

OKŁADKA TYMCZASOWA

ZESZYT PIERWSZY

NAUKA FIZYKI

PODRĘCZNIK PRZEZNACZONY DO UŻYTKU
UCZNIÓW KLAS WYŻSZYCH SZKÓŁ ŚREDNICH

PRZEZ

DRA WŁADYSŁAWA NATANSONA

i

DRA KONSTANTEGO ZAKRZEWSKIEGO,
PROFESORÓW UNIwersYTETU JAGIELLOŃSKIEGO

TOM III

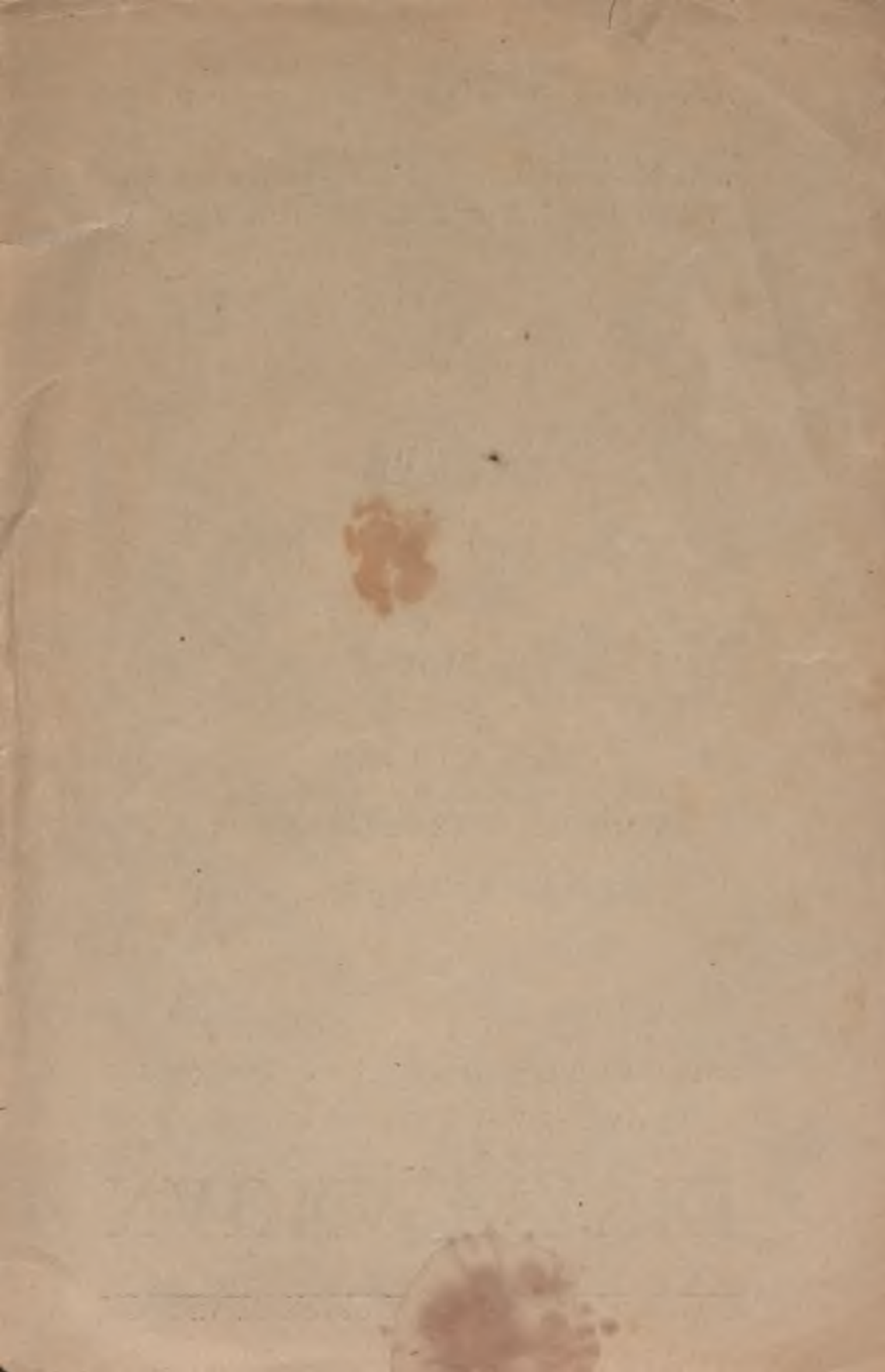


Janek

NAKŁAD GEBETHNERA I WOLFFA

WARSZAWA-KRAKÓW-LUBLIN-ŁÓDŹ-POZNAŃ-WILNO-ZAKOPANE

*Zeszyt drugi tomu III-go, zamykający całość książki,
ukaze się w roku 1925-ym.*



NAUKA FIZYKI

TOM III

ZESZYT PIERWSZY

NAKŁAD GEBETHNERA I WOLFFA



WARSZAWA—KRAKÓW—LUBLIN—ŁÓDŹ—POZNAŃ—WILNO—ZAKOPANE

DRUKARNIA UNIwersYTETU JAGIELLOŃSKIEGO POD ZARZĄDEM J. FILIPOWSKIEGO

NAUKA FIZYKI

PODRĘCZNIK PRZEZNACZONY DO UŻYTKU
UCZNIÓW KLAS WYŻSZYCH SZKÓŁ ŚREDNICH

PRZEZ

DRA WŁADYSŁAWA NATANSONA
i
DRA KONSTANTEGO ZAKRZEWSKIEGO,
PROFESORÓW UNIWERSYTETU JAGIELLOŃSKIEGO

TOM III
ZESZYT PIERWSZY



NAKŁAD GEBETHNERA I WOLFFA
WARSZAWA—KRAKÓW—LUBLIN—ŁÓDŹ—POZNAŃ—WILNO—ZAKOPANE

D 49/94



P 6502. *Museum*

SPIS RZECZY ZESZYTU I-go TOMU III-go.

ROZDZIAŁ PIERWSZY.

Pole elektryczne statyczne.

§§	Str.
1. Przedmiot trzeciego tomu tej książki	1
2. Elektryzowanie ciał; siły elektryczne	3
3. Dwa rodzaje naelektryzowania	4
4. O elektrycznych ładunkach	5
5. Przewodniki elektryczne; izolatory	6
6. Indukcja elektrostatyczna	8
7. O maszynach elektrycznych	10
8. O siedzibie ładunków ciał przewodzących	12
9. Równowaga ładunku na powierzchni przewodnika	14
10. Gęstość powierzchniowego ładunku; ładunek ostrza	15
11. Iskra elektryczna; błyskawica; piorunochrony	17
12. Kondensatory; butelka lejdejska	18
13. Ilościowe określenie elektrycznego ładunku	21
14. Wektor elektryczny	22
15. Prawo Coulomba	23
16. Wpływ ośrodka; stała dielektryczna	26
17. Elektrostatyczna jednostka ładunku	27
18. Linje pola elektrycznego	29
19. Twierdzenie Gaussa	31
20. Wiązki pola elektrycznego	33
21. Pole elektrostatyczne jest zachowawcze	36
22. Potencjał przewodnika względem ziemi	38
23. Elektrostatyczna jednostka potencjału	40
24. Od czego zależą wskazania elektroskopu	41
25. Różnica potencjałów dwóch przewodników	42
26. Potencjał w dowolnym punkcie pola	43
27. Powierzchnie ekwipotencjalne	45
28. Pojemność; jednostka pojemności	46
29. Pojemność płaskiego kondensatora	47
30. Elektrometr bezwzględny Kelvina	48
31. Energia elektryczna naładowanego przewodnika	50
32. Wpływ dielektryka na pojemność kondensatora	52

ROZDZIAŁ DRUGI

Prąd elektryczny.

§§	Str.
33. Zjawisko prądu elektrycznego	54
34. Natężenie i kierunek prądu	55
35. Wzdłuż drogi prądu potencjał opada	57
36. Jednostka natężenia prądu	59
37. Praca wydawana na wytwarzanie prądu; jednostka tej pracy	59
38. Ogniwo; siła elektromotoryczna ogniwa	60
39. Prawo Volty	63
40. Typy ogniw; składanie bateryj	66
41. Zjawisko elektrolizy;iony	68
42. Elektrony i jądra dodatnie atomów; obraz elektrolizy	70
43. Faradaya pierwsze prawo elektrolizy	72
44. Drugie prawo elektrolizy	74
45. Wartość niektórych zasadniczych stałych	76

ROZDZIAŁ TRZECI.

Pole magnetyczne statyczne.

46. Zjawiska magnetyczne	79
47. Magnesy naturalne i sztuczne; bieguny magnesu	80
48. Dwa rodzaje biegunów; igła magnesowa	80
49. Namagnesowanie indukowane	81
50. Jednostajnie namagnesowany magnes linjowy	82
51. Wzajemne działanie magnetycznych biegunów	82
52. Prawo Coulomba	85
53. Jednostka ilości magnetyzmu	87
54. Ilości magnetyzmu zawarte w biegunach magnesu	88
55. Budowa magnesu	89
56. Wektor magnetyczny	91
57. Linje pola magnetycznego	92
58. Wiązki pola magnetycznego	94
59. Żelazo w polu magnetycznem	95
60. Pole magnetyczne ziemskie	97

ROZDZIAŁ CZWARTY.

Pole magnetyczne prądu.

61. Odkrycie Oersteda	103
62. Magnetyczne pole towarzyszące prostoliniowemu prądowi	104
63. Magnetyczne pole towarzyszące kołowemu prądowi	106
64. Związek pomiędzy elektrycznymi i magnetycznymi pojęciami	109
65. Układ jednostek elektromagnetycznych	111
66. Układ jednostek praktycznych	114
67. Busola stycznych; galwanometry	116

§§	Str.
68. Opór elektryczny	118
69. Solenoidy; ich pola magnetyczne	120
70. Elektromagnes; pojęcie magnetycznej indukcji	122
71. Działanie obcego pola magnetycznego na obwód prądu	126
72. Działanie obcego pola magnetycznego na element prądu	127
73. Galwanometry Kelvina. Ampermetry	130

ROZDZIAŁ PIĄTY.

Prawa prądów trwałych.

74. Opór elektryczny. Prawo Ohma	133
75. Jednostka oporu. Ohm	135
76. Opór przewodników złączonych	135
77. Opór właściwy; przewodnictwo właściwe	137
78. Zastosowanie prawa Ohma do zamkniętego obwodu	140
79. Rozpraszanie energii elektrycznej w przewodnikach	142

ROZDZIAŁ SZÓSTY.

Zjawiska elektromagnetycznej indukcji.

80. Odkrycie praw elektromagnetycznej indukcji	147
81. Ruch przewodnika w obcym polu magnetycznym	148
82. Reguła Lenza	149
83. Elektromotoryczna siła prądu indukcyjnego	150
84. Prawo Faradaya	152
85. Uogólnienie reguły Lenza oraz prawa Faradaya	154
86. Ponowne uogólnienie prawa indukcji	157
87. Zjawiska indukcji własnej	159
88. Prądy Foucaulta	163
89. Induktor Ruhmkorffa	163
90. Przykład prądu przemiennego	166
91. O prądnicę	168
92. Motor elektryczny	171
93. Alternatory	174
94. Przetwornica	175
95. Ampermetry cieplne	176

ROZDZIAŁ SIÓDMY.

Organia i fale elektryczne.

96. Hypoteza Maxwella	178
97. Zasadnicze prawa pól elektromagnetycznych	180
98. Oscylacyjne rozbrajanie się kondensatora	184
99. O rezonancji elektrycznej	189

VIII

§§	Str.
100. Odkrycia Henryka Hertza	191
101. Fale elektromagnetyczne	192
102. Odbijanie się fal elektromagnetycznych; długość fali	194
103. Krystaliczny detektor	197
104. Radjotelegrafia i radjotelefonja	198

ROZDZIAŁ ÓSMY.

Elektrony.

105. Strumienie katodowe	202
106. Działanie pola magnetycznego na strumień katodowy	204
107. Działanie pola elektrycznego na strumień katodowy	206
108. Własności cząstek katodowych	207
109. Promieniowanie Röntgena	211
110. Ionizacja gazów	214
111. Własności gazowych ionów. Ładunek elektronu	217
112. Lampa elektronowa	219
113. Odkrycie promieniotwórczości	221
114. Składniki promieniowania Becquerela	224
115. Istota promieniowania Becquerela	225
116. Własności cząstek β	227
117. Własności cząstek α	229
118. Scyntylacje. Tory cząstek alfa	231
119. Budowa atomu; sztuczna promieniotwórczość	234
120. Promieniotwórcze przemiany	236

ROZDZIAŁ PIERWSZY.

Pole elektryczne statyczne.

§ 1. Przedmiot trzeciego tomu tej książki.

Zatrudnieni wznoszeniem budynku, robotnicy wciągają belki zapomocą lin; koń ciągnie powóz, wyprężając sznury uprzęży. Kręcimy koło, naciskając połączoną z niem korbę; struny wprawiamy w drganie za pośrednictwem smyczka. Ażeby popchnąć kulę bilardową, posyłamy ku niej inną kulę; fale budzimy na wodzie, rzucając kamyczek; artylerja niszczy okopy, trafiając je pociskami. Ciśnienie prasy hydraulicznej przenosi się przez wodę; impulsy drgającego dzwonu dobiegają ucha za pośrednictwem powietrza. Wywieramy zatem my, lub pewne ciała wywierają mechaniczne skutki zapomocą prętów, pasów, sznurów, przy spółdziale kamieni, kul lub pocisków, z uczestnictwem wody, ziemi albo powietrza; ciała działają wzajemnie na siebie za pośrednictwem łączników. Czy jednak nieodzowny jest taki łącznik, taki most materialny, przenoszący działanie? Będziemy skłonni do twierdzącej odpowiedzi na to pytanie. Widząc, że ciało *A* działa na ciało *B* mechanicznie, szukamy między nimi materialnych połączeń. Gdy marjonetka posuwa się lub podskakuje, powiadamy, że jest osadzona na drucie lub wisi na sznurku; gdy ptak spada zabity, domyślamy się kuli lub strzały, która dosięgła go w locie. Nie wierzymy, ażeby można było mechaniczną pracę wykonywać zdaleka; kopimy kanały, wybijamy tunele zapomocą łopat, motyk i świdrów, nie zapomocą magicznych formuł i zaklęć. Wiemy, że ląd nie rozstąpi się, skały nie poruszają się bez pracy; wiemy nadto, że ową pracę trzeba doprowadzić aż do nich.

Zagadnienie nie jest wszakże tak proste, jak wydaje się na pierwszy rzut oka. Kula ziemską przyciąga ku sobie chmurę, balon, aeroplan lub kamień ku niej biegnący, ale nie ciągnie

ich sznurem ani łańcuchem; *jak* ziemia je ciągnie? Ziemia działa na księżyc i doznaje jego działania, jakkolwiek nie jest z nim materialnie złączona. To samo ciało jest jednakowo ciężkie w powietrzu, w wodzie, w rtęci i w próżni (§ 46 tomu II-go); nie istnieją zasłony, o ile dotychczas wiadomo, które tamowałyby działanie ciężenia. Częstka materji głęboko w ziemi leżąca przyciąga inną, wewnątrz księżycy schowaną częstkę dokładnie tak samo, jak gdyby nie było przegradzających warstw i pokładów materji (§ 53 tomu I-go). Takie fakty wychodzą poza zwykły porządek codziennych mechanicznych wydarzeń. Dlatego właśnie, w okresie dzieciństwa, myśl ludzka nie mogła zrozumieć posuwania się słońca po sklepieniu niebieskiem; naiwna wyobraźnia umieszczała promienistą tę bryłę na wozie ciągnionym przez bajeczne rumaki. Mędracy późniejsi osadzili słońce i gwiazdy na baniach kryształowych, na sferach przezręczystych, kręcących się dokoła ziemi odwiecznie. Kartezjusz otoczył te kule splotami wirów burzliwych, które miały je poruszać; dopiero Newton zmiotł z niebios zalegającą je pajęczynę.

Przyglądamy się ruchowi wozu miejskiej elektrycznej kolei; co porusza ten wagon wbrew oporom i tarcia? Wagonu nie ciągnie pręt, którym wóz łączy się z rozpiętym od góry przewodem; ten pręt możnaby zastąpić drutem luźno wiszącym. Choćby i w próżni, magnes pociąga ku sobie drobne opilki, cienkie zaś skrawki bibułki lgną do potartego bursztynu. Staromodne dzwonki wprawiamy w ruch, ciągnąc złązone z niemi sznury lub taśmy; takie zjawisko leży w zakresie zwyczajnej mechaniki; gdy jednak, naciskając mały guziczek, budzimy czynność bardzo odległego przyrządu, wywieramy jakieś inne, niemechaniczne działanie. W Krakowie albo w Warszawie możemy dziś słuchać muzyki lub śpiewu, które rozlegają się w Operze paryskiej; wygłoszona w Londynie mowa brzmi w Przylądku Dobrej Nadziei; w New-Yorku słysząc wybornie chłupot fal bijących o brzeg Spokojnego Oceanu. Poprzez próżną otchłań przestrzeni, z odległości niezmiernej, słońce dokonywa bezustanku pracy olbrzymiej na powierzchni kuli naszej ziemskiej. Odbywają się zatem w naturze jakieś wydarzenia, nie tak blisko ani nieodczownie złączone z materją jak cieplne i mechaniczne zjawiska, które poznaliśmy w poprzednich tomach tej książki; świat chowa w sobie tajemnice dziwniejsze, trudniej uchwytnie, później poznane, w wysokim stopniu zasługujące na naszą uwagę.

§ 2. Elektryzowanie ciał; siły elektryczne.

Sporządzoną z bursztynu pałeczkę pocieramy flanelą albo jedwabiem; pałeczka przyciąga wówczas ku sobie ułamki słomy, skrawki papieru, niteczki, włoski, odrobiny korka i inne leciutkie kruszyny; własności tej bursztyn nie okazywał przed potarciem. Podobnie jak bursztyn, zachowuje się szkło, lak do pieczętowania służący, kalafonja, siarka, opał, ametyst. O takich ciałach, gdy zostały potarte, mówimy, że są *naelektryzowane*; powiadamy, że wywierają w swoim otoczeniu *siły elektryczne*, że dokoła takich ciał istnieje wówczas *elektryczne pole* (por. § 55 tomu I-go).

Przyciąganie wywierane przez bursztyn potarty było znane oddawna; świadczą o tem nazwy, które przechowały się w różnych językach. W Persji bursztyn nazywają «rabusiem słomy» (*karuba*); we Francji jeszcze dzisiaj mówią o nim *tire-paille*. Odkrycie opisanej własności bursztynu przypisywano w starożytności Talesowi z Miletu, w VI-ym wieku przed N. Chr. Przez dwa tysiące lat nikt nie próbował zapoznać się bliżej z tak dziwnym zjawiskiem. Dopiero William Gilbert w Anglii (1540—1603), jeden z najwcześniejszych, po Odrodzeniu, badaczy natury, przekonał się, że mnóstwo innych substancyj zdradza tę samą zdolność; wszystkie takie substancje Gilbert nazywa *electricum corpora* t. j. podobnemi do bursztynu (*electrum*) ciałami, mówiąc: *quae attrahunt eadem ratione*. O wywieranem przyciąganiu powiada: *vim illam electricam nobis placet appellare*; odąd nazwy te pozostały we wszystkich cywilizowanych językach.



Rys. 1.

Ażeby wygodnie badać siły wywierane przez ciała potarte, posługujemy się *wahadelkiem elektrycznym* (rys. 1); z korka lub z rdzenia bzu lekarskiego sporządzamy małą kuleczkę, którą zawieszamy na szklanym wieszadelku przy pomocy cienkiej nici jedwabnej. Ogrzawszy dość mocno pręt szklany (i osu-



Rys. 2.

szywszy go tym sposobem), pocieramy go nagle kawałkiem jedwabiu; pręt silnie wówczas przyciąga kulę wahadła.

Sprawdźmy natychmiast, czy elektryczne siły stosują się do prawa działania i oddziaływania, które, jak wiemy, jest funda-

mentem dynamiki (tom I, §§ 36 i 37). Naelektryzowany (jak w doświadczeniu poprzednim) pręt szklany zawieszamy na szklanym wieszadku przy pomocy nici jedwabnej (rys. 2); zbliżając ciało nienaelektryzowane, np. rękę, widzimy, że pręt wykręca się, jak gdyby przez rękę był przyciągany.

§ 3. Dwa rodzaje naelektryzowania.

Naelektryzowany pręt szklany przyciąga ku sobie kulkę wachadełka (rys. 1). Pozwólmy kulce dotknąć pręta; przyciąga ona wówczas żdźbła słomy; zatem przez zetknięcie z naelektryzowanym prętem kulka naelektryzowała się sama. Powtarzając to doświadczenie uważnie, spostrzegamy, że, natychmiast po dotknięciu pręta, kulka odskakuje od niego, jak gdyby była odpychana. Kiedyż zatem między naelektryzowanymi ciałami działa przyciąganie, kiedy zaś odpychanie? Na szklanym wieszadku zawieszamy, na jedwabnych nitkach, dwie jednakowe kulki *a*, *b*



Rys. 3.

(rys. 3). Kulkę *a* elektryzujemy, dotykając jej szklanym prętem, który potarliśmy jedwabiem; kulkę *b* elektryzujemy, dotykając jej ebonitową laską, którą potarliśmy futrem. Oddalamy laskę ebonitową, zbliżamy zaś pręt szklany, ponownie potarty jedwabiem; pręt odpycha kulkę *a*, przyciąga *b*. Oddalamy pręt szklany, zbliżamy laskę ebonitową, ponownie potartą futrem; laska przyciąga kulkę *a*, odpycha *b*. Istnieją przeto conajmniej *dwa* rodzaje naelektryzowania; nazywamy je dla zwięzłości *dodatniem* i *ujemnem* naelektryzowaniem. Powiadamy, że szkło potarte jedwabiem elektryzuje się dodatnio; że ebonit potarty futrem elektryzuje się ujemnie. Z opisanego doświadczenia wnosimy, że ciało dodatnio naelektryzowane odpycha dodatnio naelektryzowane, przyciąga zaś ujemnie naelektryzowane; wnosimy również, że ciało ujemnie naelektryzowane przyciąga dodatnio naelektryzowane, odpycha zaś naelektryzowane ujemnie. Gdy jednak ciało *A* przyciąga ku sobie ciało *B*, jest także przyciągane przez *B*; gdy odpycha od siebie ciało *B*, jest także odpychane przez *B* (§ 2). Wszystkie wyniki możemy więc streścić w następującem twierdzeniu: *ciała jednoimiennie naelektryzowane odpychają się; ciała różnoimiennie naelektryzowane przyciągają się wzajemnie.*

Badaliśmy dotychczas naelektryzowanie szkła potartego jedwabiem; zbadajmy teraz stan jedwabiu, który służył do potarcia szkła. Do naelektryzowanych wahadełek *a* i *b* (rys. 3) lub do naelektryzowanego szklanego albo ebonitowego pręta, zawieszzonego jak na rys. 2-im, zbliżamy jedwab, którym potarliśmy szkło; przekonujemy się, że ten jedwab jest naelektryzowany ujemnie. Sprawdzamy podobnie, że, gdy ebonit w zetknięciu z futrem elektryzuje się ujemnie, futro jednocześnie elektryzuje się dodatnio. *Gdy dwa odmienne ciała pocieramy o siebie, elektryzują się różniamiennie: jedno dodatnio, drugie ujemnie.*

Podobne doświadczenia wykonywamy, posługując się innemi parami substancyj; wybieramy np. szkło i futro, ebonit i bawełnę, siarkę i jedwab, korek i płótno, lak pieczętarski i kauczuk. Każde ciało po potarciu zachowuje się: albo jak szkło potarte jedwabiem albo jak ebonit potarty futrem; każde zatem elektryzuje się albo dodatnio, albo ujemnie; nie dostrzegamy trzeciego rodzaju naelektryzowania.

Ciało *A*, wyrobione z danej substancji, może elektryzować się dodatnio w zetknięciu z ciałem *B*, ujemnie zaś w zetknięciu z ciałem *C*; naprzykład, pocierane jedwabiem szkło elektryzuje się dodatnio, pocierane futrem lub wełną elektryzuje się zazwyczaj ujemnie. Znak naelektryzowania bywa także zależny od temperatury ciała, od stanu jego powierzchni i innych okoliczności. Rozłamawszy na dwie części ebonitową laseczkę i pocierając je o siebie, przekonujemy się nieraz, że jedna jest dodatnio, druga ujemnie naelektryzowana.

Zmieszajmy ze sobą mialko roztartą minję i siarkę; przesiewając taką mieszaninę przez gazę muślinową na powierzchnię naelektryzowanego ciała, spostrzegamy, że proszek siarczany (żółty) przylega do ciał dodatnio naelektryzowanych, czerwona zaś minja do naelektryzowanych ujemnie. Przez tarcie okruchy siarki naelektryzowały się ujemnie, ziarenka minji — dodatnio.

§ 4. O elektrycznych ładunkach.

Na suchy pręt szklany wdziewamy odcinek rurki kauczukowej, obejmującej go dosyć luźno. Szybko posuwając kauczuk po szkle, elektryzujemy obadwa ciała: szkło dodatnio, kauczuk ujemnie. Postąpmy teraz inaczej: po potarciu pozostawmy kauczuk na szkle i przekonajmy się, czy ciała te nie rozłączone działają na elektryczne wahadełko. Okazuje się, że zespół szkła i kauczuku nie wywiera nazewnątrz elektrycznego działania. Pręt ebonitowy, potarty płatem flaneli, nie wytwarza dokoła pola elektrycznego, dopóki nie zdejmemy zeń tego płotka. Na szkle i kauczuku, na ebonicie i flaneli powstają widocznie, przez tarcie, *przeciwnie* co do znaku ale co do wartości *równe* elektryczne

ładunki; takie ładunki, równe sobie ale przeciwne, wytwarzają w otoczeniu siły równe ale skierowane przeciwnie, które znoszą się wszędzie dokładnie.

Dodatnio naelektryzowany pręt szklany wraz z ujemnie naelektryzowaną kauczukową rurką, gdy ładunki obu ciał są sobie równe, zachowuje się zatem jak ciało nienaelektryzowane czyli *obojętne*. Gdybyśmy zbudowali układ złożony z setek albo tysięcy takich par (dodatnio naelektryzowanych szklanych pręcików oraz osadzonych na nich, równie mocno ujemnie naelektryzowanych kauczukowych rurczek), całość zachowywałaby się elektrycznie obojętnie. Czy nie powinniśmy przypuszczać, że w każdym elektrycznie obojętnym ciele znajdują się, jpodobnie, maleńkie, równe, różnoimienne ładunki? Położone tuż obok siebie, nie wywierałyby one nazewnątrz elektrycznego działania. Elektryzując ciała, oddalamy tylko od siebie owe najmniejsze, *elementarne* ładunki; potrafimy je tylko rozdzielać i napowrót ze sobą je łączyć, nie umiemy ich rozmnażać, nie możemy ich niszczyć. Elementarne elektryczne ładunki tkwić muszą zapewne w ostatnich okrucach materji: w molekułach fizycznych, w chemicznych atomach (§ 25 tomu II-go). W dalszych rozdziałach zrozumiemy, dlaczego, w dzisiejszym stanie nauki, wyobrażenia takie są pożyteczne a nawet konieczne; zobaczymy, jak odsłoniły się przed naszym wzrokiem duchowym własności przedewszystkiem ładunków elementarnych *ujemnych*, zwanych *elektronami*, jak zaczynamy dziś powoli przenikać rolę, którą w budowie chemicznego atomu grają ładunki elementarne *dodatnie*.

§ 5. Przewodniki elektryczne; izolatory.

Spróbujmy naelektryzować przez potarcie pręt metalowy, np. żelazny, nikłowy, mosiężny. Gdy trzymamy go w ręku, pręt nie okazuje elektrycznego ładunku; ale elektryzuje się podobnie jak ebonitowy lub szklany, gdy, osadziwszy go w szklanej lub kauczukowej rękojeści i nie dotykając ręką, pocieramy go jedwabiem, wełną lub futrem.

Pręt metalowy umieścmy na szklanej nóżce i przylutujmy na jednym jego końcu, metalicznym lutem, wąziutkie dwa paski, wycięte z najcieńszej aluminiowej folji albo też dwa listki pozłótki (rys. 4). Elektryzując przeciwległy koniec metalowego pręta, spostrzegamy, że listki rozchylają się; odpychają się, otrzymały

więc jednoimienne ładunki. Metaliczne ciało nie tylko przybiera elektryczny ładunek, lecz rozprawdza go, jak można najdalej roznosi czyli *przewodzi*; metale oraz inne ciała, które przewodzą ładunki, nazywamy więc *elektrycznymi przewodnikami*. Suche szkło nie jest przewodnikiem. Naelektryzujemy koniec szklanego pręta; przytwierdzone do przeciwnego końca złote listki nie rozchylają się. Ciała pozbawione zdolności elektrycznego przewodnictwa nazywamy *izolatorami*; powiadamy o nich, że *izolują* (t. j. elektrycznie odosabiają). Oprócz metali, również węgiel i grafit oraz wodne roztwory soli, kwasów i zasad są przewodnikami; porcelana, lak, szellak, kałafonja, wosk, parafina, siarka, bursztyn, ebonit, kauczuk są izolatorami. Powietrze naogół jest izolatorem. Ciało ludzkie jest przewodnikiem, co tłumaczy, dlaczego niepodobna naelektryzować metalowego pręta, trzymając go w ręku.



Rys. 4.

Wspominaliśmy o tem, że ciała szklane, którym przeznaczamy rolę izolatorów w elektrycznych doświadczeniach, winny być suche. Niektóre gatunki szkła (zwłaszcza tak rozpowszechniony *crown-glass*) są *hygroskopijne*, przyciągają z powietrza parę wodną; na powierzchni ciał sporządzonych z takich gatunków szkła znajduje się zwykle cienka, stosunkowo dobrze przewodząca wodna warstewka. Sucha para wodna jest izolatorem, podobnie jak powietrze i inne ciała gazowe; mosiężna naelektryzowana kula, zawieszona w prądzie suchej pary wodnej, na jedwabnej nici, nie traci bynajmniej elektrycznego ładunku.

Doświadczenia i czynności, które przedsiębiorzymy w naukowych pracowniach lub zakładach technicznych, odbywają się w sąsiedztwie olbrzymiej bryły, kuli ziemskiej, która nas wszystkich niesie na sobie. Kula ziemska jest niewyczerpanym, praktycznie nieskończonym przewodnikiem i zbiornikiem elektrycznym; spłynęły do niej, spływają lub spłyną wszelkie ładunki, które ludziom udało się lub uda się kiedykolwiek sztucznie wytworzyć. Bardzo często w naukowem badaniu zachodzi właśnie potrzeba, ażeby pewne ładunki, które mogą zakłócić obserwowane zjawisko, odpłynęły do ziemi; przewodniki, na których znaj-

dują się owe ładunki, łączymy wówczas metalicznie z podłogą, z układem rur wodociagowych, ze studnią lub wilgotnym gruntem. Będziemy w takich razach krótko mówili, że dany przewodnik jest *połączony z ziemią*.



Rys. 5.

Przedstawione na rys. 4-yim doświadczenie daje nam pochop do zbudowania *elektroskopu* (rys. 5). Dwa ruchome listki pozłótki (albo dwa płatki najcieńszej folii aluminiowej albo dwie nitki kwarcowe cieniutko powleczone platyną) wiszą u dolnego końca mosiężnego pręta, z którym są w przewodzącem zetknięciu. Pręt, zaopatrzony w takie wskazówki, przechodzi przez otwór szklanego naczynia, którego część dolna, sporządzona z metalu, łączy się z ziemią; na górnym końcu pręt kończy się główką lub dźwiga mosiężny talerzyk. Nawet słabe naelektryzowanie zdradza się w elektroskopie rozchylaniem się listków.



Rys. 6.

Pręt powinien być najstaranniej izolowany za pomocą parafiny, wosku, kauczuku, siarki, najlepiej bursztynu. Wnętrze przyrządu powinno być suche i wolne od pyłu. Im rozleglejsza jest metalowa część osłony, im mniej stosunkowo rozległa jest jej część szklana, im staranniejsze połączenie z ziemią, tem mniej zakłócona będzie czynność przyrządu, tem prawdziwsze będą jego wskazania. W niektórych elektroskopach mamy tylko jeden ruchomy listek, albo też lekką, zrównoważoną, na osi ruchomą, metalową wskazówkę (rys 6). Wrażliwy elektroskop wskazuje ładunek, który wytwarzamy, gdy pociągamy pręt miękkim pędzelkiem. Temperując ołówek, pozwólmy strużynom drewnianym spadać na krążek elektroskopu; okazują one wyraźnie ładunek, który przybrały przez tarcie.

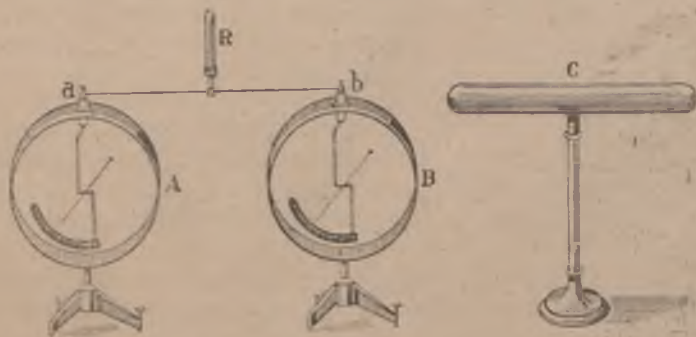
§ 6. Indukcja elektrostatyczna.

Przez potarcie jedwabiem elektryzujemy pręt szklany i zbliżamy go powoli do elektroskopu. Chociaż pręt nie dotknął jeszcze krążka lub główki elektroskopu, chociaż znajduje się od nich w odległości kilku centymetrów, listki rozchylają się,

wskazówka się porusza; gdy oddalamy pręt, wszystko powraca do normalnego położenia. Samo zatem sąsiedztwo ładunku, nawet i bez zetknięcia, wywołuje naelektryzowanie listków lub wskazówki.

Zjawisko, które poznaliśmy, zwane *elektrostatyczną indukcją*, możemy łatwo zrozumieć, przypuszczając, że elektryczne siły są wywierane nie tylko przez *ciała* naelektryzowane oraz na ciała naelektryzowane, lecz również przez same *ładunki* i na same ładunki. W listkach, w pręcie i w krążku elektroskopu, jak w każdym obojętnym ciele, istniały zarówno dodatnie jak ujemne ładunki. Gdy zbliżamy pręt szklany naelektryzowany dodatnio, jego dodatni ładunek przyciąga na górną powierzchnię krążka ładunki ujemne, dodatnie zaś wypycha do listków, które, otrzymawszy jednoimienne ładunki, muszą się rozchylić.

W pewnej odległości od siebie ustawiamy dwa od ziemi odłączone, izolowane elektroskopy *A* i *B* (rys. 7), łączymy je metalowym drutem *ab*, zaopatrzonym w szklaną rękkość *R* i zbliżamy do *B* izolowany przewodnik metalowy *C*, silnie naelektryzowany dodatnio. Wskazówki obu elektroskopów *A* i *B* odchylają się; gdy oddalamy *C*, zarówno w *A* jak w *B* wskazówki opadają. Powtórzmy doświadczenie nieco inaczej; *A* i *B* łączymy znów drutem *ab*, zbli-



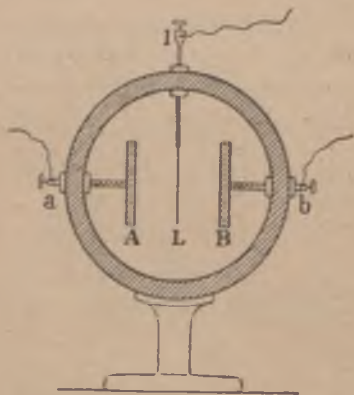
Rys. 7.

żamy *C* i wówczas usuwamy *ab*; po oddaleniu przewodnika *C*, wskazówki zarówno w *A* jak i w *B* pozostają odchylone. Gdy zbliżamy *C* do *B*, *B* wówczas przybiera widocznie ujemny, *A* zaś przybiera dodatni ładunek; gdy *A* i *B* są połączone drutem, przeciwne ich ładunki zobojętniają się po oddaleniu *C*; gdy *A* i *B* nie są połączone, pozostają naładowane. Gdybyśmy rozłączyli *A* i *B* i wówczas zbliżyli *C*, wskazówka w *B* odchyliłaby się, w *A* pozostałaby nieodchylona; co świadczy, że ładunek przewodnika *C*, z powodu znacznej odległości, nie działa na *A*; *A* ładuje się tylko wówczas, gdy jest połączony z *B* metalicznie.

Przypuśćmy, że naładowaliśmy elektroskop dodatnio, dotknąwszy jego krążka prętem szklanym, potartym o jedwab. Gdy wówczas zbliżymy do elektroskopu ciało naładowane dodatnio, listki rozchylą się jeszcze bardziej; gdy zbliżymy ciało naładowane ujemnie, listki zbliżą się ku sobie. Tym prostym sposobem możemy rozstrzygnąć, czy pewien ładunek jest dodatni czy też ujemny.

Działaniu sił elektrycznych ulegają zatem nie tylko ciała materialne naelektryzowane ale i same elektryczne ładunki; przyciągane lub odpychane, ładunki poruszają się i płyną w łonie przewodników, według nakazu pola. Powiadamy, że w polu elektrycznem objawiają się nie tylko *ponderomotoryczne*, ale również *elektromotoryczne* działania.

Wielką wrażliwością odznaczają się t. zw. *heterostatyczne* elektroskopy, w których, do badania nieznanych ładunków, powołujemy do pomocy pewne ładunki zewnętrzne, wiadomego rodzaju. Opisujemy tu prosty elektroskop heterostatyczny jednolistkowy.



Rys. 8.

W skrzynce metalowej, zaopatrzonej w szyby szklane, znajdują się płyty metalowe A i B (rys. 8), pomiędzy którymi wisi ruchomy listek L; A, B oraz L łączą się odpowiednio ze spinakami a, b, l, ale, jak widać z rysunku, są izolowane od metalowej osłony przyrządu. Możemy posługiwać się w dwojaki sposób heterostatycznym elektroskopem: (I) listkowi L udzielamy ładunku wiadomego rodzaju; płytę B łączymy z ziemią, płytę A z ciałem, którego naelektryzowanie mamy zbadać. Zależnie od rodzaju badanego i pomocniczego ładunku, listek jest odpychany lub przyciągany; na B przez indukcję powstają ładunki, które działają zawsze zgodnie z ładunkami rozlanymi na A (II) Ładujemy dodatnio, z pomocniczego źródła, płytę A.

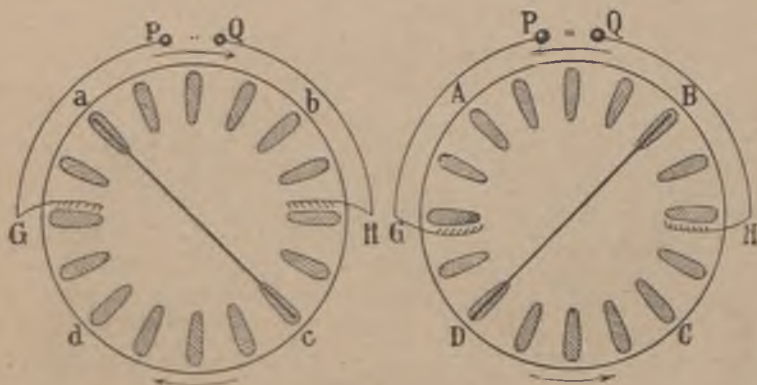
płytę B podobnie ładujemy ujemnie; z listkiem L łączymy ciało, którego ładunek zamierzamy zbadać. Jeżeli ciało jest naelektryzowane dodatnio, listek odchyła się w stronę płyty B; jeżeli jest naelektryzowane ujemnie, listek odchyła się w stronę płyty A.

§ 7. O maszynach elektrycznych.

Do wytwarzania obfitych elektrycznych ładunków służą *elektryczne maszyny*. Starodawne przyrządy, w których posługiwano się tarcieniem, wyszły z użycia; zastąpiły je t. zw. *indukcyjne* maszyny, z których opiszemy tu jedną, maszynę Wimshursta.

Wyobraźmy sobie dwie tarcze szklane lub ebonitowe, w odstępie kilku milimetrów osadzone, równoległe do siebie, na dwóch różnych osiach, które znaj-

dużą się jedna w przedłużeniu drugiej. Po zewnętrznych stronach tarcz naklejone są t. zw. *sektory*, paski wycięte z cienkiej cynowej folji. Na rys. 9-ym, dla jasności, tarcze są przedstawione, jak gdyby były umieszczone jedna za drugą; w istocie jednak punkty *A* i *a*, *B* i *b*, *C* i *c*, *D* i *d* leżą naprzeciwko siebie; wyobraźmy sobie *A*, *B*, *C*, *D* po stronie przedniej, ku nam zwróconej; *a*, *b*, *c*, *d* niechaj leżą po stronie odwrotnej. W pobliżu tarcz, po zewnętrznych ich stronach, znajdują się nieruchome pręty metalowe, t. zw. *łączniki*: *BD* naprzeciwko przedniej tarczy, *ac* naprzeciwko tylnej; łączniki te kończą się miotłkami, zlekka dotykającemi sektorów. U końców poziomych średnic, grzebienie metalowe *G*, *H* obejmują obiedwie tarcze; łączą się one z kulami *P* i *Q*, które nazywamy *biegunami* maszyny.



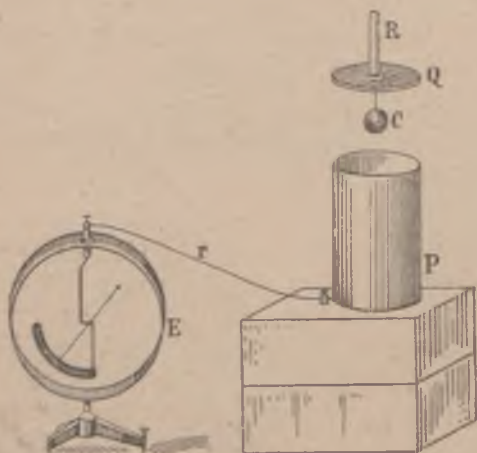
Rys. 9.

Gdy obracamy tarcze w kierunkach przeciwnych, jak pokazuje rysunek, bieguny *P* i *Q* ładują się szybko, ładunkami znaków przeciwnych. Ażeby wytłumaczyć to działanie, przypuśćmy, że, już w pierwszej chwili obrotu, sektory tylne, leżące między *a* i *b*, mają pewne, choćby słabe, dodatnie ładunki. Gdy te sektory przebiegają po kolei przed końcem *B* łącznika *BD*, tworzą się wówczas przez indukcję w tym łączniku ładunki, mianowicie ujemny u końca *B*, dodatni u przeciwległego końca *D*; ładunki te udzielają się sektorom, będącym właśnie w zetknięciu z łącznikiem *BD*. Tym sposobem górne sektory tarczy przedniej, które za chwilę znajdują się między *B* i *A*, otrzymują ładunki ujemne, dolne zaś sektory teje tarczy, które będą wkrótce zawarte między *D* i *C*, otrzymują ładunki dodatnie. Wspomniane ujemne ładunki górnych sektorów tarczy przedniej podbiegają do punktu *A*; lecz naprzeciwko *A* znajduje się koniec *a* łącznika *ac* tarczy tylnej; w łączniku *ac* wytwarzają się znowu ładunki indukowane, w *a* dodatni, w *c* ujemny; sektor tylny, będący właśnie w zetknięciu z *a*, otrzymuje stosunkowo silny ładunek dodatni, sektor zaś dotykający końca *c* otrzymuje ładunek ujemny. Tym sposobem w górnych sektorach przedniej tarczy oraz w dolnych sektorach tylnej tarczy szybko gromadzą i wzmagają się ładunki ujemne; w dolnych sektorach przedniej tarczy oraz w górnych tylnej narastają ładunki dodatnie. Pierwsze, ujemne, spływają do grzebienia *G* i stamtąd do bieguna *P*; drugie ładunki, dodatnie, przenoszą się do *H* i następnie do *Q*. W jednym z następnych artykułów zrozumiemy dokładniej, dlaczego grzebienie

zbierają, niejako wysysają ładunki z przebiegających przed nimi sektorów i dostarczają ich biegunom.

§ 8. O siedzibie ładunków ciał przewodzących.

Wyobraźmy sobie naczynie metalowe P (rys. 10), zamknięte metalową pokrywą Q , która jest zaopatrzona w szklaną rękę R ; we wnętrzu naczynia, na jedwabnej nici, zatem izolowana, wisi kula metalowa C . Zapomocą drutu metalowego r



Rys. 10.

łączymy zewnętrzną powierzchnię naczynia PQ z elektroskopem E ; naczynie izolujemy, umieszczając je na parafinowej lub szklanej podstawie.

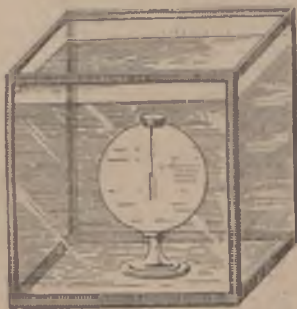
Wykonujemy kilka prostych doświadczeń: (I) Naczynie P i pokrywa Q są elektrycznie obojętne. Elektryzujemy kulę C dodatnio, poczem, nie dotykając nią ani P ani Q , umieszczamy Q wraz z C na P . Znamym z § 6-go sposobem prze-

konywamy się, że na zewnętrznej powierzchni naczynia PQ znajduje się ładunek dodatni; ładunek ten nie zmienia się, gdy poruszamy kulę C wewnątrz PQ , nie wprowadzając jej w zetknięcie ze ścianami. Wszystkie te fakty są objawami elektrostatycznej indukcji. Pod wpływem przyciągania, wywieranego przez dodatni ładunek kuli C , ładunek ujemny zawarty w ścianach PQ zgromadził się na wewnętrznej powierzchni naczynia; jego zewnętrzna powierzchnia jest zatem naładowana dodatnio. Wskazówka elektroskopu, odchyliwszy się, pozostaje w spoczynku; mówimy, że ładunki ciał C i PQ są *w równowadze*.

(II) Łączymy z ziemią zewnętrzną powierzchnię naczynia PQ ; powierzchnia ta powraca do stanu obojętnego, jak ze wskazań elektroskopu natychmiast widzimy; dopłynął do niej widocznie z ziemi odpowiedni ujemny ładunek. Powiadamy, że kula naładowana, znajdując się we wnętrzu zamkniętej, przewodzącej, połączonej z ziemią osłony, nie wytwarza nazewnątrz pola elektrycznego.

(III) Naczynie P i wieko Q są znów obojętne. Elektryzujemy kulę C dodatnio, umieszczamy Q wraz z C na P i kulę C dotykamy wewnętrznej powierzchni PQ . Elektroskop wykazuje, że naelektryzowanie zewnętrznej powierzchni naczynia PQ nie zmieniło się skutkiem zetknięcia. I ten fakt rozumiemy bez trudności; nagromadzony na wewnętrznej powierzchni naczynia ujemny ładunek połączył się wprawdzie z dodatnim ładunkiem kuli C , ale na zewnętrznej powierzchni naczynia pozostał ten sam jak poprzednio ładunek dodatni. Otwórzmy naczynie i zbadajmy stan kuli C ; okazuje się ona istotnie obojętna. Lecz przecież od chwili, gdy zetknęła się ze ścianami naczynia, kula stanowiła część składową, niejako zgrubienie tych ścian; wewnętrzna i zewnętrzna postać przewodnika PQ nie może mieć wpływu na wynik doświadczenia. Wnosimy zatem, że *ciało metaliczne może posiadać elektryczny ładunek w równowadze tylko na zewnętrznej swojej powierzchni*. Do tego wniosku doprowadziło nas badanie przewodnika wydrążonego; skoro jednak postać wydrążenia jest obojętna, możemy być pewni, że twierdzenie pozostaje prawdziwe, chociażby wydrążenia wcale nie było.

