z dostępnego nam wszechświata.

Przemiana atomów materyi może odbywać się tylko bardzo wolno, ponieważ przy tworzeniu się nowego atomu bardzo znacznie wzrasta temperatura elektronowa i bardzo długiego czasu potrzeba, aby przez promieniowanie spadła ona o tyle, żeby mogło powstać nowe połączenie, t. j. atom nowego pierwiastka. Nie należy także zapominać, że obniżeniu się temperatury elektronowej stoi na przeszkodzie promieniowanie, pochłanianie przez dany atom i pochodzące od innych; w tym wypadku elektrony otrzymują energię kinetyczną z energii promieni pod działaniem sił elektrycznych i magnetycznych w falach eteru. Nie można pominąć jeszcze jednego prostego obliczenia dla uprzytomnienia sobie, jaka ilość energii może się wywiązać przy tworzeniu się nowego atomu, lub jaką należy wprowadzić, aby atom rozłożył.

Rozważmy atom zawierający n elektronów, przy czym e będzie ładunek każdego elektronu, a — promień kuli wypełnionej elektrycznością dodatnią w ilości ne (rys. 37); rozkład atomu będziemy sobie wyobrażali w ten sposób, że elektrony kolejno usuwają się z niego na znaczną odległość, czyli teoretycznie na nieskończenie wielką a praktycznie na względnie małą odległość, ponieważ siła działania atomu prędko się zmniejsza z odległością (zależy od kwadratu odległości).



Rys. 37.

Praca na przesuwanie elektronów wewnątrz kuli o promieniu a jest wogóle nieznaczna; wobec tego obliczymy tylko tę pracę, jaka jest potrzebna do przeniesienia elektronu z powierzchni wyżej wspomnianej kuli do nieskończoności. Biorąc pod uwagę, że siła zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do odległości elektronu od środka kuli i że ładunek elektryczny kuli równa się jej ładunkowi dodatniemu ne , bez ładunku $(n-1)e$, pozostałych jeszcze wewnątrz kuli elektronów ujemnych, pracę potrzebną dla usunięcia pierwszego elektronu otrzymamy w postaci $\frac{e^2}{a}$. Dla drugiego elektronu wyraz będzie inny, bo ładunek kuli, jaki należy brać pod uwagę, będzie:

$$ne - (n - 2)e = 2e.$$

Wielkość pracy przedstawi się w postaci $\frac{2e^2}{a}$.

Rozumując tak w dalszym ciągu, otrzymamy całą pracę dla usunięcia n elektronów w postaci:

$$\frac{e^2}{a} (1 + 2 + 3 + \dots + n) = \frac{e^2}{a} \frac{n(n+1)}{2}.$$

Podług tego wzoru praca niezbędna do usunięcia elektronów z atomu wodoru wypadnie następująca: Jak wiadomo z rozdziału VIII, $e = 4,69 \cdot 10^{-10}$ absolut. jednostek elektrost., teoria kinetyczna gazów podaje mniej więcej $a = 10^{-8}$ cm, $n = 1000$. Wstawiając te liczby do ostatniego wzoru, otrzymamy:

$$\frac{e^2}{a} \frac{n(n+1)}{2} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ ergów.}$$

Ponieważ masa atomu wodoru wynosi około 10^{-25} g, gram wodoru zawiera 10^{25} atomów, a zatem ilość energii w 1 g wodoru będzie $1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{25} = 1,1 \cdot 10^{20}$ ergów = $1,12 \cdot 10^{12}$ kJm = $4,16 \cdot 10^6$ konio-godzin (4,16 milionów konio-godzin).

Z podanych tu liczb wyraźnie widać, jak *wielki* zapas energii zawiera się w atomie materii nawet najprostszego pierwiastka wodoru; inne ciała gęstsze mają w atomie więcej elektronów niż wódór, a ponieważ cała energia atomu jest proporcjonalna do drugiej potęgi ilości elektronów, więc energia w atomach tych ciał będzie jeszcze znacznie większa.