We wnętrzu przewodnika, w jego materialnej substancji, niema zatem ładunków; czy niema również i pola? Zastąpmy poprzednią nieprzezroczystą osłonę PQ przez warstwę wody zakwaszonej, więc przewodzącej; do wnętrza wody zanurzamy elektroskop (rys. 11); jego listki nie rozchylają się, gdy wodę elektryzujemy. *Jeżeli we wnętrzu przewodnika niema ciał naelektryzowanych, niema tam pola; ładunek w równowadze znajduje się tylko na powierzchni przewodnika, pole zaś wypełnia całe zewnętrzne otoczenie, poczynając od tej powierzchni.*

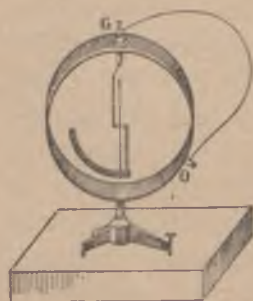


Rys. 11.

W doświadczeniu, wyobrażonem na rys. 11, jest rzeczą obojętną, czy listki elektroskopu są czy nie są izolowane od wody, czy ścianki elektroskopu są całkowicie szklane, czy też po części szklane, po części metalowe. Wynik doświadczenia jest zawsze ten sam: pole nie tworzy się w elektroskopie.

Wykonajmy jeszcze doświadczenie następujące. Umieszczamy elektroskop na podstawie izolującej (rys. 12); metalową osłonę O elektroskopu łączymy metalowym drutem z główką G , wreszcie elektryzujemy osłonę O jak możemy najsilniej; wskazówka elektroskopu nie odchyła się. Na pierwszy rzut oka może

wydawać się, że wynik ten potwierdza tylko wnioski poprzedzające. Zważmy jednak, że wewnętrzna powierzchnia ścian osłony elektroskopu łączy się z ich zewnętrzną powierzchnią poprzez brzeg otworu, przez który przechodzi pręt elektroskopu; jedna powierzchnia jest oczywiście przedłużeniem drugiej; jeżeli



Rys. 12.

zewnętrzna powierzchnia jest naelektryzowana, dlaczego wewnętrzna nie przybiera wówczas ładunku? Powinniśmy byli zadać sobie to samo pytanie w rozbiórce doświadczenia, wyobrażonego na rys. 11-ym, w razie, gdy listki elektroskopu nie są izolowane od otaczającego przewodzącego ośrodka. Mamy w obu razach naczynie *elektrycznie otwarte*; jeżeli jednak otwór takiego otwartego naczynia jest niewielki, na wewnętrznej powierzchni jego ścian znajduje się nieznaczny ładunek. Ażeby przekonać się o tem, spróbujmy elektryzować wysoki słój metalowy, otwarty, izolowany; na zewnętrznej powierzchni naczynia znajdujemy elektryczny ładunek, nie znajdujemy go natomiast na wewnętrznej powierzchni dna; w pobliżu

dna, wewnątrz walca, nie konstatujemy pola. Odbierając nieco wody otaczającej elektroskop (rys. 11), nie dostrzegamy rozchylania się listków; lecz jeśli elektroskop np. do połowy wynurzy się z wody, pole wytworzy się w jego wnętrzu.

Na podstawie izolującej ustawiamy klatkę, sporządzoną z gęstej siatki metalowej; z siatką łączymy metalicznie dwie pary listków elektroskopowych; jedna wisi nazewnątrz klatki, druga gdziekolwiek nawewnątrz. Gdy elektryzujemy klatkę, listki pierwszej (zewnętrznej) pary rozchylają się, listki drugiej (wewnętrznej) pozostają w spoczynku. Doświadczenie to może jednak zawieść, zwłaszcza gdy siatka jest niedosyć gęsta; przez jej oczka mogą wówczas przeniknąć naelektryzowane cząstki unoszące się w powietrzu, podobnie jak do zwykłej drucianej klatki moglibyśmy przecież wrzucić jakąkolwiek naładowaną kuleczkę.

§ 9. Równowaga ładunku na powierzchni przewodnika.

Wyobraźmy sobie ciało metaliczne izolowane, znajdujące się w zetknięciu tylko z powietrzem lub innymi nieprzewodzącymi ciałami. Ładunek, którego udzielamy przewodnikowi, dąży natychmiast ku zewnętrznej powierzchni ale tam zatrzymuje się, ponieważ otoczenie nie pozwala mu dalej odpłynąć. Na każdą cząstkę ładunku zgromadzonego na zewnętrznej powierzchni działa siła elektryczna, która stara się cząstkę z metalu wypędzić; powiadamy, że zgromadzony na powierzchni przewodnika ładunek okazuje pewne *napięcie*.



Rys. 13.

Utwórzmy bańkę mydlaną u końca metalowej rurki *m*, osadzonej w innej, izolującej rurze *R* (rys. 13); gdy

elektryzujemy rurkę m , bańka mydlana rozdyma się pod wpływem napięcia swego elektrycznego ładunku. Podobnie zachowuje się kauczukowy balonik, jeśli pokryliśmy jego powierzchnię proszkiem przewodzącym, np. grafitowym lub metalicznym.

O ile sądzić możemy ze zjawisk, które poznaliśmy dotychczas, ładunki elektryczne w łonie metalu poruszają się zupełnie swobodnie. Dopóki zatem w łonie metalu istnieje pole elektryczne, równowaga elektrycznych ładunków jest niemożliwa; równowaga elektryczna w metalu może zapanować dopiero wówczas, gdy pole zniknie w całym wnętrzu metalu; innymi słowy, gdy wypadkowa sił, wywieranych w każdym wewnętrznym punkcie metalu przez zgromadzony na powierzchni ładunek, stanie się równa zeru. Jeżeli nie działają siły elektromotoryczne, które przeszkadzają ustanowieniu się elektrycznej równowagi, wytwarza się ona w mgnieniu oka w ciałach metalicznych, z którymi codziennie miewamy do czynienia.

Zwykłe metale, jak żelazo lub mosiądz, są dla materji trudno przenikliwe; przez gruby pancerz stalowy przebija się tylko pocisk armatni, wystrzelony z ogromną prędkością. Natomiast atmosferyczne powietrze, podobnie jak inne gazy teje gęstości, stawia zazwyczaj słaby opór ruchowi zanurzonych w niem ciał. Zupełnie inaczej zachowują się te substancje wobec elektrycznych ładunków; metale są bardzo łatwo przenikliwe dla elektrycznych ładunków, powietrze jest dla nich trudno przenikliwe. Tworzymy pomimowoli obraz świata, sądząc go ze stanowiska materji; lecz gdy patrzymy z elektrycznego punktu widzenia, świat wygląda całkowicie na opak.

Nauka o prawach elektrycznej równowagi, t. zw. *elektrostatyka*, byłaby niemożliwa, gdyby nie istniały ciała izolujące. Z elektrycznego punktu widzenia, metale są niejako wydrążeniami, wyrwaniami z łona izolatorów. Dlatego każde ciało metaliczne jest pewną jednostką w elektrostatyce, pewną całością. W ciele metalicznem stan elektryczny każdego punktu zależy od stanu wszystkich innych punktów; w izolatorze, przeciwnie, stan elektryczny danego punktu nie zależy wcale od stanu innych punktów.

§ 10. Gęstość powierzchniowego ładunku; ładunek ostrza.

Im znaczniejszy elektryczny ładunek jest nagromadzony na danej powierzchni, tem większa, jak mówimy, jest jego *gęstość*. Wyobraźmy sobie kulę metalową izolowaną, odległą od wszelkich innych ciał naelektryzowanych (por. § 6); w stanie równowagi, rozkład ładunku na powierzchni kuli jest równomierny, gęstość zatem ładunku jest jednostajna. Ale na powierzchni przewodnika walcowatego (jak C na rys. 7-ym, § 6) rozkład ładunku w stanie równowagi nie może być równomierny. Przy-

puśćmy istotnie, że elektryzujemy walcowaty przewodnik, np. ujemnie; odpychające się nawzajem cząstki ładunku, nie mając dostępu do wnętrza metalu, odpływają przeważnie ku zakończeniom, dopóki rosnące odpychanie gromadzących się tam ładunków nie powstrzyma dalszego dopływu; w stanie równowagi gęstość na końcach walca będzie zatem większa aniżeli w środkowej części powierzchni. Podobnie układają się ładunki w stanie równowagi na przewodniku mającym kształt gruszki. Jeszcze większe różnice gęstości powierzchniowego ładunku znajdujemy na wierzchołku stożka, na końcu ostrza, kolca lub igły; gdziekolwiek na małej rozległości mieści się stosunkowo duży ładunek, jego gęstość musi być znaczna.



Rys. 14.

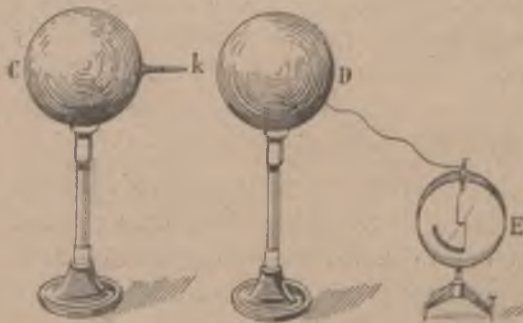
Sprawdzamy te wnioski, posługując się prostym wywiadowczym przyrządem; stanowi go mała metalowa płytka, umocowana u końca szklanego lub ebonitowego pręcika (rys. 14). Obojętną (wyładowaną) płytką dotykając różnych punktów powierzchni kuli, walca, gruszki, elipsoidy, wogóle przewodników dowolnej postaci, przekonywamy się, że ładunek uniesiony z miejsc wypuklejszych sprawia w elektroskopie więcej skutku niż zdjęty z części płaskich, tem bardziej niż zaczerpnięty z miejsc wklęsłych. Naelektryzujemy metaliczny przewodnik,



Rys. 15.

wyobrażony na rys. 15-ym; z wierzchołka wystającego stożka zbieramy stosunkowo sporo ładunku; z lejkowatego wgłębienia po stronie przeciwnej niepodobna uzyskać ładunku, co zresztą, według § 8-go, mogliśmy *a priori* przewidzieć.

Ładunek elektryczny gromadzi się zatem stosunkowo najgęściej na ostrzach; stamtąd też najłatwiej ucieka, wypływając w otaczające powietrze. Wkręćmy, jak na rys. 16 ym,



Rys. 16.

jak na rys. 16 ym, metalowy kołec *k* do izolowanej, metalowej kuli *C*; kuli tej wówczas, jak świadczy elektroskop, niemal niepodobna jest naładować; gdy wyjmujemy kołec, kula elektryzuje się bez trudności. Na-

przeciwko kolca *k* kuli *C* umieścimy drugą kulę metalową *D* (rys. 16), połączoną metalicznie z elektroskopem *E*; gdy próbujemy na-

elektryzować kulę C , przekonywamy się, że nie C ale D uzyskała ładunek; gdy usiłowaliśmy naelektryzować kulę C , ładunek, którego jej udzielaliśmy, wypływał z niej widocznie i przenosił się przez powietrze do kuli D . Ponieważ kula C nie okazuje niemal żadnego ładunku, kula D nie mogła naelektryzować się przez indukcję; usuwając C , przekonywamy się o tem natychmiast, albowiem ładunek kuli D nie zmienia się wówczas.

Przypuśćmy, że zaopatrzona w kolec k kula C (rys. 16) jest rozbrojona; połączmy ją metalicznie z elektroskopem E , kulę zaś D , odłączoną od elektroskopu, naładujmy dodatnio. Jeżeli, jak na rys. 16-ym, kolec k jest zwrócony do kuli D , kula C szybko elektryzuje się dodatnio, kula zaś D traci pierwotny ładunek. Wszystko odbyło się zatem tak, jak gdyby ostrze k było *wessało* ładunek kuli D ; lecz w istocie zjawisko musiało mieć przebieg następujący: dodatni ładunek kuli D drogą indukcji wytworzył ujemny ładunek na ostrzu k , dodatni zaś na odwróconej od ostrza półkuli C ; ujemny ładunek z ostrza k wypłynął w powietrze a docierając do D , zubożył się z pierwotnym (dodatnim) ładunkiem tej kuli; na kuli C pozostał wzbudzony przez indukcję ładunek dodatni. Przypuszczenie to sprawdzamy w następujący sposób. Naładujmy elektroskop; jego wskazówka odchyła się i bez zakłócenia zzewnątrz pozostaje długo odchylona; lecz jeśli zbliżymy zaostrzony drut stalowy, który trzymamy w ręku, wskazówka elektroskopu opada natychmiast. Pojmujemy teraz ssące działanie grzebieńi, o którym była mowa w § 7-ym.

§ 11. Iskra elektryczna; błyskawica; piorunochrony.

Przypuśćmy, że na powierzchni przewodnika A rozlany jest silny dodatni elektryczny ładunek, na powierzchni zaś pobliskiego przewodnika B silny ładunek ujemny; może wówczas wydarzyć się, że warstwa rozciągającego się między A i B powietrza zostanie przerwana, że między A i B przebieje elektryczna *iskra*. Wspaniałym przykładem takiej iskry jest *błyskawica*, która podczas burzy bije w chmurach lub też bije niekiedy między chmurą a ziemią.

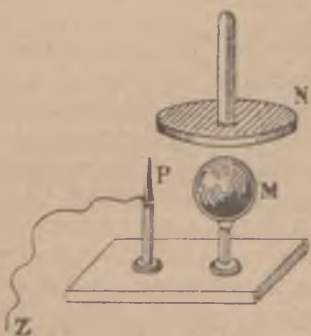
Iskra jest wąską kolumną gazu nagle przez wyładowanie rozżarzonego; domieszane w niej bywają pary metalu, z którego składają się wyładowujące się przewodniki. Suchy trzask iskry pochodzi od pulsu raptownego zgęszczenia, które gaz rozgrzany i rozszerzający się nagle wytwarza w otaczającym gazowym ośrodku (§§ 61, 73 i 96 tomu II-go); z tej samej przyczyny pochodzi grzmot, który nieraz, dzięki odbiciom, przeciąga się lub powtarza się kilkakrotnie.

Badaniu zjawisk elektrycznych, w połowie XVIII-go stulecia, oddawał się, między innymi, Benjamin Franklin w Filadelfji, za młodu drukarz i księgarz, niebawem mąż stanu i dyplomata (1706—1790); postanowił on dowieść, że błyskawica na niebie jest tylko potężną iskrą elektryczną. Podczas burzy, w czerwcu 1752 r., wypuścił pod chmury latawca; jego ostrze żelazne łączyło się konopnym



sznurem z kluczem, który okazał niebawem silny ładunek. Od tego (bardzo zresztą niebezpiecznego) doświadczenia był tylko krok do zbudowania dziś tak pospolitego *piorunochronu*. Słusznie zatem i pięknie streścił D'Alembert zasługi Franklina w hexametrze: *eripuit coelo fulmen, sceptrumque tyrannis*.

Działalność piorunochronu możemy objaśnić następującem doświadczeniem. Niechaj przewodnik N uzmysławia naładowaną chmurę, wiszącą ponad budynkiem M (rys. 17). Ażeby zapobiec grożącemu pomiędzy M a N wyładowaniu, umieszczamy metalowe ostrze P w pobliżu kuli M i łączymy je metalicznie z ziemią. Ujemny (przypuśćmy) ładunek przewodnika N indukuje na końcu ostrza P ładunek dodatni, ujemny zaś ładunek ostrza odpływa do ziemi. Ale dodatni ładunek ostrza wypływa zeń szybko, dociera do przewodnika N i zobojętnia jego ujemny ładunek.

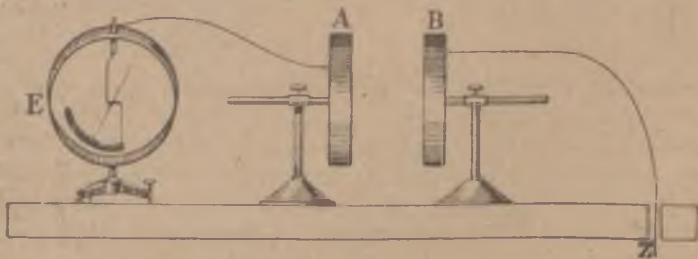


Rys. 17.

Zakończenie piorunochronu powinno być ostre i czyste (niezardzewiałe); piorunochron powinien łączyć się metalicznie (bez przerwy) ze strumieniem, studnią, wilgotnym gruntem, siecią rur żelaznych (np. wodociągowych, lecz *nie* gazowych). Rozmnażanie się przewodów elektrycznych w miastach spółczesnych chroni je raczej od niebezpieczeństw piorunu aniżeli na nie naraża (por. § 8); dokoła niektórych budynków, np. magazynów amunicyjnych, budowano nawet klatki metaliczne, celem ich skutecznej osłony od piorunu.

§ 12. Kondensatory; butelka lejdejska.

Ładujemy dodatnio przewodnik A (rys. 18), połączony metalicznie z elektroskopem E , zresztą izolowany; zauważmy podziałkę,



Rys. 18.

do której odchyliła się wskazówka elektroskopu. Do przewodnika A zbliżamy drugi przewodnik B , który dotychczas był

odległy od A ; przewodnik B nie jest naładowany i łączy się metalicznie z ziemią. Im bliżej do A przysuwamy B , tem bardziej zmniejsza się odchylenie wskazówki elektroskopu E od normalnego jej położenia. Zgodnie z § 6-ym mówimy, że na przewodniku B przez indukcję utworzył się ładunek ujemny, dodatni zaś jego ładunek odpłynął do ziemi. Skoro jednak przy zbliżaniu B do A napięcie w elektroskopie E maleje, widocznie zatem ujemny ładunek przewodnika B wywabia swem przyciąganiem, niejako wyciąga dalsze dodatnie ładunki z E do A . Dopóki w pobliżu A znajduje się B , musielibyśmy udzielić przewodnikowi A wiele dodatniego ładunku, zanim skłonilibyśmy wskazówkę w E , by powróciła do pierwotnego położenia, które zajmowała przed zbliżeniem przewodnika B . Możemy więc opisać dość trafnie przebieg doświadczenia, mówiąc, że ładunek przewodnika B *wiąże* albo *zagęszcza* obecne na przewodniku A ładunki. Od takiego obrazu zjawiska (którym chętnie posługiwano się dawniej) pochodzi nazwa *kondensatora*, nadawana w fizyce każdemu układowi dwóch przewodników, oddzielonych od siebie warstwą ciała izolującego.

Badając działalność *powietrznego* kondensatora AB (rys. 18), przekonywamy się łatwo, że grubość przewodzących płyt A i B (t. zw. *okładek*) nie wywiera wpływu na jego elektryczną *pojemność*; pojemność ta zależy natomiast od rozległości zwróconych ku sobie powierzchni okładek a także od ich odległości wzajemnej, czyli od grubości warstwy izolującej, która oddziela od siebie okładki. Im większa jest rozległość wspomnianych powierzchni, im mniejszy ich odstęp, tem skuteczniej funkcjonuje kondensator, tem większą okazuje pojemność. Zmniejszając atoli grubość izolującej warstwy powietrznej, narazamy się na niebezpieczeństwo iskry, która, gdy między A i B przeskoczy, niweczy działanie przyrządu; zastępujemy więc warstwę powietrza przez (cienką) szklaną tafelkę, której iskra nie przebijie łatwo ani nie okrąży. Prostym zatem *szklanym płaskim* kondensatorem jest tafla szklana, z dwóch stron oklejona (nie sięgającemi brzegów) arkuszami metalicznej folii (cynowej, aluminowej); przyrząd ten, zwany *taflą Franklina* (niesłusznie, gdyż wynalazł go Bevis), jest prototypem rozmaitych płaskich kondensatorów, które znajdują częste zastosowania w przemyśle; za izolator w nich służy mika, parafinowany papier, niekiedy warstwa lakieru, w nowszych konstrukcjach nieraz warstwa oliwy lub innego ciekłego izolatora.

Od płaskiego kondensatora niczem istotnem nie różni się kondensator kulisty lub cylindryczny. Takim cylindrycznym szklanym kondensatorem jest powszechnie znana *butelka lejdejska*, sporządzona (nieumyślnie) po raz pierwszy przez von Kleista na Pomorzu i van Musschenbroeka w Lejdzie (1745); w postaci spólczesnej jest to szklany sło



Rys. 19.

cienkościenny, wyklejony wewnątrz i oklejony odzewnątrz metalową folią (rys. 19); z wewnętrzną okładką łączy się metalowy pręt *A*, od ścian izolowany; *A* i *B* są *biegunami* butelki. Butelka lejdecka, a tem bardziej złożona z kilku butelek *baterja* ułatwia wykonywanie elektrostatycznych doświadczeń; dołączona do indukcyjnej maszyny, pozwala między jej biegunami otrzymywać iskry wprawdzie rzadsze, ale bezporównania świetniejsze.

Zadania.

1. Mamy do rozporządzenia: szklany pręt, kawałek jedwabiu, elektroskop; jak rozstrzygnąć o znaku pewnego elektrycznego ładunku?

2. Dwie metalowe płyty są ustawione poziomo nad sobą; dolna jest połączona z ziemią, górna jest silnie naelektryzowana; jak zachowują się drobne korkowe kuleczki umieszczone między płytami?

3. Blisko listków elektroskopu, nie dotykając ich jednak, znajdują się dwa słupki metalowe połączone z ziemią; czy elektroskop dzięki temu urządzeniu nie stanie się wrażliwszy? Dlaczego łączymy z ziemią metalową osłonę elektroskopu?

4. Czy na izolowanym przewodniku można wytworzyć jednocześnie dodatni i ujemny ładunek? Przy pomocy danej izolowanej kuli metalowej, naładowanej dodatnio, naelektryzować drugą kulę metalową ujemnie, trzecią dodatnio.

5. Jak możemy przekonać się o tem, czy gazy płomienne są dobrym czy złym przewodnikiem?

6. Na krążku elektroskopu umieszczamy nienaładowaną ebonitową płytkę; gdy pocieramy krążek płytką, czy listki elektroskopu rozchyla się wówczas? Co dostrzegamy, gdy oddalimy płytkę?

7. Elektryzujemy siatkę wyrobioną w postaci worka z nici bawełnianych lub konopnych; następnie badamy, zapomocą wywiadowczej płytki, stan zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni worka; co dostrzegamy? Przywiązany do dna worka jedwabny sznurek pozwala go odwrócić nazewnątrz stroną wewnętrzną, bez rozbrojenia; odwróciwszy worek w taki sposób i powtarzając badanie, co dostrzegamy?

8. Dlaczego przewodniki metalowe, służące do elektrostatycznych doświadczeń, bywają zwykle zaokrąglone? Czy przewodnik pokryty metalicznym lub innym pyłem zachowuje się elektrycznie tak samo jak czysty?

9. Do krążka elektroskopu przytwierdzono metalowe ostrze; jak zmieni się wówczas zachowanie się elektroskopu? Jaki wpływ miałoby wkręcenie ostrza do wewnętrznej powierzchni metalowej osłony przyrządu? Dlaczego zginamy palec, gdy, w chęci wywołania iskerki, zbliżamy go do przewodnika naładowanego? Czy do tego celu nadaje się igła metalowa trzymana w ręku? czy izolowana igła byłaby odpowiednia?

10. Było podobno zwyczajem w starożytności, na widok groźnych chmur, rozpalać ogniska; czy sposób ten mógł rzeczywiście przyczyniać się do ułagodzenia Zeusa gromowładnego? Czy komin fabryczny jest bardziej czy mniej narażony na niebezpieczeństwo gromu, gdy uchodzą zeń duże ilości gazów płomiennych?

11. W maszynach Ramsdena, Wintera i innych (znajdujemy je w każdym zbiorze przyrządów fizycznych), okrągłą tafel szklana, którą obracamy przy

pomocy korby, ociera się o skórzane poduszki (zwykle pokryte amalgamatem cynowo-cynkowym); tworzące się ładunki zbiera *kollektor* za pośrednictwem *grzebieni*, których ostrza są zwrócone ku taflii. Wyjaśnić działanie takiej maszyny (por. § 6). Jaką rolę spełniają grzebienie? Obmyśleć maszynę, która dostarczałaby zarówno dodatnich jak ujemnych ładunków. Jaki byłby skutek, gdybyśmy szklaną taflę maszyny zastąpili tarczą mosiężną? Wskazać źródło energii, której dostarcza działalność maszyny.

§ 13. Ilościowe określenie elektrycznego ładunku.

Opisywaliśmy dotychczas rozmaite elektryczne zjawiska; lecz w tych zjawiskach nic nie *mierzyliśmy*, nie badaliśmy ich zatem ściśle. Naukowe badanie otaczającego nas świata winno być *ilościowe*. Zawilego splotu wydarzeń w naturze nie możemy rozgmatwać, dopóki poprzestajemy na ogólnikowym opisie. Tworząc pojęcia jasne, ilościowe, od wszelkiej dowolności i dwuznaczności dalekie, przenikamy głębiej i pod pozorami chaosu dostrzegamy *prawidłowość* w zjawiskach.

Wyobraźmy sobie metalową, zamkniętą osłonę O ; może nią być naczynie PQ , którem posługiwaliśmy się w § 8-ym. Ze wewnętrzną powierzchnią osłony łączymy metalicznie z elektroskopem E . Do wnętrza osłony wprowadzamy rozmaite elektryczne ładunki; na jej zewnętrznej powierzchni wytwarzają się wówczas nowe ładunki, których obecność zdradza się zachowaniem się listków (lub wskazówki) elektroskopu. Przyjmujemy określenia następujące: (I) uznajemy, że dwa *jednoimiennie* ładunki są sobie równe, gdy, po kolei wniesione do wnętrza osłony O , sprawiają te same wskazania w elektroskopie E . (II) Uznajemy, że bezwzględne wartości dwóch *różnoimiennych* ładunków są sobie równe, gdy ładunki te, równocześnie wniesione do wnętrza osłony O , nie wywołują wychylenia listków (lub odchylenia wskazówki) w elektroskopie E .

Pocieramy o siebie dwa różne ciała, np. szkło i jedwab, ebonit i futro, wogóle ciała a i b ; lub też takie dwa ciała wprowadzamy ze sobą w zetknięcie. Po rozłączeniu, ciała a i b okazują się różnoimiennie naelektryzowane; wprowadzając je wówczas (równocześnie) do wnętrza osłony O , przekonujemy się, że nie wywołują wychylenia w elektroskopie; według określenia (II) wnosimy zatem, że ciała potarte albo ze sobą zetknięte otrzymują ładunki znaków przeciwnych, lecz bezwzględnych wartości jednakowych,

Wyobraźmy sobie dwa jednoimiennie ładunki q_1 i q_2 ; przypuśćmy, że, gdy każdy z osobna był umieszczony we wnętrzu osłony O , wskazania elektroskopu były te same. Powiadamy, że $q_1 = q_2$; wspólną wartość tych ładunków oznaczamy przez q . Wprowadzając teraz q_1 i q_2 jednocześnie do wnętrza osłony, twierdzimy, że znajduje się tam ładunek $2q$. Jeżeli pewien ładunek Q jednoimienny z q_1 i q_2 , znajdując się we wnętrzu osłony, wywołuje w elektroskopie te same wskazania, jakie w tych warunkach wytwarzają wspólnie q_1 i q_2 , powiadamy, że $Q = 2q$. Podobnie rozstrzygamy, kiedy ładunek Q , jednoimienny z q_1 i q_2 , wynosi $3q$, $4q$ i t. d. Wybierając q dostatecznie mały, możemy zmierzyć wystarczająco dokładnie każdy jednoimienny z q_1 i q_2 ładunek; odwołując się do określenia (II), rozciągamy sposób mierzenia do różnoimiennych względem q_1 i q_2 ładunków.

Kto zatem posiada osłonę metalową zamkniętą i elektroskop, może zmierzyć każdy elektryczny ładunek Q t. j. porównać go z pewnym ładunkiem q , uznanym za jednostkę ładunków. Ale wybór jednostki q jest dotychczas dowolny. Nasza metoda mierzenia ładunków jest wprawdzie ścisła, ale nie jest *powszechna*, podobnie jak metoda mierzenia ciężarów, polegająca na użyciu pewnej sprężyny, mogłaby być ścisła, ale nie byłaby powszechna. Musimy ustanowić jednostkę elektrycznego ładunku, którą każdy mógłby *odtworzyć*.

§ 14. Wektor elektryczny.

Przypominamy teraz, że dokoła każdego naelektryzowanego ciała C istnieje *pole elektryczne* (§ 2) czyli zakres przestrzenny, w którym objawiają się siły sprawiane przez ładunek ciała C . Takie siły nazywamy *elektrycznymi* ze względu na ich pochodzenie; ale mierzymy je według ogólnych zasad, które, celem pomiaru sił, ustanowiliśmy w dynamice. Przypuśćmy, iż mamy zbadać pole istniejące dokoła naładowanego ciała C . Wyobraźmy sobie bardzo drobne wahadełko (§ 2), zaopatrzone w nadzwyczaj słaby *dodatni* ładunek q ; wyobraźmy sobie, iż wnosimy je do różnych miejsc pola i obserwujemy jego zachowanie się; znając masę wahadełka, moglibyśmy podać wartość siły F , która w każdym punkcie pola jest wywierana na ładunek q wahadełka.

Mała deszczulka, umieszczona na powierzchni wody, wskaże prawdziwie kierunek prądu w jeziorze lub rzece; ale kołysanie się dużego okrętu jest wy-

padkowym wynikiem mnożenia impulsów, nie daje więc obrazu kierunków płynięcia. Porównanie to tłumaczy, dlaczego rozmiary wywiadowczego wahadełka powinny być małe; w przeciwnym razie z ruchu wahadełka nie moglibyśmy sądzić o sile działającej w danym punkcie pola. Ładunek q wahadełka powinien być znikomy; w przeciwnym razie jego wpływ zakłócałby pole, które mamy badać. Znak wywiadowczego ładunku możnaby wybrać dowolnie; na wybór dodatniego istnieje oddawna zgoda powszechna.

Badanie pola zapomocą wywiadowczego wahadełka jest doświadczeniem idealnem, które wykonywamy w wyobraźni; ma ono nam tylko dopomóc do utworzenia pojęć nadzwyczaj ważnych w nauce o elektrycznych zjawiskach.

Przypuśćmy, iż badamy pole, wytwarzane przez ładunek Q ciała C . Jeżeli natura i kształt ciała C oraz ładunek Q pozostają niezmiennie, pole również pozostaje niezmiennie. Ale siła F , której w różnych punktach pola doznaje wahadełko, zależy nietylko od pola, lecz również od ładunku q wahadełka; dlatego wartość siły F samej przez się *nie* daje należytej miary pola. Jeżeli na ładunek q w miejscu M działa siła F , wówczas na ładunek $\frac{1}{2}q$, $\frac{1}{3}q$ w temże miejscu działa siła $\frac{1}{2}F$, $\frac{1}{3}F$; innemi słowy: *siła F jest wprost proporcjonalna do ładunku q wahadełka*. Napiszmy

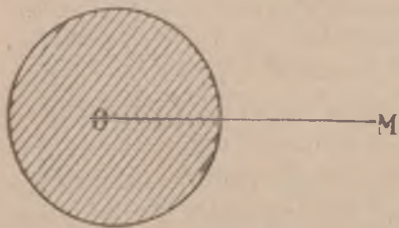
$$1. \quad F = qE$$

Jakie własności ma wówczas wielkość E ? Ponieważ siła F jest wektorem (§§ 11 i 35 tomu I-go), przeto E jest również wektorem; wektor E jest umiejscowiony w tej samej prostej, w której leży F , ma ten sam kierunek jak F i ten sam punkt przyłożenia. Ponieważ wartość wektora F jest proporcjonalna do ładunku q , zatem wartość wektora E nie zależy od q , zależy natomiast od miejsca, w którym E jest utworzony. W wektorze E znaleźliśmy zatem właściwą miarę stanu, panującego w danym punkcie pola; poznaliśmy pole, jeżeli dla każdego jego punktu możemy wskazać wartość i kierunek wektora E ; dlatego wektor E nazywamy *zasadniczym elektrycznym wektorem*.

§ 15. Prawo Coulomba.

Wyobraźmy sobie kulę metalową pełną, której środek znajduje się w punkcie O (rys. 20) i przypuśćmy, że na powierzchni tej kuli rozlany jest jednostajnie ładunek Q . W punkcie M , którego odległość OM od środka kuli ma pozostawać niezmienna, umieszczamy wahadełko wywiadowcze obdarzone zni-

komo małym ładunkiem q ; z ruchu lub równowagi wahadełka wnosimy o czynnej w miejscu M sile F ; z obserwowanej w miejscu M siły F wyprowadzamy, podług wzoru (1) poprzedzającego artykułu, działający w tem miejscu wektor E . Przy-



Rys. 20.

puszczając, że ładunek wywiadowczego wahadełka jest tak słaby, że można zaniedbać zmiany, które mogłyby wywołać przez indukcję w ładunku kuli, powiadamy: *wektor E , wytwarzany w danem miejscu M pola przez ładunek Q kuli, jest wprost proporcjonalny do ładunku Q .*

Oznaczając zatem przez f współczynnik proporcjonalności, niezależny od q ani Q , zależny natomiast od wyboru miejsca M (t. j. od położenia wahadełka względem kuli), mamy

$$1. \quad E = fQ$$

skąd wynika według (1), § 14:

$$2. \quad F = fqQ.$$

Siła F , czynna w danem miejscu M , jest wprost proporcjonalna do iloczynu obu ładunków: q wywiadowczego oraz Q stwarzającego pole.

Twierdzenie (2) przypomina podobną zależność, jak wiemy, wielkiej wagi w naszej nauce: siła przyciągania czynna pomiędzy dwiema materjalnemi bryłami A i B , w danem położeniu tych ciał, jest wprost proporcjonalna do iloczynu obu mas, masy A i masy B . Może zatem i w innym względzie prawa sił elektrostatycznych są podobne do słynnej zasady mechaniki niebios, do prawa Newtona? Takie pytanie przewodziło Karolowi Augustowi Coulomb (1736—1806) w badaniach, które doprowadziły w r. 1785 do odkrycia prawa działania sił elektrostatycznych: *wzajemne siły, działające pomiędzy dwoma bardzo małemi (skupionemi w punktach) elektrycznemi ładunkami, są równe i przeciwne sobie, są umiejscowione w łączącej je prostej, są wprost proporcjonalne do iloczynu obu ładunków, odwrotnie proporcjonalne do kwadratu wzajemnej ich odległości.* Oznaczając zatem przez F każdą z dwóch sił, wywieranych przez ładunki q i Q na siebie wzajemnie, przez r odległość punktów,

w których q i Q są skupione, przez k stały współczynnik, niezależny od q , Q ani r , mamy

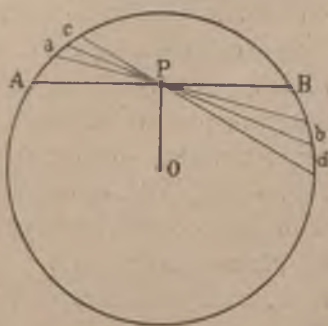
$$3. \quad F = \frac{kqQ}{r^2}.$$

Elektrostatyczne siły działają więc według praw bardzo podobnych do zasady powszechnego ciążenia; odróżniają się jednak od ciążenia w niektórych względach, przede wszystkim swą *dwoistością*. Ciała materialne przyciągają się wszystkie wzajemnie; elektryczne ładunki przyciągają się, jak wiemy, gdy są różnoimienne, lecz odpychają się, gdy są jednoimienne. Taka dwoistość sił wiąże się z dwoistością ładunków, które dzielą się na dwa odmienne rodzaje, gdy tymczasem masy materialne należą wszystkie do jednego tylko rodzaju.

Znane z § 53-go tomu I-go twierdzenie Newtona obowiązuje również w elektrostatyce: *kula mająca na swej powierzchni ładunek Q jednostajnej gęstości działa nazewnątrz, jak gdyby ładunek Q był skupiony w jej środku*. Rozumiejąc zatem przez r odległość OM (rys. 20) wahadełka, obdarzonego ładunkiem q , od środka kuli, mamy znów w miejscu M

$$4. \quad F = \frac{kqQ}{r^2}.$$

Jak widzimy, siła F nie zależy od promienia kuli, na której znajduje się ładunek Q ; gdy zatem, nie zmieniając wartości Q , zmniejszamy coraz bardziej ten promień, siła F pozostaje niezmienna. W tem znaczeniu możemy powiedzieć, że w metalowej, jednostajnie na powierzchni naładowanej kuli urzeczywistniona jest fikcja *punktowego* ładunku, którą posługujemy się w prawie Coulomba. Możemy więc sprawdzać prawo Coulomba, obserwując siły, działające pomiędzy naładowanymi metalowymi kulkami; ale spostrzeżenia te nie mogą być dokładne z powodu rozpraszania się ładunków, z powodu wpływu ładunków indukowanych, prądów powietrza i innych zakłóceń. Nieporównanie pewniejszem potwierdzeniem ścisłości prawa Coulomba są ważne prawdy, znane nam z § 8-go. Wyobraźmy sobie zamkniętą metalową powłokę kulistą, w której wewnątrz, w punkcie P (rys. 21), znajduje się znikomo mały, dodatni ładunek; na zewnętrznej powierzchni powłoki ma być jednostajnie rozlany również dodatni elektryczny ładunek. Ze środka O kuli prowadzimy do P prostą OP ; przez P prowadzimy płaszczyznę AB , prostopadłą do OP . Ładunek rozlany na czaszy kulistej $AacB$ odpycha P w kierunku od P ku O ; ładunek rozlany na czaszy przeciwległej $AbdB$ odpycha P w kierunku przeciwnym, od O ku P . Jeżeli prawo Coulomba jest ściśle prawdziwe, dwie



Rys. 21.

powyższe siły są sobie równe. Biorąc istotnie na uwagę dwa przeciwległe elementy a , b powierzchni (przyczem a leży nad płaszczyzną AB , b pod nią), widzimy, że ładunki Q_a i Q_b tych elementów mają się do siebie jak rozległości, powiedzmy S_a i S_b ich powierzchni. Lecz rozumiejąc przez α i β odległości elementów a i b od punktu P , mamy, jak wiadomo z geometrii

$$5. \quad S_a : S_b = \alpha^2 : \beta^2$$

zatem również

$$6. \quad Q_a : Q_b = \alpha^2 : \beta^2$$

skąd wynika, iż siły Q_a/α^2 oraz Q_b/β^2 są sobie równe. Ten sam sposób rozumowania stosuje się do innych par elementów uważanych czasz, np. c i d i t. d. Istotnie zatem punkt P nie doznaje żadnej siły od powierzchniowego ładunku, rozlanego jednostajnie na zewnętrznej powierzchni powłoki. Wniosek ten można uzasadnić i w ogólniejszym przypadku, gdy zewnętrzna powierzchnia zamkniętej metalowej osłony ma postać dowolną. Gdyby prawo Coulomba nie było ściśle prawdziwe, wówczas, jak widzimy z wywodu, we wnętrzu naładowanej metalowej zamkniętej powłoki istniałoby pole elektryczne; wynik ten byłby sprzeczny ze znanymi z doświadczenia faktami (§ 8).

§ 16. Wpływ ośrodka; stała dielektryczna.

Szukając praw, rządzących elektrycznymi siłami, Coulomb wykonywał pomiary w zwykłym atmosferycznym powietrzu; w powietrzu Coulomb widział tylko bierny izolator, którego rola jest zupełnie podrzędna. Gdy cała uwaga Coulomba była zwrócona na działające na siebie z odległości ładunki, wynalazczy, przenikliwy wzrok Michała Faradaya (1791—1867) kierował się raczej ku ośrodkowi, który otacza i wzajemnie od siebie oddziela ładunki. Faraday niechętnie nazywał ośrodek *izolującym*; sądził, że nazwa ta powiada nam tylko, czego ośrodek *nie* czyni; otoczenie ciał naładowanych nazywał raczej *dielektrykiem* lub *dielektrycznym ośrodkiem*. Około r. 1837 Faraday już wiedział, że dielektryczny ośrodek nie jest bynajmniej obojętnym świadkiem działań elektrycznych; *wartość sił elektrycznych, które są czynne pomiędzy naładowanymi ciałami, zależy od natury obejmującego je dielektryka*. Uzupełniamy więc teraz prawo Coulomba wypowiedziane w artykule poprzednim; w tym celu drobna tylko zmiana sformułowania będzie potrzebna. Zakładamy, że stały współczynnik k , występujący we wzorach (3) i (4) § 15-go, zależy od natury dielektrycznego ośrodka otaczającego ładunki q oraz Q . Doświadczenie uczy, jak zobaczymy niebawem, że *siły czynne pomiędzy dwoma danymi (niezmiennymi) ładunkami* (pozostającymi w odległości

niezmiennej) są wówczas największe, gdy ładunki znajdują się w próżni; gdy ładunki są zanurzone w jakimkolwiek innym (materiałnym) ośrodku, działające siły *caeteris paribus* są mniejsze niż w próżni. Ażeby dać wyraz temu faktowi, zastąpmy dotychczasowy stały współczynnik k w formule prawa Coulomba przez stosunek A/ϵ ; A ma być stałą *powszechną*, jednakową dla wszelkich ośrodków, natomiast ϵ ma być liczbą charakteryzującą dielektryczne własności uważanego ośrodka. Dla próżni przyjmujemy $\epsilon = 1$; dla każdego innego materiałnego ośrodka zakładamy $\epsilon > 1$; taką wielkość ϵ nazywamy *stałą dielektryczną* ośrodka. Formułę (3) lub (4) § 15-go przepisujemy teraz w następującej postaci

$$1. \quad F = \frac{AqQ}{\epsilon r^2}.$$

Przekonamy się w dalszym ciągu niniejszego rozdziału, że doświadczenie zgadza się z tak uzupełnionem prawem Coulomba, że nawet takiego uzupełnienia niezbędnie wymaga.

Atmosferyczne powietrze i inne gazy równie małej gęstości są rozcieńczoną postacią materji, jak o tem wiemy z tomu II-go; takie gazy zachowują się, jako dielektryki, prawie tak samo jak próżnia; wartość ich stałej ϵ jest mało co większa od jedności. Natomiast dla ciekłych i stałych izolujących ośrodków (jak nafta, oliwa, szkło, siarka i t. p.) stała ϵ jest znacznie większa od jedności. Gdybyśmy umieli dokładnie zmierzyć siły czynne pomiędzy naelektryzowanemi ciałami, przekonalibyśmy się zatem, że siły te zmniejszają się znacznie, gdy ciała przenosimy np. z powietrza do nafty; ale niebawem poznamy dokładniejsze i dogodniejsze metody mierzenia stałej ϵ dielektrycznych ośrodków.

Dostrzegamy obecnie drugą ważną różnicę, zachodzącą między sposobami działania sił elektrostatycznych i grawitacyjnych (por. § 15). Siły elektryczne zależą od natury ośrodka, w którym rozwija się ich czynność; w przypadku grawitacji takiej zależności nie znamy. Przyciąganie czynne między dwiema danemi bryłami, znajdującemi się w danej odległości od siebie, jest jednakowe, o ile dotychczas wiadomo, bez względu na naturę oddzielającego je ośrodka.

§ 17. Elektrostatyczna jednostka ładunku.

Przypuśćmy, że ładunki q i Q znajdują się w próżni, w punktach leżących od siebie w odległości r ; siła F czynna między niemi wynosi

$$1. \quad F = \frac{AqQ}{r^2}.$$

Jakiemi jednostkami mamy mierzyć wchodzące do tego wzoru wielkości? Siłę F wyrażamy w dynach (§ 47 tomu I-go); od-

ległość r mierzymy centymetrami; nie ustanowiliśmy jednak dotychczas jednostki elektrycznego ładunku. Załóżmy, że współczynnik A jest równy *oderwanej* (czyli niemianowanej) *jedności*; jednostkę ilości q i Q , która z takiego założenia wyniknie, nazwijmy *elektrostatyczną jednostką ładunku*. Zamiast równania (1) mamy wówczas wzór prostszy

$$2. \quad F = \frac{qQ}{r^2}.$$

Jeżeli w tym wzorze przypuścimy, że

3. $r = 1 \text{ cm}$; $q = Q = \text{el.-stat. jednostce ładunku}$,
otrzymamy:

4. $F = 1 \text{ dynie}$.

Elektrostatyczna jednostka ładunku, skupiona w punkcie, w odległości 1 cm od innej, również w punkcie skupionej elektrostatycznej jednostki ładunku, wywiera na nią w próżni siłę 1 dyny i wzajemnie doznaje od niej w próżni siły 1 dyny.

Wiemy, że $1 \text{ dyna} = 1 \text{ gr cm/sek}^2$ (§ 47 tomu I-go); z równania (2) wynika zatem, że

$$\text{el.-stat. jedn. ładunku} = 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{3/2} / \text{sek}.$$

Pocierając futrem szkło lub ebonit, możemy łatwo uzyskać ładunek wynoszący setki elektrostatycznych jednostek; w błyskawicy zobojętniają się nieraz miljarde. W elektrotechnice znajdujemy się codzień wobec zjawisk, w których występują ładunki ogromne w stosunku do elektrostatycznej jednostki; odwoływanie się do niej byłoby więc niedogodne. Na konferencjach międzynarodowych w Chicago (1893) i w Londynie (1908) ustanowiono inną, *praktyczną* jednostkę ładunku i ku czci Coulomba nazwano ją *kulombem*; określenie tej jednostki poznamy dopiero w IV-ym rozdziale.

Niezależna od umów ludzkich, wyższa nad względy praktyczne, fundamentalna jednostka elektrycznego ładunku jest nam dana w samym urządzeniu natury; jest nią (ujemny) ładunek jednego elektronu (§ 4). Według badań, które opisujemy w VIII-ym rozdziale, wartość e ładunku jednego elektronu jest następująca:

$$6. \quad e = 4.774 \times 10^{-10} \text{ (ujemnych) el.-stat. jedn. ład.}$$

Na jedną zatem ujemną el.-stat. jednostkę ładunku składa się 2095 milionów elektronów. Jeżeli na metalowej kulce (której masa niechaj wynosi 250 gr) zgromadziliśmy 4774 el.-stat. jedn. ujemnego ładunku, mamy na niej 10^{13} swobodnych elektronów. Jak zobaczymy, masa elektronu wynosi $0.9 \times 10^{-27} \text{ gr}$; masa rozlanego na kulce ładunku wynosi więc $0.9 \times 10^{-14} \text{ gr}$, co wobec 250 gr jest ilością znikomą.

Zadania.

1. Dwie metalowe kulki, dodatnio naładowane, znajdują się w próżni; na każdej znajduje się 100 el.-stat. jedn. ładunku; odległość środków kulek wynosi 10 cm. Znaleźć wartość F czynnego między kulkami odpychania. Przypuszczając, że masa każdej kulki wynosi 0.5 gr, porównać F z ciężarem kulki, oraz z wzajemnem ciążeniem, działającym między kulkami w wymienionej odległości.

2. Dwie małe, metalowe, dodatnio naelektryzowane kulki wiszą na cienkich nitkach; masa każdej kulki wynosi m , ładunek każdej q , długość każdej nici l . Pod działaniem siły ciężkości, wzajemnego odpychania F oraz reakcji nici, kulki znajdują się w równowadze; kąt odchylenia każdej nici od pionu wynosi θ ; odległość środków kulek jest r . Dowieść, że spełnione są wówczas równania

$$r = 2l \sin \theta; \quad F = mg \tan \theta$$

w których g jest przyspieszeniem ciężkości. Zakładając $m = 0.5$ gr, $l = 50$ cm, $q = 100$ el.-stat. jedn., obliczyć θ , r oraz F .

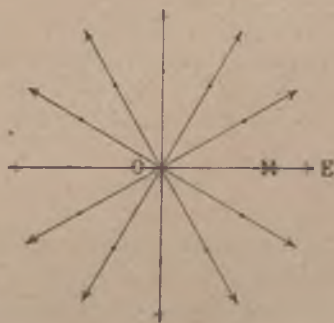
3. Sprawdzić, że 1 gram elektronów zawierałby ich 1.11×10^{27} , że miałyby 5.3×10^{17} el.-stat. jedn. ład. Udowodnić, że w próżni, w odległości 100 cm, gram elektronów odpychałby inny gram elektronów siłą 2.81×10^{31} dyn. Wykazać, że 1 gram materjalnej masy, w odległości również 100 cm, przyciąga inny 1 gram materjalnej masy siłą 6.64×10^{-12} dyn; że zatem elektryczne działanie między dwoma gramami elektryczności w próżni jest około 4×10^{42} razy silniejsze niż ciążenie ku sobie, z tej samej odległości, dwóch gramów materji.

4. Mamy dwie jednakowe metalowe kulki; dodatni ładunek pierwszej wynosi $+190$ el.-stat. jedn., ujemny drugiej -50 el.-stat. jedn. Kulkom pozwalamy zetknąć się ze sobą, poczem oddalamy je, odległość ich środków wynosi 7 cm. Sprawdzić, że będą wówczas odpychały się siłą 100 dyn.

§ 18. Linje pola elektrycznego.

Wyobraźmy sobie, że w punkcie O (rys. 22) znajduje się dodatni elektryczny ładunek Q ; dokoła, w próżni, istnieje pole wytworzone przez Q . Ażeby zbadać ustrój pola, postępujemy jak w § 14-ym.

W miejscu M , gdzie chcemy znaleźć wartość i kierunek wektora E , umieszczamy drobne ciało, obdarzone małym dodatnim ładunkiem q . Wyrażając ładunki w elektrostatycznych jednostkach, powiadamy, że odpychanie F wywierane przez Q na q w odległości r wynosi qQ/r^2 i jest skierowane wzdłuż promienia r od Q do q ; wektor E wynosi więc Q/r^2 i jest skierowany tak samo jak F . Poprowadźmy linje proste, wychodzące z Q jak promienie r ; wyobrażają one w każdym miejscu kierunek

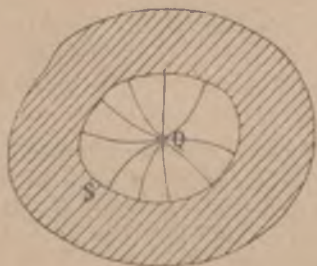


Rys. 22.

Wyobraźmy sobie, że w punkcie O (rys. 22) znajduje się dodatni elektryczny ładunek Q ; dokoła, w próżni, istnieje pole wytworzone przez Q . Ażeby zbadać ustrój pola, postępujemy jak w § 14-ym.

wektora E ; ich rozmieszczenie dokoła Q przedstawia rys. 22. Linje, które w każdym miejscu pola biegają zgodnie z kierunkiem wektora elektrycznego E , nazywamy *linjami pola elektrycznego*. Jeżeli ładunek wytwarzający pole jest skupiony w punkcie, linje pola są proste (rys. 22); w innych razach linje pola mogą być krzywe; wektor E w każdym miejscu jest wówczas *styczny* do przebiegającej przez to miejsce linii; przykłady takich pól poznamy niebawem.

Powiedzieliśmy, że linje pola wybiegają z dodatniego ładunku Q (rys. 22); dokądże one dążą, dokąd dobiegają? Przy-



Rys. 23.

puśćmy, że Q znajduje się we wnętrzu zamkniętego metalowego naczynia (rys. 23); linje pola docierają wówczas do wewnętrznej powierzchni S naczynia, ale na tej powierzchni urywają się, giną; w łonie metalu nie ma pola, wektor E jest tam $= 0$; do metalu zatem linje pola nie wkraczają. Wiemy jednakowoż, że na wewnętrznej powierzchni S tworzy się przez indukcję

ładunek ujemny (§ 8); zatem *linje pola łączą ze sobą przeciwne ładunki, wychodząc z dodatnich, wchodząc do ujemnych*.

Wyobraźmy sobie ciało metaliczne M , którego powierzchnią jest S (rys. 24); przypuśćmy, że na powierzchni S znajduje się



Rys. 24.

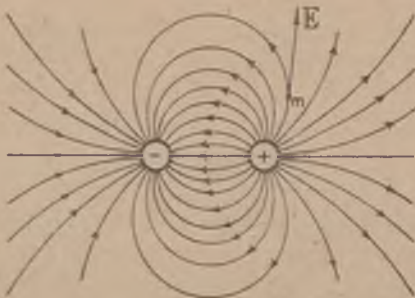
ładunek elektryczny w równowadze. Niechaj będzie l kierunkiem stycznym w miejscu A do powierzchni S ; utwórzmy składową E_t (w kierunku l) wektora pola, wytworzonego przez ładunek powierzchni S . Gdyby składowa E_t nie była równa zero, powierzchni, na S rozlany ładunek poruszałby się pod jej wpływem po powierzchni S , nie

pozostawałby więc w równowadze. Wektor E nie może zatem być skierowany ukośnie (jak na rys. 24-ym) do elementu A powierzchni S ; jedyną składową wektora E , która w elektrostatycznym polu może być różna od zera, jest składowa *normalna* E_n . W miejscu leżącym na powierzchni przewodnika wektor E elektrostatycznego pola jest normalny do powierzchni. Linje pola elektrostatycznego wybiegają więc normalnie z do-

datnich powierzchniowych ładunków i wkraczają normalnie do ładunków powierzchniowych ujemnych.

Na rys. 25-ym widzimy przebieg linii pola elektrostatycznego, wytwarzanego przez dwa przeciwne, co do bezwzględnej wartości równe sobie ładunki.

Wektor E pola jest w każdym miejscu styczny do przebiegającej przez to miejsce linii; mała bryłka, obdarzona znikomym (wywiadowczym) dodatnim ładunkiem, umieszczona nieruchomo w tym miejscu, zaczyna poruszać się w kierunku E . Przypuśćmy, że bryłka posunęła się, w tym kierunku, o mały łuk linii pola. Ponieważ bryłka jest bezwładna, dalszy jej ruch, według §§ 22 i 23-go tomu I-go, wynika z geometrycznego złożenia dwóch ruchów składowych: ruchu nabytego



Rys. 25.

oraz nowego, wywołanego przez nowy, nieco już odchylony wektor E . Linia pola wskazuje więc wszędzie kierunek *rozpoczynającego się* ruchu bryłki, lecz nie wyobraża całkowitego jej toru.

Wyobraźmy sobie pole, którego linie biegą wszystkie pionowo ku dołowi; wpoprzek tych linii, prostopadle do nich, umieszczamy kratę, złożoną z prętów metalowych. Na rys. 26-ym widzimy poprzeczne przecięcia prętów; należy



Rys. 26.

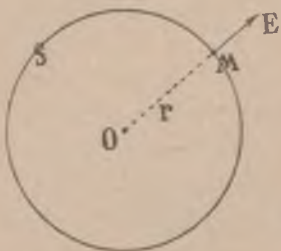
wyobrazić sobie, że pręty biegą prostopadle do płaszczyzny rysunku. Rysunek okazuje, jak krata pochłania idące z góry linie pola; pozwala on zrozumieć ochronne działanie metalicznych siatek i klatek, o którym była mowa w § 8-ym.

§ 19. Twierdzenie Gaussa.

Rozważmy jeszcze raz ustrój pola elektrostatycznego, wytwarzanego w próżni przez ładunek dodatni Q , skupiony w punkcie O (rys. 27). Dokoła punktu O jako środka zbudujemy promieniem r (idealną) powierzchnię kulistą S . W miejscu M leżącym na S wektor E wynosi Q/r^2 ; rozumiejąc przez S rozległość powierzchni S , mamy $S = 4\pi r^2$, zatem

$$1. \quad E = 4\pi Q/S.$$

Ładunek Q znajduje się w punkcie O ; lecz gdybyśmy zgodzili się rozłożyć go w wyobraźni na powierzchni S jednostajnie, jego gęstość wynosiłaby tam Q/S . Oznaczmy przez σ tę idealną gęstość; mamy



Rys. 27.

$$2. \quad E = 4\pi\sigma.$$

Wyobraźmy sobie w O środek kuli o promieniu R ; na jej powierzchni rozlany jest jednostajnie ładunek Q ; gęstość tego ładunku wynosi $Q/4\pi R^2$. W każdym miejscu M pola otaczającego kulę spełnione są równania (1) i (2). Jeżeli to miejsce leży w próżni tak, iż jego promień $r > R$, σ jest idealną gęstością ładunku Q przeniesionego na powierzchnię $4\pi r^2$, jest więc mniejsza w stosunku $R^2 : r^2$ od prawdziwej gęstości. Lecz jeżeli miejsce M leży na samej powierzchni kuli, tak iż $r = R$, gęstość σ jest rzeczywistą gęstością ładunku Q , wartość zaś, dana przez (2), jest graniczną wartością, do której dąży wektor E , gdy coraz bardziej zbliżamy się do powierzchni kuli od strony próżni.

Nietylko na powierzchni jednostajnie naładowanej kuli spełnione jest równanie (2). Wyobraźmy sobie w próżni przewodnik dowolnej postaci; ładunek, jakkolwiekby rozlany na powierzchni przewodnika, wytwarza pole w otaczającej próżni. Na powierzchni przewodnika wybieramy punkt M i dokoła tego punktu wyobrażamy sobie niezmiernie mały element powierzchniowy s . Przez σ rozumiemy gęstość ładunku w elemencie s , przez E , jak wyżej, graniczną wartość, do której dąży wektor pola, gdy zbliżamy się do punktu M od strony próżni. Pomiędzy E a σ mamy związek

$$3. \quad E = 4\pi\sigma.$$

Element s różni się mało od elementu powierzchni kulistej; graniczna w miejscu M wartość E zależy tylko od gęstości σ w najbliższym otoczeniu s tego miejsca; to nam tłumaczy, dlaczego związek (2) pozostaje w mocy bez względu na kształt powierzchni i na rozkład na niej ładunku. Rozumie się samo przez się, że równanie (3) stosuje się również, gdy powierzchnia przewodnika jest płaska.

Wiemy, że linie pola wychodzą z dodatnio naelektryzowanych, wchodzą zaś do ujemnie naelektryzowanych powierzchni. Równanie (3) możemy więc zastosować zarówno do przypadku do-

datnich jak ujemnych wartości σ ; gdy $\sigma > 0$, wektorowi E mamy nadawać kierunek z metalu nazewnątrz, w próżnię; gdy $\sigma < 0$, mamy rozumieć, że E kieruje się, przeciwnie, z próżni w metal. W obu razach E jest skierowany normalnie do elementu powierzchni, przez który przebiega.

Twierdzenia, które poznaliśmy w artykule niniejszym, zawdzięczamy odkryciom dwóch znakomych badaczy: Jerzego Greena (1828) oraz Karola Fryderyka Gaussa (1840).

§ 20. Wiązki pola elektrycznego.

Bierzemy jeszcze raz na uwagę pole elektrostatyczne, wytwarzane w próżni przez ładunek dodatni Q , skupiony w punkcie O (rys. 28); w każdym miejscu pola wyobrażamy sobie utworzony wektor E . Z punktu O prowadzimy nadzwyczaj ostry stożek, którego tworzącymi są linje pola wychodzące z O ; taki stożek nazywamy *wiązką pola* (wytwarzanego przez ładunek punktowy). Zbudowawszy dokoła O , jako środka, powierzchnie kuliste o coraz dłuższych promieniach r , widzimy, że wiązka wycina z tych powierzchni elementy coraz większej rozległości s . Wartość wektora E jest odwrotnie proporcjonalna do r^2 , rozległość s wprost proporcjonalna do r^2 , zatem E jest odwrotnie proporcjonalna do s :

$$1. \quad Es = \text{stała}.$$

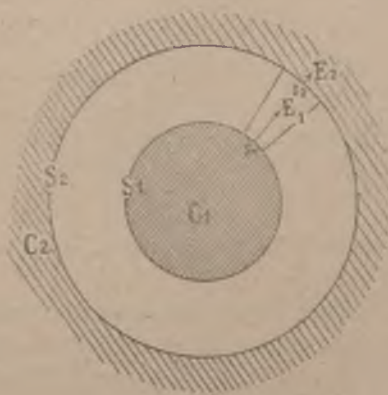
Im bardziej w danym miejscu pola rozszerza się wiązka, tem słabsze panuje tam pole; im wiązka jest węższa, tem pole jest silniejsze.

Przypuśćmy, że kula metalowa C_1 znajduje się spółośrodkowo w kulistym wydrążeniu ciała metalowego C_2 (rys. 29).

Oznaczmy przez S_1 zewnętrzną powierzchnię kuli C_1 , przez S_2 wewnętrzną powierzchnię wydrążenia; przypuśćmy, że na S_1



Rys. 28.



Rys. 29.

znajduje się w równowadze ładunek dodatni, na S_2 indukowany ujemny; pomiędzy S_1 a S_2 mamy próżnię. Wiązka pola wybiega promieniście z S_1 , wbiega promieniście do S_2 . Jeżeli s_1 i s_2 są rozległości elementów, które wiązka wycina z S_1 i S_2 i jeżeli E_1 i E_2 są graniczne wartości elektrycznego wektora w miejscach tych elementów, mamy, jak wyżej:

$$2. \quad E_1 s_1 = E_2 s_2.$$

Rozumiejąc przez q_1 i q_2 ładunki elementów s_1 i s_2 , piszemy podług twierdzenia Gaussa

$$3. \quad E_1 = 4\pi q_1/s_1; \quad E_2 = -4\pi q_2/s_2;$$

ze związku (2) zatem wypada

$$4. \quad q_1 = -q_2.$$

Wiązka łączy ze sobą ładunki przeciwne co do znaku, równe sobie co do bezwzględnej wartości. Całkowite na S_1 i S_2 rozlane ładunki Q_1 i Q_2 czynią zadosyć analogicznemu warunkowi $Q_1 = -Q_2$.

Przypuśćmy, że dodatni ładunek Q , skupiony w punkcie O , znajduje się w próżni; z punktu O lub, jak często mawiamy, z ładunku Q wychodzą linje oraz wiązki pola. Możemy wyprowadzać dowolną liczbę wiązek z ładunku Q ; umówmy się, że będziemy z Q wyprowadzali $4\pi Q$ wiązek, gdzie Q jest *liczbową wartością* Q t. j. liczbą oderwaną, wskazującą, ile jednostek ładunku zawiera się w Q . Mamy więc

$$5. \quad Q = Q \times (\text{jedn. ład.}).$$

Wyobraźmy sobie kulistą powierzchnię S , zatoczoną dokoła punktu O jako środka, promieniem r . Każda z O (czyli z Q) wychodząca wiązka wycina z powierzchni S element s ; ponieważ z Q we wszystkie strony wybiegło $4\pi Q$ wiązek, zatem

$$6. \quad s = \frac{S}{4\pi Q} = \frac{r^2}{Q} = \frac{r^2 \times (\text{jedn. ład.})}{Q}.$$

Jak z § 18-go wiadomo, $E = Q/r^2$, więc z równania (6) wynika

$$7. \quad s = \frac{(\text{jedn. ład.})}{E}.$$

Przypuśćmy, że N wiązek przebiega normalnie przez każdy cm^2 powierzchni kuli S ; mamy $N \cdot s = 1 \text{ cm}^2$, zatem z (7) wyprowadzamy

$$8. \quad N = \frac{1 \text{ cm}^2}{s} = \frac{1 \text{ cm}^2 \times E}{(\text{jedn. ład.})}.$$

Lecz skoro $E = Q/r^2$, zatem

9. jednostka wektora $E = (\text{jedn. ład.})/1 \text{ cm}^2$.

Rozumiejąc przeto przez E liczbową wartość elektrycznego wektora czyli liczbę oderwaną, wskazującą, ile jednostek zawiera się w wartości wektora E , dochodzimy do wniosku

$$10. \quad N = \frac{E}{\text{jedn. } E} = E.$$

Jeżeli z ładunku Q każemy wybiegać $4\pi Q$ wiązkom, wówczas liczba N wiązek, przecinających normalnie 1 cm^2 w danem miejscu pola, wyraża liczbową wartość E panującego w tem miejscu wektora E . W taki właśnie sposób będziemy budowali w wyobraźni wiązki pól elektrycznych.

Przypuśćmy, że przewodniki C_1 i C_2 , kształtów dowolnych, znajdują się naprzeciw siebie w próżni; na powierzchni S_1 przewodnika C_1 znajduje się ładunek dodatni, na powierzchni S_2 przewodnika C_2 znajduje się ujemny; obadwa są w równowadze. Na powierzchni S_1 , dokoła upatrzonego punktu M_1 , wyobrażamy sobie nadzwyczaj mały element s_1 (rys. 30); poprowadźmy wszystkie linje pola, które wychodzą z obwodu elementu s_1 ; przypuśćmy, że one

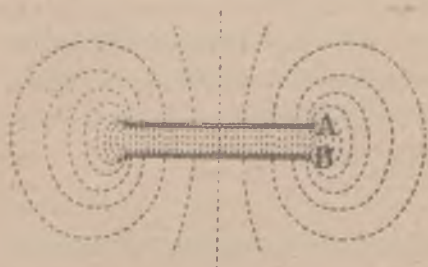


Rys. 30.

kończą się wszystkie na S_2 , wycinając na niej element s_2 . Wzięte wspólnie, linje te tworzą pobocznice pewnej *wiązki pola*, która wychodzi z powierzchni S_1 , wchodzi do S_2 . Dla takiej wiązki wszystkie poprzednie twierdzenia pozostają w mocy: wiązka wybiega z S_1 normalnie, wbiega do S_2 normalnie; rozszerza się poprzecznie, gdzie pole jest słabe, kurczy się poprzecznie czyli zwęża, gdzie pole jest silne; łączy ze sobą ładunki co do znaku przeciwne, co do bezwzględnej wartości równe. Liczba wiązek, przecinających 1 cm^2 normalnie, wyraża liczbową wartość panującego w danem miejscu elektrycznego wektora; z ładunku Q wybiega $4\pi Q$ wiązek, gdzie Q jest liczbową wartością ładunku Q .

Z pośród rozmaitych elektrostatycznych pól najprostszym ustrojem odznacza się pole *jednorodne*, w którym wektor E ma wszędzie wartość jednakową i jednakowy kierunek. Linje takiego pola są wszędzie równoległymi do siebie prostymi; wiązki są walcami prostymi, ich osi są równoległe, liczba wiązek przebiegających normalnie przez 1 cm^2 jest wszędzie ta sama; por. § 65 tomu I-go.

W jaki sposób moglibyśmy urzeczywistnić jednorodne pole elektryczne? Wyobraźmy sobie dwie płyty A i B płaskie, rozległe, metalowe, izolowane, usta-



Rys. 31.

wione równoległe do siebie w odstępnie nieznacznym (rys. 31). Przypuśćmy, że płytę A naelektryzowaliśmy dodatnio, płytę B połączyliśmy z ziemią; na B znajduje się wówczas ładunek ujemny, wartości zaś bezwzględne ładunków rozlanych na A i B są identyczne. Niemal cały ładunek każdej płyty znajduje się na płaszczyźnie zwróconej ku drugiej płycie; ładunki, zabłąkane po zewnętrznych, odwróconych od siebie stronach płyt,

można zaniedbać. Ograniczając się do środkowej części płyt, oddalonych od brzegów oraz do pola zawartego pomiędzy temi częściami, powiadamy: po wewnętrznych stronach środkowych części płyt ładunek jest rozlany jednostajnie, jego gęstość jest stała; z twierdzenia Gaussa wynika, że wektor E ma tam wartość stałą. W tej części pola jego linie biegną prostopadle do płaszczyzn płyt. W dostatecznej odległości od obwodu płyt pole jest więc zbliżone do pola jednorodnego; w okolicy przybrzeżnej pole nie jest jednorodne.

Zadania.

1. Czy dwie różne (przecinające się) linie pola mogą przebiegać przez dany punkt elektrostatycznego pola? Czy wiązka pola może kończyć się w próżni spiczasto? Czy linie elektrostatycznego pola mogą być zamkniętymi obwodami, powracającymi do punktu wyjścia?

2. Naprzeciwko dodatnio naelektryzowanej, płaskiej, rozległej powierzchni przewodnika umieściliśmy ostrą igłę metalową, naładowaną ujemnie; narysować przebieg linii i wiązek pola; wytłumaczyć, dlaczego na ostrzu igły gęstość ładunku musi być znaczna. Metalowa butelka, o wąskiej szyjce, jest naelektryzowana; objaśnić, dlaczego na wewnętrznej powierzchni ścian może znajdować się tylko nieznaczny ładunek (§ 8).

3. Nieskończenie długi walec prosty, kołowy, wyrobiony z metalu, jest na swej poboczniczy naelektryzowany dodatnio; przypadający na jednostkę długości walca powierzchniowy ładunek oznaczamy przez k . Narysować linie pola wychodzące z poboczniczy; udowodnić, że w odległości r od osi walca mamy $E = 2k/r$.

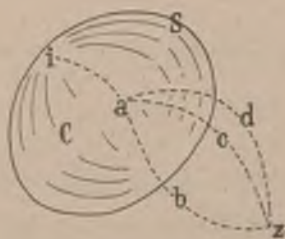
4. W punkcie A znajduje się ładunek dodatni $4Q$, w punkcie B ujemny — Q . Dowieść, że jedynym miejscem równowagi wywiadowczego ładunku q w wytworzonym polu jest miejsce C leżące na prostej AB w odległości $BC = AB$. Narysować linie pola; jak one przebiegają w pobliżu punktu C ?

§ 21. Pole elektrostatyczne jest zachowawcze.

W otaczającym nas świecie zjawisk możemy nieraz dostrzec prawidłowości proste i ogólne, gdy posługujemy się pojęciami

pracy i energii. Spróbujmy odwołać się do pomocy tych pojęć w badaniu pól elektrycznych; dotychczas rozważaliśmy tylko *siły*, które są w nich czynne.

Wyobraźmy sobie w próżni przewodnik C izolowany (rys. 32), na którego powierzchni S znajduje się w równowadze ładunek elektryczny dodatni; dokoła przewodnika rozciąga się pole. Przypuśćmy, że mała kulka metalowa, znajdując się w zetknięciu z powierzchnią S w punkcie a , przybrała słaby dodatni ładunek q . Pozwalamy kulce oddalać się od S , bardzo powoli, dopóki nie osiągnie położenia z ; przypuśćmy, że zatoczyła orbitę abz . Oznaczając przez E wektor pola w danym punkcie, powiadamy, że pole działa w tym punkcie na ładunek q siłą qE ; w przejściu abz pole wykonało więc pewną pracę, przypuśćmy W_{abz} . Jeżeli kulka była swobodna, szła wszędzie za nakazem pola, zatoczyła więc tor np. abz , przepisany przez ustrój tego pola. Ale ruchem kulki możemy (bez pracy) kierować; podobnie nic wahadła, nie łóżąc pracy, krępuje ruch jego ciężkiego punktu (§ 63 tomu I-go); podobnie szyny wiodą pociąg, ale go nie popychają. Wyobraźmy sobie, że, sterując ale nie pracując, zmuszamy kulkę do przebieżenia nowej orbity. Zaczynając od poprzedniego położenia początkowego a , kulka, po nowym torze acz , ruchem znów bardzo powolnym, dochodzi do poprzedniego końcowego położenia z ; przypuśćmy, że pole wykonywa przytem pracę W_{acz} . Założmy na chwilę, że $W_{acz} > W_{abz}$; rozumiemy jak w § 83-im tomu I-go. Pozwalamy kulce odbyć drogę acz ; pole wykonało pracę W_{acz} . Zmuszamy kulkę, ażeby z położenia z powróciła do a po torze zba t. j. ażeby przebiegła dawny tor abz w kierunku przeciwnym; ponieważ siła qE w każdym punkcie dróg abz i zba jest jednakowa, przemieszczenia zaś kulki są przeciwne, zatem praca wykonana przez pole na drodze zba jest $= -W_{abz}$ (§ 70 tomu I-go); innymi słowy, na drodze zba wykonywamy pracę W_{abz} przeciwko siłom pola. Wyruszywszy więc z a , kulka powróciła do a , odbyła drogę kołową $aczba$; jakkolwiek nie zmieniło się nic w położeniu kulki względem ciała C , ani w stanie tego ciała, ani w polu elektrycznym zmiana nie zaszła, pozostał nam w zysku nadmiar



Rys. 32.

1.

$$W_{acz} - W_{abz} > 0$$

uzyskanej pracy. Gdyby ten nadmiar był rzeczywiście dodatni, tedy, powtarzając obiegi kołowe, urzeczywistnilibyśmy *perpetuum mobile*; gdyby był ujemny, zniewalilibyśmy kulkę do obiegów kołowych w sensie przeciwnym; osiągnęlibyśmy wówczas znów *perpetuum mobile*. Możliwości tej zaprzeczamy; powiadamy: *elektrostatyczne pole jest zachowawcze*; twierdzimy, iż

$$2. \quad W_{aba} = W_{aca} = W_{ada} = \dots\dots$$

Gdy dany ładunek q porusza się (niezmiernie powoli) w danem polu elektrostatycznym, wychodząc z tego samego położenia początkowego i dochodząc do tego samego końcowego, *praca* wykonywana w tem przejściu przez siły pola jest *zawsze ta sama*, bez względu na postać toru, po którym dokonywa się przejście.

Wyobraźmy sobie inne przejście, nieco odmienne. Przypuśćmy, że kulka obdarzona ładunkiem q znajdowała się początkowo w zetknięciu z powierzchnią S przewodnika C w punkcie i (rys. 32), że poruszała się najprzód po krzywej ia leżącej na powierzchni S i dopiero w a opuściła S , biegnąc dalej po abz aż do z . Powiadamy, że

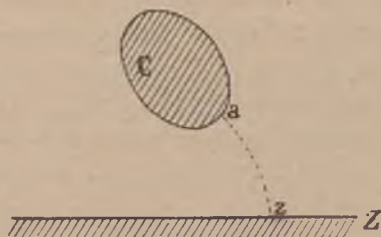
$$3. \quad W_{iaba} = W_{iaa}$$

innemi słowy, mówimy, że $W_{ia} = 0$. Wiemy istotnie, że na powierzchni przewodnika wektor E jest normalny do tej powierzchni (§ 18); styczna do powierzchni składowa wektora E jest $= 0$; stąd wynika, że w części ia toru pole nie wykonywa pracy. Gdy zatem ładunek q porusza się w polu, wychodząc z dowolnego punktu powierzchni przewodnika i dochodząc do tego samego końcowego położenia, *praca pola* jest *zawsze ta sama*, bez względu na położenie początkowe i na kształt toru przejścia.

§ 22. Potencjał przewodnika względem ziemi.

Wyobraźmy sobie ponownie przewodnik C w próżni; na jego powierzchni znajduje się dodatni ładunek w równowadze. W sąsiedztwie przewodnika znajduje się ziemia Z (rys. 33), od której C jest izolowany. Jak w § 21-ym, przypuśćmy, że mała kulka metalowa, która była pierwotnie w zetknięciu z przewodnikiem C , oddała się od niego następnie bardzo powoli, unosząc znikomo mały dodatni ładunek q ; przypuśćmy, że kulka porusza

się, dopóki nie dotknie powierzchni ziemi Z . Ładunkowi q pozwalamy tym sposobem spłynąć do ziemi; pole elektryczne wykonywa wówczas pracę, którą oznaczmy przez W . Praca W nie zależy od wyboru punktu a na powierzchni C , w którym kulka była z przewodnikiem w zetknięciu ani od wyboru punktu z , w którym dotknęła ziemi, ani również od postaci toru przejścia az ; dla danego przewodnika C , znajdującego się w danym położeniu względem ziemi, praca W zależy tylko od ładunku Q rozlanego na powierzchni C oraz od ładunku q konwekcyjnie przeniesionego przez kulkę. Pracy W dostarcza pole; wykonywa ją siła qE wywierana na q . Jeżeli postać, położenie i ładunek przewodnika C pozostają niezmiennie, wektor E jest określony; siła wywierana na ładunek q jest wówczas proporcjonalna do wartości q ; zatem praca W również jest proporcjonalna do q . Pisząc



Rys. 33.

$$1. \quad W = qV$$

możemy powiedzieć, że wielkość V , niezależna od q , zależy tylko od postaci przewodnika C , od jego położenia względem ziemi, wreszcie od znajdującego się na jego powierzchni ładunku. Wielkość V , określoną przez równanie (1), nazywamy *potencjałem przewodnika C względem ziemi*.

Przypuśćmy na chwilę, że przewodnik C jest połączony mechanicznie z ziemią (§ 5); stanowi on wówczas z ziemią jedną całość, nowy wspólny przewodnik; według § 21-go mamy więc $W=0$; według (1) mamy $V=0$. *Gdy przewodnik jest metalicznie połączony z ziemią, jego potencjał względem ziemi jest zerem.*

Zakładaliśmy dotychczas, że przewodnik C jest naelektryzowany *dodatnio*; pomiędzy dodatnim ładunkiem przewodnika C a dodatnim wywiadowczym ładunkiem q działa odpychanie, pole sprzyja oddalaniu się ładunku q do ziemi, praca W jest dodatnia. *Potencjał dodatnio naładowanego przewodnika C jest dodatni.* Rozważmy teraz przypadek przeciwny, w którym ładunek przewodnika C jest *ujemny*. Wywiadowczy ładunek q , według umowy

§ 14-go, poczytujemy zawsze za dodatni. Wyobrażamy sobie zatem w obecnym przypadku, że kulka otrzymała ładunek q (dodatni) nie z ładunku ciała C , lecz z jakiegokolwiek bądź innego źródła; skoro idzie tylko o wartość pracy W , pochodzenie ładunku q jest obojętne. Przypuszczamy jednocześnie, że początkowy punkt a (rys. 33), od którego rozpoczyna się ruch ładunku q ku ziemi, leży niezmiernie blisko powierzchni przewodnika C , ale nie na samej powierzchni. Ładunek przewodnika C przyciąga teraz ładunek q , pole sprzeciwia się ruchowi ładunku q ku ziemi, pracę W musimy my wykonywać przeciwko siłom pola; wartość W jest ujemna. Ponieważ wartość q jest dodatnia, *potencjał ujemnie naładowanego przewodnika C jest ujemny.*

Streszczając się, powiadamy: *potencjałem przewodnika C względem ziemi, w danym jego położeniu i przy danym naelektryzowaniu, nazywamy stosunek W/q dwóch wielkości: pracy W związanej z przeniesieniem z przewodnika C do ziemi ładunku q oraz (dodatniej) wartości q przeniesionego ładunku. Wykonaną przez pole pracę W uważamy za dodatnią, wykonaną przeciwko polu uważamy za ujemną.*

§ 23. Elektrostatyczna jednostka potencjału.

Zapoznawszy się z nową wielkością, zadajemy sobie pytanie, jaką *jednostką* wypada ją mierzyć; odpowiedź znajdziemy zawsze w określeniu wielkości, do której stosuje się zapytanie. Potencjał przewodnika, według poprzedzającego artykułu, jest stosunkiem pewnej pracy do pewnego ładunku. Ponieważ pracę mierzymy ergiem (§ 71 tomu I-go), ładunki zaś mierzymy elektrostatyczną jednostką ładunku (§ 17), zatem elektrostatyczna jednostka potencjału jest następująca:

1. el.-stat. jedn. potencjału = 1 erg/1 el.-stat. jedn. ładunku.

Jeżeli dla przeniesienia z przewodnika C do ziemi 1 el.-stat. jednostki ładunku pole wykonywa pracę 1 erga, potencjał przewodnika C względem ziemi jest równy $+1$ el.-stat. jednostce potencjału. Jeżeli dla przeniesienia z przewodnika C do ziemi 1 el.-stat. jednostki ładunku wykonywamy pracę 1 erga przeciwko siłom pola, potencjał przewodnika C względem ziemi jest równy -1 el.-stat. jednostce potencjału. W pierwszym razie potencjał przewodnika C jest wyższy, w drugim jest niższy o 1 el.-stat. jednostkę potencjału od potencjału ziemi.

Wiemy, że $\text{erg} = 1 \text{ gr cm}^2/\text{sek}^2$ (§ 71 tomu I-go); wiemy, że

2. el.-stat. jedn. ładunku $= 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{3/2}/\text{sek}$

(§ 17); z (1) wyprowadzamy zatem, że

3. el.-stat. jedn. potencjału $= 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{1/2}/\text{sek}$.

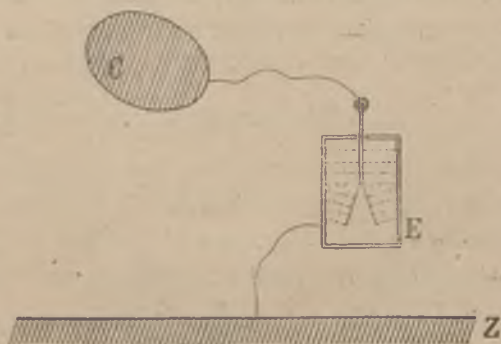
W praktyce naukowych i technicznych pomiarów el.-statyczna jednostka potencjału nie byłaby dogodna; za *praktyczną* jednostkę potencjału przyjęto więc inną jednostkę, którą nazwano *woltem*; poznamy jej określenie w IV-yim rozdziale.

§ 24. Od czego zależą wskazania elektroskopu.

W § 5-ym poznaliśmy prosty przyrząd zwany *elektroskopem*; pozwalając wykrywać obecność i stwierdzać znak elektrycznych ładunków, elektroskop oddawał nam wielkie usługi w badaniu pól elektrycznych.

Przypuśćmy, że dodatnio naładowany przewodnik *C* połączy-

liśmy metalowym drutem z prętem elektroskopu *E* (rys 34); metalowa osłona przyrządu jest połączona z ziemią *Z*. Drobna część rozlanego na powierzchni przewodnika *C* ładunku przepływa do pręta i do listków elektroskopu; uzyskawszy zatem słabe jednoimienne (dodatnie) ładunki, listki rozchylają się. Ładunki pręta i listków wytwarzają ładunek in-



Rys. 34.

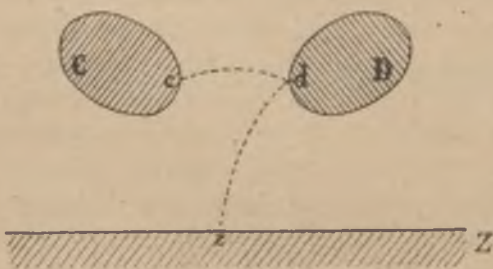
dukowany ujemny na wewnętrznej powierzchni osłony; ładunek indukowany dodatni spływa do ziemi. Wewnątrz elektroskopu tworzy się pole, którego linie wybiegają z pręta i listków, wbiegają do wewnętrznej powierzchni osłony; to wewnętrzne pole jest zupełnie różne od zewnętrznego, istniejącego poza osłoną; metal osłony odgranicza, odcina od siebie owe dwa pola. Lecz skoro tak jest, czy rozchylenie listków elektroskopu ma jakibądź związek z elektrycznym stanem przewodnika *C*? Jakkolwiek wewnętrzne i zewnętrzne pole są odmienne, mają jedną cechę wspólną. Pręt i listki elektroskopu łączą się metalicznie z przewodnikiem *C*; zatem potencjał pręta i listków jest równy po-

tencjałowi przewodnika C ; dopóki nie stanie się zadosyć temu warunkowi, ładunki płyną z C do pręta i listków E . Gdy równość potencjałów jest osiągnięta, wychylenie listków, zależąc bezpośrednio od potencjału pręta i listków względem osłony, zależy tem samem pośrednio od potencjału przewodnika C względem ziemi.

Powiedzieliśmy, że wychylenie listków zależy od potencjału złączonego z nimi przewodnika; nie powiedzieliśmy, ażeby było do tego potencjału proporcjonalne; zależność wychylenia od potencjału, naogół zawiła, jest w każdym przyrządzie odmienna. Przypuśćmy, że możemy naelektryzować przewodnik C do rozmaitych potencjałów; zobaczymy później, jakim sposobem możemy zmierzyć te potencjały, wyrazić je np. w elektrostatycznych jednostkach. Połączony z elektroskopem przewodnik C wywołuje w nim wówczas pewne wychylenia; obserwując je, możemy zastąpić dowolną skalę przyrządu przez skalę *bezwzględną*, wyrażoną w el.-statycznych jednostkach. Mówimy, że elektroskop jest wówczas *skalibrowany*; wolno wówczas nazwać go *elektrometrem*.

§ 25. Różnica potencjałów dwóch przewodników.

Wyobraźmy sobie dwa przewodniki C i D , wyrobione z tej samej chemicznie substancji i znajdujące się w tym samym fi-



Rys. 35.

zycznym stanie; przypuśćmy, że są izolowane i naelektryzowane dodatnio (rys. 35); ładunki na nich rozlane są w równowadze. Przenosimy niezmiernie mały dodatni ładunek q z przewodnika C do D po orbicie cd . Pole tworzone przez ładunki przewodników wy-

konywa pewną dodatnią lub ujemną pracę W_{cd} na orbicie cd ; W_{cd} nie zależy od wyboru krańcowych punktów c i d na powierzchni przewodników ani od postaci orbity (§ 21). Przypuśćmy, że, doszedłszy do powierzchni przewodnika D , ładunek q oddala się następnie niezmiernie powoli do ziemi po torze dz ;

pole wykonywa wówczas pracę W_{ca} . Praca wyłożona przez pole na przeniesienie ładunku q z C do ziemi Z wynosi

$$1. \quad W_{cda} = W_{ca} + W_{da}$$

mamy zatem

$$2. \quad W_{cd} = W_{cda} - W_{da} = q(V_c - V_d).$$

Różnicą potencjałów przewodników C i D , w danym ich wzajemnym położeniu i przy danym ich naelektryzowaniu, nazywamy więc stosunek W_{cd}/q dwóch wielkości: pracy W_{cd} związanej z przeniesieniem ładunku q z C do D oraz (dodatkowej) wartości q przeniesionego ładunku. Wzór ten stosuje się zarówno gdy $V_c > V_d$ (praca W_{cd} jest wówczas wykonywana przez pole), jakoteż gdy $V_c < V_d$ (praca W_{cd} jest wykonywana przeciwko polu). Ładunki przewodników C i D mogą być obadwa dodatnie lub obadwa ujemne; jeden ładunek może być dodatni, drugi ujemny; twierdzenie (2) pozostaje prawdziwe we wszystkich przypadkach.

Za przewodnik D w powyższym wywodzie moglibyśmy poczytać ziemię; zakładamy wówczas $V_d = 0$ i powracamy tym sposobem do twierdzeń § 22-go. Potencjał ziemi uznaliśmy konwencjonalnie za zero potencjałów.

Przypuśćmy na chwilę, że przewodnik C jest metalicznie połączony z przewodnikiem D ; stanowią one wówczas jeden jednolity przewodnik. Podług § 21-go mamy wówczas $W_{cd} = 0$, zatem $V_c = V_d$. *We wszystkich punktach danego (jednolitego) przewodnika wartość potencjału, w razie elektrycznej równowagi, jest jednakowa.*

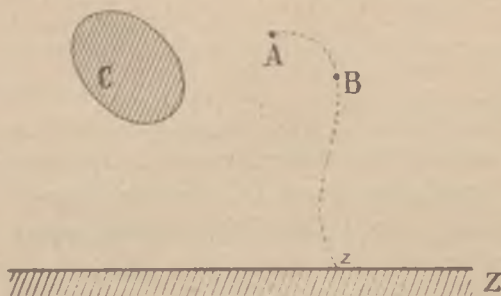
Jak kilkakrotnie w artykule niniejszym wspomnieliśmy, mówiąc o przewodniku, mamy na myśli ciało przewodzące, chemicznie i fizycznie jednolite; mówiąc o dwóch przewodnikach, przypuszczamy, że są chemicznie i fizycznie jednakowe. Przekonamy się w rozdziale następującym, że obecne twierdzenia nie stosowałyby się bez zastrzeżeń do niejednorodnych przewodników lub układów przewodników.

Przypuśćmy, że przewodnik C łączy się z listkami lub wskazówką elektroskopu, przewodnik zaś D z metalową osłoną przyrządu. Wychylenie listków lub wskazówki zależy wówczas od różnicy potencjałów $V_c - V_d$; gdyby ta różnica była równa zeru, nie byłoby wychylenia.

§ 26. Potencjał w dowolnym punkcie pola.

Wyobraźmy sobie w próżni przewodnik C , dodatnio lub ujemnie naelektryzowany (rys. 36); ładunek przewodnika tworzy w oto-

czeniu pole elektryczne. Wybierzmy w polu dwa punkty A , B . Gdyby niezmiernie słaby dodatni ładunek q posuwał się z A do B bardzo powoli, siły pola wykonałyby dodatnią lub ujemną pracę



Rys. 36.

$$1. W_{AB} = q(V_A - V_B).$$

Położenie punktów A i B jest dowolne; mogą one znajdować się na powierzchniach pewnych przewodników; powracamy wówczas do twierdzeń, znanych z § 25-go.

Możemy również przypuścić, że B leży na powierzchni ziemi, np. w miejscu z ; kładziemy wówczas $V_B = 0$ i otrzymujemy

$$2. W_{Az} = qV_A,$$

twierdzenie, w którym punkt A jest zupełnie dowolny; w analogicznym twierdzeniu (1) § 22-go zakładaliśmy, iż A znajduje się na powierzchni przewodnika. Wielkość V_A , określoną przez równanie (2), nazywamy *potencjałem pola* (względem ziemi), *utworzonym w punkcie A*; nazwę tę nadajemy więc stosunkowi W_{Az}/q dwóch wielkości: pracy W_{Az} związanej z przeniesieniem ładunku q z punktu A do ziemi oraz (dodatknie) wartości q przeniesionego ładunku; wykonaną przez pole pracę uważamy za dodatnią, wykonaną przeciwko polu uważamy za ujemną.

Wybieramy w polu dowolny punkt A ; na linii pola przebiegającej przez A wybieramy drugi punkt B niezmiernie bliski. Jeżeli nadzwyczaj słaby dodatni ładunek q posuwa się wzdłuż linii pola, o niezmiernie małą odległość $l = AB$, porusza się wówczas zgodnie z kierunkiem wektora E panującego pomiędzy A i B pola elektrycznego. Niechaj potencjał pola w punktach A i B wynosi V_A i V_B . Na ładunek q pole działa siłą qE ; wykonana na drodze AB praca jest

$$3. W_{AB} = qEl$$

skąd, przy pomocy równania (1), wyprowadzamy

$$4. E = (V_A - V_B)/l.$$

Jeżeli A i B są niezmiernie siebie bliskie, lecz zresztą dowolne punkty pola (jeżeli B nie leży koniecznie na tej samej linii pola, na której znajduje się A), otrzymujemy, podług twierdzenia (2) § 70-go tomu I-go, wzór ogólniejszy

$$5. \quad E_i = (V_A - V_B)/l$$

gdzie E_i jest przypadającą w kierunku przemieszczenia l (czyli AB) składową wektora E pola, które pomiędzy punktami A i B panuje.

Możnaby zapytać, jak dalece małe powinno być przemieszczenie AB , jeżeli powyższe twierdzenie ma być poczytane za ważne. Znajdujemy się tutaj widocznie wobec zapytania podobnego do rozważonych w §§ 14 i 21 tomu I-go zagadnień. Drogą do ówczesnej analogiczną dochodzimy do odpowiedzi następującej: *prawdziwą* wartością składowej E_i wektora E w kierunku przemieszczenia l jest *granica*, do której dąży stosunek różnicy potencjału $V_A - V_B$ w przemieszczeniu AB do długości l tego przemieszczenia, gdy zarówno przemieszczenie jak odpowiadająca mu różnica potencjału dążą jednocześnie do zera.

Jeżeli ładunek dodatni q posuwa się zgodnie z kierunkiem wektora E , wówczas, jak widzimy z równań (4) i (5), mamy $V_A > V_B$. *Płynąc zgodnie z kierunkiem działania pola, ładunek dodatni przenosi się z miejsca wyższego do miejsca niższego potencjału; ładunek ujemny, w tych samych okolicznościach, porusza się przeciwnie, z miejsca niższego do miejsca wyższego potencjału.*

§ 27. Powierzchnie ekwipotencjalne.

Wyobraźmy sobie pole elektryczne; w różnych jego punktach A , B , C utwórzmy wartości V_A , V_B , V_C potencjału. Jeżeli te wartości są sobie równe, powiadamy, że punkty A , B , C leżą na tej samej *ekwipotencjalnej powierzchni* czyli na powierzchni równych potencjałów.

Przypuśćmy, że, posuwając się po ekwipotencjalnej powierzchni, ładunek q doznaje na niej nadzwyczaj drobnego przemieszczenia l lub AB . Mamy wówczas

$$1. \quad V_A = V_B$$

zatem, według równania (5) § 26-go

$$2. \quad E_i = 0.$$

Wektor elektryczny E utworzony w dowolnym punkcie pola jest normalny do ekwipotencjalnej powierzchni, która przechodzi przez punkt uważany. Porównajmy ten wniosek z twierdzeniami § 18-go; widzimy, że, jeżeli na powierzchni przewodnika ładunek jest

w równowadze, powierzchnia ta jest ekwipotencjalna. Do tego samego wyniku dochodzimy, zasadzając się na wywodach §§ 21 i 25-go. Spostrzegamy zarazem, że powierzchnia kuli ziemskiej jest również ekwipotencjalną powierzchnią.

§ 28. Pojemność; jednostka pojemności.

Wyobraźmy sobie przewodnik w próżni, na którego powierzchni znajduje się w równowadze ładunek Q ; potencjał przewodnika względem ziemi, w danym jego położeniu i przy danym naładowaniu, wynosi V . Nie zmieniając postaci ani położenia przewodnika względem ziemi, zwiększamy rozłany na nim ładunek Q . Rośnie wówczas gęstość σ powierzchniowego ładunku; w tym samym stosunku rośnie wektor E pola w sąsiedztwie powierzchni oraz potencjał V (por. §§ 19 i 22). Jeżeli postać i położenie przewodnika względem ziemi pozostają niezmiennie, wartości Q i V rosną proporcjonalnie do siebie. Rozumiejąc przez C współczynnik niezależny od wartości zmiennych V i Q , zależny zaś od postaci przewodnika i od jego położenia względem ziemi, piszemy

$$1. \quad Q = CV.$$

Spółczynnik C nazywa się *pojemnością* przewodnika względem ziemi w danym jego (względem niej) położeniu.