XII. Wyjaśnienie niektórych własności atomów na zasadzie teorii elektromagnetycznej ich budowy. Układ peryodyczny pierwiastków. Według zasadniczych własności, pierwiastki chemiczne, jak wiadomo, dają się ugrupować w ciągły szereg o stopniowo wzrastających ciężarach atomowych; w takim szeregu własności pierwiastków powtarzają się peryodycznie. Tę prawidłowość można wyjaśnić powtarzającą się odpowiednio postacią układu elektronów w atomie; dla stworzenia sobie pewnego wyobrażenia o tem, w jaki sposób może taka peryodyczność w zmianie ugrupowania elektronów w atomie nastąpić, nie zawadzi zwrócić uwagę na wyniki ciekawych doświadczeń MAYERA z magnesami. MAYER umieszczał magnesy pionowo na małych kawałkach korka, pływających po wodzie; wszystkie magnesy były skierowane do góry je-

dnakowymi biegunami, a więc odpychały się od siebie podobnie jak elektrony w atomie. Nad tymi magnesami umieszczano w środku magnes nieruchomy, zwrócony na dół biegunem, przeciwnym biegunom magnesów pływających. Ten magnes nieruchomy oczywiście przyciągał do siebie magnesy, podobnie jak dodatni ładunek przyciąga elektrony w atomie.

W takich warunkach magnesy pływające ustawiały się w grupy zrównoważone, tworzące rozmaite figury geometryczne, zależnie od ilości magnesów; kilka takich figur pokazano na rys. 37. Najbardziej charakterystyczne cechy figur są następujące: Przy tej samej ilości magnesów grupy zrównoważone mogą posiadać kilka postaci, np. przy 5-ciu magnesach; przy zwiększaniu się ilości magnesów w pewnym miejscu następuje zasadnicza zmiana układów; z jednego pierścienia robi się pierścień i grupa w środku, np. przy przejściu od 5-ciu do 6-ciu, dwa pierścienie i grupa w środku przy przejściu od 14 do 15-tu magnesów; następnie charakter układu peryodycznie się powtarza, — np. układ trójkątny spotykamy przy trzech magnesach i przy 10-ciu.

W atomach, gdzie ilość elektronów jest bez porównania większa od rozważanej liczby magnesów, oczywiście różnorodność układów może być daleko większa.

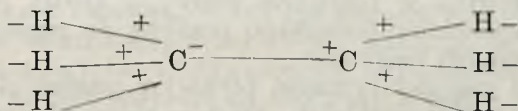
Własności elektrochemiczne pierwiastków. Ważne znaczenie w chemii i fizyce mają własności elektrochemiczne pierwiastków. Pod tym względem pierwiastki dzielą się na dodatnie i ujemne. Dodatnie są to pierwiastki takie, które przy elektrolizie stają się jonami dodatnimi, ujemne zaś otrzymują ładunki ujemne i stają się jonami ujemnymi.

Według teorii elektromagnetycznej budowy atomów, atomy rozmaitych pierwiastków mają elektrony o temperaturze elektronowej rozmaitej wysokości. Takie atomy, w których elektrony znajdują się w bardzo szybkim ruchu, łatwo mogą stracić jeden lub więcej elektronów; gdy atom traci elektron, staje się naelektryzowanym dodatnio, ponieważ ładunek tego znaku w nim przeważa; wielkość ładunku elektronu wynosi 10^{-20} kulonów, taki więc ładunek dodatni posiada atom; jeżeli dwa elektrony opuściły atom, to jego ładunek dodatni będzie $2 \cdot 10^{-20}$ kulonów; w pierwszym wy-

padku powiemy, że pierwiastek jest jednowartościowy, w drugim, że on jest dwuwartościowy i t. d.

Elektrony innych atomów poruszają się tak wolno, że nie są w stanie przeszkodzić ładunkowi dodatniemu atomu w pochyceniu przebiegającego w pobliżu wolnego elektronu; w ten sposób zdobywa atom ładunek ujemny; gdy pochyci jeden elektron, ma 10^{-20} kulonów, gdy pochyci dwa elektrony, będzie posiadał $2 \cdot 10^{-20}$ kulonów i t. d., stosownie do okoliczności. W ten sposób z jednej strony łatwo wytłumaczyć wartościowość pierwiastków, z drugiej zaś strony zmienność tej wartościowości pod wpływem okoliczności ubocznych.