Przypuśćmy, że na powierzchni przewodnika znajduje się w równowadze ładunek dodatni, równy 1 el.-stat. jednostce ładunku i że potencjał przewodnika względem ziemi wynosi 1 el.-stat. jednostkę potencjału; zgodnie z równaniem (1) powiadamy, że pojemność takiego przewodnika względem ziemi jest *elektrostatyczną jednostką pojemności*:

$$2. \quad 1 \text{ el.-stat. jedn. pojemności} = \frac{1 \text{ el.-stat. jedn. ładunku}}{1 \text{ el.-stat. jedn. potencjału}}.$$

Wiemy z §§ 17 i 23-go, że

$$3. \quad \text{el.-stat. jedn. ładunku} = 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{3/2} / \text{sek}$$

$$4. \quad \text{el.-stat. jedn. potencjału} = 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{1/2} / \text{sek}$$

Stosownie do wzoru (2) wnosimy zatem, że elektrostatyczną jednostką pojemności jest 1 cm. Praktyczną jednostkę pojemności poznamy w IV-ym rozdziale.

§ 29. *Pojemność płaskiego kondensatora.*

W § 12-ym zajmowaliśmy się już kondensatorem płaskim; opisaliśmy działanie przyrządu, utworzyliśmy nawet jakościowe pojęcie jego elektrycznej pojemności. Możemy teraz podać dokładniejszy, ilościowy rozbiór tych samych zagadnień.

Jak w § 20-ym, wyobraźmy sobie dwie rozległe, płaskie, metalowe płyty A i B (rys. 31), ustawione równolegle do siebie, w odstępnie nieznacznym. Przypuśćmy, że płyta A , izolowana, jest dodatnio naładowana, B zaś metalicznie połączona z ziemią. Załóżmy, że ładunek Q płyty A znajduje się całkowicie na jej ku B zwróconej płaszczyźnie, że ładunek $-Q$ płyty B znajduje się całkowicie na jej ku A zwróconej płaszczyźnie. Przypuśćmy, że pole istniejące między płytami jest jednorodne; wektor E pola jest zatem wszędzie prostopadły do płyt i ma wartość stałą; gęstość ładunków Q i $-Q$ jest stała. Rozumiejac przez h prostopadle mierzony odstęp między zwróconymi ku sobie płaszczyznami płyt, otrzymujemy z (4) § 26-go:

$$1. \quad E = V/h$$

przyczem przez V oznaczamy potencjał płyty A względem ziemi, płycie zaś B , według założenia, przypisujemy potencjał zero. Gęstość σ dodatniego ładunku, rozlanego na zwróconej ku B płaszczyźnie płyty A , według twierdzenia (3), § 19, wynosi $E/4\pi$; jeżeli więc S jest rozległością płaszczyzny, znajduje się na niej ładunek dodatni

$$2. \quad Q = \sigma S = \frac{S}{4\pi} E = \frac{S}{4\pi h} V.$$

Stąd wynika, że pojemność C kondensatora płaskiego wynosi

$$3. \quad C = \frac{S}{4\pi h}$$

jest więc odwrotnie proporcjonalna do odstępów płyt; gdy odstęp ten h jest bardzo mały, pojemność kondensatora jest bardzo znaczna.

Wyobraźmy sobie dwa płaskie kondensatory połączone *równolegle* (rys. 37); izolowane płyty A_1 i A_2 są połączone ze sobą, ewentualnie połączone z elektrometrem E (rys. 37), pozostałe dwie płyty B_1 i B_2 są połączone z ziemią. Oznaczmy przez V wspólną wartość potencjałów płyt A_1 i A_2 , przez Q_1 i Q_2 ładunki na tych płytach zebrane, przez C_1 i C_2 pojemności kondensatorów. Mamy

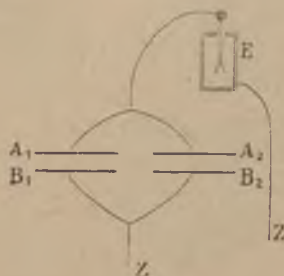
$$4. \quad Q_1 = C_1 V; \quad Q_2 = C_2 V$$

zatem

$$5. \quad Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2) V.$$

Pojemność kondensatora złożonego z dwóch równo-

legle połączonych kondensatorów jest zatem sumą pojemności kondensatorów składowych. Twierdzenie to znajduje zastosowanie w praktyce pomiarów elek-



Rys. 37.

trycznych. Przypuśćmy, że pojemność C_1 jest znana; powiadamy, że kondensator $A_1 B_1$ jest *wzorcem* pojemności, służącym do porównań. Łącząc płytę A_1 tego kondensatora z elektrometrem, mierzymy potencjał V_1 , który przybiera A_1 , gdy otrzymała ładunek Q :

$$6. \quad Q = C_1 V_1.$$

Przyłączamy $A_2 B_2$ równolegle do $A_1 B_1$; ładunek Q rozptywa się po A_1 i A_2 , potencjał spada do V_2 ; mamy

$$7. \quad Q = (C_1 + C_2) V_2.$$

Znając C_1 , zmierzwszy V_1 i V_2 i wyrugowawszy obojętną Q , obliczamy C_2 z równań (6) i (7).

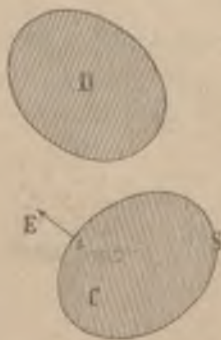
Zadania.

1. Z przewodnika, którego potencjał względem ziemi wynosi $+10$ el.-stat. jednostek, pozwalamy spłynąć do ziemi ładunkowi 418 el.-stat. jednostek, co jest maleńką cząstką rozlanego na przewodniku ładunku. Uzyskaną pracę przeobrażamy w ciepłą energję; ile kaloryj otrzymaliśmy? Ilu gramom musimy pozwolić opuścić się o 1 cm, ażeby osiągnąć tę samą pracę?

2. Płyty kondensatora są płaskie, kwadratowe; bok każdej ma 40 cm długości; odstęp płyt = 5 mm. Obliczyć pojemność kondensatora. Jakiego ładunku potrzeba, ażeby izolowaną płytę naładować do potencjału $+1$ el.-stat. jednostki względem ziemi?

§ 30. Elektrometr bezwzględny Kelvina.

Wyobraźmy sobie jeszcze raz kondensator płaski; przypuśćmy, że składa się z dwóch płaskich metalowych krążków, ustawionych poziomo; górny krążek jest naładowany dodatnio, dolny łączy się metalicznie z ziemią. Na jednym z ramion belki równoramiennej wagi, zamiast szalki, zawieszamy górny krążek kondensatora. Dodatni ładunek górnego krążka jest przyciągany ku dołowi przez ujemny ładunek dolnego; górny zatem krążek po naelektryzowaniu wyda nam się cięższy; różnica pomiędzy ciężarem naładowanego a ciężarem nienaładowanego krążka jest równa przyciąganiu, wywieranemu przez ujemny ładunek dolnego krążka na dodatni górny.



Rys. 38.

Podaliśmy tylko ogólnikową myśl doświadczenia; ażeby zrozumieć jego wykonanie, rozważmy najprzód zagadnienie następujące. Przypuśćmy, że w pobliżu przewodnika C znajduje się inny przewodnik D ; ładunki na obu przewodnikach są w równowadze (rys. 38). Wektor E pola, utworzony nazewnątrż przewodnika C , niezmiernie blisko elementu s jego powierzchni S , jest skiero-

wany normalnie do s . Rozłożmy wektor E na dwie części: na część E_s , pochodzącą od działania elementu s i na resztę E_0 , wywieraną przez pozostałą część powierzchni przewodnika C tudzież przez powierzchnię przewodnika D . Nazewną S , niezmiernie blisko elementu s , mamy

$$1. \quad E_s + E_0 = E.$$

Powtórzmy to samo twierdzenie dla drugiego punktu leżącego wewnątrz S , również niezmiernie blisko elementu s . Część E_s ma tutaj przeciwny niż przed chwilą kierunek, E_0 jest niezmienniona, całość zaś E musi zniknąć; mamy zatem

$$2. \quad -E_s + E_0 = 0.$$

Z równań (1) i (2) wypada, że

$$3. \quad E_0 = \frac{1}{2}E.$$

Oznaczając przez σ gęstość ładunku w miejscu s , mamy $E = 4\pi\sigma$, przeto

$$4. \quad E_0 = 2\pi\sigma.$$

Na elemencie s znajduje się ładunek σs ; ponieważ element s sam na siebie działać nie może, pole działa nań wektorem E_0 , nie E ; pole wywiera zatem na ładunek σs siłę

$$5. \quad E_0 \sigma s = 2\pi\sigma^2 s.$$

Rozumiejąc przez p ciśnienie wynikające, w miejscu s , z działania siły (5) czyli t. zw. *elektryczne ciśnienie*, otrzymujemy (§ 4 tomu II-go)

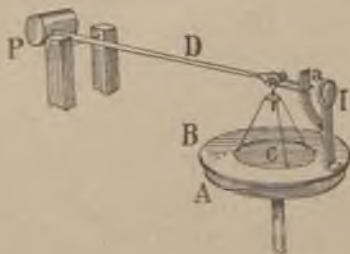
$$6. \quad p = 2\pi\sigma^2 = E^2/8\pi.$$

Powróćmy do kondensatora, którego górny, ruchomy krążek jest zawieszony na wadze. Przypuśćmy, że dolna płaszczyzna tego ruchomego krążka ma rozległość S ; przyciąganie, wywierane nań przez ładunek dolnego krążka, wynosi $E^2 S/8\pi$, co podług równania (1) § 29-go przepisujemy w postaci $V^2 S/8\pi h^2$, rozumiejąc jak dawniej przez V potencjał górnego krążka względem ziemi, przez h prostopadły odstęp krążków od siebie. Oznaczając jeszcze przez R różnicę między ciężarem naelektryzowanego a ciężarem nienaelektryzowanego górnego krążka, otrzymujemy

$$7. \quad V^2 S = 8\pi h^2 R.$$

Zmierzywszy h w cm, R w dynach, S w cm², możemy stąd wyliczyć potencjał V w el.-stat. jednostkach potencjału. Przyrząd nasz jest *elektrometrem bezwzględnym* (por. § 24).

Przypuszczaliśmy w powyższym rachunku, że pole istniejące pomiędzy krążkami kondensatora jest jednorodne; lecz to przypuszczenie jest słuszne tylko w środkowej części pola, oddalonej od obwodu (§ 20), byłoby więc dostateczne tylko wówczas, gdyby krążki były bardzo rozległe, co znów w doświadczeniu jest niewykonalne. Trudność, którą tu spotykamy, przewyrczył Lord Kelvin w r. 1860 prostym sposobem. Krążek c (rys. 39) jest zawieszony w pośrodku *ochronnego pierścienia* B , który łożacza go zbliska, nigdzie nie



Rys. 39.

dotykając. Gdy c znajduje się w poziomie pierścienia B , obadwa razem stanowią rozległy, niemal nieprzerwany krążek Bc ; B i c są przytem połączone giętkim drucikiem, znajdują się zatem na jednakowym potencjale. Poniżej Bc widzimy połączony z ziemią, pełny krążek A , który możemy podnosić lub zniżać; c zaś wisi u końca dźwigni D , zaopatrzonej w przeciwwagę P . Ładujemy B i c ; dzięki działaniu pierścienia, możemy uważać pole istniejące pod c za jednorodne, możemy zasadzać się zatem na równaniu (7). Gdy B i c są naładowane, powinniśmy powiększyć masę P celem przywrócenia równowagi; możemy również zwiększyć odstęp h , tak, żeby c , znajdując się w poziomie B , był w równowadze.

Zadania.

1. Przypuśćmy $S = 25 \text{ cm}^2$, $h = 5 \text{ mm}$ w elektrometrze Kelvina; na wadze możemy wyznaczyć $R = 10 \text{ mgr.}$ Wykazać, że możemy zmierzyć potencjał 157 el.-stat. jednostek.

2. W sąsiedztwie powierzchni S przewodnika istnieje pole, którego E wynosi 100 el.-stat. jedn. Dowieść, że na powierzchni S panuje ciśnienie elektryczne 398 dyn/cm^2 , mniejsze 2547 razy niż normalne atmosferyczne ciśnienie.

3. Przez rozwalcowanie sporządzono złotą blaszkę tak cienką, że jej 1 m^2 okazuje masę 1 gr. Ciśnienie elektryczne 0.0981 dyn/cm^2 panowałoby na powierzchni blaszki, gdyby zgromadzono na niej ładunek gęstości 0.125 el.-stat. jedn. na 1 cm^2 . Gdyby zatem 1 el.-stat. jednostka ładunku przypadła na 8 cm^2 powierzchni S , listek, wycięty ze wspomnianej blaszki i ułożony na S , zachowywałby się, jak gdyby był pozbawiony ciężaru.

§ 31. Energja elektryczna naładowanego przewodnika.

Wyobraźmy sobie ponownie w próżni przewodnik, na którego powierzchni znajduje się dodatni ładunek Q w równowadze; potencjał przewodnika względem ziemi wynosi V . Jeżeli maleńka cząstka q ładunku Q spływa do ziemi, możemy uzyskać pracę qV ; ale wzór ten tylko wówczas jest ważny, gdy q jest tak drobna, że jej ubytek nie zmienia ocenialnie wartości V potencjału przewodnika. Przypuśćmy teraz, że nie jedna tylko cząstka q przepływa z przewodnika do ziemi, lecz całe ich tłumy; ładunek Q wówczas zmniejsza się coraz bardziej, zatem, według § 28-go, zmniejsza się także potencjał przewodnika; z pierwotnej wartości V potencjał opada coraz niżej i dochodzi do zera, gdy suma przeniesionych q dosięga całkowitego ładunku Q . Przy takim przebiegu zjawiska średnia wartość potencjału wynosi $\frac{1}{2}V$; stąd wynika, że, pozwalając całemu ładunkowi Q stopniowo uchodzić i ująć wreszcie do ziemi, możemy ostatecznie uzyskać pracę $\frac{1}{2}QV$. W układzie składającym się z przewodnika i z ziemi

nagromadzony jest więc taki zasób pracy, zwany elektryczną energją $\mathcal{E}$ przewodnika względem ziemi:

$$1. \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2} QV.$$

Przy pomocy wzoru (1) § 28-go formułę tę przepisujemy w postaci

$$2. \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2} CV^2.$$

Gdy zatem położenie przewodnika (względem ziemi) pozostaje niezmienione, jego elektryczna energja (względem ziemi) zmienia się proporcjonalnie do kwadratu potencjału (odniesionego do ziemi).

Dla fizyka jednostką pracy i energii jest erg; energję elektryczną w równaniach (1) i (2) wyobrażamy sobie zatem zmierzoną w ergach. Stąd wynika, że elektrostatyczne jednostki ładunku, potencjału i pojemności winny spełniać związki następujące:

$$3. \quad (1 \text{ el.-stat. jedn. ład.}) \times (1 \text{ el.-stat. jedn. pot.}) = 1 \text{ erg}$$

$$4. \quad (1 \text{ el.-stat. jedn. poj.}) \times (1 \text{ el.-stat. jedn. pot.})^2 = 1 \text{ erg.}$$

Powracając do określeń, podanych w §§ 17, 23 i 28-ym, sprawdzamy bez trudu, że powyższe jednostki czynią zadosyć warunkom (3) i (4).

Z twierdzeń niniejszego artykułu jasno wynika, że elektryczny ładunek *nie* jest energją. Jeżeli potencjał przewodnika jest wyższy lub niższy od potencjału ziemi (lub innych przewodników sąsiednich), obecność ładunku na powierzchni przewodnika łączy się z istnieniem pewnej energii; jej zapas zależy nie tylko od ładunków zgromadzonych w układzie, lecz również od istniejących w nim różnic potencjału.

W tomie II-im poznaliśmy prawa sprężystości ciał stałych. Widzieliśmy, że, jeżeli ciało stałe (doskonale sprężyste) zostało odkształcone, istnieje w niem pewna energja, której nie posiada ciało nieodkształcone. Dopóki trwa odkształcenie, energja ta przechowywa się bez uszczerbku; odkształcenie jest stanem statycznym, ciało doskonale sprężyste jest układem zachowawczym. Pole elektryczne, wytworzone w układzie przewodników izolowanych, jest również statyczne; układ przewodników izolowanych jest zachowawczy (§ 21). Dopóki na przewodnikach zgromadzone są ładunki, dopóki istnieją pomiędzy nimi różnice potencjału, energja elektryczna układu trwa bez zmiany, bez straty; zamienia się w ciepłą, w mechaniczną lub w inne postaci energii, gdy układ zostanie wyładowany.

Zadania.

1. Płyty płaskiego kondensatora są kwadratowe; bok każdej ma 20 cm długości; odstęp płyt wynosi 1 mm; potencjał izolowanej płyty względem drugiej, połączonej z ziemią, wynosi 0.3 el.-stat. jednostki. Ile ergów możemy uzyskać, rozbijając kondensator?

2. Pojemność kondensatora wynosi 100 el.-stat. jednostek; czynna w nim różnica potencjałów wynosi 50 el.-stat. jednostek. Porównać elektryczną energję

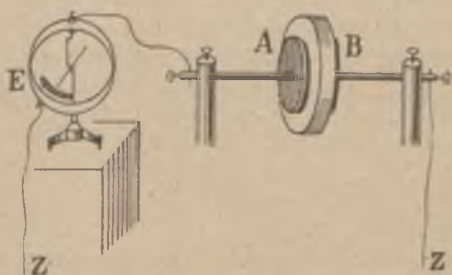
kondensatora z kinetyczną energią masy 100 gr, poruszającej się z prędkością 50 cm/sek.

3. Zamiast jednostek: gram, centymetr, sekunda przyjmujemy kilogram, metr oraz minutę za jednostki zasadnicze układu miar elektrostatycznych; jak zmienia się wówczas elektrostatyczne jednostki ładunku, potencjału, pojemności, energii?

4. Dla ilustracji wzoru (1) niniejszego artykułu przypuśćmy, że V_1 jest pierwotną wartością potencjału, przy której pierwsza cząstka q ładunku Q spłynęła do ziemi; że V_2 jest wartością, przy której spłynęła druga i t. d. Przypuszczając, że $V_1, V_2, \dots, V_n$ tworzą postęp arytmetyczny, że $nq = Q$ i że $V_n = 0$, otrzymać ponownie równanie wspomniane (1). Rozumowanie to objaśnić metodą graficzną (por. § 17 tomu I-go).

§ 32. Wpływ dielektryka na pojemność kondensatora.

Powracamy jeszcze raz do zagadnień, które w §§ 12, 20, 29-ym byliśmy zajęci. Wyobraźmy sobie kondensator płaski, którego płyta A jest metalicznie połączona z listkami lub wskazówką elektroskopu E , druga zaś B łączy się z ziemią (rys. 40).



Rys. 40.

Gdy płycie A udzieliliśmy ładunku, w elektroskopie E spostrzegamy wychylenie, z którego możemy wyprowadzić wartość potencjału płyty A względem B oraz ziemi (§ 24); wartość ta, jak wiemy, zależy od ładunku płyty A i od pojemności kondensatora (§§ 28 i 29). Nie zmieniając wzajemnej odle-

głości ani ładunku płyt, wprowadzamy pomiędzy nie taflę sporządzoną ze szkła, z ebonitu, z parafiny lub siarki (rys. 40); wychylenie w elektroskopie zmniejsza się; zatem wartość potencjału płyty A (względem B i ziemi) zmniejszyła się również. Musielibyśmy znacznie powiększyć ładunek płyty A , ażeby otrzymać w elektroskopie wychylenie poprzednie, ażeby przywrócić pierwotną wartość potencjałowi płyty A względem B i ziemi. Pojemność kondensatora zależy zatem od obecnego między jego płytami dielektryka (§ 16); gdy tym dielektrykiem jest szkło, ebonit, parafina lub siarka, pojemność kondensatora jest *większa* niż pojemność (geometrycznie identycznego) powietrznego kondensatora.

W § 16-yim poznaliśmy uogólnioną postać prawa Coulomba, w której ono stosuje się do sił elektrycznych, działających poprzez dielektryk dowolny. Zasadzając się na ówczesnem twierdzeniu (1), powtórzmy rozumowanie, które doprowadziło nas w § 19-yim do wniosku, zwanego twierdzeniem Gaussa; dochodzimy bez trudności do następującego wyniku: jeśli pole istnieje w dielektryku, którego stała dielektryczna jest ϵ , graniczna wartość (od strony dielektryka) wektora E w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni przewodnika, na której znajduje się ładunek gęstości σ , jest dana przez równanie

$$1. \quad \epsilon E = 4\pi\sigma.$$

Twierdzenie to pozwala obliczyć pojemność C kondensatora płaskiego, w którym płyty są oddzielone od siebie przez warstwę dielektryka o stałej dielektrycznej ϵ . Powtarzając rozumowanie § 29-go, otrzymujemy w oznaczeniach ówczesnych

$$2. \quad C = \frac{\epsilon S}{4\pi h}.$$

Rozumiejąc zatem przez C pojemność kondensatora, którego dielektryk ma stałą dielektryczną ϵ , przez C_0 pojemność geometrycznie identycznego kondensatora, w którym dielektrykiem jest próżnia, mamy

$$3. \quad C : C_0 = \epsilon : 1$$

Na zasadzie tego twierdzenia wyznaczamy wartość stałej ϵ badanego dielektryka; niektóre wartości przytaczamy w następującej tablicy:

Parafina:	2.3	Nafta:	2.1
Ebonit:	2.9	Siarczek węgla:	2.6
Siarka (st.):	4.0	Oliwa:	3.2
Szkło: od 3.7 do 7.6		Woda:	około 80

Powietrze atmosferyczne: 1.0006.

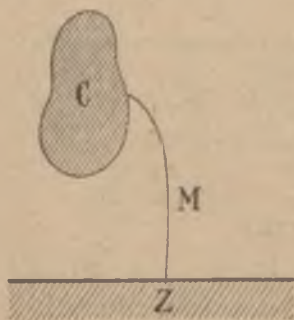
Stała dielektryczna powietrza różni się tak mało od jedności, że w większości przypadków możemy utożsamiać jego dielektryczne własności z własnościami próżni.

ROZDZIAŁ DRUGI.

Prąd elektryczny.

§ 33. Zjawisko prądu elektrycznego.

Przypuśćmy, że ciało C przewodzące, izolowane, jest naładowane dodatnio, że posiada ładunek Q i że jego (dodatni) potencjał wynosi V . W układzie ciał C , Z panuje elektryczna równowaga. W chwili $t=0$ połączmy nagle ciało C z ziemią Z

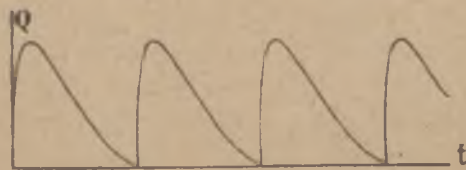


Rys. 41.

przez drut metalowy M (rys. 41); od tej chwili ciała C , M , Z stanowią jeden przewodzący układ; ale ten układ *nie* jest w równowadze. W chwili $t=0$ potencjał ciała C jest wyższy niż potencjał ziemi Z ; poczynając zatem od tej chwili równowaga w układzie jest niemożliwa. Spostrzegamy rzeczywiście, że od chwili $t=0$ ładunek Q ciała C zmniejsza się, potencjał V opada, co trwa dopóty, dopóki V nie wyrówna się z potencjałem ziemi; wówczas dopiero

zniknie ładunek Q , zapas zaś elektrycznej energii przeobrazi się w inne postaci energii. Takie wydarzenia wychodzą poza ramy elektrostatyki; nazywamy je zjawiskami *prądu elektrycznego*.

Prąd w układzie C , M , Z jest krótkotrwały, przejściowy w opisanym przypadku; potencjał ciała C nadzwyczaj szybko opada



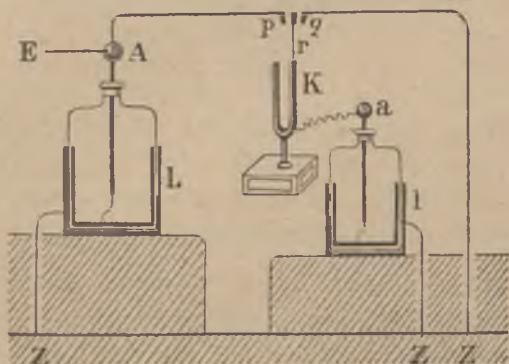
Rys. 42.

do zera. Weźmy na uwagę zjawisko nieco odmienne.

Przypuśćmy, że nie możemy wykryć ładunku Q ciała C , gdy od chwili $t=0$ upłynął krótki okres τ ; po czasie τ ciało C praktycznie jest

rozbrojone. W chwili $t = \tau$ ładujemy C nowym ładunkiem Q ; od $t = \tau$ do $t = 2\tau$ płynie w C, M, Z nowy prąd, znów przemijający, do pierwszego podobny. Ładując ciało C w chwilach $t = 2\tau, 3\tau$ i t. d., otrzymujemy w C, M, Z prąd *perjodycznie zmienny* albo *falisty* (por. § 62 tomu II-go), złożony z nagłych podskoków wartości Q i V oraz z ich szybkich omdlewań (rys. 42). Rozumiejmy przez n odwrotność okresu τ , tak iż $n\tau = 1$ sek; na sekundę przypada wówczas n podskoków i n opadań, n okresów prądu. Taki prąd możemy rzeczywiście wytworzyć rozmaitemi sposobami; poniżej opisujemy urządzenie, które pozwala cel ten łatwo osiągnąć.

Wyobraźmy sobie dwie butelki lejdejskie L i l (rys. 43), których zewnętrzne okładki są metalicznie połączone z ziemią. Wewnętrzna okładka butelki L łączy się metalicznie z dodatnim biegunem A maszyny elektrycznej E ; od bieguna A do ziemi Z biegnie drut metalowy, który w miejscu pq jest przerwany. Pomiędzy p a q drga blaszka metalowa r , osadzona na jednym z ramion widełek strojowych (kamertonu) K (por. § 85 tomu II-go); uczestnicząc w drganiach pobudzonego kamertonu, blaszka r dotyka kolejno kontaktów p oraz q . Jak widzimy z rysunku, wewnętrzna okładka butelki l łączy się metalicznie z K oraz r ; gdy zatem r dotyka kontaktu p , bieguny A i a przez chwilę są połączone; gdy r dotyka q , wewnętrzna okładka butelki l drogą $aKrq$ łączy się z ziemią. Możemy teraz łatwo zdać sobie sprawę z przebiegu zjawiska. Gdy drgająca blaszka r przez chwilę dotyka p , wewnętrzna okładka butelki l otrzymuje pewien ładunek Q . Lecz wkrótce blaszka r , dotykając q , łączy wewnętrzną okładkę butelki l z ziemią; ładunek Q tej okładki odpływa wówczas do ziemi. W każdym okresie drgania ładunek Q odpływa przez drut qZ do ziemi; jeżeli więc n jest liczbą drgań kamertonu w sekundzie, powiadamy, że ładunek dodatni nQ przepływa w ciągu sekundy przez każde poprzeczne przecięcie drutu qZ .



Rys. 43.

§ 34. Natężenie i kierunek prądu.

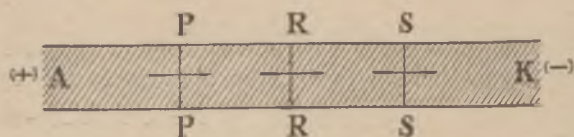
Przypuśćmy, że przez drut metalowy AK (rys. 44) płynie prąd elektryczny; niechaj PP, RR, SS będą poprzecznymi przecięciami drutu w miejscach P, R, S . Badajmy prąd w miejscu P

od chwili t_1 do późniejszej t_2 ; oznaczmy przez τ odstęp czasu, który między temi chwilami upływa. Przypuśćmy, że w czasie od t_1 do t_2 prąd przeniósł dodatni ładunek Q przez przecięcie PP w kierunku od A do K ; powiadamy wówczas, że *średnie natężenie prądu* i_P w miejscu P pomiędzy chwilami t_1 a t_2 wynosiło

$$1. \quad i_P = Q/\tau.$$

W miejscach R , S tworzymy podobnie średnie wartości i_R , i_S natężenia prądu pomiędzy t_1 a t_2 . Jeżeli te wartości okażą się równe sobie, mówimy, że w drucie AK płynie prąd *trwały* lub

jednostajny. Dana część drutu, np. $PPRR$, traci wówczas w czasie τ tyle ładunku przez przecięcie RR , ile go w tymże czasie zy-



Rys. 44.

skuje przez PP ; ładunek odcinka $PPRR$ pozostaje niezmienny, jego stan jest *trwały*. Podobnie trwały jest wówczas stan odcinka $RRSS$ i innych odcinków drutu. Powiadamy krótko w tym razie, że w drucie panuje natężenie i niezależne od miejsca:

$$2. \quad i = i_P = i_R = i_S = \dots\dots\dots$$

Jeżeli, przeciwnie, wartości i_P , i_R , i_S i t. d. nie są równe sobie, nazywamy prąd *nietrwałym*, *niejednostajnym* lub *zmiennym*. Ładunek każdego odcinka, np. $PPRR$, zmienia się wówczas z biegiem czasu. Pragniemy teraz utworzyć pojęcie *prawdziwej* albo *chwilowej* wartości natężenia prądu, w danym miejscu drutu, w danej chwili; rozumiemy w tym celu podobnie, jak rozumowaliśmy w §§ 14 i 21 tomu I-go. *Prawdziwem* albo *chwilowem* natężeniem i prądu w miejscu P , w chwili t , nazywamy granicę, do której dąży wartość średnia Q/τ natężenia, utworzona w miejscu P w odstępie τ (zawierającym chwilę t), gdy zarówno odstęp τ jak odpowiadający mu ładunek Q dążą jednocześnie do zera.

W powyższym wywodzie wyrażamy się w taki sposób, jak gdyby prąd elektryczny polegał na płynięciu *dodatnich* elektrycznych ładunków; prądowi elektrycznemu nadajemy kierunek zmierzający od miejsc drutu połączonych z *dodatnim* biegunem źródła ładunków (np. maszyny elektrycznej) do miejsc połączonych z biegunem *ujemnym*. Innemi słowy, prądowi w drucie AK nadajemy

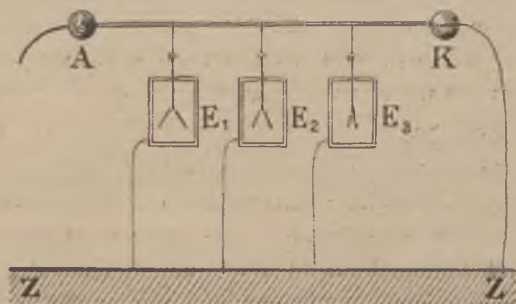
kierunek, zmierzający od miejsc, w których potencjał jest *wyższy*, do miejsc, w których potencjał jest *niższy*. Na rys. 44-ym zatem *A* jest miejscem połączonym z dodatnim biegunem źródła ładunków, *K* jest miejscem połączonym z ziemią (rys. 41). W tem rozumieniu zakończenie *A* przewodnika nazywamy niekiedy jego *anodą*, zakończenie *K* nazywamy *katodą*.

Nazwy przytoczone pochodzą od greckich wyrazów *άνω* (do góry), *κάτω* (ku dołowi) i *ὁδός* (droga); po raz pierwszy zostały użyte przez Faradaya w znaczeniu (jak sam to tłumaczy) *wrót, przez które wpływa lub wypływa prąd elektryczny*.

Ustanawiając pojęcie kierunku prądu elektrycznego, zastosowaliśmy się do umowy, która obowiązuje oddawna za zgodą powszechną i umocniła się przyzwyczajeniem. Musimy jednak o tem pamiętać, że żadna umowa nie może rozstrzygać ani przesądzać, jak w drucie wiodącym prąd elektryczny poruszają się rzeczywiście elektryczne ładunki. Według dziś panujących poglądów, przez taki drut płyną w istocie *ujemne* ładunki, w kierunku *przeciwnym* temu, który dowolnie nazwaliśmy kierunkiem prądu. Pomiędzy językiem naszym a hipotezą istnieje więc tutaj sprzeczność pozorna; lecz przecież umowy i określenia wyrazów pozostają zawsze dowolne i nie mogą mieć wpływu na właściwą treść prawd naukowych.

§ 35. Wzdłuż drogi prądu potencjał opada.

Umowę przyjętą w poprzedzającym artykule objaśniamy prostem doświadczeniem. Wyobraźmy sobie długi (około 1 m mający), dość gruby (2—3 mm średnicy), mocno zwilżony sznur bawełniany *AK* (rys. 45); taki sznur przewodzi dosyć dobrze prąd elektryczny. Kula *A* jest dodatnim biegunem maszyny elektrycznej, zarazem anodą przewodnika *AK*, którego katodę *K* łączymy metalicznie z ziemią. W kilku punktach sznura odgałęziają się (identyczne) elektroskopy *E*₁,



Rys. 45.

*E*₂, *E*₃, których osłony łączymy również z ziemią. Przypuśćmy, że połączenie katody *K* z ziemią jest przerwane; sznur *AK* wraz z elektroskopami stanowi wówczas dalszy ciąg dodatniego przewodnika maszyny, izolowany od jej ujemnego bieguna; działał-

ność maszyny może zatem ładować sznur elektrycznie, ale nie może wytwarzać w nim prądu. Spostrzegamy wówczas rzeczywiście, że listki rozchylają się jednakowo w elektroskopach; skąd wnosimy, że ładunek przewodnika AK znajduje się na nim w równowadze. Zmieńmy warunki doświadczenia; przywróćmy połączenie katody K z ziemią, tarcze zaś maszyny wprowadźmy w ruch obrotowy, o ile podobna jednostajny. Stan rzeczy w sznurze jest teraz odmienny; listki elektroskopu E_1 rozchylają się (niemal tak samo, jak rozchylały się poprzednio), listki w E_2 są mniej rozchylone, jeszcze mniej listki w E_3 ; łącząc elektroskop z katodą K , nie możemy dostrzec rozchylenia. Powtarzamy więc krótko: *prąd w przewodniku płynie w kierunku, w którym potencjał opada.*

Tarcze elektrycznej maszyny trudno jest wprawić w ruch obrotowy ściśle jednostajny; dlatego wskazania elektroskopów w opisanem doświadczeniu bywają chwiejne. Jako równoległą do sznura odnogę, możemy między A i K włączyć butelkę lejdejską, której jedną okładkę łączymy z A , drugą z K ; butelka ujednostajnia prąd w sznurze płynący, działając podobnie jak zbiornik wód w sieci wodociągowej.

Określiłszy prąd w drucie jako płynięcie przezeń elektrycznych ładunków. Lecz jeżeli w drucie płynie prąd trwały, ładunek każdego odcinka drutu pozostaje niezmienny; niepodobna wówczas dowieść, że przez kolejne przecięcia drutu rzeczywiście przebiegają ładunki. Opadanie potencjału wzdłuż drogi prądu, wprost przeciwnie, jest *faktem*; gdziekolwiek prąd płynie, możemy wykazać naocznie, że potencjał maleje w kierunku płynięcia.

Z rozdziału I-go jest nam wiadomo, że, gdziekolwiek opada potencjał, tam elektryczne pole istnieje (§ 26). Wektor pola przecina zawsze normalnie ekwipotencjalne powierzchnie, kierując się od miejsc wyższego do miejsc niższego potencjału (§ 27). A zatem siły, których istnienie i skierowanie zdradza się w opadaniu potencjału wzdłuż drogi prądu, wprawiają tu w ruch elektryczne ładunki, one są *elektromotorycznymi* siłami, wzniecającymi w przewodniku prąd elektryczny.

Energja cieplna może poruszać się wspólnie z cząstkami materjalnemi, w których jest zawarta; takie zjawiska nazywamy *konwekcją*; natomiast w zjawiskach *przewodzenia* energja cieplna płynie sama przez się, bez udziału materji. Gdy czerpiemy wodę konewką, gdy opuszczamy ją w kuble, poruszamy wodę konwekcyjnie: woda sama przepływa, gdy pchamy ją rurą lub gdy się przez piasek przesącza. Ładunki elektryczne mogą poruszać się również dwoma sposobami: przez konwekcję i przez przewodnictwo. Jak zobaczymy w niniejszym i VIII-ym rozdziale, ładunki mogą poruszać się wraz z maleńkimi materjalnemi odrobinami, do których są przywiązane, więc konwekcyjnie. Gdy jednak ładunki płyną przez metal, cząstki metalu nie uczestniczą w ich ruchu; słusznie więc powiadamy, że metale *przewodzą* prąd elektryczny.

Spokojny staw, na którego powierzchni woda układa się płasko i poziomo, może służyć za obraz naelektryzowanego izolowanego przewodnika, którego

ładunek jest w równowadze; w stawie ciśnienie jest wszędzie na powierzchni to samo (§ 37 tomu II-go), w przewodniku izolowanym, w razie równowagi, potencjał jest wszędzie jednakowy (§ 25). W rzece woda płynie, stosując się do spadku ciśnienia wzdłuż drogi płynięcia; rzekę możemy więc poczytywać za model drutu, w którym płynie prąd elektryczny; ciśnieniu wody odpowiada tu znowu elektryczny potencjał.

§ 36. Jednostka natężenia prądu.

Według § 34-go natężenie prądu trwałego płynącego przez przewodnik jest stosunkiem elektrycznego ładunku, przenieszonego przez dowolne przecięcie w pewnym okresie czasu, do długości tego okresu. *Elektrostatyczną jednostką natężenia prądu* jest zatem natężenie prądu trwałego, który przez dowolne przecięcie przewodnika przenosi 1 elektrostatyczną jednostkę ładunku (§ 17) w przeciągu 1 sekundy. Możemy powiedzieć:

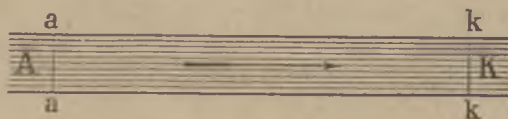
1. el.-stat. jedn. natężenia prądu = 1 el.-stat. jedn. ładunku/1 sek.

Elektrostatyczną jednostką natężenia prądu fizycy posługują się rzadko, technicy nigdy; w codziennem natomiast użyciu w naukowej i przemysłowej pracowni jest jednostka praktyczna, zwana *amperem*; jej określenie poznamy w IV-ym rozdziale.

- Z podanego w § 17-ym twierdzenia (5) i z obecnego (1) wyprowadzamy, że
2. el.-stat. jedn. natęż. prądu = $1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{3/2} / \text{sek}^2$.

§ 37. Praca wydawana na wytwarzanie prądu; jednostka tej pracy.

Wyobraźmy sobie metalowy drut AK (rys. 46), przez który płynie prąd trwały, o natężeniu i , w kierunku od anody A do katody K . Przez V_a i V_k oznaczmy potencjały panujące w poprzecznych przecięciach



Rys. 46.

aa i kk ; wartości te nie zmieniają się z czasem, mimo iż prąd przez aa i kk nieustannie przepływa. Mamy $V_a > V_k$; skąd wnosimy, że w drucie

AK nie ma elektrycznej równowagi, że czynne w nim jest pole elektryczne; posłuszne siłom tego pola, ładunki poruszają się w drucie; wszystko dzieje się tak, jak gdyby w czasie τ przez każde poprzeczne przecięcie przepływał w kierunku od A do K ładunek dodatni

1. $Q = i\tau$.

Ażeby przenieść ładunek Q z aa do kk , z miejsca, gdzie panuje potencjał V_a , do miejsca, gdzie wartość potencjału wynosi V_k , siły pola działające w drucie muszą wyłożyć pracę

$$2. \quad W = Q(V_a - V_k) = i(V_a - V_k)\tau.$$

Naukową jednostką pracy jest erg (§ 71 tomu I-go); z równania (2) przeto wynika, że

3. 1 el.-stat. jedn. nat. prądu $\times$ 1 el.-stat. jedn. pot. $\times$ 1 sek = 1 ergowi; wstawiając istotnie do związku (3) twierdzenia: (1) § 36-go oraz (1) § 23-go, przekonywamy się łatwo, że związek (3) jest prawdziwy.

Pojęcie *dzielności* źródła pracy poznaliśmy w § 72-im tomu I-go; stosownie do przyjętych wówczas określeń nazywamy obecnie stosunek W/τ dzielnością D źródła wytwarzającego prąd elektryczny; mamy zatem

$$4. \quad D = i(V_a - V_k).$$

Elektrostatyczną jednostką dzielności jest 1 erg na sekundę; według twierdzenia (3):

$$5. \quad \begin{aligned} &1 \text{ el.-stat. jedn. dzielności} = \\ &= (1 \text{ el.-stat. jedn. nat. prądu}) \times (1 \text{ el.-stat. jedn. pot.}). \end{aligned}$$

Zadania.

1. Kondensator o pojemności 750 el.-stat. jedn. naładowano do potencjału 100 el.-stat. jedn. Przez jak krótki czas wystarczyłby nagromadzony ładunek do wytwarzania prądu o natężeniu 3×10^6 el.-stat. jedn.?

2. Maszyna Wimshursta dostarcza prądu o natężeniu 150000 el.-stat. jedn.; jak długo musiałaby być czynna, ażeby przepchnąć 3×10^6 el.-stat. jedn. ładunku przez zamykający ją obwód?

3. Dzielność konia parowego wyrazić w jednostkach elektrostatycznych.

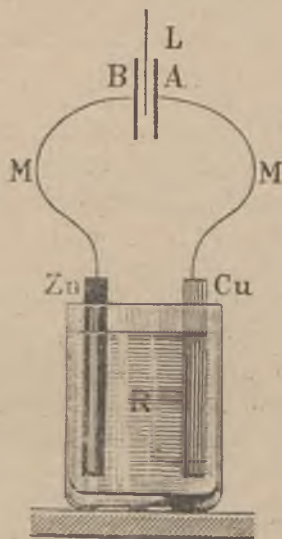
4. Przy pomocy twierdzeń (3) § 23-go oraz (2) § 36-go przekonać się o słuszności formuły (3) § 37-go.

5. Prąd o natężeniu 10^{10} el.-stat. jednostek płynie przez drut przez przeciąg czasu 12.54 sek.; między anodą a katodą istnieje różnica potencjału 1 el.-stat. jedn. Ile otrzymalibyśmy kaloryj, gdybyśmy przeobrazili w ciepło całą pracę wyłożoną na wytworzenie prądu? Jaka jest dzielność pracującego tu źródła energii?

§ 38. Ogniwo; siła elektromotoryczna ogniwa.

Wyobraźmy sobie, że w rozcieńczonym roztworze wodnym kwasu siarkowego zanurzyliśmy dwie płyty; jedną miedzianą Cu , drugą cynkową Zn (rys. 47); taki przyrząd nazywamy *elektrycznem*

ogniwem. Połączmy miedzianą płytę ogniwa z płytką *A* jednolistkowego (heterostatycznego) elektroskopu (§ 6), cynkową płytę ogniwa z płytką *B* tego przyrządu; dla uproszczenia przypuśćmy, że płytki *A* i *B* są sporządzone z tego samego metalu, powiedzmy z metalu *M*, z którego składają się druty, łączące płyty ogniwa z płytkami elektroskopu. Jeśli ruchomy listek *L* jest naładowany dodatnio, odchyła się ku płycie *B*; jeśli jest naładowany ujemnie, odchyła się ku *A*; bezwzględna wartość potencjału listka musi być w obu razach dostatecznie wysoka. Powiadamy, że płyta *A* jest dodatnio naelektryzowana, płyta *B* ujemnie; mówimy, że pomiędzy *A* i *B* istnieje pewna (dodatnia) różnica potencjałów.



Rys. 47.

Wykonaliśmy doświadczenie elektrostatyczne; niema tu prądu, w powietrzu pomiędzy płytkami *A* i *B* istnieje pole elektryczne statyczne. Doświadczenie to uczy nas jednak prawd nowych, których nie poznaliśmy w wykładzie elektrostatyki. W poprzedzającym rozdziale zajmowaliśmy się równowagą elektryczną w przewodniku *jednolitym*; pominęliśmy z umysłu przypadek, w którym układ składa się z przewodników różnych, niejednakowych. Dostrzegamy obecnie, że twierdzenia § 25-go wymagają uzupełnienia. W razie równowagi elektrycznej wartość potencjału, w obrębie tego samego, jednolitego przewodnika jest jednakowa. Gdy jednak, jak w ogniwie, różne (niejednakowe) przewodniki znajdują się ze sobą w zetknięciu, wartość potencjału, jednakowa w obrębie jednego przewodnika, dla każdego przewodnika bywa naogół inna. Gdyby np. układ zawierał przewodniki *A, B, C* we wzajemnem zetknięciu, w zakresie przewodnika *A* panowałby jednostajny potencjał V_A , w zakresie *B* podobnie V_B , w zakresie *C* podobnie V_C , ale wartości V_A, V_B, V_C mogą być *różne*.

Wyobraźmy sobie dwa przewodniki *A* i *B* w zetknięciu wzajemnem, w równowadze cieplnej (t. j. w temperaturze jednakowej) i w równowadze elektrycznej. Dopóki poruszamy się w obrębie przewodnika *A*, potencjał ma wartość stałą V_A ; dopóki poruszamy

się w obrębie przewodnika B , potencjał ma wartość stałą V_B ; gdy jednak przechodzimy z A do B lub z B przeciwnie do A , przez granicę zetknięcia, potencjał podskakuje lub spada o pewną skończoną różnicę. Przypuśćmy, że $V_A > V_B$ i napiszmy

$$1. \quad V_A - V_B = B/A.$$

Gdy przechodzimy z przewodnika B do przewodnika A , potencjał podnosi się nagle o B/A ; gdy przechodzimy przeciwnie z A do B , potencjał obniża się o B/A ; mamy oczywiście

$$2. \quad A/B = -B/A.$$

Będziemy przypuszczali, że *różnica* czyli *skok potencjału* B/A zależy od jakości chemicznej, od temperatury i wogóle od stanu fizycznego przewodników A i B znajdujących się ze sobą w zetknięciu; że nie zależy natomiast od rozmiarów ani postaci tych przewodników, że nie zależy również od wartości samych potencjałów, których jest różnicą; gdy obadwa potencjały jednakowo rosną lub maleją, skok B/A nie zmienia się.

Powróćmy do doświadczenia, od którego rozpoczęliśmy obecne wywody; jego schemat jest dany przez rys. 47. W płytce B oraz w drucie M , który łączy B z cynkową płytą ogniwa, panuje jednostajnie potencjał V_B ; gdy z drutu M przechodzimy do cynku Zn , potencjał zmienia się nagle o $V_{Zn} - V_B$; gdy z cynku Zn przechodzimy do roztworu R kwasu siarkowego w wodzie, potencjał zmienia się o $V_R - V_{Zn}$; gdy z roztworu R przechodzimy do miedzi Cu , potencjał zmienia się o $V_{Cu} - V_R$; gdy z miedzi Cu przechodzimy do drutu M , łączącego miedzianą płytę ogniwa z płytką A elektroskopu, potencjał zmienia się o $V_A - V_{Cu}$; po odbyciu tych skoków, bądź do góry bądź na dół, potencjał osiąga wreszcie poziom V_A :

$$3 \quad V_B + (V_{Zn} - V_B) + (V_R - V_{Zn}) + (V_{Cu} - V_R) + (V_A - V_{Cu}) = V_A.$$

Posługując się symbolem, który przed chwilą przyjęliśmy, piszemy

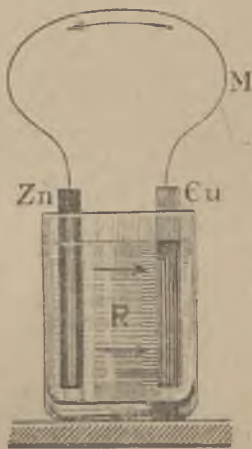
$$4. \quad V_A - V_B = M/Zn + Zn/R + R/Cu + Cu/M.$$

Różnicę $V_A - V_B$ nazywamy *elektromotoryczną siłą* ogniwa; według równania (4) zależy ona od chemicznej jakości wchodzących w grę przewodników, od ich fizycznego stanu, zwłaszcza temperatury; nie zależy jednak od rozmiarów ani postaci przewodników, ani też od bezwzględnych wartości V_A i V_B samych przez się wziętych.

Nadawana różnicy (4) nazwa *siły elektromotorycznej* oczywiście nie jest poprawna. Różnica dwóch potencjałów nie jest siłą i nie mierzy się jednostkami siły, lecz jednostkami potencjału; nie możemy wyrazić jej w dynach, możemy podać ją w el.-stat. jednostkach potencjału. Ale nazwa ta jest oddawna zakonieniona i byłoby rzeczą próżną próbować z nią walczyć.

§ 39. Prawo Volty.

Opuszczając elektroskop *ALB* z układu doświadczenia przedstawionego na rys. 47-ym, połączmy bezpośrednio ze sobą końce drutów *M*, *M* wiodących od cynkowej i od miedzianej płyty ogniwa (rys. 48). W drucie *M* mamy wówczas prąd elektryczny, ale mamy go nie tylko w tym drucie; w obu płytach ogniwa, w roztworze *R*, w całym wogóle obwodzie *CuMZnRCu* krąży prąd elektryczny w kierunku, na rycinie wskazanym przez strzałki; w drucie *M* prąd płynie od miedzi do cynku, w roztworze *R* powraca od cynku do miedzi. Własności tego prądu (lub prądów podobnych) będziemy rozważali w obecnym i w kilku dalszych rozdziałach.

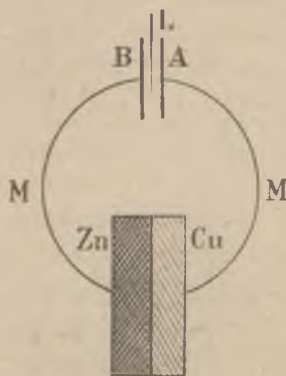


Rys. 48.

Doświadczenie, które tu opisaliśmy, napozór tak proste, otworzyło nową epokę w dziejach nauki o elektrycznych zjawiskach, zaważyło zatem na intelektualnej i materialnej historii XIX-go stulecia. Pragnąc uzyskać elektryczne ładunki, fizycy XVIII-go wieku uciekali się do pomocy maszyn elektrostatycznych (§ 12); jakkolwiek budowano niekiedy maszyny ogromne, przyrządy te, wytwarzając wielkie napięcia, bardzo przecież skąpo dostarczały ładunków. Ze zdziwieniem dowiedzieli się nagle, w r. 1791, europejscy uczeni, że istnieje nieoczekiwane źródło, które, przy bardzo słabym napięciu, może ładunki strumieniem w nieprzebranej obfitości wylewać. Źródło to odkrył Alojzy Galvani w Bolonji; z tego powodu prąd elektryczny nazywano przez długi czas *galwanizmem*. Dopiero jednak Aleksander Volta w Pawji (1745—1827), badacz wytrawny, myśliciel głęboki, zrozumiał prawidłowość poznanych zjawisk i poddawszy je tym sposobem pod panowanie ludzkiego umysłu, uutorował drogę późniejszemu rozkwitowi nauki o prądzie elektrycznym.

W nauce elektrostatyki dzieliliśmy ciała natury na dwie wielkie klasy: na izolatory i na przewodniki. Pójdziemy obecnie dalej; ciała przewodzące podzielimy na dwie podklasy: na ciała metalicznie przewodzące lub, jak dla zwięzłości powiemy, *metale* oraz na ciała elektrolitycznie przewodzące czyli *elektrolity*. Prze-

wodząc prąd elektryczny, metale nie zmieniają się chemicznie; żelazo, cynk, miedź, srebro, rtęć, mosiądz, mimo przepływu ładunków, nie tracą dawnych i nie nabywają nowych chemicznych własności. Inaczej, jak zobaczymy, zachowują się elektrolity t j. przede wszystkim wodne roztwory kwasów, zasad i soli; ich przewodnictwo jest nieodłączne od głębokiej przebudowy wewnętrznej, której ulegają, przewodząc prąd elektryczny; jeśli taka przebudowa (jak w nafcie, oliwie, parafinie, benzolu) jest



Rys. 49.

niemożliwa, ciało jest izolatorem. Typowym elektrolitem jest roztwór kwasu siarkowego w wodzie, tenże sam, którym posłużyliśmy się do budowy ogniwa. Jaką rolę gra ów roztwór w działalności ogniwa? czy rola ta jest istotna? Spróbujmy roztwór z ogniwa wypuścić. Przyłóżmy do siebie dwie suche płyty: cynkową i miedzianą; drutami *M*, jak w artykule poprzednim (rys. 47), połączmy płytę cynkową z płytką *B*, płytę miedzianą z płytką *A* jednolistkowego elektroskopu (rys. 49). W najwrażliwszym, w najbardziej udoskonalonym elektro-

skopie nie dostrzeżemy wychylenia listka z położenia równowagi, z położenia *zero*; musimy uznać, że różnica potencjałów płytek *A* i *B*, czyli wielkość $V_A - V_B$, jak pisaliśmy w § 38-ym, tutaj jest równa zero. Postępując jak wyżej, otrzymujemy

$$1. \quad V_A - V_B = M/Zn + Zn/Cu + Cu/M = 0.$$

Ażeby uchwycić właściwe znaczenie tego równania, wyobraźmy sobie, że z metali *Zn*, *Cu*, *M* utworzyliśmy obwód nieprzerwany, zamknięty (rys. 50); w takim obwodzie, mimo granicznych skoków potencjału, panowałaby równowaga elektryczna, *nie* byłoby prądu. W przypadku, który tu rozstrząsamy, równanie (1) wyraża t zw *prawo Volty*.



Rys. 50

Możemy wypowiedzieć to samo prawo w ogólniejszej postaci. Przypuśćmy, że mamy obwód nieprzerwany zamknięty, złożony z dowolnych metalicznych przewodników (nie elektrolitów) *A*, *B*, *C*, ..., *X*, *Y*, *Z* w równowadze cieplnej; mamy wówczas

$$2. \quad A/B + B/C + \dots + X/Y + Y/Z + Z/A = 0;$$

w takim obwodzie, mimo granicznych skoków potencjału, panowałaby równowaga elektryczna, prąd nie krążyłby w nim w żadnym kierunku.

Przypuśćmy na chwilę, że w obwodzie nieprzerwanym zamkniętym $Zn\ Cu\ M\ Zn$ lub też $ABC\dots XYZA$ krąży prąd, sam przez się nie kończący się nigdy. Do wytwarzania prądu potrzebna jest praca (§ 37); skąd zatem obwód metali czerpałby pracę niezbędną do wywoływania elektrycznego obiegu? mógłby pożyczać jej tylko od zapasu wewnętrznej (cieplnej) energii metali. Gdyby takie zjawisko odbywało się w metalicznym obwodzie, byłoby ściśle *kołowe*, jak wnosimy z określenia metalu, które przed chwilą przyjęliśmy (§ 83 tomu I-go, §§ 112 i 113 tomu II-go); byłoby zatem sprzeczne z aksjomatem Kelvina, z twierdzeniem orzekającym, iż zamiana ciepła na pracę nie bywa nigdy jedynym wynikiem kołowego, perjodycznie powracającego zjawiska. Prawo Volty jest więc następstwem zasad termodynamiki. Lecz gdyby choć jeden z pomiędzy przewodników, składających obwód, był elektrolitem, krążenie prądu w obwodzie nie byłoby zjawiskiem kołowym; prawo Volty nie mogłoby być zastosowane.

Z równania (1) łatwo wyprowadzamy

$$3. \quad Cu/Zn = Cu/M + M/Zn.$$

Różnica potencjału istniejąca pomiędzy miedzią a cynkiem nie zmienia się, gdy pomiędzy nie włączymy trzeci, dowolny, metaliczny przewodnik. Posługując się twierdzeniem (3), powróćmy teraz do wzoru (4) § 38-go; otrzymujemy:

$$4. \quad V_A - V_B = Cu/Zn + Zn/R + R/Cu.$$

Elektromotoryczna siła ogniwa, złożonego z miedzi, z elektrolitu R i z cynku, zależy od skoków Cu/Zn , Zn/R i R/Cu potencjału, ale nie zależy od jakości metalu M , z którego sporządzone są elektrody A, B oraz druty, łączące miedź i cynk ogniwa z temi elektrodami (rys. 47). Elektromotoryczną siłę ogniwa będziemy odtąd oznaczali przez $\mathcal{E}$.

Ażeby należycie zrozumieć znaczenie równania (4), przypuśćmy, że drut M zamykający obwód ogniwa (rys. 48) jest wyrobiony z miedzi; nieprzerwany zamknięty obwód, utworzony z przewodników Zn, Cu, R (rys. 51), możemy wówczas uznać za schemat ogniwa. W takim obwodzie panuje trwała dążność wprawiająca w ruch elektryczne ładunki czyli elektromotoryczna siła

$$5. \quad Cu/Zn + Zn/R + R/Cu = \mathcal{E} \approx 0.$$

Lecz gdybyśmy elektrolit R zastąpili przez metal M , zamiast obwodu rys. 51 go mielibyśmy obwód rys. 50-go, zamiast równania (5) mielibyśmy (1) t. j.

$$6. \quad Cu/Zn + Zn/M + M/Cu = 0.$$



Rys. 51.

Istotna różnica pomiędzy obwodami rys. 51-go i 50-go, pomiędzy elektrycznym ogniwem a metalicznym obwodem spoczywa więc w elektrolicie R , w jego stosunku do graniczących z nim metali Cu i Zn .

§ 40. Typy ogniw; składanie bateryj.

Ogniwo $Zn, H^2SO^4 aq., Cu$, którym zajmowaliśmy się wyżej, pamiętne w dziejach fizyki, nie ma dziś praktycznego znaczenia; wytwarzając prąd elektryczny, ogniwo to, skutkiem chemicznych w nim zmian, wyczerpuje się szybko; siła elektromotoryczna spada niebawem do nieużytecznej wartości. Trwalsze ogniwa otrzymujemy, składając je z dwóch metali A, B i z dwóch elektrolitów R_1, R_2 ; dla takiego ogniw:

$$1. \quad \mathcal{E} = B/A + A/R_1 + R_1/R_2 + R_2/B.$$

Ażeby o ile podobna utrudnić mieszanie się ze sobą elektrolitów R_1 i R_2 , oddzielamy je od siebie ściankami sporządzonemi z niewypalanej porowatej glinki; R_1 i R_2 graniczą wówczas ze sobą w kanalikach ścianek, co umożliwia płynięcie prądu a przewleka dyfuzję.

W ogniwie Daniella płyta cynkowa jest otoczona rozcieńczonym roztworem wodnym siarczanu cynkowego $ZnSO^4$, płyta miedziana nasyconym roztworem wodnym siarczanu miedziowego $CuSO^4$. W ogniwie Leclanchého płyta cynkowa znajduje się w nasyconym roztworze wodnym salmjaku NH^4Cl ; druga elektroda, węglowa, tkwi w mieszaninie złożonej z tlenku manganu MnO^2 i ze sproszkowanego węgla. W ogniwie Greneta cynk i węgiel są zanurzone w roztworze składu: $H^2SO^4, K^2Cr^2O^7 aq.$ W *normalnem* ogniwie Westona jedna elektroda, złożona z kadmowego amalgamatu, znajduje się w nasyconym roztworze $CdSO^4 aq.$, druga, rtęciowa, jest w zetknięciu z pastą Hg^2SO^4 ; ogniwo to służy często za wzorzec siły elektromotorycznej, która zależy w niem mało od temperatury. Ogniwa *suche* są naogół odmianą typu Leclanchého; elektrolitami bywają w nich ciastowate masy, np. mieszanina $NH^4Cl, MnO^2, ZnCl^2$ i sproszkowanego grafitu.

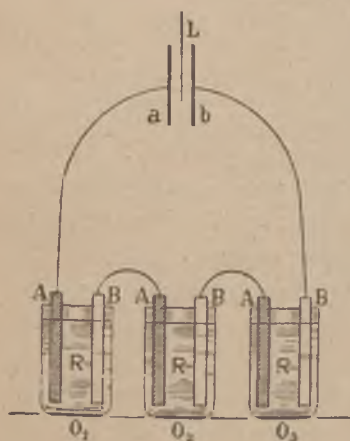
Na szczególną uwagę zasługują *akumulatory*. Dwie ołowiane płyty, zanurzone w rozcieńczonym roztworze H^2SO^4 lub elektroda, złożona ze sproszkowanego żelaza i druga z tlenku niklowego, zanurzone w wodnym roztworze KOH lub $NaOH$, stanowią akumulator. Ładujemy akumulator, przepuszczając przezeń prąd elektryczny; naładowany akumulator zachowuje się jak ogniwo; wytwarzając prąd, wyczerpuje się, ale możemy go odrodzić, przesyłając przezeń ponownie prąd elektryczny.

Uważajmy ogniwo typu A, R, B , gdzie przez A i B rozumiemy metale, przez R elektrolit. Przypuśćmy, że podnieśliśmy

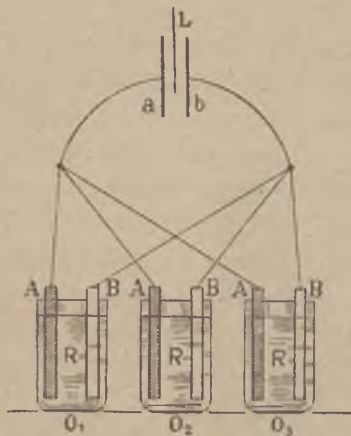
wartości potencjałów ciał A , R i B , we wszystkich ich punktach, o jednakową wielkość; skoki B/A , A/R i R/B nie zmieniają się wówczas, ich suma

$$2. \quad \mathcal{E} = B/A + A/R + R/B$$

nie zmienia się również. Połączmy płytę B pierwszego ogniwa O_1 (rys. 52) z płytą A drugiego O_2 , płytę B drugiego ogniwa z płytą A trzeciego O_3 ; elektromotoryczna siła $\mathcal{E}$ każdego ogniwa zachowa wartość przypadającą pojedynczemu ogniwu; na elektrodach a , b otwartego szeregu otrzymamy różnicę potencjału $3\mathcal{E}$. Taki sposób łączenia nazywamy spinaniem ogniw *w szereg*; powiadamy więc, że elektromotoryczna siła baterji spiętych



Rys. 52.



Rys. 53.

w szereg ogniw jest równa sumie ich sił elektromotorycznych. Wyobraźmy sobie, przeciwnie, że połączyliśmy ze sobą płyty A ogniw, że połączyliśmy podobnie płyty ich B , że ogół pierwszych połączyliśmy z a , ogół drugich z elektrodą b elektrometru (rys. 53); spiąwszy tym sposobem ogniwa (jak powiadamy *równolegle*), zwiększyliśmy tylko rozmiary płyt A i B , co nie wywiera wpływu na siłę elektromotoryczną. Na elektrodach baterji otwartej, złożonej z ogniw równolegle spiętych, otrzymujemy więc poprzednią różnicę potencjału $\mathcal{E}$.

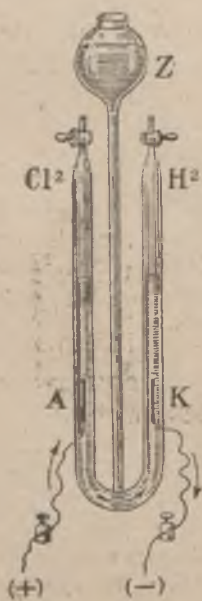
Różnica potencjałów na biegunach maszyny Wimshursta wynosi nieraz kilkaset el.-stat. jednostek; elektromotoryczna siła zwykłego ogniwa nie dochodzi jednej setnej części el.-stat. jednostki. Napięcie maszyny przewyższa zatem ogromnie napięcie ogniwa; należałoby spiąć w szereg setki tysięcy ogniw, ażeby

uzyskać różnicę potencjałów, którą potężna maszyna elektryczna oddaje na nasze usługi. Dlatego zazwyczaj nie izolujemy drutów idących od ogniwa lub postępujemy się w tym celu pomocą miernych izolatorów jak drewno, papier, tektura; dlatego takich drutów dotykamy rękoma bezkarnie.

Lecz jeśli elektromotoryczne siły czynne w ogniwie są słabe, ładunki, które one w ruch wprawiają, są przeciwnie bardzo obfite; w tym znowu względzie ogniwo znacznie przewyższa elektryczną maszynę. Ogniwo nadzwyczaj szybko odnawia wydany ładunek; dlatego jest tak hojnym źródłem ładunków. Gdy maszyna (np. przez rozbrojenie między biegunami) wyładowała się, ładuje się napowrót stosunkowo powoli; głównie z tego powodu maszyna tak skąpo dostarcza ładunków. Molekularny mechanizm ogniwa działa nieporównanie zręcznie i sprawniej aniżeli stosunkowo gruby, nieskładny ustrój elektrycznej maszyny.

§ 41. Zjawisko elektrolizy; iony.

Gdy chlorowódor HCl rozpuszcza się w wodzie, tworzy się t. zw. kwas solny. Takim (stężonym) kwasem napełniamy całkowicie obadwa ramiona rury szklanej zgiętej w kształcie litery U (rys. 54), przyczem trzecie ramię Z oraz kureczki szklane, zamykające dwa główne ramiona, są bardzo pomocne. W miejscach A i K wlutowane są druty platynowe, dźwigające platynowe również blaszki, które są *elektrodami* przyrządu; elektroda A , którą łączymy z dodatnim biegunem baterji, jest *anodą*; elektroda K , którą łączymy z biegunem ujemnym, jest *katodą*. Stosując się do przyjętej w § 34-ym umowy, mówimy, że prąd elektryczny z dodatniego bieguna baterji wpływa do A , z A przez roztwór, czyli przez *elektrolit*, płynie do K , wreszcie z K powraca do ujemnego bieguna baterji. Całe urządzenie, za Faradayem, nazywamy *woltametrem*.



Rys. 54.

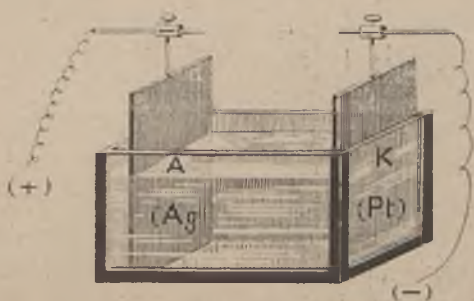
Skoro ustanowiliśmy wskazane połączenia, spostrzegamy, iż około blaszek A i K poczynają ukazywać się banieczki gazowe; odrywając się od elektrod, bańki podnoszą się wkrótce i zbierają się w górnych częściach ramion przyrządu; przekonywamy się łatwo, że dokoła A wytwarza się *chlor*, że dokoła K pojawia się *wodór*. Związek HCl zdaje się zatem rozkładać się tutaj na swe składniki, które jednak nie pojawiają się razem: chlor ukazuje się na jednej, wodór

na drugiej elektrodzie, chociażby one były od siebie bardzo odległe. Okoliczność ta może nas słusznie zadziwić. Jeżeli rozkładają się cząsteczki HCl znajdujące się w pobliżu anody, jakże może pochodzący z nich wodór niepostrzeżenie przeskakiwać do katody? Gdy w sąsiedztwie katody rozpadają się cząsteczki HCl , uwolniony z nich chlor, zanim ukaże się naszemu wzrokowi, ma do anody drogę daleką: jakże zataja się w tej podróży? *Elektroliza*, czyli rozkład związków chemicznych odbywający się pod wpływem prądu elektrycznego, ma więc cechy osobliwe, którymi różni się od zwykłych chemicznych reakcyj.

W opisanem doświadczeniu należy posłużyć się kwasem solnym zawierającym od 20 do 30 gr HCl na 100 gr roztworu; gęstość takiego kwasu wynosi od 1.10 do 1.15 gr/cm^3 . Gdy roztwór jest zbyt rozcieńczony, na anodzie wraz z chlorem wydziela się pochodzący z wody tlen. Możemy zabarwić roztworem indyga kwas solny, który elektrolizujemy; wydzielający się na katodzie wodór nie zmienia niebieskiego zabarwienia cieczy; około anody zabarwienie znika szybko pod wpływem uwalnianego tam chloru.

Wykonajmy doświadczenie następujące. Do szklanego naczynia, zawierającego wodny roztwór azotanu srebrnego AgNO_3 , wprowadzamy dwie płyty: jedną srebrną Ag , drugą platynową Pt (rys. 55). Płytę srebrną wy-

bieramy za anodę woltametr, łączymy ją zatem z dodatnim biegunem baterji (o dostatecznej sile elektromotorycznej); platynowa służyć nam będzie za katodę, łączymy ją z biegunem ujemnym; gdy uskuteczniłmy te połączenia, prąd płynie przez roztwór, jak zawsze, od anody do



Rys. 55.

katody. Przekonywamy się po pewnym czasie, że masa srebrnej anody zmniejszyła się; im dłużej prąd płynie, tem ów ubytek jest większy. Jednocześnie na platynowej katodzie osadza się metaliczne srebro; naniesiona na katodę masa srebra jest dokładnie równa stracie anody. Roztwór elektrolityczny, przynajmniej napozór, nie zmienia się podczas zjawiska; masa rozpuszczonej soli jest wciąż taka sama, jaką mieliśmy w roztworze przed wszczęciem elektrolizy. Doświadczenie to jest pouczające;

widzimy, że oderwane od anody cząstki srebra *wędrują* pod wpływem prądu aż do katody przez roztwór; rozpuszczony w elektrolicie azotan, jako pośrednik, jak pomost, pomaga im w tej wędrówce zapewne.

Będziemy odtąd nazywali *ionami* najmniejsze cząstki, atomy lub zbiory i grupy atomów, które wędrują przez roztwór, pod wpływem prądu elektrycznego, w zjawisku elektrolizy. Iony, które płyną ku anodzie, nazwiemy *anionami*; dążące ku katodzie iony nazwiemy *kationami*. Jak widzieliśmy, atomy chloru są anionami; atomy wodoru, atomy srebra są kationami. Podobnie anionami są atomy bromu lub jodu; niektóre grupy atomów, np. grupa OH (hydroksyl), grupa NO³, grupa SO⁴, zachowują się jak aniony. Atomy potasu lub sodu, atomy miedzi, cynku, rtęci są kationami; jak kation zachowuje się grupa amonowa NH⁴.

Wyobraźmy sobie elektrolit, w którym, pod wpływem prądu, ciągnie ku elektrodom podwójny korowód: aniony ku anodzie zmierzają, kationy ku katodzie. Między anodą a katodą w elektrolicie, jak wszędzie, którędy prąd płynie, istnieje pole elektryczne. *Aniony* w tem polu poruszają się *przeciwko* elektrycznemu prądowi, w kierunku od ujemnej do dodatniej elektrody, od miejsc niższego do miejsc wyższego potencjału; wnosimy, że są zaopatrzone w *ujemne* elektryczne ładunki (§ 26). *Kationy* kierują się w polu *zgodnie* z elektrycznym prądem; posuwają się one od dodatniej do ujemnej elektrody, od miejsc wyższego do miejsc niższego potencjału; zachowują się zatem, jak gdyby niosły *dodatnie* elektryczne ładunki. Przepływ materialnych mas w elektrolizie, pochod materialnych atomów, łączy się więc nieodzownie z transportem elektrycznych ładunków; ionami są *atomy*, lub grupy atomów, w jakowyś sposób *związane z elektrycznością*.

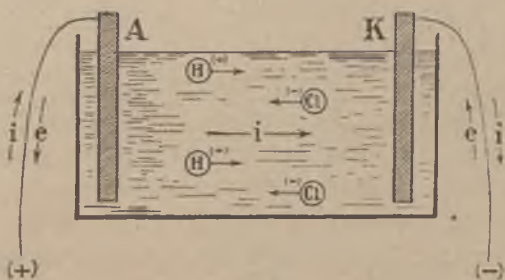
§ 42. Elektrony i jądra dodatnie atomów. Obraz elektrolizy.

Fizycy wyobrażają sobie obecnie, że elektryczność, podobnie jak pospolita materja, ma budowę atomistyczną. Przypuszczają, że istnieją niezmiernie małe, niepodzielne, ujemne elementarne ładunki, zwane *elektronami*. Wszystkie elektrony mają być jednakowe, ich ładunki identyczne. Jak w § 17-ym, oznaczmy przez *e* bezwzględną wartość ładunku elektronu; ładunek ten jest zatem — *e*. Atomy chemiczne (np. atomy H, He, O, N, Cl, Hg i t. p.)

bywają zazwyczaj elektrycznie obojętne czyli *neutralne*; jeśli tak jest, mówimy, że atom jest w stanie *normalnym*. Przypuśćmy, że neutralny atom chemiczny zawiera n elektronów; pozostała reszta atomu musi być elektrycznie dodatnia; resztę tę za Rutherfordem nazywamy *dodatniem jądrem* atomu.

Elektrony łatwo uciekają z atomu; wydarza się także, że swobodny elektron przyłącza się do neutralnego atomu. Przypuśćmy, że do neutralnego atomu zawierającego n elektronów przyłączył się jeden elektron; atom zawiera odtąd $n + 1$ elektronów, ma zatem ujemny ładunek $-e$. Jeżeli atom zawiera $n + 2$ elektrony, posiada ujemny ładunek $-2e$. W zjawisku elektrolizy takie atomy są anionami. Kationami są przeciwnie atomy, które utraciły pewną liczbę elektronów i mają ich mniej aniżeli w stanie normalnym. Atom zawierający $n - 1$ elektronów ma ładunek dodatni e ; atom zawierający $n - 2$ elektronów okazuje ładunek dodatni $2e$.

Powróćmy do elektrolizy kwasu solnego (§ 41). W chlorowodorze gazowym istnieją z pewnością cząsteczki HCl ; poznajemy je dzięki pomocy, której w badaniu gazów używa nam ich kinetyczna teoria (§ 53 tomu II-go). Lecz w kwasie solnym, t. j. w wodnym roztworze chlorowodoru, cząsteczki HCl , jak chemicy oddawna wiedzą, jako takie już nie istnieją; wśród tłumu wodnych molekuł błakają się zosobna atomy chloru i atomy wodoru. Obadwa atomy nie są neutralne. Gdy odłącza się od atomu wodoru, z którym w cząsteczce HCl był sprzężony, atom chloru zabiera jeden elektron; każdy więc atom chloru ma $n + 1$ elektronów, każdy atom wodoru ma ich $n - 1$. Wyobraźmy sobie pole elektryczne istniejące między anodą A a katodą K woltametr (rys. 56); aniony Cl przepychają się przez ciecz ku anodzie, kationy H torują sobie drogę ku katodzie. Dopłynawszy



Rys. 56.

anody, aniony oddają jej elektrony, które przywłaszczyły sobie nad normę; stają się wówczas zwykłymi, neutralnymi atomami chloru; utworzywszy molekuły Cl_2 , wydzielają się na anodzie

w postaci pospolitego chloru. Anoda, jako metaliczna zaporą, zatrzymuje atomy; ale nie stanowi przegrody dla elektronów. Uwolnione z chlorowych anionów elektrony płyną dalej przez metal anody i drutów, w kierunku strzałek e (rys. 56); w kierunku przeciwnym strzałek i płynie prąd. Opłynawszy obwód, w nim także ogniwa baterji, elektrony zjawiają się na katodzie K , gdzie spotykają się z kationami H ; wypełniają wówczas ich luki, zobojętniają ich ładunki dodatnie; kationy H powracają do roli neutralnych atomów wodoru, które, złączwszy się w molekuly H^2 , wydzielają się na katodzie jako zwyczajny wodór. Tym sposobem prąd krąży przez elektrolit i obwód, dopóki nie wyczerpie się zapas istniejących w roztworze ionów H i Cl .

§ 43. Faradaya pierwsze prawo elektrolizy.

Teorja oddaje nieocenione usługi poznawaniu natury; jeśli ich nie oddaje, staje się wkrótce zbyteczna. Pociągając za sobą pewne następstwa, teorja domaga się istnienia pewnych zależności, pewnych ilościowych związków lub praw. Spróbujmy i my wyprowadzić wnioski z hipotez, które przed chwilą przyjęliśmy. Wyobraźmy sobie zjawisko elektrolizy kwasu solnego, schematycznie przedstawione na rys. 56-ym. Wodorowy kation H w tej elektrolizie ma ładunek dodatni $+e$, co do bezwzględnej wartości równy ładunkowi jednego elektronu; kationy H mają taki pojedynczy ładunek $+e$ we wszystkich procesach elektrolizy, w których uczestniczą. Oznaczmy przez m masę jednego kationu H . Wyobraźmy sobie, że przebieg elektrolizy już się utrwalił; weźmy na uwagę nieprzerwany strumień kationów H ciągnących ku katodzie. Przypuśćmy, że w przeciągu czasu t do katody dopływa Nt kationów H ; symbol N oznacza więc odniesioną do jednostki czasu liczbę dopływających kationów. W czasie t dzieją się dwa zjawiska: masa wodoru mNt wydziela się na katodzie, katoda zyskuje ładunek elektryczny dodatni eNt ; oba dwa zjawiska wynikają z tej samej przyczyny, z pochodzenia kationów, są zatem nierozłącznie ze sobą związane. Rozumiejąc przez M wydzieloną na katodzie w czasie t masę wodoru, przez Q uzyskany przez katodę w tymże czasie dodatni ładunek, mamy

$$1. \quad M = mNt$$

$$2. \quad Q = eNt$$

skąd wynika, że

$$3. \quad \frac{M}{Q} = \frac{m}{e} = \text{wielkości stałej } A,$$

niezależnej od t , od M lub Q , zależnej tylko od jakości ionów; stałą tę A będziemy nazywali *elektrochemicznym równoważnikiem* substancji, o której mówimy; w obecnym przykładzie wodoru. Powiadamy, że z biegiem elektrolizy wydzielona masa M i przeniesiony ładunek Q rosną, pozostając wzajemnie proporcjonalne do siebie:

$$4. \quad M = AQ.$$

Twierdzenie to wyraża pierwsze z pomiędzy praw elektrolizy, ustanowionych w r. 1834-ym przez Michała Faradaya.

Jak z § 34-go wiadomo, stosunek Q/t jest charakterystyczną cechą prądu trwałego, którą nazywamy jego natężeniem i ; z (1) i (2) wyprowadzamy

$$5. \quad i = eN$$

$$6. \quad M = Ait.$$

Jeżeli natężenie prądu pozostaje niezmiennie, wydzielona masa M rośnie proporcjonalnie do czasu trwania elektrolizy; masa wydzielona w jednostce czasu jest proporcjonalna do natężenia prądu. Zarówno poprzednie pierwsze twierdzenie jak obecnie przytoczone stosują się do wszelkich kationów; ze zmianą oczywistą znaków wielkości e oraz Q stosują się one również do wszelkich anionów; zgadzają się one ściśle ze wszystkimi spostrzeżeniami, do tego stopnia, że nie istnieje dzisiaj wątpliwość co do ich prawdziwości.

Ogólniej niż przed chwilą, przypuśćmy, że każdy kation niesie w sobie ładunek dodatni ke ; utraciwszy k elektronów z liczby normalnej n , którą jako neutralny atom posiada, taki kation zawiera $n - k$ elektronów. Dwuwartościowy atom miedzi Cu , wchodzący w skład cząsteczki CuSO_4 siarczanu miedziowego, tworzy naprzykład kation obdarzony dodatnim ładunkiem $2e$; tu zatem $k = 2$. Mamy ogólnie

$$7. \quad M = mNt$$

$$8. \quad Q = keNt.$$

Otrzymujemy zatem, jak wyżej

$$9. \quad M = AQ = Ait$$

lecz elektrochemiczny równoważnik A ma tutaj wartość

$$10. \quad A = m/ke.$$

Jak zobaczymy w IV-ym rozdziale, natężenie prądu krążącego w danym obwodzie możemy mierzyć sposobami niezależnymi

od zjawisk elektrolizy. Przepuszczając zatem przez stosowny elektrolit prąd znanego natężenia i oraz mierząc masę M kationów lub anionów, która wydzieliła się wówczas w czasie t , możemy poznać, podług równania (6), wartość równoważnika elektrochemicznego A substancji, której jony obserwowaliśmy. Przytaczamy niektóre wyniki, które tą drogą znaleziono; wartości A są podane w jednostce 10^{-15} gr/el.-stat. jedn. ładunku.

Wodór: 3 482; Srebro: 372 67; Miedź (dwuwart.): 109 8.

Jeżeli elektrochemiczny równoważnik pewnej substancji jest nam znany, odwracamy wówczas postępowanie: posługujemy się woltametrem, ażeby mierzyć natężenie przepływającego prądu; z wiadomych wartości A , M oraz t obliczamy wartość i podług równania (6). Do takich pomiarów posługujemy się zazwyczaj woltametrami, zawierającymi roztwory wodne soli srebra lub miedzi.

§ 44. Drugie prawo elektrolizy.

Porównajmy własności dwóch różnych ionów, np. kationu wodoru H i kationu srebra Ag; obadwa mają ładunek jednaki, mianowicie ładunek e , co do bezwzględnej wartości identyczny z ładunkiem elektronu. Oznaczając zatem elektrochemiczne równoważniki wodoru i srebra przez A_H i A_{Ag} , wnosimy z równania (3) § 43-go, że

$$1. \quad A_H : A_{Ag} = m_H : m_{Ag}.$$

Do tego związku wchodzi tylko *stosunek mas* kationów H i Ag lub, co niemal dokładnie na to samo wypada, stosunek mas neutralnych atomów H i Ag. Takie stosunki, według zasadniczych praw chemii, wyrażają się przez t. zw. *ciężary atomowe* (czyli przez *stosunkowe masy atomowe*, jak stałe te właściwie nazywać się powinny). Wiemy naprzykład, że

$$2. \quad m_H : m_{Ag} = 1.008 : 107.88;$$

w tym zatem stosunku, jeżeli formuła (1) jest słuszna, pozostawać do siebie powinny wartości A_H i A_{Ag} . Doświadczenie potwierdza to oczekiwanie; przytoczone w § 43-im wartości elektrochemicznych równoważników spełniają warunek

$$3. \quad A_H : A_{Ag} = 1.008 : 107.88.$$

Na tym przykładzie poznajemy treść t. zw. *drugiego prawa Faradaya*: *elektrochemiczne równoważniki ionów niosących jedna-*

kowe elementarne ładunki (czyli, mówiąc chemicznym językiem, obdarzonych tą samą wartościowością), są proporcjonalne do mas atomowych.

Wypowiadamy niekiedy inaczej drugie prawo Faradaya. Wyobraźmy sobie dwa elektrolity: w pierwszym niechaj wydzielają się kationy H przy elektrolizie, w drugim kationy Ag; przypuśćmy, że prąd elektryczny przeniósł równe sobie ładunki Q przez obadwa elektrolity. Według równania (4) § 43-go mamy wówczas

$$4. \quad M_H = A_H Q; \quad M_{Ag} = A_{Ag} Q$$

otrzymujemy zatem przy pomocy twierdzenia (1):

$$5. \quad M_H : M_{Ag} = m_H : m_{Ag}.$$

Jeżeli różne rodzaje ionów są obdarzone jednakowymi elementarnymi ładunkami (czyli mają wartościowość tę samą), ich masy, wydzielane z elektrolitów przez jednakowe ładunki, są proporcjonalne do mas atomowych.

Jak powiedzieliśmy, w elektrolizie roztworu siarczanu miedziowego kation Cu jest dwuwartościowy, ma więc ładunek dodatni $2e$; w tym razie $k = 2$. Stosunek mas atomowych wynosi

$$6. \quad m_{Cu} : m_{Ag} = 63.57 : 107.88$$

podług równania (10) § 43-go powinniśmy zatem oczekiwać, iż

$$7. \quad A_{Cu} : A_{Ag} = \frac{1}{2} (63.57) : 107.88.$$

Przytoczone w § 43-im wartości równoważników A_{Cu} i A_{Ag} czynią istotnie zadosyć warunkowi (7). W uogólnionej zatem postaci drugie prawo Faradaya brzmi jak następuje: elektrochemiczne równoważniki są proporcjonalne nie do samych mas m , lecz do stosunków m/k ; masy ionów, wydzielane z elektrolitów przez jednakowe ładunki, są proporcjonalne do mas atomowych, dzielonych przez liczby elementarnych w ionach ładunków czyli przez ich wartościowość.

Gram-atomem μ pierwiastka nazywamy jego masę liczącą tyle gramów, ile jednostek zawiera ciężar atomowy pierwiastka; na przykład 1.008 gr wodoru, 107.88 gr srebra, 63.57 gr miedzi, 35.46 gr chloru i t. d. Innymi słowy, oznaczając przez ∂ liczbę atomów zawartych w gram-atomie, powiadamy

$$8. \quad \mu = m\partial$$

przyczem, jak z określenia wynika, ∂ jest liczbą *powszechną*, jednakową dla wszystkich pierwiastków. Posługując się pojęciem gram-atomu, przepisujemy zatem, dla ionów jednowartościowych

(czyli mających ładunek $+e$ lub $-e$), równanie (3) § 43-go w postaci następującej:

$$9. \quad A = \mu/e\partial\mathcal{L}.$$

Stałą Faradaya nazywamy iloczyn $e\partial\mathcal{L}$, ku czci wielkiego odkrywcy, któremu nauka tyle zawdzięcza; jest to oczywiście również stała powszechna, dla wszystkich gatunków ionów jednokowa. Oznaczając przez F stałą Faradaya, mamy

$$10. \quad \mu = AF \qquad 11. \quad M:\mu = Q:F$$

Gdy $Q = F, 2F, 3F$, wówczas $M = \mu, 2\mu, 3\mu$; przepływając przez elektrolit, każdy ładunek F wydzieli 1 gram-atom dowolnego jednowartościowego (niosącego jeden elementarny ładunek) ionu.

Podług (10) § 43-go mamy ogólniej $A = m/ke$; zatem

$$12. \quad \mu = AkF \qquad 13. \quad M:\mu = Q:kF$$

Przepływając przez elektrolit, każdy ładunek kF wydzieli 1 gram-atom dowolnego k -wartościowego (niosącego k elementarnych ładunków) ionu.

Ażeby obliczyć wartość stałej Faradaya, kładziemy w równaniu (10)

$$14. \quad \mu_{Ag} = 107.88 \text{ gr}, \quad A_{Ag} = 372.67 \times 10^{-15} \frac{\text{gr}}{\text{el.-stat. j. ład.}}$$

otrzymujemy:

$$15. \quad F = 2.89478 \times 10^{14} \text{ el.-stat. jedn. ład.}$$

Stosownie do określenia stałej Faradaya, wartość (15) stosuje się jednakowo do wszelkich gatunków ionów.

§ 45. Wartość niektórych zasadniczych stałych.

Za określenie stałej Faradaya przyjęliśmy związek

$$1. \quad F = e\partial\mathcal{L}.$$

Zobaczymy jednak w VIII-ym rozdziale, że wartość e ładunku elektronu jest już dzisiaj znana dokładniej; mamy

$$2. \quad e = 4.774 \times 10^{-10} \text{ el.-stat. jedn. ład.}$$

(por. § 17). Wstawiając znaną wartość F oraz niniejszą e do równania (1), otrzymujemy

$$3. \quad \partial\mathcal{L} = 6.064 \times 10^{23}$$

tyle więc atomów dowolnego pierwiastka zawiera się w jego 1 gram-atomie. Znając liczbę $\mathfrak{N}$, obliczamy rzeczywistą masę atomu któregośkolwiek pierwiastka z równania (8) § 44-go; np. dla wodoru

$$4. \quad m_H = \frac{1.008 \text{ gr}}{6.064 \times 10^{23}} = 1.662 \times 10^{-24} \text{ gr.}$$

Przypuśćmy, że w 0°C , pod ciśnieniem 1 atmosfery normalnej, 1 cm^3 wodoru zawiera N cząsteczek (molekuł), zatem $2N$ atomów. Ponieważ w wymienionych warunkach temperatury i ciśnienia 1 cm^3 wodoru okazuje masę 9.004×10^{-6} gr, mamy zatem

$$5. \quad 2N : \mathfrak{N} = 9.004 \times 10^{-6} : 1.008$$

skąd wyprowadzamy

$$6. \quad N = 2.71 \times 10^{19}.$$

Według znanego z chemji, fundamentalnego prawa Avogadra, jednakowe objętości gazów doskonałych, w tej samej temperaturze i pod tem samem ciśnieniem, zawierają liczby molekuł jednakowe; znaleziona wartość N stosuje się przeto nietylko do wodoru, lecz do wszystkich gazów, które w 0°C i pod ciśnieniem 1 atmosfery, w dostatecznym stopniu przybliżenia możemy uważać za doskonałe. Liczba N jest zatem stałą *powszechną*, którą nazywamy *liczbą Avogadra*.

Odbiegliśmy napozór daleko od obecnego naszego przedmiotu. Może nas to zdziwić, iż, ważąc osad srebra, wydzielany w elektrolizie roztworu soli AgNO_3 , fizycy wnoszą z wyniku, ile cząsteczek zawiera się w centymetrze sześciennym wodoru, w temperaturze 0°C i pod ciśnieniem 1 atmosfery. Mamy tu przykład na prawdę głęboką, że w naturze niema szczegółów luźnych, odosobnionych, że w niej wszystko łączy się, spleta niemi ukrytych powiązań. Iść śladem tych związków jest właśnie zadaniem nauki.

Zadania.

1. Przepłynąwszy przez roztwór soli AgNO_3 , ile srebra wydzieli na katodzie ładunek 10^{12} el.-stat. jedn.? Przez jak długi czas musi przepływać przez ten elektrolit prąd o natężeniu 10^{12} el.-stat. jedn., ażeby wydzielił się 1 gr srebra?

2. W przeciągu 30 minut prąd wydzielił 11.858 gr dwuwartościowej miedzi z roztworu soli tego pierwiastka. Sprawdzić, że natężenie prądu wynosiło 6×10^{10} el.-stat. jednostek.

3. W pewnej elektrolizie wydziela się na katodzie wodór; na każdy wydzielony gram wodoru ile dostarczyliśmy katodzie el.-stat. jednostek ładunku? Ile el.-stat. jednostek ładunku musi otrzymać katoda na każdy gram dwuwartościowej miedzi wydzielony w elektrolizie roztworu soli tego pierwiastka?

4. Elektrolizując kwas solny, otrzymaliśmy 0.1662 gr wodoru na katodzie; ile przepłynęło przez elektrolit wodorowych kationów?

5. Ile atomów miedzi zawiera się w 63.57 gr tego pierwiastka? Ile atomów srebra zawiera się w 1 gr srebra? W 100 cm³ wodoru, w temperaturze 100°C, pod ciśnieniem 380 mm Hg, ile zawiera się molekuł wodoru?

ROZDZIAŁ TRZECI.

Pole magnetyczne statyczne.

§ 46. Zjawiska magnetyczne.

Od najdawniejszych lat jest już wiadomo, że niektóre żelaziste rudy przyciągają opiłki żelazne, gwoździe i inne drobne żelazne przedmioty. Lukrecjusz wspomina, że *magnesy* mogą nie tylko przyciągać, lecz niekiedy także odpychać; spostrzeżenie, które, według Plutarcha, należało do zasobu tajemnej wiedzy dawnych egipskich kapłanów. Że swobodnie kręcąca się igła magnesowa ustawia się w kierunku z południa na północ, piszą o tem arabscy, włoscy i francuscy autorowie XI-go, XII-go i XIII-go wieku, którzy *busoli* (czyli żeglarskiego kompasu) nie uważają widocznie za nowy, społeczny im wynalazek; niema też wątpliwości, że o wiele dawniej był znany w Chinach. Lecz do takich pierwotnych, ogólnikowych spostrzeżeń (nieraz zresztą pomieszanych z bajkami) ograniczała się starożytna i średnio-wieczna wiedza o magnetycznych zjawiskach. Uczeni przez stulecia czytali dawne księgi, ale bezpośrednie dostrzeganie i doświadczanie otaczającego świata pozostawiali rzemieślnikom, nieukom, fantantom i szarlatanom. «Jakże żałosna jest nasza nieznajomość natury!» pisze w r. 1600-ym William Gilbert, który naukę o elektrycznych i magnetycznych zjawiskach na nowe pchnął tory; «nasi filozofowie czyż nie są podobni do ludzi w ciemnościach drzemających? Trzeba ich obudzić, trzeba ich nauczyć, jak należy się z *rzeczami* obchodzić; niechże raz zarzucą uczoność, na domysłach polegającą i na wojowaniu słowami». *Doświadczalne* badanie natury rozpoczęło okres dzisiejszej cywilizacji.

Jak wiadomo z pierwszego rozdziału, podstawy elektrostatyki założono w XVII-em i XVIII-em stuleciu. Podobnie, powoli, wzmagala się znajomość faktów magnetyzmu; cały jej rozwój

do początków XIX-go wieku można streścić, mówiąc, że zrozumiano aż do tej chwili prawa *pól magnetycznych statycznych*. Elektryczne i magnetyczne badania postępowały więc równoległymi, lecz niezawisłymi torami. Dopiero w XIX-ym wieku spostrzeżono, że elektryczne i magnetyczne zjawiska są głęboko sprzężone ze sobą; że każda dziedzina, tych i tamtych doświadczeń, jest tylko szczególnym przypadkiem, tylko szczupłym rozdziałem wiele szerszej, wspaniałej całości.

§ 47. Magnes naturalne i sztuczne; bieguny magnesu.

Wyobraźmy sobie sztabę, wyciętą z rudy magnetycznej; taką sztabę nazywamy *naturalnym magnesem*. Jak powiedzieliśmy, magnes przyciąga żelazne opiłki; ale przyciąga je inaczej niż ziemia przyciąga kamień, niż naelektryzowany przewodnik przyciąga elektryczne wahadełko. Zanurzysz magnes w stogu opiłków żelaznych, wyciągamy go wraz z przylepionymi doń opiłkami



Rys. 57.

(rys. 57); spostrzegamy natychmiast, że opiłki przylegają tylko do zakończeń sztaby, część jej środkowa zdaje się ich nie przyciągać. Końcowe, przyciągające części sztaby (lub innego wydłużonego magnesu) nazy-

wamy *biegunami*; część nieczynną, środkową, nazywamy *pasem obojętnym*; Gilbert mówił konsekwentniej, że jest to *równik magnesu*. Sposobami, o których niżej wspomnimy, sporządzane dzisiaj bywają *sztuczne* magnesy, zwłaszcza stalowe, których magnetyczne własności, bardziej prawidłowe i o wiele wybitniejsze niż własności naturalnych magnesów, w istocie rzeczy są zupełnie podobne. Bieguny i pas obojętny występują wyraźnie w sztucznym magnecie.

Sprawdźmy, czy siły magnetyczne stosują się do prawa działania i oddziaływania, do t. zw. III-ej zasady dynamiki. Wydłużony magnes zawieszamy na nici; zbliżając żelazny lub stalowy przedmiot, widzimy, że magnes wykręca się, jak gdyby był przyciągany.

§ 48. Dwa rodzaje biegunów; igła magnesowa.