Powinowactwo chemiczne. Łączenie się pierwiastków w ciała złożone zwykle tłumaczy się w chemii jako wynik powinowactwa chemicznego. Na zasadzie rozważanej teorii zamiast powinowactwa należy przyjąć działanie sił elektrycznych. Przy rozważanem wyobrażeniu o budowie atomów nie ma jednak potrzeby przypuszczać, że pewne atomy mogą być zawsze tylko ujemne, inne zaś tylko dodatnie, zależy to bowiem w znacznym stopniu od zewnętrznych warunków, które mogą sprzyjać oddzieleniu się elektronu od atomu danego ciała, lub też mogą spowodować związanie się atomu z elektronem dodatkowym. Wzory strukturalne nie tracą ze swej mocy umysławiającej, przeciwnie, nabierają one jeszcze większego znaczenia.



Rozważając np. wzór strukturalny związku C_2H_6 , możemy uważać atomy wodoru za ujemne, linie proste możemy sobie wyobrażać jako linie sił elektrycznych; w takim razie, końce linii idących od wodoru muszą iść do ładunków dodatnich; wobec tego każdy z atomów węgla ma co najmniej trzy ładunki dodatnie, — pozatem jest jeszcze linia sił łącząca atomy węgla; ta linia musi także prowadzić od ładunku ujemnego do dodatniego, więc np. na lewym atomie jest ładunek ujemny, a na prawym dodatni. Przy takim poglądzie na budowę chemiczną rozważanego ciała, atomy węgla, które przy zwykłym poglądzie czysto chemicznym były zupełnie jednakowe, tutaj zdradzają wyraźną różnicę: atom lewy ma

trzy dodatnie ładunki i jeden ujemny, prawy zaś cztery dodatnie.

Zjawiska elektryczne. Przewodnictwo elektryczne ciał stałych, ciekłych i gazowych daje się przedstawić w następujący sposób. Gdy połączymy końce przewodnika ze źródłem prądu, to wzdłuż tego ostatniego idą linie sił elektrycznych, pod których działaniem elektrony atomów rozpoczynają wędrówkę wokoło obwodu zamkniętego: elektrony przechodzą od atomu jednego do przyległego, od tego do następnego i t. d. według porównania LODGE'A tak, jak kulek z wodą przy gaszeniu pożaru. Przy takiej wędrówce elektrony wprawiają w ruch wahadłowy atomy, wywołując w ten sposób zjawisko ogrzewania się przewodnika. W izolatorach przechodzenie elektronów od atomu do atomu może się odbywać tylko gwałtownie. W cieczach, a właściwie w roztworach, ładunki elektryczne poruszają się tylko razem z atomami. Tak np. pewna ilość cząsteczek kwasu siarczanego przechodząc do roztworu wodnego rozszczepia się na jony H_2 i SO_4 ; przy takim dzieleniu się ze względu na znaczną wysokość temperatury elektronowej wodoru, z każdego atomu wodoru oddziela się po jednym elektronie, H_2 staje się jonem dodatnio naelektryzowanym, elektrony wodoru przyłączają się do cząsteczki SO_4 i tworzą z tą cząsteczką jon ujemny. Gdy przepuścimy prąd przez taki roztwór, wywołując w nim siły pola elektrycznego (od pogrążonych w roztworze biegunów źródła prądu), to jony z odpowiednimi ładunkami popłyną do przeciwnie naelektryzowanych biegunów.

Przez gaz elektryczność płynie w postaci elektronów ujemnych i jonów dodatnich, które są atomami pozbawionymi pewnej liczby elektronów. Prąd może przepływać tylko wtedy, gdy atomy rozszczepią się na takie dwie części; rozdział atomów następuje albo pod wpływem dostatecznie wielkiej siły elektrycznej (czyli napięcia między płytkami, rys. 21), lub też pod wpływem rozmaitych zaburzeń eteru: promieni RÖNTGEN'A, fal nadfioletowych i t. p.

Na zasadzie teorii materii elektromagnetycznej łatwo jest wytłumaczyć także cały szereg innych zjawisk. Naprzykład wypływanie ładunku ujemnego z ciał silnie ogrzanych tłumaczy się gwałtownym ruchem elektronów, których atomy nie mogą utrzymać.

Elektryzacja przez tarcie, uderzenie i t. p. tłumaczy się łatwością przechodzenia elektronów z jednego ciała do dru-

giego. Nawet takie proste zjawisko jak rozpryskiwanie się kropelek wody spadających z pewnej wysokości wywołuje oddzielenie się elektronów od atomów, a więc elektryzację.