Zawieszamy magnes na nici (rys. 58), tak iż może kręcić się koło niej i zataczać dowolne łuki w płaszczyźnie poziomej;

oddaliwszy wszelkie inne magnesy lub żelazne i stalowe przedmioty, dostrzegamy, że magnes ustawia się w oznaczonym kierunku: jeden jego biegun zwraca się mniej więcej ku północy, drugi wskazuje przybliżenie południe. Biegun, który wykręca się ku północy, bywa nazywany biegunem *północnym* lub w skróceniu biegunem *N* (od ang. wyrazu *North*, północ); przeciwny biegun, który w położeniu równowagi szuka południa, nosi nazwę bieguna *południowego* lub bieguna *S* (od *South*, południe).

Wyrażamy się niekiedy inaczej; mówimy, że biegun *N* jest *do-*
datnim, że biegun *S* jest *ujem-*
nym biegunem magnesu; właściwe znaczenie tych nazw poznamy niebawem.



Rys. 58.

Iglą magnesową nazywamy magnes, wycięty w postaci długiej i wąskiej igły (rys. 59);



Rys. 59

taką igłę zaopatrujemy zazwyczaj w małe, szkłem lub agatem wyłożone wydrążenie; w tem miejscu igła wspiera się na ostrzu, na którym kręci się niemal bez tarcia. Igła magnesowa jest najważniejszą składową częścią *busoli* czyli kompasu; może też służyć wygodnie do badania pól magnetycznych w pracowni fizycznej.

§ 49. Namagnesowanie indukowane.

Dolny koniec *n* pręta *ns*, sporządzonego z wyżarzonego miękiego żelaza, zanurzamy w opiłkach żelaznych; opiłki nie przylegają, pręt nie jest magnesem. Do górnego końca *s* pręta zbliżamy biegun *N* silnego magnesu; opiłki przylepiają się teraz do *n*, *ns* zachowuje się jak gdyby był magnesem (rys. 60). Przy pomocy igielki magnesowej przekonujemy się, że najbliższy biegunowi *N* koniec *s* jest południowym (względem *N* różnoimiennym) biegunem, gdy najdalszy od *N* koniec *n* jest północnym (z *N* jednoimiennym) biegunem. Lecz to namagnesowanie pręta *ns* jest przemijające; trwa ono tylko dopóty, dopóki w pobliżu znajduje się magnes *NS*; gdy go oddalimy, namagnesowanie pręta znika całkowicie lub niemal całkowicie. Takie namagnesowanie żelaza nazywamy *indukowanym*; opisane zjawisko nazywamy *magnesowaniem się przez indukcję*.



Rys. 60.

Sporządźmy inny pręt *ns* z t. zw. twardej stali i powtórzmy doświadczenie powyższe; wynik będzie odmienny. Stal magnesuje się przez indukcję, ale słabiej niż miękkie żelazo; u dolnego końca stalowego pręta, do którego zbliżyliśmy magnes, wisi mniej uczepionych opilek aniżeli u końca żelaznego. Ale stal zachowuje uporczywiej namagnesowanie, którego nabyła; gdy oddalimy indukujący magnes, stalowy pręt okazuje prawie te same magnetyczne własności, które objawiał w sąsiedztwie magnesu. Mówimy, że w stali, po namagnesowaniu, zachowuje się pewna *magnetyczna pozostałość*.

Żelazny lub stalowy pręt, namagnesowany przez indukcję, może indukować namagnesowanie w drugim, drugi w trzecim i t. d. Dlatego u bieguna silnego magnesu może wisieć sznur uczepionych słupków żelaznych; dlatego też takiego bieguna trzyma się stłoczona gromada opilek żelaznych (rys. 57).

§ 50. Jednostajnie namagnesowany magnes linjowy.

Do doświadczeń, którymi będziemy zajmowali się w niniejszym rozdziale, nadają się magnesy, sporządzone w sposób następujący.



Rys. 61.

Długą i wąską sztabę stalową *ns* umocowujemy nieruchomo (rys. 61); następnie posuwamy po niej, od *s* do *n*, biegun południowy *S* magnesu *NS*, ruchem jednostajnym. U końca *n* sztaby odrywamy biegun *S*, przenosimy go zdala od sztaby do początku *s*, posuwamy ponownie do *n*, znów odrywamy w *n* i t. d. Powtórzywszy tę czynność kilkanaście razy, przekony-

wamy się, że w *n* utworzył się biegun północny magnesu *ns*, w *s* południowy. Tak sporządzony magnes linjowy nazwiemy *jednostajnie namagnesowanym* magnesem. Gdybyśmy byli posuwali podobnie biegun *N* magnesu *NS* po sztabie *ns*, byłaby się namagnesowała przeciwnie, znów jednostajnie.

§ 51. Wzajemne działanie magnetycznych biegunów.

Wyobraźmy sobie dwa magnesy *NS* i *ns*, których bieguny rozpoznaliśmy wiadomym sposobem; możemy je zawiesić na nici lub osadzić na ostrzu, tak iż są swobodnie ruchome. Do

bieguna n jednego magnesu możemy zbliżać biegun N lub S drugiego; do bieguna s możemy zbliżać albo N albo S . W wyniku tych czterech doświadczeń przekonujemy się, że:

- (I) biegun N odpycha biegun n i jest przezeń odpychany
- (II) biegun S przyciąga biegun n i jest przezeń przyciągany
- (III) biegun N przyciąga biegun s i jest przezeń przyciągany
- (IV) biegun S odpycha biegun s i jest przezeń odpychany.

Krótko mówimy: *jednoimienne magnetyczne bieguny odpychają się, różnoimienne przyciągają się wzajemnie.*

Jeżeli magnes ma postać bardzo cienkiego pręta, bieguny możemy w przybliżeniu poczytywać za punkty. W tym znaczeniu powiadamy: *siły działające między magnetycznymi biegunami są umiejscowione w prostej, która łączy bieguny ze sobą.*

Wyobrażamy tu sobie oczywiście doświadczenie idealne; w ciągu dalszych wywodów rozważymy dokładniej wzajemne działanie rzeczywistych magnesów na siebie.

Ponad dużym, silnym magnesem NS (rys. 62), niezbyt od niego daleko, umieszczamy igłę magnesową ns ; znajduje się ona w równowadze, gdy oś sn igły jest równoległa do osi SN magnesu lecz skierowana przeciwnie, gdy zaś biegun n igły zwraca się w stronę bieguna S magnesu, gdy biegun s igły wskazuje stronę bieguna N . Wynik ten tłumaczy nam natychmiast spostrzeżenia opisane w § 48 ym; wyprowadzamy zeń wniosek, który Gilbert jako «nową i niesłyszanaą prawdę» ogłosił, że mianowicie *kula ziemską jest wielkim magnesem*; że jej magnetyczny biegun S znajduje się w pobliżu północnego geograficznego bieguna, że jej bi-biegun magnetyczny N znajduje się w pobliżu południowego geograficznego bieguna.



Rys. 62.

Z dotychczasowych wyników wnosimy, że magnetyczne bieguny działają na siebie podobnie jak maleńkie ciała naelektryzowane; jakże daleko sięga to podobieństwo? Gdy próbujemy w doświadczeniu znaleźć odpowiedź na to pytanie, natrafiamy na trudność. Zbliżajmy ku sobie dwa magnesy NS i ns . Działająca na biegun n wypadkowa siła składa się geometrycznie z sił, wywieranych przez N i przez S ; działająca na biegun s wypadkowa siła składa się geometrycznie z sił, wywieranych przez N i przez S . A przytem ruch bieguna n nie jest niezależny od ruchu bieguna s ; ns jest ciałem sztywnym, jego ruch zależy od sił nN , nS , sN , sS w sposób naogół zawily. Ale wzajemne

§ 52. Prawo Coulomba.

Przed chwilą widzieliśmy, że prawa wzajemnego działania magnetycznych biegunów ze wszech miar są podobne do praw działania ciał naelektryzowanych. Z §§ 15-go i 51-go wnosimy, że brakuje nam tylko magnetycznego pojęcia analogicznego do pojęcia elektrycznego ładunku; skoro je utworzymy, będziemy mogli zastosować w pełni prawo Coulomba do sił wywieranych przez magnetyczne bieguny.

Wyobraźmy sobie doświadczenia podobne do opisanych w § 51-ym; przypuśćmy, że nieruchomy, *czynny* magnes NS pozostaje niezmienny, że zmienia się natomiast ruchomy magnes ns , który nazwiemy *wywiadowczym*. Zbliżyamy bieguny n_1, n_2, n_3 rozmaitych wywiadowczych magnesów do bieguna N danego czynnego magnesu NS , przestrzegając, by odległości nN były zawsze jednakowe oraz, by odległości nS, sN, sS były znaczne w porównaniu do odległości nN (§ 51). Na bieguny n_1, n_2, n_3 działają w tych warunkach siły F_1, F_2, F_3 ; w myśl prawa Coulomba przypisujemy biegunom n_1, n_2, n_3 *magnetyczne masy* albo *ilości magnetyzmu* m_1, m_2, m_3 proporcjonalne do wartości F_1, F_2, F_3 .

Magnes czynny NS nie różni się jednak niczem istotnem od wywiadowczego ns ; możemy je wymienić t. j. unieruchomić ns i nazwać go *czynnym*, uruchomić NS i rolę wywiadowczego go obarczyć. Skoro biegun N działa na n proporcjonalnie do ilości magnetyzmu m skupionej w n , zatem przeciwnie biegun n musi działać na N proporcjonalnie do ilości magnetyzmu M obecnej w N . Ponieważ zaś prawo działania i oddziaływania stosuje się do sił magnetycznych (§ 47), przeto siła wywierana przez N na n jest równa sile, wywieranej przez n na N . Jedna i druga siła musi więc być proporcjonalna zarazem do m i do M ; innemi słowy obiedwie są proporcjonalne do iloczynu mM .

Wnioski poprzedzającego i obecnego artykułu zbieramy w twierdzeniu następującem: *wzajemne siły działające pomiędzy dwoma magnetycznymi biegunami są równe i przeciwne sobie, są umieszczone w łączącej te bieguny prostej, są wprost proporcjonalne do iloczynu ilości magnetyzmu, któremi bieguny są obdarzone, wreszcie odwrotnie są proporcjonalne do kwadratu wzajemnej odległości biegunów*. Twierdzenie to, podobnie jak analogiczne elektrostatyczne twierdzenie, zawdzięczamy C o u l o m b o w i;

w nauce o polu magnetycznym statycznym nazywamy je zatem również *prawem Coulomba*.

Czytając siedm rozpraw, poświęconych zbadaniu praw elektrostatycznego i magnetostatycznego działania, siedm prac pomnikowych, które Coulomb umieścił w Pamiętnikach paryskiej Akademii Nauk pomiędzy 1785 a 1789 r., nie możemy oprzeć się uczuciu podziwu. Ścisłość i staranność doświadczeń, trzeźwość i trafność rozumowań i wniosków są w nich nieporównane. Coulomb spokojnie odrzuca zamęt błędnych twierdzeń, przypuszczeń niejasnych, obrazów zbytecznych i złudnych, które utrudniali sobie drogę spółcześni; co uznaje za prawdę, pozostało w nauce, niemal bez wyjątku.

Oznaczając przez m i M ilości magnetyzmu zawarte w dwóch biegunach, które znajdują się od siebie w odległości r i rozumiejąc przez k współczynnik stały (niezależny od m , M i r), przedstawiamy w następującej postaci siłę F czynną między biegunami

$$1. \quad F = \frac{kmM}{r^2}.$$

Proporcjonalność siły F do mM wynika, jak wiemy, z przyjętej umowy; ale odwrotna jej proporcjonalność do r^2 , wspólna z prawem sił grawitacyjnych i elektrostatycznych, jest faktem głębokim, wyższym ponad wszelką dowolność.

Z §§ 16 i 32-go jest nam wiadomo, że ośrodek, który otacza ciała naelektryzowane, nie pozostaje bez wpływu na wywierane pomiędzy nimi działania; od natury ośrodka zależy, niekiedy wybitnie, wartość sił czynnych w polu elektrycznym. Zapytujemy, czy siły magnetyczne są i w tym względzie podobne do elektrycznych? Że jest tak istotnie, było jednym z mnóstwa odkryć, któremi naukę wzbogacił Faraday. Wyłączmy przedewszystkiem z uwagi żelazo oraz inne substancje, t. zw. *ferromagnetyczne*, które w polu magnetycznym zachowują się podobnie jak żelazo; zachowanie to rozważymy w artykułach późniejszych. Pozostałe materjalne ośrodki możemy podzielić na dwie klasy: na t. zw. *diamagnetyczne* i *paramagnetyczne* ośrodki. Wyobraźmy sobie dwa magnetyczne bieguny i przypuśćmy, że zawarte w nich ilości magnetyzmu m i M oraz wzajemna odległość biegunów r pozostają niezmiennie; jeżeli bieguny są zanurzone w diamagnetycznym ośrodku, wywierane między nimi siły są *silniejsze* niż w próżni; jeżeli bieguny są zanurzone w paramagnetycznym ośrodku, wywierane między nimi siły są *slabsze* niż w próżni. W obu razach siły, działające w ośrodku, są bardzo mało różne od sił, które *caeteris paribus* objawiają się w próżni.

Postąpmy teraz podobnie jak w § 16-ym; o stałej k występującej w formule (1) założmy, iż jest $= A/\mu$; A ma być tutaj stałą powszechną, jednakową dla wszelkich ośrodków i zależną jedynie od wyboru jednostek, w których wyrażamy m , M , r oraz F , natomiast μ ma być (oderwaną) liczbą, charakteryzującą własności substancji jako ośrodka pól magnetycznych. Gdy tym ośrodkiem jest próżnia, zakładamy $\mu = 1$; gdy ośrodek jest diamagnetyczny, mamy $\mu < 1$; gdy jest paramagnetyczny, piszemy $\mu > 1$. Taką liczbę μ nazywamy *przenikliwością magnetyczną* uważanego ośrodka. Poprzednią formułę przepisujemy teraz w następującej postaci:

$$2. \quad F = \frac{AmM}{\mu r^2}.$$

Do *ferromagnetycznych* substancyj zaliczamy, prócz żelaza, również kobalt i nikiel oraz związki, mieszaniny lub aljaże, zawierające żelazo, kobalt lub nikiel (więc np. różne gatunki stali), wreszcie niektóre inne, nieliczne substancje, np. aljaże manganu, miedzi i glinu. Najwybitniejszym przedstawicielem substancyj *diamagnetycznych* jest bizmut; przenikliwość bizmutu w temperaturze pokojowej wynosi 0.99984, jest więc mało różna od jedności; dla wszystkich innych diamagnetycznych substancyj (jak antymon, cynk, rtęć, miedź, woda) stała μ jest jeszcze bliższa jedności. Do *paramagnetycznych* substancyj należą pallad, platyna, potas; tlen jest również paramagnetyczną substancją. Dla palladu w temperaturze pokojowej μ wynosi 1.0006; dla innych wymienionych substancyj μ jest jeszcze bliższa jedności.

§ 53. Jednostka ilości magnetyzmu.

Podobnie jak w elektrostatyce, zadajemy sobie teraz pytanie, w jakich jednostkach mamy wyrażać wielkości, występujące w równaniu (2) § 52-go. Przypuśćmy, że dwa bieguny, w których zawarte są ilości m i M magnetyzmu, znajdują się w próżni, w odległości r od siebie wzajemnie. Kładziemy wówczas $\mu = 1$, siłę F mierzymy dynami, odległość r wyrażamy w centymetrach. Umawiamy się, że współczynnik A ma być równy oderwanej jedności; jednostkę ilości m i M , która wyniknie z takiej umowy, nazywamy *magnetostatyczną jednostką ilości magnetyzmu*. Piśzemy zatem

$$1. \quad F = \frac{mM}{r^2}.$$

Gdy tu założymy

$$2. \quad r = 1 \text{ cm}; \quad m = M = 1 \text{ magn.-stat. jedn. il. magn.},$$

otrzymamy

$$3. \quad F = 1 \text{ dynie.}$$

Gdy dwie magnetostatyczne jednostki ilości magnetyzmu, skupione każda w biegunie, zanurzone są w próżni, w odległości 1 cm od siebie wzajemnie, każda wówczas wywiera siłę 1 dyny na pozostałą i doznaje od niej siły 1 dyny.

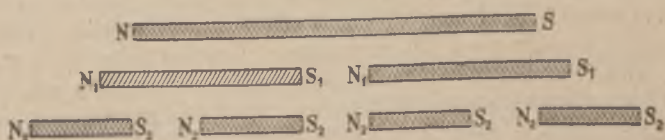
Rozumując jak w § 17-ym, dochodzimy do wniosku, że

$$4. \quad 1 \text{ magn.-stat. jedn. il. magn.} = 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{3/2} / \text{sek.}$$

Gauss po raz pierwszy, w r. 1832-im, pokazał, jak można mierzyć magnetyczne wielkości, wychodząc z przytoczonej tutaj zasady.

§ 54. Ilości magnetyzmu zawarte w biegunach magnesu.

Wyobraźmy sobie magnes linjowy NS (rys. 64). Taki magnes, jak wiemy, ma dwa bieguny: północny N i południowy S ; jeżeli przełamiemy go lub przepiłujemy gdziekolwiek bądź w pasie obojętnym, otrzymamy dwa nowe magnesy $N_1 S_1$, z których



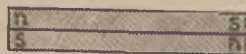
Rys. 64.

każdy ma dwa bieguny: północny N_1 , południowy S_1 ; powtarzając proces dzielenia, otrzymamy cztery nowe magnesy $N_2 S_2$ i każdy ma znów dwa bieguny, północny N_2 , południowy S_2 . Niepodobna zatem rozłączyć, materialnie rozerwać, oddzielić od siebie magnetycznych biegunów; niepodobna utworzyć magnesu, który okazywałby jeden biegun. Magnes ma co najmniej dwa bieguny.

Spróbujmy wymierzyć ilości magnetyzmu, któreimi obdarzone są dwa bieguny linjowego, jednostajnie namagnesowanego magnesu. Posługujemy się w tym celu zasadami, które ustanowiliśmy w §§ 51 i 52-im. Przypuśćmy, że biegun N magnesu NS , w odległości r , przyciąga pewien biegun s siłą F ; przeciwny biegun S tego samego magnesu NS , w tej samej odległości r , odpycha wówczas ten sam biegun s taką samą siłą F ; skąd wynika, że bezwzględne wartości ilości magnetyzmu, skupionych

w biegunach N i S , są jednakowe. *Ilości magnetyzmu, zawarte w biegunach tego samego* (linowego, jednostajnie namagnesowanego) *magnesu, co do znaku sobie przeciwne, co do wartości bezwzględnej są jednakowe.*

Przypuśćmy, że w biegunach dwóch linowych, jednostajnie namagnesowanych, jednakowo długich magnesów zawarte są jednakowe ilości magnetyzmu. Gdybyśmy złożyli ze sobą dwa takie magnesy ns (rys. 65), łącząc biegun n jednego z biegunem s drugiego, utworzony układ nie objawiałby nazewnątrz magnetycznych własności: nie wywierałby sił magnetycznych na obce bieguny, nie budziłby indukowanego magnetyzmu w zbliżonym kawałku miękkiego żelaza.



Rys. 65.

§ 55. Budowa magnesu.

Dzieląc na części magnes linowy, otrzymywaliśmy krótsze, ale całkowite magnesy (rys. 64). Jak przed chwilą w § 54-ym, zbadajmy ilości magnetyzmu, które obdarzone są bieguny utworzonych tym sposobem magnesów. Każdy północny biegun, który powstał przy podziale (np. N_1, N_2), okazuje tę samą ilość magnetyzmu, jaką miał biegun N pierwotnego magnesu; każdy nowy południowy biegun (np. S_1, S_2) okazuje tę samą ilość magnetyzmu, jaką miał biegun S pierwotnego magnesu.

Łącząc ze sobą części $N_1 S_1$ lub też części $N_2 S_2$ i składając N_1 z S_1 , N_2 z S_2 , otrzymujemy napowrót magnes pierwotny, który okazuje tylko dwa zewnętrzne bieguny N i S ; bieguny wewnętrzne zubożniają się wzajemnie parami. Gdybyśmy mogli ciąć magnesy albo je kruszyć bez uderzeń i wstrząśnień szkodzących namagnesowaniu, w zewnętrznych biegunach odbudowanego magnesu znaleźlibyśmy także same ilości magnetyzmu, jakie były zawarte w biegunach pierwotnego.

Rozłamywaliśmy dotychczas magnes na kilka, na kilkanaście części; rozetrzyjmy go teraz, rozkruszmy go na drobne fragmenty. Każda odrobina magnesu jest znów maleńkim, całkowitym, dwubiegunowym magneselem. Prowadząc dalej, już



Rys. 66.

w wyobraźni, dzieło podziału, możemy przypuszczać, że najmniejsze cząstki magnesu są *spolaryzowane*; każda zawiera ujemny biegun s i dodatni n , w każdej odległość od s do n jest bardzo mała ale nie jest zerem. *Ośią magne-*

tyczną molekuły *ns* nazwijmy wektor o długości *ns*, skierowany od *s* do *n*. Dopóki osi molekuł rozrzucone są bezładnie (jak to wskazuje część *A* schematycznego rys. 66-go), sztaba z takich cząstek złożona nie okazuje magnetycznych własności. Lecz jeżeli, pod wpływem zewnętrznego magnesującego działania, osi *sn* zwrócą się, choć przybliżenie, w zgodnych kierunkach (część *B* rys. 66-go), sztaba staje się słabszym lub silniejszym (zależnie od układu cząstek) magnesem. Kiedy więc sztaba stanie się najsilniejszym magnesem, jakim być wogóle może? Wówczas, gdy osi jej wszystkich molekuł ułożą się równoległe do siebie (część *C* rys. 66-go). Znamy istotnie stan t. zw. *nasycenia magnetycznego* czyli możliwie najsilniejszego namagnesowania stali lub miękkiego żelaza; osiągamy go, postępując się wpływem sił magnesujących ogromnych.

Przy pomocy prostych urządzeń możemy zgrubsza naśladować układy magnetycznych molekuł. Wypełniamy szklaną rurkę dość luźno opiłkami żelaznymi, które mocno magnesujemy tak, żeby ułożyły się w łańcuchy i pasma, przybliżenie równoległe do osi rurki; układ zachowuje się mniej więcej jak magnes linjowy, którego bieguny leżą przy końcach rurki; lecz skoro go mocno wstrząśniemy, magnetyczne własności modelu słabną lub znikają. Podobnie słabną albo znikną magnetyczne własności rzeczywistego magnesu, gdy raptownie ogrzejemy go do czerwoności. Bardzo drobne cząstki magnetycznego tlenku żelaza, skłócone z wodą, tworzą zawiesinę mętną, niemal nieprzezroczystą. Rurkę, pełną tej zawiesiny, umieszczamy w silnem polu magnetycznem; wiązka światła, która przez zawiesinę nie mogła poprzednio się przedrzeć, przenika ją teraz z łatwością.

Obrazy czyli porównania molekularne tłumaczą, dlaczego magnetyczne własności magnesów bywają podobne do niedoskonałej sprężystości ciał stałych (§ 9 tomu II-go). Pozostałość magnetyczna, pamiątka po namagnesowaniu (§ 49), jest czemś analogicznem do *trwałych odkształceń* ciał podatnych (plastycznych); istnieją również objawy magnetycznego poddawania i ociągania się oraz «zmęczenia» po namagnesowaniu.

Dla uproszczenia mówiliśmy dotychczas o bardzo wydłużonych, cienkich lub wąskich prętach i sztabach magnesowych. Rzeczywiste magnesy nie mogą oczywiście być linjowe, mają zawsze skończone poprzeczne rozmiary; bieguny takich magnesów nie są umiejscowione w punktach ani nawet w powierzchniach; zamiast właściwych biegunów mamy tu raczej *okolice biegunowe* w pobliżu zakończeń, jak to zresztą wnosimy z najprostszych doświadczeń (rys. 57).



Rys. 67.

Magnes krótki i gruby traci łatwo namagnesowanie, o wiele łatwiej aniżeli długi i cienki. *Pierścień* zachowuje wytrwale namagnesowanie, którego mu udzieliliśmy. Wyciąwszy w pierścieniu przerwę (rys. 67), otrzymujemy w niej



Rys. 68.

stosunkowo silne pole magnetyczne; przyciąganiu, sprawianemu przez jedno zakończenie, dopomaga odpychanie wywierane przez drugie. Ale przez tę własność

przerwę może łatwo uciec magnetyzm pierścienia; gdy ją wypełnimy t. zw. *zworą* (kawałkiem żelaza, który ją dokładnie zamyka), powstający w zworze indukowany magnetyzm wzmacnia namagnesowanie pierścienia i chroni je od skutków wstrząśnięć, zmian temperatury i innych zakłóceń. Odmianą pierścieniowego jest pospolity magnes sporządzony w kształcie podkowy (rys. 68); składa się często z warstw cienkich, ponieważ zachowują one namagnesowanie uporczywiej niż grube.

§ 56. Wektor magnetyczny.

Dokoła każdego magnesu istnieje, jak wiemy, *pole magnetyczne* czyli zakres przestrzenny, w którym objawiają się siły wywierane przez magnes. Mierzymy te siły według zasad, które przepisuje dynamika. Przypuśćmy, że mamy zbadać pole istniejące dokoła magnesu *NS*. Wyobraźmy sobie inny magnes *ns*, linjowy i nadzwyczajnie długi, a przytem jednostajnie ale słabo namagnesowany; przypuśćmy, że jego północny biegun *n* zawiera dodatnią ilość *m* magnetyzmu, południowy *s* ilość ujemną — *m*. Biegun *n* (który nazywamy znów *wywiadowczym*) wnosimy do uważanego w polu miejsca, przestrzegając warunku, by skojarzony z nim biegun *s* znajdował się o ile podobna najdalej. Obserwując zachowanie się magnesu *ns*, możemy znaleźć wartość siły *F*, która w danym punkcie pola działa na dodatnią ilość *m* magnetyzmu.

Dopóki postać, natura oraz namagnesowanie magnesu *NS* pozostają niezmiennie, otaczające go pole pozostaje także niezmiennie. Zważajmy atoli, iż siła *F*, której biegun *n* doznaje w różnych punktach pola, zależy nie tylko od pola, lecz również od ilości magnetyzmu zawartej w tym biegunie; dlatego wartości *F* same przez się nie wystarczają do opisu pola; dlatego *F* nie jest właściwą, charakterystyczną cechą pola. Skoro jednak, według § 52-go, siła *F* jest proporcjonalna do ilości *m* magnetyzmu zawartej w wywiadowczym biegunie, przeto, gdy założymy

$$1. \quad F = mH,$$

wartość *H* już nie zależy od *m*, zależy tylko od punktu pola, w którym *F* i *H* są utworzone. Podobnie jak *F*, wielkość *H* jest wektorem. Wektor *H* jest umiejscowiony w tej samej prostej, w której leży *F*, ma ten sam kierunek jak *F* i ten sam punkt przyłożenia. Gdy znamy wartość i kierunek *H* w każdym punkcie pola, opisaliśmy w zupełności to pole; dlatego *H* nazywamy *zasadniczym magnetycznym wektorem*.

Przypuśćmy, że biegun wywiadowczy, którym posługujemy się celem zbadania pola, jest obdarzony ilością dodatniego magnetyzmu równą 1 magnetostatycznej jednostce (§ 53); przypuśćmy, że ten biegun w punkcie M pola doznaje działania siły równej 1 dynie; mówimy wówczas, że w punkcie M wartość wektora H wynosi 1 gauss. Mamy zatem

$$2. \quad 1 \text{ gauss} = 1 \text{ dyna} / 1 \text{ magn.-stat. jedn. il. magn.}$$

Wiemy, iż $1 \text{ dyna} = 1 \text{ gr cm/sek}^2$; wiemy również, że

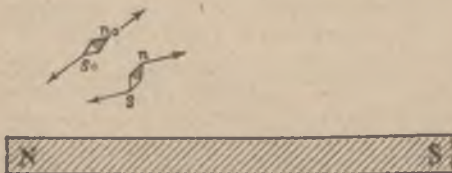
$$3. \quad 1 \text{ magn.-stat. jedn. il. magn.} = 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{3/2} / \text{sek}$$

(§ 53); z wzoru (2) wynika zatem, że

$$4. \quad 1 \text{ gauss} = 1 \text{ gr}^{1/2} / \text{cm}^{1/2} \text{ sek.}$$

Fizycy umieją wytwarzać dzisiaj pola, w których wartość H dochodzi do 50000 gaussów.

W punkcie M magnetycznego pola umieszczaliśmy dotychczas biegun północny n obdarzony dodatnią ilością m magnetyzmu. Przypuśćmy, że w to samo miejsce M tego samego pola wносimy biegun południowy s , zawierający ilość $-m$ magnetyzmu; kierunek siły F odwróci się wówczas (wykręci się o 180°), ale wartość siły F pozostanie niezmienną. Przypuśćmy, że w polu



Rys. 69.

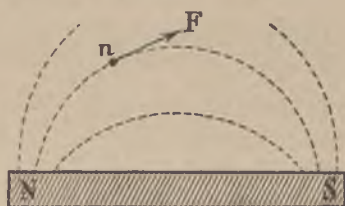
znalazła się mała, swobodnie ruchoma magnetyczna igielka (rys. 69). Bieguny igielki przypadają w dwóch różnych punktach pola, w których wektor H ma wogóle wartość różną i kierunek niejednakowy; lecz jeżeli igielka jest bardzo krótka, możemy założyć, że siły działające na jej bieguny są równe sobie i skierowane przeciwnie. Gdy zatem oś sn igielki tworzy dowolny kąt z kierunkiem H , na igielkę działa para sił (§ 97 tomu I-go), która dąży do jej wykręcenia; igielka będzie natomiast w równowadze, gdy (jak w $n_0 s_0$) oś jej przybierze kierunek zgodny z kierunkiem miejscowego wektora H . W położeniu równowagi oś igielki wskazuje więc kierunek wektora H panującego w danym miejscu.

§ 57. Linje pola magnetycznego.

Linjami pola magnetycznego nazywamy linje, które w każdym punkcie pola bieżą zgodnie z kierunkiem miejscowego magne-

tycznego wektora. Jeżeli w pewnym polu kierunek tego wektora jest wszędzie jednakowy, linje pola są równoległymi do siebie prostymi. Naogół jednak linje pól magnetycznych bywają zakrzywione; wektor H w danym miejscu jest wówczas styczny do przebiegającej przez to miejsce linji. Ponieważ wektor H wskazuje kierunek siły, która w danym punkcie pola jest wywierana na północny biegun n wywiadowczy (§ 56), wynika stąd zatem, że *linje pola wytwarzanego przez magnes kierują się zawsze od jego północnego do południowego bieguna*.

Rozważamy jako przykład pole sprawiane przez magnes linjowy; rys. 70 wskazuje przebieg kilku linij takiego pola. Ażeby zbadać ustrój pola, postępujemy jak w artykule poprzednim. W pobliżu bieguna N umieszczamy północny biegun n wywiadowczy, zakładając, że sprzężony z nim biegun południowy s jest nadzwyczaj odległy. Jeśli biegun n jest swobodny, posuwa się w kierunku działającej nań siły F , zatem w kierunku wektora H . Linja pola, przechodząca przez wybrane miejsce, wskazuje więc kierunek rozpoczynającego się ruchu bieguna; z powodów, które wskazaliśmy w analogicznym



Rys. 70.

przypadku pola elektrycznego (§ 18), nie wyobraża ona całkowitego toru tego bieguna. Gdy biegun n posunął się o mały łuk wzdłuż linji pola, zatrzymajmy go wówczas, odbierzmy mu prędkość nabytą i gdy znieśliśmy tym sposobem skutki bezwładności, pozwólmy mu przebyć następny element linji pola. Gdy tak postępujemy, biegun porusza się nieustannie po danej linji i może przebiec ją całą, od północnego do południowego bieguna magnesu.

Silny magnes, kształtu podkowy, ustawiamy biegunami do góry; na biegunach umieszczamy poziomo kartę papieru i posypujemy ją jednostajnie proszkiem drobnych żelaznych opiłek



Rys. 71.



Rys. 72.

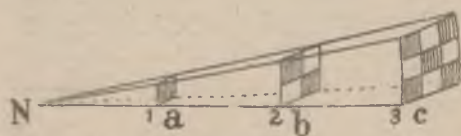
(t. zw. *ferrum limatum*). Lekko wstrząsając kartę, spostrzegamy, że opiłki ułożyły się w zakrzywione pasma, które wcale dokładnie

oddają przebieg linii pola magnetycznego. Otrzymujemy tym sposobem obrazy noszące nazwę *widm magnetycznych*.

Na zasadzie poprzedzających wywodów objaśniamy łatwo powstawanie widm magnetycznych. Jeżeli mała magnesowa igielka może kręcić się swobodnie, ustanawia się w danym miejscu pola w kierunku wektora H , stycznie do przebiegającej przez owo miejsce linii pola. Każde ziarnko żelaza na karcie magnesuje się przez indukcję, staje się więc niejako maleńką magnesową igielką. Odskokczywszy od wstrząśniętej karty, opilki układają się w kierunku elementów linii magnetycznego pola. Na rys. 71 i 72 widzimy widma tworzone przez dwa zbliżone ku sobie bieguny: na rys. 71 przez różnoimienne, na rys. 72 przez jednoimienne dwa bieguny.

§ 58. Wiązki pola magnetycznego.

Dokoła skupionego w punkcie, północnego bieguna N magnesu, gdy sprzężony biegun S znajduje się daleko, tworzy się pole magnetyczne *promieniste*, podobnie jak dokoła elektrycznego punkowego dodatniego ładunku powstaje elektryczne pole pro-



Rys. 73.

mieniste (§§ 18 i 20). Linje promienistego pola są proste i wybiegają jak promienie z bieguna N (rys. 73). Poprowadźmy z punktu N ostry stożek, którego two-

rzącami są linje pola; taki stożek nazywamy *wiązką pola* (wytworzanego przez biegun punktowy). Zbudowawszy dokoła punktu N jako środka powierzchnie kuliste o coraz dłuższych promieniach r , widzimy, że wiązka wycina z tych powierzchni elementy coraz większej rozległości s . Podług §§ 52 i 56-go wartość magnetycznego wektora H w odległości r od bieguna obdarzonego ilością M magnetyzmu wynosi M/r^2 ; otrzymujemy zatem

$$1. \quad Hs = \text{stałe},$$

podobnie jak w § 20-ym. Im szersza jest wiązka w danym miejscu pola, tem ono w tem miejscu jest słabsze; im wiązka jest węższa, tem pole jest silniejsze.

Z bieguna N możemy wyprowadzać liczbę wiązek dowolną; podobnie jak w § 20-ym, umówmy się odtąd, że będziemy z N wyprowadzali $4\pi M$ wiązek, gdzie M jest liczbową wartością M czyli oderwaną liczbą wskazującą, ile jednostek ilości magnetyzmu zawiera się w M . Rozumując dokładnie tak samo jak w § 20-ym, dochodzimy do wniosku następującego: *jeżeli z bie-*

guna N zawierającego dodatnią ilość M magnetyzmu każemy w wyobraźni wybiegać $4\pi M$ wiązkom, wówczas liczba L wiązek, przecinających normalnie 1 cm^2 w danem miejscu pola, wyraża liczbową wartość H panującego tam wektora H

Wyobraźmy sobie dla ilustracji, że z bieguna N wybiegło 108 wiązek pola; biegna one dalej wszystkie przez przecięcia a , b , c (rys. 73) poprowadzone normalnie do promienia r w odległościach 1 cm, 2 cm, 3 cm od N . Przecięcie a ma 1 cm^2 , b ma 4 cm^2 , c ma 9 cm^2 rozległości; zatem przez 1 cm^2 leżący w odległości 1 cm od N przebiega 108 wiązek, przez 1 cm^2 leżący w odległości 2 cm od N przebiega 27 wiązek, przez 1 cm^2 leżący w odległości 3 cm od N przebiega już tylko 12 wiązek. Ponieważ

$$2. \quad 108:27 = 2^2:1 \quad \text{oraz} \quad 108:12 = 3^2:1,$$

widzimy zatem, że, jeżeli w miejscu przecięcia a wartość H wynosi np. 108 gaussów, tedy w miejscu b wynosi 27 gaussów, w miejscu c już tylko 12 gaussów. Liczba L wiązek przebiegających przez 1 cm^2 normalnie wyraża wszędzie wartość liczbową panującego tam wektora H .

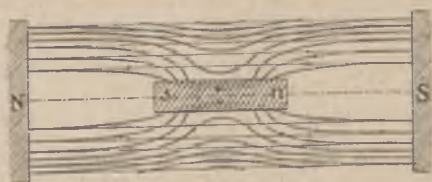
W podobny sposób będziemy starali się uzmysłwić ustrój innych, zawiślejszych pól magnetycznych. *Wiązką pola magnetycznego* nazwiemy wąską rurkę, której pobocznica składa się z linii pola. Będziemy sobie wyobrażali, że z bieguna N wybiega $4\pi M$ wiązek, gdzie M jest liczbową wartością dodatniej ilości M magnetyzmu zawartej w biegunie; do południowego bieguna S , obdarzonego ujemną ilością — M magnetyzmu, wbiega wówczas $4\pi M$ wiązek. Wiązki rozszerzają się poprzecznie w miejscach, w których pole jest słabe; kurczą się, gdzie pole jest silne; liczba wiązek, przecinających normalnie 1 cm^2 , wyraża liczbową wartość panującego w danem miejscu wektora H .

Wyobraźmy sobie pole, w którym wektor H ma wszędzie jednakową wartość i jedna owy kierunek; tak zbudowane pole magnetyczne (podobnie jak analogiczne elektryczne, § 20) nazywamy *jednorodnem*. Linie jednorodnego pola są wszędzie proste, do siebie równoległe; wiązkami pola są walce proste, których osi są równoległe; liczba wiązek, normalnie przebiegających przez 1 cm^2 , jest wszędzie ta sama. Bardzo jest trudno rzeczywiście wytworzyć pole ściśle jednorodne. Przypuśćmy, że zwrócone ku sobie powierzchnie przeciwnych biegunów dwóch magnesów (których pozostałe bieguny są bardzo odległe) znajdują się w nieznacznym od siebie odstępie; środkowa część pola będzie przybliżenie jednorodna. W środkowej części szczupłej przerwy pierścienno magnesu (rys. 67) tworzy się podobnie pole przybliżenie jednorodne.

§ 59 Żelazo w polu magnetycznem.

Wyżarzywszy kawałek żelaza (ażeby pozbawić go śladów przypadkowego magnetyzmu), wprowadzamy go do pola magnetycz-

nego; w żelazie przez indukcję budzi się namagnesowanie. Będąc magnesem, żelazo tworzy teraz w otoczeniu nowe, własne pole, które dodaje się do pierwotnego; powstaje pole wypadkowe,

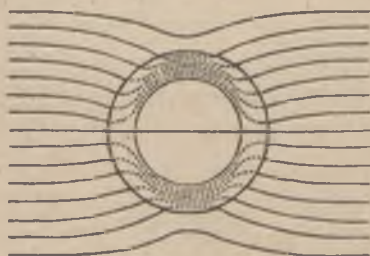


Rys. 74.

ostateczne; zwłaszcza w sąsiedztwie żelaza może ono być zupełnie różne od pierwotnego. Wyobraźmy sobie na przykład, że pole pierwotne SN (rys. 74) było jednorodne; jego linie na rys. 74-ym są wskazane jako

cienkie, proste linie. Do

pola SN wprowadzamy prostopadłościenną sztabkę żelazną ns ; krzywe grube na rys. 74-ym wyrażają przebieg linii zmienionego czyli wypadkowego pola. Na rys. 75-ym widzimy podobnie przebieg linii pola, które pierwotnie było jednorodne, zostało zaś



Rys. 75.

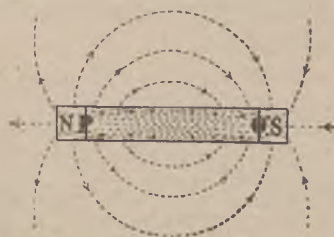
zakłócone przez wniesienie żelaznego pierścienia. Widzimy, iż żelazo zachowuje się tak, jak gdyby pociągało ku sobie linie pierwotnego pola; dlatego w jednych zakresach pola linie gęstnieją, w innych rzadną; w pierwszych pole wzmacnia się zatem, w drugich słabnie; w okolicy na przykład otoczonej przez pierścień pole znika niemal zupełnie.

Grubościenne naczynie żelazne ośłania podobnie swe wnętrze przed każdym polem magnetycznym zewnętrznym.

Mówiliśmy dotychczas, iż linie wychodzą z północnego bieguna magnesu, wchodzą zaś do południowego; mówiliśmy więc tylko o przebiegu linii przez powietrze lub próżnię. Za przykładem Faradaya i Maxwella prowadzimy linie również i w łonie żelaza, przedłużając te, które biegną w powietrzu lub próżni; linjom w żelazie idącym nadajemy zatem kierunek od południowego, przez indukcję wzbudzonego bieguna do (podobnie wytworzonego) północnego. Tak prowadzone, na rys. 74 i 75 kropkowane linie skupiają się w żelazie i, jak widzimy, stłaczają się ciasno.

Namagnesowanie trwałego (np. stalowego) magaesu nie różni się niczem istotnem od wzbudzonego (np. w miękkim żelazie)

przez indukcję; możemy wyobrazić sobie, iż namagnesowanie trwałego magnesu jest pozostałością, którą on zachował, gdy oddalono pole magnesujące. Do pola i do wnętrza trwałego magnesu możemy więc zastosować sposób prowadzenia linii i wiązek, którym przed chwilą posługiwaliśmy się, rozważając zachowanie się żelaza namagnesowanego przez indukcję. Wyobraźmy sobie magnes trwały NS (rys. 76); linie otaczającego go pola wychodzą z północnego bieguna i zmierzają, biegnąc w powietrzu, ku południowemu; prowadzimy je dalej wewnątrz magnesu, tak iż kierują się w nim od południowego do północnego bieguna. Odosobnijmy w myśli niewielką część NP magnesu, przylegającą do N ; gdybyśmy oddzielili tę część NP od reszty PS , byłaby ona sama przez się całkowitym magnesem; linie, które z niej wyszły, musiałyby do niej powrócić. Z zewnętrznej powierzchni części NP (z tej, która graniczy z powietrzem) linie wybiegają nazewnątrz; przez płaszczyznę P wewnętrznego przecięcia (zatem w żelazie) linie wracają do NP , zmierzając ku N . Podobnie rozumiemy, rozważając część QS , przylegającą do południowego bieguna.



Rys. 76.

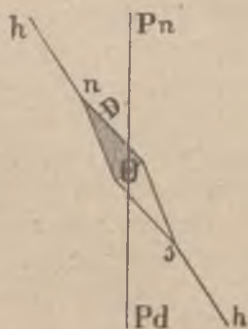
§ 60. Pole magnetyczne ziemskie.

W §§ 48 i 51-ym wspomnieliśmy już o tem pokrótce, że kula ziemska jest magnesem; powiedzieliśmy, że mieszkamy w pewnem polu magnetycznem, stosunkowo dość słabem, stworzonym przez samą przyrodę. Choć w najogólniejszym zarysie, poznajmy budowę tego t. zw. *ziemskiego* pola magnetycznego.

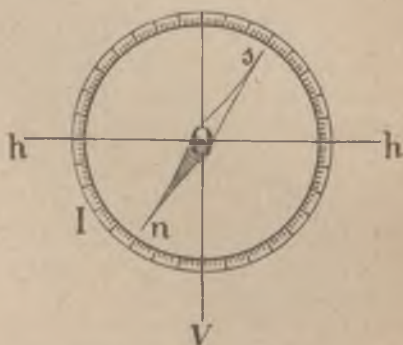
Przypuśćmy, iż igła magnesowa ns może poruszać się tylko w płaszczyźnie *poziomej*, dokoła osi nieruchomej pionowej; w tej jednak poziomej płaszczyźnie może poruszać się zupełnie swobodnie. Taką igłę magnesową nazywamy *deklinacyjną*. Gdy igła jest w równowadze, oś jej sn ustanawia się w płaszczyźnie tworzącej pewien kąt z płaszczyzną geograficznego południka. Niechaj płaszczyzna rys. 77-go wyobraża płaszczyznę poziomą; prosta $Pd-Pn$ niechaj będzie przecięciem płaszczyzny poziomej z płaszczyzną południka geograficznego; $O-Pn$ idzie na północ,

O-Pd na południe. Płaszczyzna *hh* poprowadzona przez *sn* prostopadle do płaszczyzny poziomej, nazywa się *magnetycznym południkiem*; ostry kąt dwuścienny, zawarty między płaszczyznami geograficznego i magnetycznego południka, nazywa się *deklinacją* $\mathcal{D}$ lub *magnetycznem zboczeniem*. Biegun północny igły deklinacyjnej zbacza obecnie w Polsce przybliżenie o 5° ku zachodowi.

Wyobraźmy sobie doświadczenie odmiennie. Igłę magnesową *ns* umieszczamy na osi nieruchomej *poziomej*, przechodzącej przez środek ciężkości igły a zarazem prostopadłej do płaszczyzny magnetycznego południka; igła może zatem poruszać się tylko w płaszczyźnie tego południka, ale w niej poruszać się może zupełnie swobodnie. Taką igłę nazywamy *inklinacyjną*. Niechaj



Rys. 77.



Rys. 78.

płaszczyzna rys. 78-go wyobraża płaszczyznę południka magnetycznego; *OV* niechaj będzie w niej kierunkiem pionowym ku dołowi idącym, *hOh* niechaj będzie kierunkiem poziomym czyli przecięciem płaszczyzny magnetycznego południka z płaszczyzną poziomą. Gdybyśmy spółcześnie w Polsce ustawili taką igłę inklinacyjną, przekonalibyśmy się, że ona jest w równowadze, gdy biegun *n* wskazuje pod poziom prostą *hh*. Ostry kąt *hOn*, zawarty między kierunkiem osi *sn* a najbliższym kierunkiem *Oh*, nazywamy *inklinacją* $\mathcal{I}$ lub *magnetycznem nachyleniem*; wynosi on obecnie w Polsce około 66° .

Dwa kąty, których określenia poznaliśmy, deklinacja $\mathcal{D}$ oraz inklinacja $\mathcal{I}$, wyznaczają kierunek, który, w danym miejscu powierzchni ziemi, przybiera oś igły znajdującej się w równowadze. Jak z § 56-go wiadomo, w każdym miejscu pola magnetycznego

oś małej igielki ustanawia się w kierunku wektora H pola; kąty ϑ oraz $\mathcal{I}$ wyznaczają zatem kierunek wektora H pola panującego w danym miejscu powierzchni ziemi. Ażeby w pełni poznać ów wektor, powinniśmy nadto jeszcze wiedzieć, jaka jest jego wartość lub jaka jest wartość jednej z pomiędzy jego składowych; praktycznie najważniejsza jest składowa pozioma h wektora H :

$$1. \quad h = H \cos \vartheta$$

czyli t. zw. *składowa pozioma natężenia magnetyzmu ziemskiego* w danym miejscu; wynosi ona obecnie w Polsce około 0 19 gaussa. Wielkości ϑ , $\mathcal{I}$ oraz h nazywamy zazwyczaj *elementami magnetycznymi* miejsca wybranego na powierzchni ziemi.