Promieniowanie. Przechodząc teraz do promieniowania ciał, przedewszystkiem przypomnijmy sobie, co było powiedziane o promieniowaniu w rozdziale X-tym. Każde przyspieszenie cząstki naelektryzowanej, a więc np. elektronu, wywołuje zaburzenia elektromagnetyczne w eterze, rozchodzące się w przestrzeń; gdy zmiana prędkości elektronu jest peryodyczna, to i zaburzenia elektromagnetyczne w eterze powtarzają się, t. j. powstają fale elektromagnetyczne. Na zasadzie tego promieniowanie ciał należy uważać jako wynik przyspieszonych peryodycznych ruchów elektronów w atomach, w najprostszym wypadku ruchu wahadłowego wzdłuż jednej linii prostej lub też ruchu kołowego. Prędkość takich ruchów określa długość fal, powstających w eterze; ruch przędszy wywołuje w eterze zmiany częstsze, ruch zaś wolniejszy – rzadsze; w pierwszym wypadku fale są dłuższe, w drugim krótsze. Z badań widmowych znane są dwa najbardziej charakterystyczne rodzaje widm: widma prążkowane gazów i widma ciągłe ciał stałych; pierwsze świadczą o obecności fal tylko kilku określonych długości, drugie zaś wskazują na obecność fal wszelkiej długości w pewnych granicach. Wyjaśnić to zjawisko na podstawie powyższej teorii można tem, że w atomach gazowych mniej jest warunków, wpływających na ruchy elektronów, przez co tam znajdują się elektrony, poruszające się tylko z kilku pewnymi okresami wahań, w ciałach zaś stałych znajdują się elektrony w takich warunkach, że muszą wykonywać ruchy o okresach najrozmaitszych.

Najbardziej przekonującym dowodem właściwości przedstawionego tu poglądu na promieniowanie jest odkrycie ZEEMANN'A, polegające na stwierdzeniu faktu, że pole magnetyczne zmienia własności fal świetlnych, przez oddziaływanie na źródło światła. W najprostszej postaci przedstawia się zjawisko ZEEMANN'A dla światła sodowego; gdy umieścimy źródło tego światła pomiędzy biegunami silnego elektromagnesu, to w takich warunkach łatwo się przekonać za pomocą przyrządu dostatecznie silnie rozszczepiającego promienie, że żółta linia *D* widma pod wpływem pola magnetycznego dzieli się na dwie części: jedną o fali krótszej, drugą o fali dłuższej od pierwotnej linii *D*, t. j. że poprzednio jedno-

rodny promień żółty zmienia charakter fali, która z prostej staje się złożoną.

Rozważając rodzaj fal elektromagnetycznych, wysyłanych przez elektron w ruchu wahadłowym wzdłuż prostej linii, łatwo na zasadzie teoretycznych rozumowań przekonać się, że pole magnetyczne, działające na elektron w ruchu, podobnie jak na prąd elektryczny, zmienia postać drogi elektronu, z powodu czego fale wywołane przez ten elektron tracą jednorodność.

Badając zjawisko ZEEMANN'A, można także oznaczyć stosunek masy do ładunku elektrycznego w cząstkach, wywołujących fale elektromagnetyczne promieniowania; przekonano się, że ten stosunek wynosi tyleż co w elektronie, t. j. 10^{-7} ; pozatem LARMOR obliczył teoretycznie, że w razie, gdyby cały atom z ładunkiem elektrycznym wywoływał fale elektromagnetyczne przez ruchy wahadłowe, to ze względu na znaczną masę atomu nie można byłoby się przekonać doświadczalnie o działaniu pola magnetycznego na źródło światła tak, jak to zrobił ZEEMANN. A więc źródłem wszelkiego promieniowania ciał są elektrony, poruszające się niezależnie od atomów.

Zwróćmy jeszcze uwagę na ciekawe zjawisko, dające się spostrzedz przy pochłanianiu promieniowania przez ciała i polegające na tem, że ciało pochłaniające fale eteru doznaje od tych fal działania odpychającego. Pochłanianie promieni należy rozumieć jako wprawianie w odpowiedni ruch elektronów w atomach przez siły elektryczne i magnetyczne fal elektromagnetycznych, słowem coś w rodzaju prądów indukcyjnych. Prawo LENZ'A względem indukcji prądów orzeka, że prąd indukowany stara się zawsze oddalić od indukującego, czyli prąd indukujący odpycha prąd indukowany; na zasadzie tego samego prawa fale elektromagnetyczne uderzając o ciało, wzbudzają coś w rodzaju prądów indukcyjnych i odpychają je.