Rys. 79 streszcza, co powiedzieliśmy; oto objaśnienie użytych w nim oznaczeń:

O miejsce spostrzeżeń na powierzchni ziemi

$OPhZ$ płaszczyzna pozioma w O

OV kierunek pionowy ku dołowi

$OVpP$ płaszczyzna południka geograficznego

OP ku północy, OZ ku zachodowi

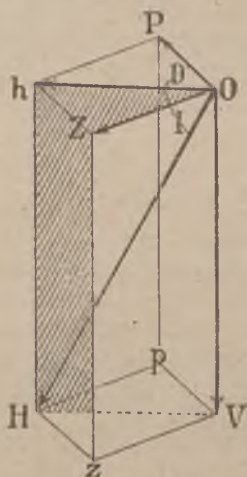
$OVHh$ płaszczyzna południka magnetycznego

OH wektor magnetyczny całkowity H

Oh składowa pozioma nat. magn. ziemskiego

ϑ deklinacja (zboczenie magnetyczne)

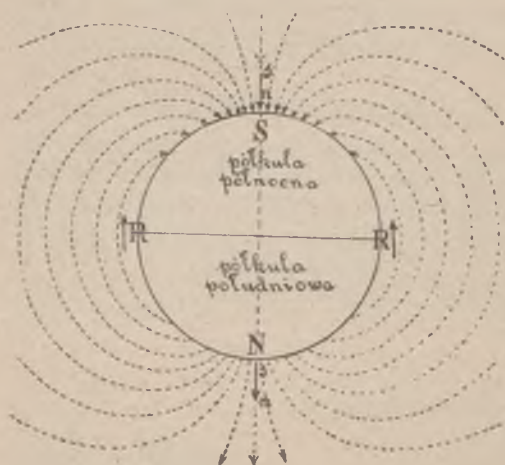
$\mathcal{I}$ inklinacja (nachylenie magnetyczne)



Rys. 79.

Pole ziemskie magnetyczne zaczęto badać dokładniej dopiero w drugiej połowie XIX-go stulecia; obecnie badanie to jest prowadzone z usilnością i skrzętnością największą. Ucywilizowane narody utworzyły dziś zasobne obserwatoria magnetyczne; w Polsce mamy dotychczas tylko skromną stację w Świdrze pod Warszawą. Liczne lądowe i morskie wyprawy magnetyczne (np. podróże okrętu Gauss Instytucji Carnegie w Waszyngtonie) uzupełniają pracę zakładów stałych. Do jakich wyników doprowadziły te spostrzeżenia?

Zgrubsza przybliżone (acz nader niedokładne) wyobrażenie o budowie magnetycznego pola, otaczającego kulę ziemską, możemy powziąć z rys. 80-go. Widzimy tu linje pola, które



Rys. 80.

wybiegają z powierzchni półkuli magnetycznej południowej i wbiegają do powierzchni półkuli magnetycznej północnej. Jak wiemy, w każdym miejscu pola igła magnesowa kręcąc się swobodnie ustawiałaby się stycznie do linii przebiegającej przez dane miejsce; oś *sn* igły byłaby zwrócona w kierunku wskazanym na rycinie przez strzałki. Igła ustawia się zatem pionowo w sąsiedztwie

punktów *S* (w półkuli północnej) oraz *N* (w południowej); biegun *n* igły wskazuje w *S* ku dołowi, w *N* ku górze. Punkty te *S* i *N* nazywają się *magnetycznymi biegunami ziemi*. W biegunach magnetycznych mamy

$$2. \quad \mathcal{I} = 90^\circ; \quad h = 0.$$

Na linii *RR* tak zwanego *magnetycznego równika* swobodnie kręcąc się igła magnesowa ustawia się *poziomo*; we wszystkich punktach takiej linii mielibyśmy

$$3. \quad \mathcal{I} = 0^\circ; \quad h = H.$$

Wyprawy podbiegunowe dotarły kilkakrotnie do magnetycznych biegunów ziemi. Według Sir James Rossa biegun *S* leżał w r. 1831 wewnątrz wyspy Boothia Felix, należącej do Dominium Kanady, na północ od lądu stałego Ameryki Północnej. Kapitan Amundsen znalazł go w r. 1905 nieco dalej na zachód, pod $70^\circ 5'$ szer. półn., $96^\circ 46'$ dług. zach. Biegun *N* ziemi, odkryty w r. 1909 przez wyprawę angielską Shackletona, znajduje się pod $72^\circ 25'$ szer. półn., 154° dług. wsch. Położenie magnetycznych biegunów może być do pewnego stopnia przypadkowe, może zależeć np. od natury sąsiednich części skorupy ziemskiej; ważniejsze jest położenie idealnej *osi magnetycznej* naszej planety, wynikające z ogółu jej magnetycznych własności.

Jak powiedzieliśmy, pole magnetyczne ziemskie nie jest bynajmniej tak proste, jak wynikałoby z rys. 80-go. Linje pola nie są płaskimi krzywymi; południki magnetyczne wiją się nieregularnie po powierzchni ziemi. Linje krzywe wska-

zujące w każdym miejscu powierzchni ziemi kierunek jej przecięcia z miejscowym południkiem magnetycznym (t. zw. linje *Duperraya*) biegną od jednego magnetycznego bieguna do drugiego, przecinając się najrozmaiciej z geograficznymi południkami.

W danym miejscu powierzchni ziemi elementy magnetyczne nie zachowują stałych wartości; całe pole zmienia się nieustannie. Jedne zmiany elementów, t. zw. *wiekowe*, odbywają się powoli lecz trwale i po dłuższych okresach czasu dochodzą do znacznych wartości; inne zmiany dokonywają się *perjodycznie*, powtarzają się zatem i znowu znikają w rozmaitych, krótkich i długich okresach; niekiedy wydarzają się także skoki nagłe, niespodziewane, które nazywamy *magnetycznymi zaburzeniami*.

W wielkim trudzie, z wytrwałym zapałem badają uczeni zjawiska magnetyzmu ziemskiego; dlaczego to czynią? Słabe pole magnetyczne ziemskie odegrało istotną rolę w dziejach rasy ludzkiej. Kierując się wskazówkami busoli, mieszkańcy zachodniej Europy odważyli się wypłynąć na oceany, co ich doprowadziło do poznania i opanowania niemal całej powierzchni ziemi. Ale nie tylko w morskiej żegludze; igła magnesowa ma również zastosowanie w górnictwie, w lotnictwie. Jakkolwiek jednak doniosłe są praktyczne korzyści nauki, nie one są istotnym jej celem i prawdziwą jej troską. Magnetyzm, zwany ziemskim, *nie* jest wyłącznie ziemskim zjawiskiem; jest również objawem węzłów i związków, dziś jeszcze niedosyć jasnych, które ziemię naszą łączą ze słońcem i z innymi okrucami wszechświata.

Zadania.

1. Magnes umieszczamy na korku, korek na powierzchni wody. Czy korek popłynie na północ lub na południe? jak zachowa się?
2. Gdy ważymy kawałek żelaza, czy powinniśmy obawiać się wówczas, ażeby wpływ magnetyzmu ziemi nie wywołał błędu w pomiarze?
3. Dwie igiełki stalowe wiszą obok siebie, uczepione oczkami na nici; jak zachowują się, gdy zbliżymy ku nim silny magnes od dołu?
4. Biegun *N* silnego magnesu zbliża się z wielkiej odległości do bieguna *n* igły słabo namagnesowanej; co dostrzegamy?
5. Nie wiedząc, czy igła jest namagnesowana, badamy ją magnesem; czy możemy odpowiedzieć, że jest, gdy zauważymy odpychanie?
6. Dwa magnesy linjowe jednakowej długości, jednostajnie i jednakowo namagnesowane, ustawiamy w jednej prostej, zawsze w tej samej od siebie odległości; raz zwracamy ku sobie jednoimienne, drugi raz różnoimienne bieguny. Czy odpychanie w pierwszym położeniu jest równe przyciąganiu w drugim?
7. W polu linjowego, jednostajnie namagnesowanego magnesu *NS* znajduje się krótki, linjowy, jednostajnie (lecz słabo) namagnesowany magnes *ns*; w dowolnie wybranej skali narysować wypadkowe siły działające na bieguny *N, S, n, s*.
8. Po wielu próbach udało nam się sporządzić magnes, którego każdy biegun zawiera 1 magn.-stat. jednostkę ilości magnetyzmu. Chcemy znaleźć ilość magnetyzmu w dowolnym innym magnetycznym biegunie. Gdy wzajemna odległość badanego i jednostkowego bieguna wynosi 1 cm, siły między nimi czynne wynoszą 3 dyny; jaka jest ilość magnetyzmu w badanym biegunie? Oddalamy ten biegun do 2 cm; jaka działa nań siła?

9. Ilość magnetyzmu w biegunie N wynosi 27 magn.-stat. jedn.; znaleźć wartość i kierunek wektora H pola wytwarzanego przez N w odległości 3 cm, jeżeli biegun S jest bardzo odległy. Porównać wartość znalezioną z wartością składowej poziomej natężenia magnetyzmu ziemskiego w Polsce.

10. Drut sporządzony z miękkiego żelaza i wyżarzony następnie umieszczamy w kierunku linii pola magnetycznego ziemskiego; jakiego skutku możemy oczekiwać?

11. Ilość magnetyzmu biegunów N i S linowego magnesu, długości 10 cm, wynosi $+10$ i -10 magn.-stat. jednostek. Jakie pole panuje w punktach P , Q leżących w przedłużeniu osi SN , w odległości 20 cm od biegunów?

12. Za oś magnetyczną ziemi uważamy prostą, łączącą magnetyczne bieguny; czy oś ta przechodzi przez środek kuli ziemskiej?

13. Czy możemy obliczyć składowe Oh , OP , OZ , OV (rys. 79), znając wartość H oraz kąty ϑ i φ ? Znając OP , OZ , OV , jak obliczyć H ? Znając Oh i ϑ , jak obliczyć OV ?

14. Podróżnik posuwa się po powierzchni kuli ziemskiej, idąc wciąż w kierunku wskazywanym przez oś deklinacyjnej igiełki; po jakiej linii odbywa się podróż? dokąd zaprowadzi? Dokąd zaszedłby podróżnik, który zwracałby się zawsze przeciwnie do kierunku wskazywanego przez oś deklinacyjnej igiełki?

15. Punkty środkowe dwóch identycznych magnesów linowych złączono ze sobą, skrzyżowawszy osi magnesów pod kątem prostym. Jeżeli umieścimy ten układ na osi pionowej, przechodzącej przez wspólny środek magnesów, jakie przybierze on położenie w polu magnetycznym ziemskim?

16. Łódź podwodna, zbudowana ze stali, jest (w głębi wód) ze wszystkich stron całkowicie zamknięta; czy we wnętrzu takiej łodzi możemy w zwykły sposób korzystać ze wskazówek żeglarskiego kompasu?

ROZDZIAŁ CZWARTY.

Pole magnetyczne prądu.

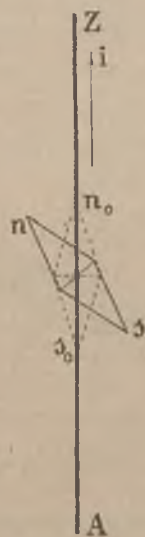
§ 61. Odkrycie Oersteda.

Już w końcu XVIII-go stulecia zaczęto przypuszczać, że między elektrycznymi a magnetycznymi zjawiskami istnieje jakowaś łączność i spójnia; ale poszukiwano jej tam, gdzie (jak dziś wiemy) nie istnieje. Spoczywający przewodnik, na którym elektryczny ładunek znajduje się w równowadze, nie tworzy w otoczeniu pola magnetycznego. Zjawiska elektrostatyczne z magnetoostatycznymi *nie* mają związku.

Do swobodnie kręcącej się magnesowej igielki ns zbliżamy przewodnik C silnie naelektryzowany. Ładunek elektryczny ciała C budzi indukowane ładunki w stalowej igielce, dlatego pomiędzy C a ns możemy zauważyć działanie pewnych sił; ale przekonywamy się łatwo, że są to siły elektrostatyczne. Duża zasłona, wyrobiona z cynku, glinu lub miedzi, przecina wszelkie pomiędzy C a ns oddziaływania; wstawiona pomiędzy igielkę ns a magnes NS , nie zakłóca wcale sił czynnych pomiędzy magnetycznymi temi układami.

Bliski natomiast związek istnieje pomiędzy magnetyzmem a zjawiskiem prądu elektrycznego: *prąd elektryczny tworzy pole magnetyczne w całym swym otoczeniu*. Odkrycia tego faktu, doniosłości niezmiernej, dokonał w r. 1820 H. Chr. Oersted w Kopenhadze.

Wyobraźmy sobie igielkę magnesową deklinacyjną; gdy oś igielki przypada w płaszczyźnie miejscowego południka magnetycznego, nie dąży ona, jak wiadomo, do wyjścia z tej płaszczyzny. Przypuśćmy, że *ponad* igielką, w tejże płaszczyźnie magnetycznego południka, biegnie poziomo długi, prosty drut metalowy, przez który przepuszczamy prąd elektryczny; skoro połączenia zostały skutecznie, igielka wychyla się z płaszczyzny magnetycznego



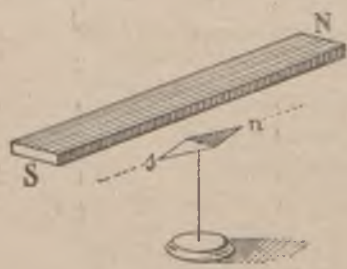
Rys. 81.

południka. Przypuśćmy, że płaszczyzna rys. 81-go jest pozioma; AZ jest leżącym w niej drutem, w którym w kierunku od A do Z płynie prąd elektryczny; płaszczyzna południka magnetycznego jest pionowa i przecina się wzdłuż prostej AZ z płaszczyzną poziomą. Dopóki w drucie AZ nie ma jeszcze prądu, oś igielki magnesowej zajmuje położenie $s_0 n_0$; gdy prąd płynie, igielka wykręca się, jej oś przybiera położenie sn ; gdy patrzymy z góry, wydaje nam się, że biegun n odchylił się w lewo, biegun s w prawo. Oś igielki w położeniu sn wskazuje kierunek wektora panującego pola; lecz pole to składa się oczywiście z dwóch pól: (I) z pola magnetycznego ziemskiego (II) z pola magnetycznego, tworzonego przez prąd elektryczny. To drugie pole będziemy nieraz nazywali *elektromagnetycznem polem*.

Powtórzmy opisanе doświadczenie, zmieniając jego układ w jednym tylko względzie: przypuśćmy, że drut AZ leży *pod* igielką ns zamiast, jak poprzednio, nad nią. Gdy prąd płynie (od A do Z jak poprzednio), biegun n odchylił się w prawo, biegun s w lewo, wprost przeciwnie niż w doświadczeniu poprzednim.

§ 62. Magnetyczne pole towarzyszące prostoliniowemu prądowi.

Pole magnetyczne ziemskie było nam tylko przeszkodą w badaniu sił, wywieranych na magnesy przez prąd elektryczny; dodając się do pola elektromagnetycznego, zasłaniało przed nami jego prostą i niezmiernie piękną budowę. Spróbujmy zrównoważyć wpływ pola ziemskiego przy pomocy t. zw. *kierowniczego* magnesu.



Rys. 82.

Przypuśćmy, że pod wpływem pola ziemskiego igła magnesowa przybrała położenie ns w płaszczyźnie południka magnetycznego (rys. 82). Do igły zbliżamy silny magnes, którego oś SN umieszczamy również w płaszczyźnie południka magnetycznego, równoległe do osi sn . Działanie kierowniczego magnesu SN sprzeciwia się wpły-

wowi pola ziemskiego: zdala go osłabia, zbliża go zwycięża, zmuszając igłę do wykręcenia się o 180° . Znajdujemy łatwo położenie magnesu, w którym jego działanie na igielkę znosi

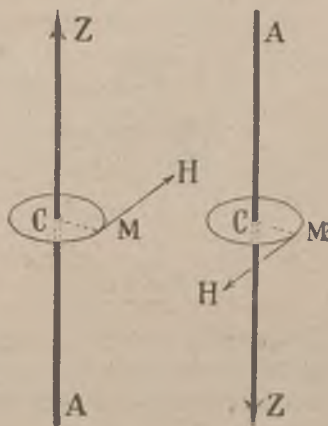
wpływ pola ziemskiego. Powtarzając doświadczenie Oersteda przy pomocy igielki, którą (wiadomym teraz sposobem) wyjęliśmy z pod wpływu pola ziemskiego, przekonywamy się, że w położeniu równowagi oś sn igielki ustanawia się *prostopadle* do kierunku prądu AZ .

Sprawdźmy, czy wniosek ten stosuje się ogólnie. Ustawiamy pionowo drut AZ , w którym prąd elektryczny płynie w kierunku od A do Z ; w sąsiedztwie umieszczamy magnesową igielkę ns ruchomą w płaszczyźnie poziomej (rys. 83). Usunąwszy igielkę z pod wpływu pola ziemskiego, spostrzegamy, że oś igły ustanawia się wszędzie *prostopadle* do kierunku prądu. Przypuśćmy, że, jak na rys. 84-ym, prąd w AZ płynie pionowo do góry; chcemy poznać kierunek wektora H pola elektromagnetycznego w miejscu M . Z punktu M prowadzimy prostą MC *prostopadłą* do AZ ; promieniem CM , w płaszczyźnie *prostopadłej* do AZ , zataczamy obwód koła; wektor H magnetycznego pola tworzonego w M przez prąd AZ jest umiejscowiony w stycznej MH poprowadzonej w M do obwodu koła. Koło zbudowane promieniem CM w płaszczyźnie *prostopadłej* do AZ jest zatem *linią pola* elektromagnetycznego, przechodzącą przez punkt M . *Linie pola magnetycznego towarzyszące prostoliniowemu prądowi są kołowe*.

Znamy już umiejscowienie wektora H ; w którą stronę stycznej jest on zwrócony? Odwróćmy kierunek prądu w drucie AZ ; przypuśćmy, że prąd płynie pionowo ku dołowi (rys. 85). Oś sn igły ustanawia się znów *prostopadle* do kierunku prądu ale zwraca się w kierunku przeciwnym poprzedniemu kierunkowi; kierunek wektora H odwraca się zatem, gdy prąd się odwraca. Wypowiadamy teraz twierdzenie, które obejmuje wszystkie przypadki. Wyobraźmy sobie obserwatora tak umieszczonego, iż prąd elektryczny płynie przez niego, od stóp ku głowie; spo-



Rys. 83.

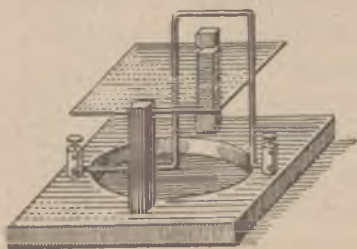


Rys. 84.

Rys. 85.

glądając na punkt M (ryss. 84 i 85), obserwator dostrzega, iż *obrót wskazywany przez wektor H odbywa się w kierunku przeciwnym kierunkowi ruchu wskazówek na tarczy zegara*. Prawidło to, zwane *regulą Ampère'a*, rozstrzyga o kierunku wektora pola elektromagnetycznego w uważanym przypadku.

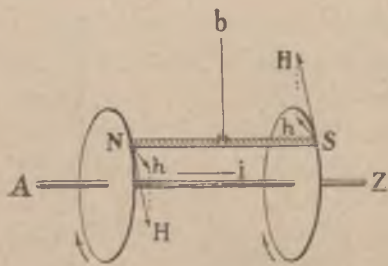
Przez środek cienkiej szyby szklanej (lub karty tektury) przechodzi drut metalowy (rys. 86), w którym płynie dość silny prąd elektryczny; szyba jest



Rys. 86.

posypana jednostajnie pyłem drobnych żelaznych opiłek. Lekko wstrząsając szybą, otrzymujemy *widmo* pola elektromagnetycznego, podobnie jak w rozdz. III-im wytwarzaliśmy widma pól magnetycznych statycznych. Na tak otrzymanych widmach występuje wyraźnie kołowa postać linii pola magnetycznego, towarzyszącego prostoliniowemu prądowi. Owa kołowa postać linii pola zasługuje na szczególną uwagę; wynika z niej jasno, że prąd nie przyciąga wprost ku sobie magnetycznych biegunów ani ich od siebie wprost

nie odpycha; prąd usiłuje zmusić bieguny do ruchu po orbitach kołowych, do własnego swego kierunku poprzecznych; biegun północny w kierunku wektora H , biegun południowy w przeciwnym. Po raz pierwszy spotykamy się z takim *wykręcającym* działaniem. Elektromagnetyczne siły, jak widzimy, różnią się istotnie od powszechnego ciężenia, od elektrostatycznych i magnetostatycznych



Rys. 87.

sił, które sprowadzają się wszystkie do przyciągań lub odpychań umiejscowionych w liniach prostych: od masy do masy, od ładunku do ładunku, od bieguna do bieguna.

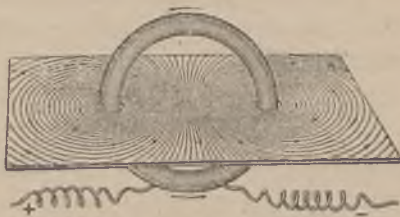
Powróćmy jeszcze raz do doświadczenia Oersteda. Przypuśćmy, że prąd płynie poziomo w drucie AZ (rys. 87), w kierunku od A do Z . Magnes NS umieszczony w pobliżu, również poziomo, na pionowej osi ab , doznaje sił H , H od prądu AZ ; poziome składowe h , h tych

sił tworzą parę sił, która skłania magnes NS do obrotu dokoła osi ab ; por. §§ 88 i 97 tomu I-go. Zdajemy sobie teraz sprawę z mechanizmu doświadczenia Oersteda i możemy łatwo rozważyć jego rozmaite przypadki.

§ 63. Magnetyczne pole towarzyszące kołowemu prądowi.

Przypuszczaliśmy w artykule poprzednim, że prąd, który sprawia pole magnetyczne, płynie w drucie bardzo długim i prostym. Przypatrzmy się teraz innemu przypadkowi. Przypuśćmy, że prąd

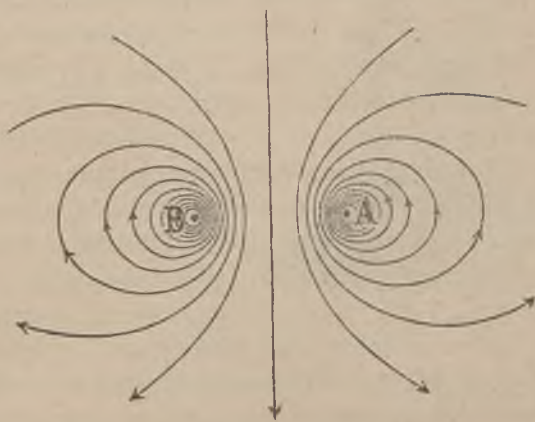
płynie w drucie mającym postać obwodu koła; zbadajmy pole, które tworzy się w środku koła. Posługujemy się znowu prostym sposobem widm magnetycznych. Prostopadle do szyby lub karty papieru umieszczamy kołowy obwód prądu (rys. 88); połowa obwodu znajduje się pod szybą, druga połowa nad nią. Z widma, które otrzymujemy, wnosimy o postaci linii elektromagnetycz-



Rys. 88.

nego pola (rys. 89). Tuż koło obwodu linie są niemal kołowe; nieco odleglejsze linie okrążają jeszcze prąd w krzywych zamkniętych ale już nie są kołami. W każdym miejscu pola wektor H jest styczny do przebiegającej przez to miejsce linii pola. Umieszczając w polu igiełkę magnesową deklinacyjną, przekonywamy się, w którą stronę stycznej kieruje się wektor H . Przypuśćmy, że w punkcie A (rys. 89)

prąd płynie *do góry* (z pod poziomej płaszczyzny rysunku ponad nią); że przeciwnie w punkcie B płynie *ku dołowi* (z ponad płaszczyzny rysunku pod nią); strzałki rys. 89 go wskazują, jak wówczas skierowany jest w różnych miejscach wektor H . Wyobrażając sobie obserwatora, bądź w A



Rys. 89.

(stopy pod płaszczyzną rysunku, głowa nad nią) bądź w B (wprost przeciwnie), spostrzegamy, że *kierunek wektora H zgadza się wszędzie z regułą Ampère'a*. W okolicy środka obwodu prądu linie wyprostowują się; pole zbliża się tam do pola jednorodnego; linie pola w tym miejscu stają się prostopadłe do płaszczyzny obwodu; skierowanie wektora H wynika tu oczywiście z jego skierowania w liniach sąsiednich. *Ośią* kołowego obwodu nazwijmy linię prostą poprowadzoną przez jego środek, prosto-

§ 64. Związek pomiędzy elektrycznymi i magnetycznymi pojęciami.

W rozdz. II-gim poznaliśmy pojęcie *natężenia* prądu elektrycznego; widzieliśmy, że możemy mierzyć wartość tego natężenia. Wyobraźmy sobie obwód kołowy i przypuśćmy, że przesyłamy przezeń prądy różnych znanych nam natężeń; badając pola magnetyczne, które tworzą się w środku obwodu, przekonywamy się o słuszności następującego ważnego twierdzenia: w środku danego (zawsze jednakowego) obwodu wartość stycznej kąta odchylenia igły magnesowej, t. j. $\tan \theta$, jest proporcjonalna do natężenia i prądu płynącego w obwodzie; *wartość wektora H pola magnetycznego panującego w środku obwodu jest zatem również proporcjonalna do natężenia prądu.*

Wyobraźmy sobie zwój, złożony z n jednakowych, kołowych, niezmiernie siebie bliskich obwodów, w których prąd płynie w tym samym (zgodnym) kierunku (rys. 91); taki zwój nazwiemy n -krotnym obwodem prądu elektrycznego. Z dwóch, w każdym względzie identycznych drutów, wyginając je rozmaicie, sporządzimy dwa obwody kołowe; całkowita przewodząca droga prądu, złożona z obwodu i doprowadzających drutów, jest zatem w obu razach ta sama. Pierwszy obwód (O_1) ma być jednokrotny, drugi (O_n) n -krotny; ich promienie mają być jednakowe. Gdy prąd, który pochodzi z tego samego stałego źródła, płynie przez przewodniki identyczne, musi mieć w obu razach jednakowe natężenie; natężenie i prądu w obwodach O_1 i O_n jest zatem jednakowe. Zbadawszy pole magnetyczne w środku obwodów, przekonywamy się, że wektor H w środku O_n ma wartość n razy większą niż wektor H w środku O_1 . Mogliśmy oczekiwać takiego wyniku; z § 34-go wnosimy istotnie, że wiązka n równoległych, tuż obok siebie płynących, identycznych prądów, z których każdy ma natężenie i , jest równoważna jednemu takiemu prądowi o natężeniu ni .

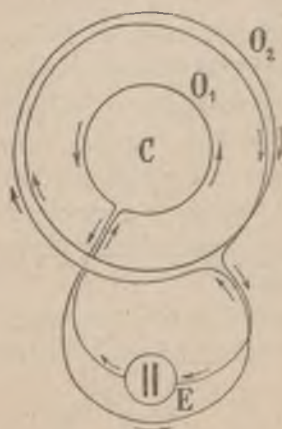
Zbierając dotychczasowe wyniki, powiadamy: wektor H pola elektromagnetycznego, tworzącego się w środku n -krotnego kołowego obwodu, gdy w obwodzie tym płynie prąd o natężeniu i ,



Rys. 91.

jest proporcjonalny do n oraz do i ; innymi słowy, jest proporcjonalny do iloczynu ni .

Zapytujemy jeszcze: czy wektor H nie zależy również od promienia obwodu? gdy promień ten wzrasta, wektor H musi się zmniejszać. Uciekamy się do próby następującej. W płaszczyźnie południka magnetycznego umieszczamy dwa współśrodkowe obwody (rys. 92): jednokrotny O_1 i dwukrotny O_2 ; promień dwukrotnego obwodu ma być dwa razy dłuższy niż promień jednokrotnego; przez obadwa obwody O_1 i O_2 , jak widzimy z rysunku, płynie ten sam prąd, pochodzący z ogniwa lub baterji E , ale opływa je w kierunkach przeciwnych. Igiełka deklinacyjna, umieszczona we wspólnym środku C obwodów, nie wychyla się z ich płaszczyzny; wnosimy zatem, że obwód O_2 działa na igłę równie silnie jak O_1 lecz w przeciwnym



Rys. 92.

kierunku. Wektor H pola, które panuje w środku kołowego obwodu zatoczonego promieniem r , jest więc odwrotnie proporcjonalny do długości promienia r .

Oznaczając przez A współczynnik proporcjonalności, niezależny od n , i , r , powiadamy ostatecznie: *wektor H pola magnetycznego panującego w środku n -krotnego kołowego obwodu o promieniu r , gdy w obwodzie tym płynie prąd o natężeniu i , jest*

$$1. \quad H = A \frac{ni}{r}.$$

Zatrzymajmy się na chwilę nad tem twierdzeniem. Pojęcie natężenia i zależy, jak wiemy, od pojęcia ładunku elektrycznego (§ 34), fundamentalnego w elektrostatyce. Pojęcie magnetycznego wektora H jest jednym z najważniejszych pojęć magnetycznych i z innymi magnetycznymi wiąże się ściśle (§ 56). Po raz pierwszy w naszym wykładzie, równanie (1) ustanawia więc *związek pomiędzy elektrycznymi a magnetycznymi pojęciami*. Dwie wielkie dziedziny zjawisk spotykają się tutaj; pamiętne odkrycia, które je splotły i zespoliły nazawsze, zawdzięczamy genjuszowi Andrzeja Marjana Ampère'a (1775—1836). Nauki o elektrycznych i o magnetycznych zjawiskach, które przed nim niezależnie

istniały, utworzyły odtąd całość wspólną, utworzyły jedną naukę; ta uogólniona wiedza *zjawisk elektromagnetycznych* zasadza się na głębokich prawdach, których szczególnym przypadkiem jest równanie (1).

§ 65. Układ jednostek elektromagnetycznych.

W równaniu (1) poprzedniego artykułu A jest wielkością stałą, niezależną od n , i , r lub od H ; wartość tej stałej zależy tylko od wyboru jednostek, w których wyrażamy zmienne i , r oraz H . Wartość promienia r wyrażamy w centymetrach, wartość H wyrażamy w gaussach; stosując się do zasad, które podaliśmy w § 36-ym, powinniśmy mierzyć natężenie i elektrostatycznymi jednostkami natężenia prądu. Tą drogą jednakże nie poszły umowy międzynarodowe. Elektrostatyka, jak wiemy, pozostała na uboczu nowoczesnego rozwoju elektrotechniki; ponieważ już rozumiemy, niebawem lepiej jeszcze zrozumiemy przyczyny tego zjawiska. Z odosobnienia elektrostatyki, z praktycznej bezsilności elektrostatycznego układu jednostek wynikło, że obok niego rozwinął się układ inny, *elektromagnetyczny*, napozór niezależny od niego. Ażeby poznać zasady elektromagnetycznego układu jednostek, przypuśćmy, że nie wybraliśmy dotychczas jednostki natężenia prądu; możemy wówczas rozporządzać wartością stałej A w równaniu (1) § 64-go. Założmy, że rozważamy pole jednokrotnego obwodu prądu; mamy więc $n = 1$. Umówmy się, że wielkość A ma być oderwaną (niemianowaną) liczbą i że jej wartość w (1) § 64-go ma wynosić 2π ; jednostkę natężenia prądu, która z takiej umowy wyniknie, nazwiemy *elektromagnetyczną jednostką* natężenia. Piszemy wówczas, zamiast (1) § 64-go, co następuje:

$$1. \quad H = \frac{2\pi i}{r}.$$

Gdy $r = 1$ cm, obwód ma 2π cm długości; płynąc w takim obwodzie, prąd o natężeniu 1 elektromagnetycznej jednostki wytwarza w środku obwodu pole 2π gaussów, zatem 1 gauss na każdy centymetr długości obwodu.

Z elektromagnetycznej jednostki natężenia prądu łatwo wyprowadzamy inne jednostki elektromagnetycznego układu. Przypuśćmy, że w pewnym drucie płynie prąd trwały; podług § 34-go, ładunek, przeniesiony w dowolnym okresie czasu przez które-

kolwiek w drucie przecięcie, jest równy iloczynowi natężenia prądu przez długość uważanego okresu. Gdy zatem w drucie płynie prąd trwały o natężeniu 1 elektromagnetycznej jednostki natężenia, przenosi w czasie 1 sekundy 1 elektromagnetyczną jednostkę ładunku przez którekolwiek poprzeczne przecięcie. Elektromagnetyczną jednostkę ładunku możemy zatem określić zapomocą założenia:

2. el.-magn. jedn. ładunku = 1 el.-magn. jedn. nat. prądu $\times$ 1 sek.

Przypuśćmy, że na powierzchni pewnego przewodnika ładunek elektryczny dodatni znajduje się w równowadze; z tej powierzchni pozwalamy spłynąć do ziemi 1 elektromagnetycznej jednostce ładunku. Jeżeli w czasie takiego przeniesienia pole elektryczne wykonywa pracę 1 erga, powiadamy, że potencjał przewodnika względem ziemi wynosi + 1 elektromagnetyczną jednostkę potencjału. Według § 23-go możemy wyrazić się krótko:

3. el.-magn. jedn. potencjału = $\frac{1 \text{ erg}}{1 \text{ el.-magn. jedn. ładunku}}$.

Jeżeli źródło pracy lub energii dostarcza 1 erga w czasie 1 sekundy, powiadamy, iż pracuje ono z dzielnością równą jednostce dzielności (§ 72 tomu I-go). W elektromagnetycznym układzie jednostka dzielności, według wzorów (2) i (3), jest zatem następująca:

4. (el.-magn. jedn. nat. pr.) $\times$ (1 el.-magn. jedn. pot.) = $\frac{1 \text{ erg}}{1 \text{ sek.}}$.

Przypuśćmy, że na powierzchni przewodnika znajduje się w równowadze ładunek dodatni wynoszący 1 elektromagnetyczną jednostkę ładunku; przypuśćmy, że potencjał tego przewodnika względem ziemi jest równy 1 elektromagnetycznej jednostce potencjału. Zgodnie z § 28-ym powiadamy, że pojemność (względem ziemi) uważanego przewodnika w uważanem jego położeniu względem ziemi wynosi 1 elektromagnetyczną jednostkę pojemności:

5. el.-magn. jedn. pojemności = $\frac{1 \text{ el.-magn. jedn. ładunku}}{1 \text{ el.-magn. jedn. potencjału}}$.

Przy pomocy związków (3) i (5) łatwo sprawdzamy, że

6. (1 el.-magn. jedn. ład.) $\times$ (1 el.-magn. jedn. pot.) = 1 ergowi

7. (1 el.-magn. jedn. poj.) $\times$ (1 el.-magn. jedn. pot.)² = 1 ergowi
jak wymagają tego twierdzenia § 31-go.

Z § 56-go jest nam wiadomo, że

$$8. \quad \text{gauss} = 1 \text{ gr}^{1/2} / \text{cm}^{1/2} \text{ sek}$$

z przyjętego określenia elektromagnetycznej jednostki natężenia prądu wnosimy zatem, że

$$9. \quad \text{el.-magn. jedn. nat. prądu} = 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{1/2} / \text{sek}$$

Z określenia (2) i z twierdzenia (9) wynika dalej, że

$$10. \quad \text{el.-magn. jedn. ładunku} = 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{1/2}.$$

Zasadzając się na określeniu (3), na twierdzeniu (10) i na wzorze (1) § 71-go tomu I-go, dochodzimy do wniosku, że

$$11. \quad \text{el.-magn. jedn. potencjału} = 1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{3/2} / \text{sek}^2.$$

Porównawszy wreszcie określenie (5) z obecnymi naszymi wynikami (10) i (11), otrzymujemy:

$$12. \quad \text{el.-magn. jedn. pojemności} = 1 \text{ sek}^2 / \text{cm}.$$

Przy pomocy twierdzeń (9), (10), (11) i (12) sprawdzamy, że równania poprzednie (4), (6) oraz (7) są spełnione.

Łatwo nasuwa się tutaj pytanie: w jakim związku ze sobą pozostają elektrostatyczne i elektromagnetyczne jednostki? W elementarnych ramach naszego wykładu nie możemy podać wyczerpującej odpowiedzi na to zapytanie; ograniczamy się do uwagi następującej, którą przytaczamy dla ilustracji. Wiadomo, iż astronomowie, gdy zajmują się zwłaszcza budową układu gwiazd stałych, mają wciąż do czynienia z odległościami, w stosunku do ziemskich potwornie wielkimi. Przypuśćmy na przykład, że odległość gwiazdy G od ziemi Z wynosi 9.44×10^{18} cm. W tem zdaniu odległość GZ jest wyrażona w jednostkach długości, wyprowadzonych z rozmiarów ziemi (lub pewnego wzorca na ziemi), w centymetrach. Gdybyśmy woleli wyrazić odległość GZ w kilometrach, w przejściu do nowej jednostki nie byłoby trudności; stosunek 1 km do 1 cm jest liczbą oderwaną (niemianowaną), km i cm są jednostkami długości, są *jednorodne*. Astronomowie postępują jednak często inaczej; mówią na przykład, że gwiazda G znajduje się w odległości *10 lat świetlnych* od ziemi; chcą przez to powiedzieć, że światło (które w próżni posuwa się naprzód z prędkością c wynoszącą 3×10^{10} cm/sek) musiałoby biec przez lat 10, zanim odbyłoby drogę GZ ; tym sposobem astronomowie opisują odległości za pośrednictwem jednostki czasu. Jednostki długości i czasu są *niejednorodne*; stosunek jednostki długości do jednostki czasu nie jest liczbą oderwaną, jest pewną prędkością; liczbowa wartość wszelkiej prędkości zależy od wyboru jednostek długości i czasu, w których ją wyrażamy. Przejdźmy teraz do przypadku, którym jesteśmy obecnie zajęci. Ustanowiliśmy dwa układy jednostek w poprzedzającym wykładzie: elektrostatyczny i elektromagnetyczny. Każdy układ sam w sobie jest spójny i konsekwentny, każdy jest możliwy i dozwolony, lecz każdy, jak wiemy, polega na założeniach czyli umowach *dowolnych*. Umowy jednego układu są *niezgodne* z umowami drugiego; dlatego możemy posługiwać się bądź jednym, bądź drugim, ale nie naraz i jednym i drugim. Jednostki tej samej wielkości, na przykład natężenia prądu, utworzone w jednym i w drugim układzie, są *niejednorodne*; stosunek jednej do drugiej *nie* jest liczbą oderwaną (niemianowaną); nieuza-

sadnione byłoby zatem pytanie, ile razy elektrostatyczna jednostka natężenia prądu zawiera się w elektromagnetycznej. Jak wytłumaczył to Maxwell, stosunek elektromagnetycznej do elektrostatycznej jednostki natężenia prądu jest pewną *prędkością*; doświadczenie wskazało, że prędkość ta wynosi 3×10^{10} cm/sek, jest więc identyczna z prędkością rozchodzenia się światła w próżni.

§ 66. Układ jednostek praktycznych.

W tak zwanym praktycznym układzie jednostek (o którym już poprzednio wspomnieliśmy kilkakrotnie) jednostką natężenia prądu jest *amper*, określony jak następuje:

1. $\text{amper} = \frac{1}{10}$ el.-magn. jedn. nat. prądu.

Przypuśćmy, że wyrażamy w amperach natężenie prądu i w równaniu (1) § 64-go, wektor zaś H , jak dawniej, mierzymy w gaussach; stała A przybiera wówczas wartość $\frac{1}{10}\pi$ i otrzymujemy

2.
$$H = \frac{\pi ni}{5r}$$

Miliamperem nazywamy jedną tysięczną, *mikroamperem* jedną milionową część ampera. Niewielka maszynka indukcyjna Wimshursta, gdy obracamy dość powoli jej tarcze, dostarcza prądu o natężeniu kilkunastu lub kilkudziesięciu mikroamperów. Dzwonimy przy pomocy prądu o natężeniu zazwyczaj około 0.5 ampera; lampki żarowe zasila zwykle prąd o natężeniu mniej więcej 1 ampera; przez silną projekcyjną lampę łukową przesyłamy prąd o natężeniu około 20 amperów.

Jednostką ładunku elektrycznego w układzie jednostek praktycznych jest *kulomb*:

3. $1 \text{ kulomb} = \frac{1}{10}$ el.-magn. jedn. ładunku;

podług określeń: obecnego (1) i (2) w § 65-ym powiadamy zatem

4. $1 \text{ kulomb} = 1 \text{ amper} \times 1 \text{ sek.}$

Możemy wyrażać się krótko: kulomb jest 1 amperosekundą. Elektrotechnicy posługują się nieraz jednostką, którą nazywają *amperogodziną*; równa się ona oczywiście 3600 kulombom.

Jednostką potencjału w układzie jednostek praktycznych jest *wolt*:

5. $1 \text{ wolt} = 10^8$ el.-magn. jedn. potencjału

skąd wyprowadzamy

6.
$$1 \text{ wolt} = \frac{10^7 \text{ ergów}}{1 \text{ kulomb}} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ kulomb}}$$

(por. wzory: (3) § 65-go, (3) obecny oraz (2) § 71-go tomu I-go). Wolt jest zatem równy 1 joule'owi na 1 kulomb; joule jest 1 kulombowoltem lub 1 woltamperosekundą.

Maszynka indukcyjna Wimshursta, jak już powiedzieliśmy, nawet i po godzinnej działalności, nie dostarczy ponad ułamek kulomba, gdy bateria ogniw w przeciągu sekundy wprawia w ruch ładunek rzędu kulomba. Na maleńkiej metalowej izolowanej kulce byłoby trudno zgromadzić ładunek porównywalny z kulombem. Różnica potencjałów na biegunach maszyny elektrycznej nieraz dochodzi 100000 woltów, w korzystnych warunkach może nawet być wyższa; tymczasem elektromotoryczna siła pospolitego ognia wynosi zwyczajnie od 1 do 2 woltów (ogniwa Daniella około 1.1 wolta, Leclanchého około 1.5 wolta, Greneta około 2 woltów, wszystkie w temperaturze pokojowej). Elektromotoryczna siła ognia Westona wynosi 1.02 wolta w 18°C.

Wyobraźmy sobie roztwór elektrolityczny, z którego podczas elektrolizy wydziela się na katodzie srebro. Przesyłając przez taki roztwór prąd o natężeniu 1 ampera przez czas 1 sekundy, spostrzegamy, że na katodzie osadza się 0.001118 gr srebra. Wiemy jednakże z §§ 43 i 44-go, że, przesyłając przez ten sam roztwór prąd o natężeniu 1 elektrostatycznej jednostki przez czas 1 sekundy, sprawili byśmy, iż na katodzie pojawia się 372.67×10^{-15} gr srebra. Pierwsza przytoczona masa jest 3×10^9 razy większa niż druga; gdy zestawiamy ze sobą zatem dwa powyższe twierdzenia, łatwo może nasunąć się wniosek, jakoby «natężenie 1 ampera było 3×10^9 razy większe niż natężenie 1 elektrostatycznej jednostki». Wniosek ten byłby błędny. Jak powiedzieliśmy w artykule poprzednim:

1 amper *nie jest* $= 3 \times 10^9$ el.-stat. jedn. natężenia prądu;

lecz 1 amper *jest* $= 3 \times 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} \times$ el.-stat. jedn. natężenia prądu.

Elektromagnetycznie określone natężenie prądu nie jest jednorodne z natężeniem określonym elektrostatycznie. Kulomb jest jednostką jednorodną z elektromagnetyczną jednostką ładunku, lecz nie jest jednorodny z elektrostatyczną jednostką ładunku.

Jednostką dzielności w układzie praktycznym jest *watt*:

$$7. \quad 1 \text{ watt} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ sek}} = \frac{10^7 \text{ ergów}}{1 \text{ sek}}$$

(por. § 72 tomu I-go); lecz podług powyższych związków (4) i (6) mamy oczywiście

$$8. \quad 1 \text{ amper} \times 1 \text{ wolt} = 1 \text{ watt};$$

woltamper jest więc identyczny z watem. Inżynierowie posługują się chętniej *kilowattem*:

$$9. \quad 1 \text{ kilowatt} = 10^3 \text{ wattów} = 10^3 \frac{\text{jouleów}}{\text{sek}} = 10^3 \text{ woltamperów}$$

która jest jednostką dzielności oraz *kilowattgodziną*:

$$10. \quad 1 \text{ kilowattgodzina} = 36 \times 10^5 \text{ wattsekund} = 36 \times 10^5 \text{ jouleów}$$

która jest jednostką pracy, pospolitą w praktyce elektrotechnicznej. Praca, wykonana w ciągu 1 godziny, przy dzielności przeciętnej lub stałej 1 kilowatta, jest równa 1 kilowattgodzinie.

Jednostką pojemności w układzie praktycznym jest *farad*:

$$11. \quad 1 \text{ farad} = 10^{-9} \text{ el.-magn. jedn. pojemności.}$$

Odwołując się do określenia (5) § 65-go oraz do wzorów obecnych (3) i (5), znajdujemy

$$12. \quad 1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ kulomb}}{1 \text{ wolt}}.$$

Przy pomocy twierdzeń (6) i (12) sprawdzamy łatwo, iż (§ 31):

$$13. \quad (1 \text{ farad}) \times (1 \text{ wolt})^2 = 1 \text{ joule.}$$

Jeżeli na powierzchni pewnego przewodnika znajduje się ładunek dodatni wynoszący 1 kulomb i jeżeli przytem ów przewodnik okazuje względem ziemi potencjał dodatni równy 1 woltowi, pojemność przewodnika względem ziemi musi wynosić 1 farad. Jednostka ta pojemności jest zbyt duża dla rachunków praktycznych; istotnie np. pojemność kuli ziemskiej wynosi około 0.0007 farada; pojemność równą 1 faradowi miałyby kula przewodząca o promieniu 9×10^{11} cm. Zazwyczaj posługujemy się t. zw. *mikrofaradem* czyli jedną miljonową częścią farada.

§ 67. Busola stycznych; galwanometry.

Z równań (1) § 63-go oraz (2) § 66-go wyprowadzamy:

$$1. \quad i = C \tan \theta \quad \text{gdzie} \quad 2. \quad C = 5rh/\pi n.$$

Wartość r jest tutaj podana w centymetrach, wartość h w gaussach, wartość i w amperach. Jeżeli znamy r , h , n t. j. jeżeli znamy wartość C , możemy obliczyć natężenie i danego elektrycznego prądu, gdy zmierzylismy wychylenie θ igły magnetycznej, które on wywołuje. Tak postawione zadanie rozwiązuje przyrząd, zwany *busolą stycznych*; zbudował go po raz pierwszy Pouillet w r. 1837-ym.

Ustawiona pionowo obręcz miedziana o stosunkowo znacznym promieniu (rys. 93) stanowi obwód kołowy, do którego prąd wpływa przez spinki widoczne u dołu przyrządu. W środku koła, na średnicy poziomej, umieszczona jest tarcza

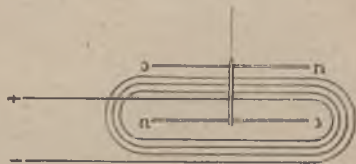
opatrzona podziałką kątową; nad tą skalą porusza się długa ale lekka wskazówka, złączona z małą deklinacyjną igielką, ruchomą w środku obwodu. Ustawiamy obręcz w płaszczyźnie południka magnetycznego; kierunek osi igły, przed przestaniem prądu przez przyrząd, przypada zatem w płaszczyźnie obwodu. Wartość współczynnika C , t. zw. *redukcyjnego współczynnika busoli*, jak widzimy z równania (1), rozstrzyga o stosunku odpowiadających sobie wartości i oraz $\tan \theta$. Wartość C zależy przedewszystkiem od długości r . Promieniowi r musimy dać długość znaczną, budując busolę; w przeciwnym razie pole w środku obwodu nie byłoby dość jednorodne i formuła (1) nie stosowałaby się. Gdy jednak wartość r jest znaczna, kąt θ odpowiadający danemu natężeniu i jest mały. Busoli stycznych nie możemy zatem tak udoskonalić, ażeby stała się wysoce wrażliwym przyrządem; przy jej pomocy wykrywamy prąd, którego natężenie wynosi przynajmniej kilka dziesięciotysięcznych części ampera, niejednokrotnie zaś miewamy do czynienia z o wiele słabszymi prądami. Inna jeszcze niedogodność busoli na tem polega, że do pomiaru i konieczna jest znajomość składowej poziomej h natężenia magnetyzmu ziemskiego w miejscu spostrzeżeń, wielkości, którą niełatwo jest zmierzyć dokładnie.