Zjawisko to przewidział już MAXWELL na zasadzie rozważań teoretycznych, potem ciśnienie fal elektromagnetycznych zmierzono doświadczalnie, a CROOKS zbudował wiatraczek zwany radiometrem, w którym kółko ze skrzydełkami obraca się w przestrzeni możliwie pozbawionej powietrza pod działaniem różnicy ciśnień fal eteru na skrzydełka z jednej strony zaczernione sadzą, z drugiej błyszczące.

PAYNTING niedawno obliczył, że dwie kulki o gęstości równej jednostce i o średnicy około 39 *cm*, przy temperaturze 27° C., zabezpieczone od postronnego promieniowania, będą się odpychały pod wpływem ciśnienia promieniowań własnych, ponieważ ta siła przewyższy działanie siły ciężenia powszechnego.

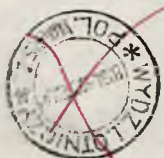
Promieniotwórczość. Na zakończenie pozostaje jeszcze zwrócić uwagę na zjawisko promieniotwórczości niektórych ciał, odkryte przez BECQUEREL'A w r. 1896, a opracowane szczegółowo przez wielu innych badaczy angielskich i francuskich. Dosyć szczegółowy opis własności ciał promieniotwórczych znajduje się w numerach 7, 8, 12, 14, 16 i 18 Przeglądu Technicznego z r. 1904, można więc uważać przedmiot ten za znany, przytoczę zatem tylko kilka wniosków, jakie można wyciągnąć, zestawiając zjawiska promieniotwórczości z teorią elektromagnetyczną materii. Ciała radyoaktywne, jak wiadomo, wydzielają t. zw. emanację; otóż ta emanacja jest to wynik rozkładu atomów ciała radyoaktywnego i ona dopiero już wysyła promienie α , β i γ , z których β — są to elektrony zwykłe, α zaś — pozostałość atomów po oddzieleniu się pewnej liczby elektronów, a promienie γ — to zwykłe fale elektromagnetyczne i zaburzenia eteru, stanowiące promienie RÖNTGEN'A.

Energia, którą posiadają te wszystkie promienie, oczywiście przede wszystkim ma swoje źródło w dzielących się atomach; o ilości energii, która może się wywiązać przy rozkładzie atomu, mamy wyobrażenie z obliczeń poprzednich i widzimy, że może ona starczyć na bardzo długo, gdy jest wydatkowana tak powoli, jak to czynią ciała radyoaktywne.

Zestawiając wyniki badania ciał radyoaktywnych z tem wszystkim co było powiedziane w rozdziale XI o budowie atomu, należy przyjść do wniosku, że przy powstawaniu pierwiastków przez łączenie się w grupy coraz cięższe, są chwile takie, kiedy powstanie nowego pierwiastku może się odbyć tylko przy znacznej zmianie postaci układu elektronów; w takim wypadku wywiązuje się wielka ilość energii, która udziela się elektronom i prowadzi do częściowego rozkładu nowo powstającego ciała; jeżeli cząstki, wybiegające w przestrzeń, są elektrony i pozostałe części atomów ciała, to ten proces rozkładu ustaje bardzo prędko (np. w emanacji toru); gdy jednak ciało wydziela ze swych atomów atomy ciał in-

nych, które następnie, dzieląc się dalej, wywołują zjawiska radioaktywne, to pierwsze ciało zachowuje tę własność przez czas długi.

W ostatnich czasach, jak można było się spodziewać, badania stwierdziły, że w słabszym lub silniejszym stopniu wiele ciał przyrody posiada własności promieniotwórcze.



O M Y Ł K I D R U K U .

<i>Str.</i>	<i>Wiersz</i>	<i>Wydrukowano</i>	<i>Powinno być</i>
2	23 z dołu	posiadają	posiada
25	6 z góry	czyli $3 \cdot 10^{-9}$	czyli $3 \cdot 10^9$
39	5 z góry	$a = \frac{m V}{H \cdot e}$	$a = \frac{m v}{H e}$
43	13 z góry	oznaczenie	związek
49	17 z góry	bliższą	bliżką
52	5 z góry	przechodzi	rozchodzi się
60	3 z góry	rys. 37	rys. 36
64	7 z dołu	materyi elektro- magnetycznej	elektromagnetycz- nej materyi