Rys. 93.

Do wykrywania bardzo słabych prądów, lub do ścisłego badania natężenia prądów dowolnych, posługujemy się *galwanometrami*. Opisujemy tu krótko urządzenie jednego typu galwanometrów, tych, które są zaopatrzone w układ magnesowy ruchomy.

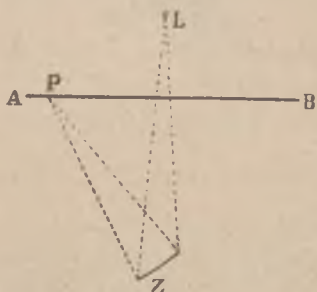
Obwodem prądu w galwanometrze bywa zwykle *cewka*, składająca się z mnóstwa skrętów długiego, cienkiego (izolowanego) drutu; gdy liczba skrętów jest znaczna a ich średnica nieznaczna, pole magnetyczne w pośrodku jest bezporównania silniejsze niż w busoli stycznych. Wewnątrz cewki znajduje się ruchomy układ magnesowy, zazwyczaj *astyczny*. Wyobraźmy sobie dwa niewielkie magnesy ns (rys. 94), możliwie identyczne co do kształtu i namagnesowania, sztywno ze sobą złączone i zawieszone na cieniutkiej nici, zwykle kwarcowej. Osi tych magnesów leżą w prostych równoległych ale są skierowane przeciwnie; pole magnetyczne ziemskie wywiera zatem słabe działanie na całość złożoną z obu magnesów; skutek jest taki, jak gdyby składowa h została wielce zmniejszona, co zwiększyłoby odpowiednio, według (1) § 63-go, wychylenie θ połączone z danym polem H . Rys. 94 objaśnia, w jaki sposób magnesy ns są umieszczone w odniesieniu do cewki. Według reguły Ampère'a, działania, wywierane przez górne i przez dolne części skrętów na magnes wewnętrzny,



Rys. 94.

dodają się; te same działania wywierane na magnes zewnętrzny odejmują się ale wpływ części górnych przeważa, różnica wzmacnia więc działanie wywierane na magnes wewnętrzny. Pomysł tego urządzenia zawdzięczamy Nobili'emu (1826). W bardzo wrażliwych galwanometrach nowoczesnych, za przykładem Kelvina (1858), umieszczamy cztery cewki; jedna para cewek działa na dolny, druga na górny magnes astatycznego układu; prąd okrąża cewki dolne w przeciwnym niż górne kierunku. Potężne prądy, służące dziś różnym zastosowaniom praktycznym, wytwarzają nieraz, zwłaszcza w miastach, pola magnetyczne, od których fizycy muszą chronić galwanometry; cel ten osiągają du Bois i Rubens w t. zw. *opancerzonym* galwanometrze, w którym ruchomy magnes wraz z cewkami jest otoczony grubą kulistą osłoną, sporządzoną z lanego żelaza (por. § 59).

Posługując się Poggenendorffa metodą odczytywania skali w zwierciadle, możemy dokładnie dostrzegać i mierzyć słabe nawet odchylenie magnesu; na rys. 95-ym widzimy przedstawione w rzucie poziomym, proste urządzenie do tego celu służące. Wiązka światła biegnąca ze źródła L pada na zwierciadełko wklęsłe Z połączone z nicią, na której zawieszony jest magnes. Po odbiciu się od zwierciadła wiązka tworzy jasny prążek P na skali AB . Wiązka światła spełnia tu zatem rolę wskazówki przytwierdzonej do magnesu lub układu magnesów; gdy zwierciadło Z odchyli się o kąt drobny, znak P przesuwa się znacznie wzdłuż skali AB .



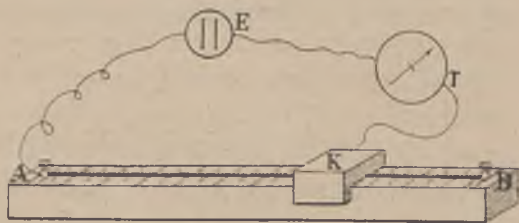
Rys. 95.

Przypuśćmy, iż, przesyłając prąd pewnego natężenia i przez dany galwanometr, odczytaliśmy odchylenie, które ów prąd sprawił. Jeżeli galwanometr jest *skalibrowany* (np. na zasadzie voltametrycznych pomiarów, § 43), z dostrzeżonego odchylenia możemy wyprowadzić bezwzględną wartość natężenia i ; w przeciwnym razie możemy wyrazić to natężenie tylko w dowolnych jednostkach, właściwych danemu jedynie przyrządowi.

§. 68. Opór elektryczny.

W obwodzie prądu trwałego umieścimy ogniwo E (rys. 96), busolę stycznych T , wreszcie drut metalowy AB prosty, długi, obnażony (t. j. niepokryty, jak zwykle elektryczne druty bywają, warstwą izolującą, jedwabną lub kauczukową). W dowolnem miejscu K drutu przyciśnięta jest do niego przesuwalna sprężynka, łącząca się metalicznie z busolą T , jak okazuje rysunek; przy pomocy tego *kontaktu* możemy włączać do obwodu krótszą lub dłuższą część drutu. Gdy prąd elektryczny krąży w obwodzie, igła busoli odchyliła się; przy pomocy wzoru podanego w § 67-ym możemy obliczyć natężenie i tego prądu. Dopóki w obwodzie nie zmienia się nic, wychylenie igły, zatem również natężenie i pozostaje stałe. Lecz jeżeli, przesuwając kontakt K , zwiększymy

długość włączonej do obwodu części drutu AB , natężenie prądu zmniejsza się natychmiast; gdy ową długość skracamy, natężenie rośnie. Przypisujemy zatem drutowi AB pewien *elektryczny opór*; każdemu przewodnikowi, każdej wogóle składowej części każdego elektrycznego obwodu (np. ogniwo, busoli, drutom i t. d.) przypisujemy własność przeciwstawiania pewnego oporu elektrycznemu prądowi.



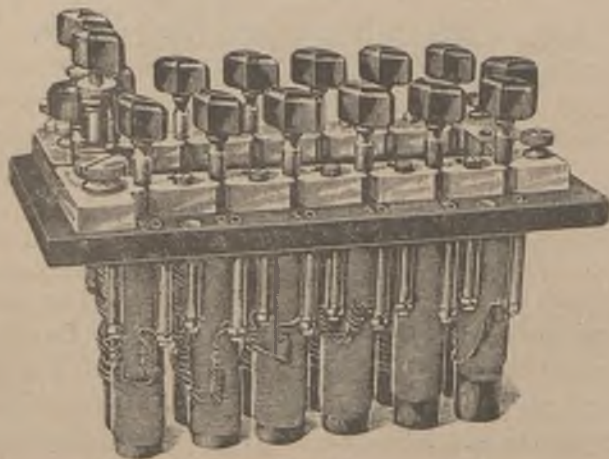
Rys. 96.

Od całkowitego oporu obwodu zależy natężenie krążącego w nim prądu; im większy jest opór, tem mniejsze natężenie; im mniejszy opór, tem większe natężenie; prawa tym związkiem rządzące poznamy w następnym rozdziale.

Przyrząd, który, według życzenia, pozwala włączać rozmaite opory do danego obwodu, nazywa się *opornicą*. Drut AB zaopatrzony w ruchomy kontakt K (rys. 96) stanowi najprostszy przykład opornicy. Istnieją rozmaite inne, ulepszone odmiany tego przyrządu; gdy stosowną opornicę umieściliśmy w obwodzie, panujemy z łatwością, i w szerokich granicach, nad natężeniem płynącego w nim prądu.

Do powyżej opisanego doświadczenia (rys. 96) nadaje się dobrze drut AB manganinowy, o długości około 1 m oraz 0.5 mm średnicy. Ogniwo E może być typu Daniella, Leclanchého lub inne podobne; przypuszczamy, że nie było ono przedtem czynne zbyt często ani zbyt długo.

Rys. 97 objaśnia urządzenie opornicy Siemens'a, powszechnie dziś w użyciu będących. Na ebonitowej płycie ułożone są grube mosiężne przewodniki; łączą się one ze sobą bądź bezpośrednio, tkwiącymi między nimi zatyczkami, bądź też przez pośrednictwo zwojów



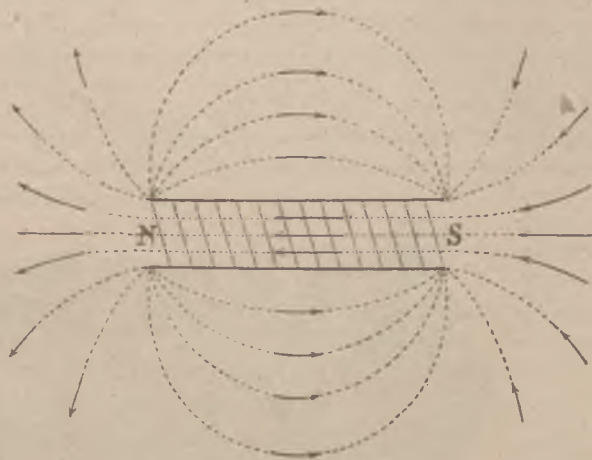
Rys. 97.

drutu umieszczonych pod płytą. Jak zrozumiemy to jasno w następującym rozdziale, opór grubych przewodników mosiężnych i zatyczek jest bezporównania mniejszy niż opór dolnych zwojów; gdy więc zatyczka tkwi w pewnym otworze, zwój drutu pod otworem leżący jest praktycznie wyłączony z obwodu prądu; zwój jest włączony, gdy odpowiednia zatyczka została wyjęta. W następującym rozdziale wyjaśnimy, jakimi jednostkami możemy mierzyć opory obwodów lub części obwodów.

§ 69. Solenoidy; ich pola magnetyczne.

Dookoła walca prostego owijamy drut metalowy, cienki, izolowany; każdy skręt prowadzimy tuż obok poprzedzającego; przypuśćmy, iż położyliśmy znaczną liczbę n skrętów na każdej jednostce długości osi walca. Założmy jeszcze dla uproszczenia, że długość walca okręconego drutem jest znaczna w stosunku do promienia jego poprzecznego przecięcia. Drut tak ukształtowany, za przykładem Ampère'a, nazywamy *solenoidem*. Gdy prąd płynie w solenoidzie, wewnątrz i zewnątrz powstaje pole magnetyczne.

Przypuśćmy, że skręty solenoidu przecinają prostopadle poziomą płaszczyznę rys. 98 go; połowa każdego skrętu znajduje



Rys 98

się nad płaszczyzną, połowa pod nią. O przebiegu linii pola magnetycznego możemy powziąć przybliżone wyobrażenie, utworzywszy znany sposóbem widmo pola. Na rys. 98-ym podany jest przebieg kilku takich linii; jak widzimy, tworzą one naogół obwody zamknięte; nazewnątrz solenoidu biegną wygiętymi łuk-

kami, nawewnątrz są niemal ściśle prostymi, równoległymi do osi. Powiadamy: *wewnątrz solenoidu pole elektromagnetyczne jest niemal ściśle jednorodne*. Zobaczmy w VIII-ym rozdziale, w jak niespodziewany sposób możemy dziś stwierdzić słuszność tego wniosku.

Wektor H pola jest w każdym punkcie umiejscowiony w stycznej do przechodzącej przez to miejsce linii pola; kierunek wektora w owej stycznej zależy od kierunku, w którym krążą prąd po skrętach solenoidu; gdy odwracamy kierunek prądu, kierunek wektora H zmienia się na przeciwny. Ażeby uchwycić węzeł, łączący kierunki prądu i wektora pola ze sobą, tworzymy przedewszystkiem pewne nowe pojęcia. Krańcowe przecięcia poprzeczne (prostopadłe do osi) nazywamy *biegunami* solenoidu. Wyobraźmy sobie obserwatora umieszczonego w osi solenoidu i tak przeciętego przez biegun, że stopy obserwatora znajdują się wewnątrz, głowa nazewnątrz solenoidu. Jeżeli obserwator dostrzeży, że prąd w skręcie bieguna płynie przeciwnie niż wskazówki poruszają się na tarczy zegara, powiadamy, że biegun jest *północnym N* czyli *dodatnim* biegunem solenoidu; jeżeli obserwator dostrzeży, że prąd w skręcie bieguna płynie w tym samym kierunku, w jakim wskazówki poruszają się na tarczy zegara, krańcowe przecięcie nazywamy *południowym S* albo *ujemnym* biegunem solenoidu (rys. 99). Posługując



Rys. 99.

się temi nazwami, wypowiadamy prawo następujące, które odpowiada na postawione przed chwilą pytanie: *nazewnątrz solenoidu linie magnetycznego pola biegną od północnego do południowego bieguna; nawewnątrz biegną przeciwnie od południowego do północnego bieguna* (rys. 98).

W miejscu północnego bieguna wektor H pola biegnący w osi solenoidu przechodzi przez wspomnianego obserwatora w kierunku od stóp ku głowie; w miejscu bieguna południowego kieruje się przeciwnie od głowy obserwatora ku jego stopom. Porównajmy obecną regułę z wypowiedzianym w § 63-im przepisem; przekonamy się, że obadwa prawa są identyczne; obadwa wynikają z twierdzenia Ampère'a (§ 62).

Znamy teraz pole magnetyczne pochodzące od prądu, który płynie przez solenoid; porównajmy je z polem tworzącym się dookoła jednostajnie namagnesowanego linowego magnesu (§ 57).

Spostrzegamy natychmiast, jak dokładnie te pola zgadzają się ze sobą. Północny biegun solenoidu gra rolę północnego bieguna magnesu; południowy biegun solenoidu okazuje własności południowego bieguna magnesu. Przypuśćmy, że dany nam jest solenoid, w którym płynie prąd danego natężenia; możemy zawsze wyobrazić sobie taki magnes linjowy, tak namagnesowany, iż pola sprawiane nazewnątrż przez solenoid i magnes są identyczne.

Oznaczmy przez S rozległość powierzchni poprzecznego przecięcia solenoidu, przez n liczbę skrętów odniesioną do jednostki długości jego osi, przez i natężenie płynącego w nim prądu, wyrażone w elektromagnetycznych jednostkach. Solenoid działa nazewnątrż jak linjowy, jednostajnie namagnesowany magnes, który na przecięciu poprzecznym północnem zawiera ilość $+Sni$ magnetyzmu, na południowem ilość $-Sni$. Gęstość magnetyczna powierzchniowa wynosi więc $+ni$ na północnem, $-ni$ na południowem przecięciu. Według twierdzenia Gaussa (§ 19), wartość wektora H w sąsiedztwie północnego przecięcia wynosi (w gaussach)

1.

$$H = 4\pi ni.$$

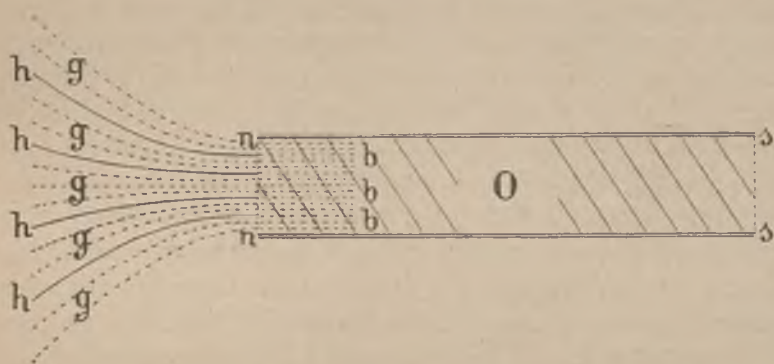
Ponieważ rozległość S wyrażamy w cm^2 , wielkość n w $1/\text{cm}$, natężenie prądu w jednostkach $\text{gr}^{1/2} \text{cm}^{1/2}/\text{sek}$ (§ 65), przeto iloczyn Sni wyobraża istotnie pewną ilość magnetyzmu, wyrażoną w magnetostatycznych jednostkach, iloczyn zaś $4\pi ni$ pewien wektor H podany w gaussach (§§ 53 i 56). Jeżeli wyrazimy i w amperach, H znów w gaussach, musimy założyć (§ 66) $H = 0.4\pi ni$

§ 70. Elektromagnes; pojęcie magnetycznej indukcji.

Wkrótce po odkryciu Oersteda, spólcześnie z pracami Ampère'a, Sturgeon w Anglii, Gay Lussac zaś i Arago we Francji dokonali nowych i ważnych spostrzeżeń. Wnętrze solenoidu wypełniamy *rdzeniem* sporządzonym z miękkiego żelaza; przepuszczając przez skręty prąd tego samego natężenia jak w doświadczeniach poprzednich, otrzymujemy nazewnątrż pole magnetyczne bezporównania silniejsze. Przyrząd tak zbudowany nazywamy *elektromagnesem*. Bieguny elektromagnesu, jak bieguny solenoidu, leżą w krańcowych poprzecznych przecięciach; *dodatni biegun elektromagnesu zgadza się z dodatnim biegunem solenoidu, ujemny z ujemnym*. Ale bieguny elektromagnesu, jak powiedzieliśmy, są o wiele silniejsze niż bieguny prostego solenoidu bez rdzenia; fakt ten możemy łatwo zrozumieć. Tworząc w swem wnętrzu znaczne, niemal jednorodne pole magnetyczne, solenoid (niosący w sobie prąd elektryczny)

indukuje wybitne magnetyczne własności w wewnętrznym swym rdzeniu. Zewnętrzne pole elektromagnesu składa się zatem z dwóch pól: z pola towarzyszącego prądowi, który płynie przez skręty oraz z pola, zazwyczaj o wiele potężniejszego, które pochodzi od indukowanego w rdzeniu namagnesowania.

Wyobraźmy sobie solenoid O (rys. 100), w którym płynie prąd elektryczny o natężeniu i . Przypuśćmy z początku, że solenoid jest pozbawiony rdzenia; lub, wyrażając się ściślej, przypuśćmy, że jego rdzeń składa się z powietrza lub próżni. Dokoła solenoidu tworzy się pole magnetyczne, którego wektor H , podług § 69-go, dla danego solenoidu, od natężenia i wyłącznie zależy. Zbudujmy linie i wiązki tego pola; na rys. 100-ym, dla jasności, poprowadzono tylko kilka wiązek idących z północnego



Rys. 100.

krańcowego poprzecznego przecięcia nn solenoidu i oznaczono je literami h . Dla uproszczenia przypuśćmy, że rozległość powierzchni przecięcia nn wynosi 1 cm^2 ; liczba L wiązek, wychodzących z nn normalnie, wyraża wówczas liczbową wartość wektora H panującego w miejscu nn pola.

Do solenoidu wprowadzamy teraz rdzeń $nnss$, który wypełnia jego wnętrze; przypuśćmy, że krańcowe poprzeczne przecięcia rdzenia przypadają w płaszczyznach przecięć poprzecznych krańcowych solenoidu nn i ss . Rdzeń może składać się z dowolnej substancji; jeżeli jest np. żelazny, magnesuje się mocno; jeżeli jest np. platynowy, magnesuje się słabo; każdy jednak rdzeń materialny magnesuje się, choć niezawsze dostrzegalnie. Dla określoności przypuśćmy, że rdzeń jest żelazny; tworzące się dokoła pole magnetyczne jest wówczas nieporównanie bogatsze

aniżeli było poprzednio, gdy w solenoidzie żelaznego rdzenia nie było; z północnego bieguna nn wybiega o wiele więcej wiązek. Przypuśćmy, że z przecięcia nn wybiega obecnie μL wiązek; poprzednie wiązki h biegną jak dawniej, przybyło zatem

$$1. \quad \mu L - L \quad \text{czyli} \quad (\mu - 1) L$$

nowych wiązek; na rys. 100-ym przedstawiono je jako krzywe kropkowane g .

Wiązki h , biegnące w powietrzu lub próżni, stanowią, jak wiadomo, przedłużenie wiązek, które istniały już w solenoidzie pozbawionym rdzenia i ciągnęły się w jego wnętrzu, niemal ściśle równoległe do osi. Założmy analogicznie, że nowo powstałe wiązki g są również przedłużeniem pewnych idealnych wiązek, które, jak wyobrażamy sobie, ułożone są w substancji rdzenia, równoległe do jego osi; fikcyjne te wiązki nazywamy *wiązkami namagnesowania*. Ogół wszystkich, wspólnie wziętych wiązek, biegnących bądź w żelazie, bądź w powietrzu lub próżni, nazywamy *wiązkami magnetycznej indukcji*. W rdzeniu wiązki b magnetycznej indukcji (rys. 100) biegną gęstą gromadą, niemal równoległe do osi; nazewnątrż rozchylają i rozpraszają się, ale liczba wiązek wychodzących z 1 cm^2 krańcowego przecięcia nie zmienia się. Wychodząc z rdzenia, wiązki magnetycznego pola pozostają sobą; wiązki namagnesowania przeradzają się w nowe wiązki pola, które, mieszając się z dawnymi, niepomniernie wzmacniają pole. Liczbę B wiązek magnetycznej indukcji, przecinających normalnie 1 cm^2 , bądź w żelazie, bądź w powietrzu lub próżni, poczytujemy za miarę liczbowej wartości pewnego nowego wektora B , który nazywamy *magnetyczną indukcją*.

Doświadczenie wskazuje, że (niemianowana) liczba μ , którą posługiwaliśmy się w powyższym wywodzie, jest identyczna z t. zw. przenikliwością magnetyczną μ znaną nam z § 52 go. Wiemy, że stała μ , utworzona dla dowolnych diamagnetycznych lub paramagnetycznych lecz nie ferromagnetycznych ośrodków, jest nadzwyczaj mało różna od jedności; rdzeń zatem złożony z wody, rtęci, miedzi, cynku, platyny, choćby nawet bizmutu albo palladu, zmienia pole solenoidu zaledwie dostrzegalnie. Lecz jeśli jest sporządzony z niklu, ze stali, z żelaza, rdzeń, jak wiemy, zmienia nadzwyczajnie pole solenoidu; niklowi, stali, żelazu musimy zatem przypisywać wartości stałej μ ogromne, bardzo dalekie od jedności.

Ściśle rzecz biorąc, dla niklu, dla stali, dla żelaza, dla wszelkich wogóle ferromagnetycznych substancyj niepodobna jest podać oznaczonej wartości przenikliwości magnetycznej; wartość μ tych substancyj zależy w nich nie tylko od H lecz nawet od sposobu wytworzenia pola, od poprzednich losów okazu, który magnesujemy; taka zmienność i nieoznaczoność wartości μ jest jednym z objawów magnetycznego poddawania i ociągania się, o których wspomnieliśmy w § 55-ym. Tylko zatem dla ilustracji przytaczamy, że dla kawałka niklu możemy z łatwością otrzymać $\mu = 300$, dla kawałka żelaza $\mu = 6000$ i inne tego rzędu wartości.

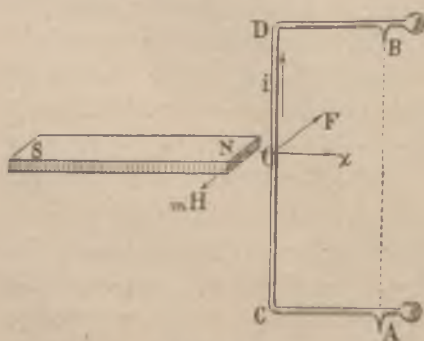
Przed chwilą wyobrażaliśmy sobie, że do wnętrza solenoidu wprowadzono rdzeń wyrobiony z miękkiego żelaza; przypuścimy teraz, że rdzeń jest sporządzony z najlepszej, twardej stali. Rdzeń stalowy magnesuje się podobnie jak żelazny; tworzą się w nim znowu wiązki namagnesowania, wiązki magnetycznej indukcji. Ale stal uporczywiej niż żelazo zachowuje swe namagnesowanie, gdy magnesujące pole zewnętrzne przestało być czynne (§ 49). Wyobraźmy sobie zatem, że nagle przerywamy prąd płynący w solenoidzie, w którego wnętrzu znajduje się rdzeń stalowy. Wiązki h (rys. 100) wytwarzał prąd; zgina one wraz z prądem, zarówno w rdzeniu jak poza rdzeniem. Lecz wiązki g z namagnesowania stały powstały; nie znikną zatem, gdy prąd przerywamy. Znosząc prąd w solenoidzie, nie unicestwiamy w stalowym rdzeniu wiązek magnetycznej indukcji, lecz je tylko przerzedzamy, zazwyczaj zresztą nieznacznie. Gdy jednak prąd w solenoidzie przestał już płynąć, rdzeń stalowy jest zwykłym trwałym magnesem, takim, którego stan magnetyczny badaliśmy w III-im rozdziale. Pojmujemy teraz, że wiązki widoczne wewnątrz magnesu NS (rys. 76, § 59) są wiązkami jego namagnesowania; wzięte wspólnie z biegnącymi nazewnątrz wiązkami pola (stanowiącymi ich przedłużenie) tworzą one wiązki magnetycznej indukcji trwałego magnesu.

Posługując się dostatecznie długim obwodem i przesyłając prąd lub przerywając w nim prąd, możemy tworzyć lub niszczyć pole elektromagnesu z odległości dowolnej. Na tej możliwości polegają zastosowania, które elektromagnes znalazł w mnóstwie przyrządów i narzędzi, jak dzwonki elektromagnetyczne, rozmaite samopiszzące lub sygnalizujące instrumenty, przerywacze automatyczne, elektromotory, telegrafy i telefony. Do podnoszenia żelaznych i żelazistych brył przemysł posługuje się potężnymi, t. zw. *technicznymi* elektromagnesami, którym nadaje się postać zwartą, jak najbardziej w sobie skupioną. W kształcie przerwanej pierścienia buduje się elektromagnesy, przeznaczone dla naukowych pracowników; pozwalają one, choć w małym przestrzennym zakresie, wytwarzać pola magnetyczne wysokich natężeń, jak o tem wspomniano w § 56-ym.

§ 71. Działanie obcego pola magnetycznego na obwód prądu.

Obwód kołowy lub solenoidalny, każdy wogóle obwód, dowolnej postaci, gdy krąży w nim prąd, tworzy w otoczeniu pole magnetyczne, wywiera zatem pewne siły na umieszczone w tem polu magnesy. Według zasady działania i przeciwdziałania wolno nam jest odwrócić powyższe twierdzenie. Powiadamy zatem, że obwód, w którym płynie prąd elektryczny, musi doznawać od magnesów sił równych i przeciwnych tym siłom, które sam na magnesy wywiera; innemi słowy mówimy, że *na obwód prądu, wniesiony do obcego mu pola magnetycznego, działają siły ponderomotoryczne równe i przeciwne elektromagnetycznym siłom sprawianym przez obwód.*

Dla sprawdzenia tych wniosków wykonajmy kilka prostych doświadczeń. Drut prosty pionowy CD (rys. 101) stanowi część



Rys. 101.

obwodu, mogącego kręcić się swobodnie dookoła osi pionowej AB ; prąd wpływa ostrzem A , wypływa ostrzem B , w drucie CD płynie zatem pionowo do góry; ostrza A i B , dla pewności zetknięcia, zanurzone są w rtęci. Do drutu CD zbliżamy biegun N silnego magnesu, którego oś SN umieszczamy w płaszczyźnie $ABCD$, prostopadłe do kierunku CD .

jak okazuje rysunek; obwód wykręca się wówczas około osi AB , jak gdyby doznawał działania siły, na rysunku oznaczonej przez strzałkę F . Ażeby zdać sobie sprawę z tego zjawiska, przypuśćmy, że w biegunie N skupiona jest dodatnia ilość m magnetyzmu; jeżeli H (jak zwykle w niniejszym rozdziale) oznacza wektor magnetycznego pola tworzonego przez obwód prądu, twierdzimy na zasadzie § 62-go, że prąd i , płynący od C do D , wywiera na biegun N siłę mH , styczną do poziomego koła, którego osią jest CD , zatoczonego promieniem ON ; siłę skierowaną przeciwnie ruchowi wskazówek na tarczy zegara dla obserwatora, który wzdłuż prądu i jest umieszczony. Siłę tę mH widzimy przedstawioną na rysunku. Skoro zatem takie, według twierdzenia Ampère'a, jest działanie drutu CD niosącego prąd i w sobie na biegun N , przeto,

podług zasady działania i przeciwdziałania, równe i wprost przeciwnie jest przeciwdziałanie bieguna N na drut CD niosący w sobie prąd i ; przeciwdziałanie to F , równe mH , prostopadle do płaszczyzny $ABCD$ i skierowane przeciwnie niż mH , tłumaczy ruch obrotowy obwodu, którego jesteśmy świadkami.

Umieśćmy oś SN magnesu w taki sposób, ażeby przecinała kierunek CD prostopadle do płaszczyzny $ABCD$; siła mH przypada wówczas w płaszczyźnie równoległej do $ABCD$, siła F leży zatem w samej płaszczyźnie $ABCD$; taka siła nie skłania obwodu do kręcenia się około osi AB .

Pokrewne doświadczenie zawdzięczamy Sir Oliverowi Lodge. Gdy przez giętką metalową taśmę przesyłamy prąd elektryczny, owija się ona spiralnie dokoła prostolinowego magnesu, w którego sąsiedztwie jest zawieszona; gdy odwracamy kierunek prądu, taśma odwija się z magnesu i okręca się koło niego w sensie przeciwnym. Rys. 102 wyjaśnia sposób wykonania tego wytwornego doświadczenia, które powiedzie się gładko, gdy posłużymy się prądem o dostatecznem natężeniu i bardzo silnym magnesem; magnes trzeba oczywiście otoczyć jakąkolwiek elektrycznie izolującą powłoką.



Rys. 102.

§ 72. Działanie obcego pola magnetycznego na element prądu.

Gdy rozważamy działanie obwodu prądu na magnetyczny biegun, możemy wyobrażać sobie, że każda część, że każdy *element* obwodu wywiera pewną siłę na biegun; z takich elementarnych sił składa się całkowite działanie obwodu. Ale nie możemy obserwować siły, którą jeden element prądu wywierałby na biegun, albowiem jednego elementu prądu odosobnić nie możemy; w jednym elemencie, wyjętym z obwodu, nie byłoby prądu. Inaczej mają się rzeczy, gdy zajmujemy się przeciwnem działaniem, od powyższego nieodłącznem, działaniem bieguna na obwód. Działanie magnetycznego bieguna na obwód prądu rozłożmy na siły składowe elementarne, przyłożone do elementów obwodu; takie siły możemy dostrzegać; nie naruszając ciągłości obwodu, możemy jedną jego część uczynić ruchomą, choć pozostałe są nieruchome.

Wyobraźmy sobie obwód kołowy jednokrotny, w którym płynie prąd o natężeniu i ; w środku obwodu niechaj znajduje się biegun magnetyczny północny, zawierający dodatnią ilość m magnetyzmu (rys. 103). Rozumiejac przez H

wartość wektora pola magnetycznego uważanego obwodu, utworzoną w środku obwodu czyli w punkcie m , powiadamy, że na biegun m działa siła mH prostopadła do płaszczyzny obwodu i związana, stosownie do reguły § 63-go, z kierunkiem prądu i . Oznaczmy przez r promień, przez L długość $2\pi r$ obwodu; wyrażając H w gaussach, i w elektromagnetycznych jednostkach natężenia prądu, mamy, podług wzoru (1) § 65-go:



Rys. 103.

$$1. \quad mH = mLi/r^2.$$

Wyobraźmy sobie bardzo mały element ab obwodu; przez l rozumiemy długość elementu ab . Kierując się analogją, założmy, że element ab wywiera na biegun m siłę

$$2. \quad mli/r^2.$$

Ponieważ m , i oraz r są identyczne dla wszystkich elementów obwodu, suma zaś długości l wynosi L , dodając zatem wyrażenia (2) utworzone dla wszystkich po kolei elementów obwodu, otrzymujemy rzeczywiście wartość (1). Lecz jeżeli

element ab wywiera na biegun m siłę (2), skierowaną jak mH na rys. 103-im, przeto, według zasady działania i przeciwdziałania, biegun m musi wywierać na element ab siłę również znaczną

$$3. \quad f = mli/r^2$$

skierowaną wprost przeciwnie niż mH . Możemy posunąć się teraz o istotny krok naprzód. Dodatnia ilość m magnetyzmu, skupiona w środkowym punkcie obwodu, wytwarza własne, *obce* pole magnetyczne, całkiem oczywiście niezależne od elektromagnetycznego pola towarzyszącego prądowi i . Dla jasności będziemy oznaczali przez H , jak dotychczas, wektor pola elektromagnetycznego, sprawianego przez prąd i ; przez literę zaś χ będziemy rozumieli wektor obcego pola magnetycznego, które zawdzięcza istnienie obecności bieguna m w środku obwodu. W miejscu zajmowanym przez element ab wektor χ , jak wiadomo, posiada wartość m/r^2 ; siłę f możemy zatem nadać postać

$$4. \quad f = li\chi.$$

W tem wyrażeniu niema już m ani r ; wielkości m i r , które opisują naturę bieguna i jego położenie względem ab , znikły; pozostał tylko χ , który charakteryzuje obce pole istniejące w miejscu ab . Pochodzenie obcego pola, w którym znajduje się element ab , niewątpliwie jest już teraz obojętne; formuła (4) w każdym magnetycznym polu jest ważna, jeżeli jego wektor χ ma wartość i kierunek, które w niniejszym przypadku okazuje w miejscu ab . Wzór (4) wyraża wartość siły f ; jakże ona jest skierowana? Bezpośrednio widzimy, że f jest umiejscowiona w prostej, prostopadłej zarówno do kierunku prądu i jak do kierunku wektora χ w miejscu elementu ab ; umieszczony wzdłuż siły f obserwator dostrzega ruch obrotowy od i do χ w kierunku przeciwnym kierunkowi ruchu wskazówek na tarczy zegara (rys. 103). W równaniu (4) wielkość l wyrażamy w cm, wielkość i w jednostkach $1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{1/2} / \text{sek}$ (§ 65), wreszcie χ w gaussach (§ 56); otrzymujemy zatem siłę f wyrażoną w dynach, jak być powinno.

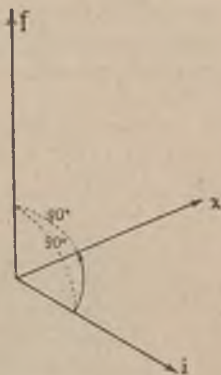
Musimy jednak o tem pamiętać, że powyższe rozumowanie było ograniczone do pewnego szczególnego przypadku. Prąd i płynął tu w obwodzie kołowym,

był zatem skierowany wszędzie prostopadle do promienia r , zarazem prostopadle do wektora χ obcego pola magnetycznego, które, pochodząc od skupionego w punkcie bieguna m , było promieniste. Równanie (4) jest zatem prawdziwe, gdy kierunek i tworzy kąt prosty z kierunkiem χ ; gdy kierunek i tworzy dowolny kąt z kierunkiem χ , wyrażenie siły f przybiera ogólniejszą postać, którą przytaczamy poniżej.

Przypuśćmy, iż element o długości l , w którym płynie prąd natężenia i , znajduje się w obcym polu magnetycznym; jeżeli kierunek prądu i tworzy kąt ($i\chi$) z kierunkiem wektora χ obcego pola, element l doznaje od tego pola siły f wynoszącej

$$5. \quad f = li\chi \sin(i\chi)$$

i umiejscowionej w prostej, prostopadłej zarazem do kierunku prądu i oraz do kierunku wektora χ (utworzonego w miejscu elementu l); obserwator umieszczony wzdłuż siły f (przez którego zatem, od stóp do głowy, przebiega kierunek tej siły) dostrzega, iż ruch obrotowy od i do χ odbywa się w kierunku przeciwnym kierunkowi ruchu wskazówek na tarczy zegara (rys. 104).



Rys. 104.

Jeżeli, jak w powyżej rozważonym przypadku, kąt i tworzy kąt prosty z kierunkiem wektora χ , wówczas ($i\chi$) = 90° , wzór (5) przechodzi zatem w formułę (4). Lecz gdyby kierunek i przypadał w kierunku wektora χ , mielibyśmy ($i\chi$) = 0° , element l nie doznawałby wcale siły ponderomotorycznej.

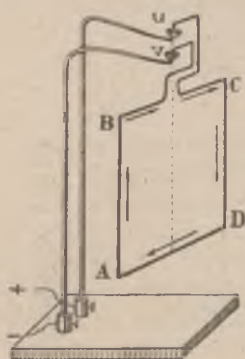
Podane tu twierdzenia możemy objaśniać i sprawdzać zapomocą rozmaitych doświadczeń. Wyobraźmy sobie drut metalowy pq , zawieszony poziomo na cienkich izolujących niciach, jak pokazuje rys. 105; dwiema poprzecznymi cienkimi platynowymi igłami, w które jest zaopatrzony, przewodnik pq dotyka powierzchni rtęci zawartej w naczynkach ss i jest tym sposobem włączony w obwód prądu elektrycznego. Zbliżając biegun magnetyczny, badamy zachowanie się przewodnika pq ; możemy więc sądzić o siłach ponderomotorycznych, których przewodnik ten wówczas doznaje.



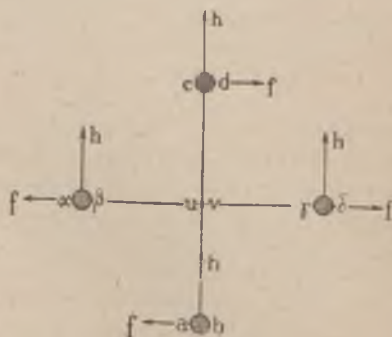
Rys. 105.

Bardzo proste i wymowne doświadczenie zawdzięczamy Ampère'owi. Obwód płaski prostokątny $ABCD$ może kręcić się swobodnie dokoła pionowej osi uv (rys. 106); prąd wpływa ostrzem u , wypływa ostrzem v , które obadwa są zanurzone w rtęci. Skoro tylko połączenia zostały skutecznie, płaszczyzna obwodu ustawia się prostopadle do płaszczyzny miejscowego południka magnetycznego. Nie zapominajmy o tem istotnie, że obwód $ABCD$ prądu znajduje się w polu magnetycznym ziemskim. Znane nam obecnie prawa działania obcego

poła na element prądu zastosujemy po kolei do ramion AB , BC , CD i DA obwodu. Składowa pozioma h natężenia magnetyzmu ziemskiego biegnie poziomo, w płaszczyźnie południka magnetycznego; na poziome ramiona BC oraz DA obwodu działają zatem ponderomotoryczne siły f skierowane pionowo, równoległe do osi uv ; nie wywierają one wpływu na wykręcanie się obwodu dokoła tej właśnie osi. Na pionowe natomiast ramiona AB i CD działają ponderomotoryczne siły f skierowane poziomo; tworzą one parę sił, wprowadzającą obwód w ruch obrotowy dokoła osi uv dopóty, dopóki jego płaszczyzna nie ustawi się prostopadle do składowej h . Przekonywamy się o tem łatwo przy



Rys. 106.



Rys. 107.

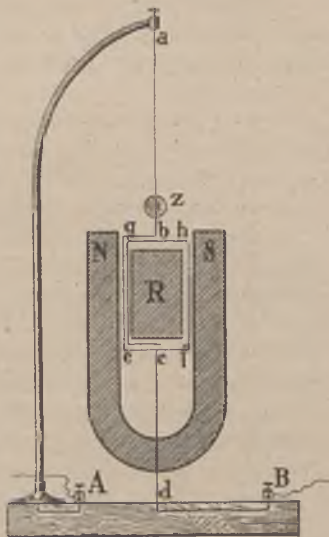
pomocy rys. 107-go, którego płaszczyzna jest pozioma; płaszczyzna obwodu $ABCD$ jest pionowa, ramiona AB i CD są więc widoczne w rys. 107-ym jako rzuty czyli przecięcia poziome, bądź ab i cd , bądź $\alpha\beta$ i $\gamma\delta$. Przez ab oraz $\alpha\beta$ prąd i płynie do góry, przez cd oraz $\gamma\delta$ prąd i płynie ku dołowi. Jeżeli płaszczyzna obwodu zajmuje położenie $abcd$ (t. j. jeżeli w niej właśnie przypada h), siły f , które działają na ramiona AB i CD , skłaniają obwód do obrotu dokoła osi uv . Gdy płaszczyzna obwodu zajmie położenie $\alpha\beta\gamma\delta$ prostopadłe do kierunku h , ponderomotoryczne siły f , jak widzimy, mogłyby chyba tylko odkształcić obwód, gdyby on nie był sztywny, ale wprowadzić go w obrót nie mogą.

§ 73. Galwanometry Kelvina. Ampermetry.

Z ponderomotorycznych sił, których w obcym polu magnetycznym doznaje obwód prądu, skorzystał Lord Kelvin dla zbudowania nowego typu prądomierzy, odmiennych od znanych nam z § 67-go galwanometrów i w niejednym względzie od nich dogodniejszych. Myśl Kelvina służy dziś do budowy mnóstwa naukowych i technicznych narzędzi. Istotną składową częścią tych przyrządów bywa zwykle cewka ruchoma, umieszczona pomiędzy biegunami silnego magnesu lub elektromagnesu; gdy przepuszczamy przez nią prąd, którego natężenie pragniemy

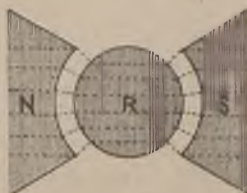
zmierzyć, cewka wykręca się; z wykręcenia cewki (lub wskazówki albo zwierciadełka, które połączyliśmy z cewką) wnosimy o natężeniu przepuszczonego prądu.

Rozpowszechniony typ (Deprez-d'Arsonval) galwanometrów Kelvina ma budowę następującą. Pomiędzy biegunami magnesu NS (rys. 108), na cienkim metalowym drucie ab wisi cewka prostokątna $efgh$ (na rysunku wskazana schematycznie); od dołu, w punkcie c , cewka ta łączy się z innym cienkim metalowym drutem cd utwierdzonym w d . Gdy prądu w cewce nie ma, jej płaszczyzna ma być równoległa do linii magnetycznego pola. Przypuśćmy, że prąd wpływa do A , drogą Aab dopływa do cewki (którą okrąża w kierunku $bgefhc$) wreszcie przez cdB odpływa do pozostałych części obwodu. Ramiona poziome cewki (hbg , ecf) nie doznają działania sił ponderomotorycznych, na ramiona pionowe (ge , fh) wywierane są siły, umiejscowione w prostych prostopadłych do płaszczyzny cewki lecz skierowane przeciwnie. Cewka może kręcić się swobodnie około osi $abcd$; gdy prąd płynie, cewka znajduje się pod wpływem pary sił, która stara się jej płaszczyznę ustawić prostopadle do linii magnetycznego pola (por. § 72).



Rys. 108.

Ów obrót cewki łączy się atoli ze skręcaniem drutów ab i cd (§ 30 tomu II-go), opiera mu się zatem sztywność drutów; gdy sprężysta reakcja drutów dorównywa ponderomotorycznemu działaniu pola, układ $abgefhcd$ wraz ze zwierciadełkiem z jest w równowadze. Kąt obrotu odczytujemy metodą znaną z § 67-go. Wewnątrz cewki (opasany przez nią, ale bez zetknięcia) znajduje się rdzeń R w postaci walca, sporządzonego z miękkiego żelaza. Obecność tego rdzenia przede wszystkim wzmaga znacznie pole magnetyczne (§ 70); nadto zaś wykręca nieco linie pola (rys. 109), tak iż one biegną przez cewkę w kierunkach promieni walca R . Wynika stąd ważna zaleta przyrządu; gdy cewka wykręca się, skłaniająca ją do obrotu para sił pozostaje niezmienna; dlatego wykręcenie jest proporcjonalne do natężenia prądu. Ponieważ nadto w wąskim odstępnie pomiędzy N lub S a R pole magnetyczne jest bardzo silne, przeto, posługując się galwanometrem Kelvina, możemy zaniedbywać zakłócenia pochodzące np. od prądów elektrycznych obcych, od pola magnetycznego ziemskiego i t. p. Czułość przyrządów, zaopatrzonych w ruchomą cewkę, bywa natomiast zazwyczaj mniejsza niż czułość galwanometrów opisanych w § 67-ym.



Rys. 109.

Ampermetry (lub, jak mawia się niekiedy, *ammetry*), któremi posługuje się dzisiaj codziennie przemysł elektrotechniczny, działają według objaśnionych tu

zasad; cewka wisi w nich na sprężynkach przypominających te, które znane są z kieszonkowych zegarków (rys. 4, § 5 tomu I-go); dzięki temu urządzeniu przyrząd staje się przenośny. Odchylenia cewki wskazuje wskazówka, biegnąca przed skalą łukową; jej podziałkę sporządza się przez kalibrowanie przyrządu.

Zadania.

1. Umieściwszy się pod przewodem biegnącym z południa na północ i niosącym w sobie potężny prąd elektryczny, spostrzegamy, że północny biegun igiełki deklinacyjnej odchyła się ku zachodowi. W jakim kierunku płynie prąd w przewodzie?

2. Spoglądając na obwód kołowy płaski, leżący poziomo, dostrzegam, iż prąd w nim płynie w kierunku ruchu wskazówek na tarczy zegara. Jak względem mnie skierowana jest siła, którą prąd wywiera na biegun magnetyczny południowy umieszczony w środku obwodu?

3. Określić amperosekundę, wattminutę, woltamperogodzinę; podać ich stosunek do znanych jednostek. Dlaczego nie kupujemy kulombów? dlaczego elektrownia w kilowattgodzinach sporządza rachunki? Dzielność 1 konia parowego wyrazić w woltamperach.

4. W środku kołowego obwodu, umieszczonego w płaszczyźnie magnetycznego południka, znajduje się magnesowa igiełka; wychyla się ona pod działaniem prądu płynącego w obwodzie. Czy kąt wychylenia jest proporcjonalny do natężenia prądu? Nie zmieniając natężenia prądu, skracamy do połowy promień obwodu; jak zmieni się kąt wychylenia?

5. W jakich jednostkach wyraża się redukcyjny współczynnik busoli stycznych?

6. Dla pewnej busoli stycznych mamy $n = 1$, $r = 50$ cm; dostrzegamy $\theta = 32^\circ$. Kładąc $h = 0.2$ gaussa, obliczyć natężenie prądu.

7. Spoglądamy na poziome przecięcia krańcowe elektromagnesu zbudowanego w kształcie podkowy; w jakim kierunku wydaje nam się, iż krąży prąd dokoła bieguna N i dokoła S ?

8. Czy możemy wyobrazić sobie, że pole magnetyczne ziemskie wynika z obecności pewnych ładunków elektrycznych rozlanych na powierzchni kuli ziemskiej i uczestniczących w jej ruchu obrotowym?

9. Przez solenoid o długości 25 cm, liczący 50 skrętów, płynie prąd elektryczny o natężeniu 0.5 ampera; obliczyć wektor magnetyczny we wnętrzu solenoidu. Zakładając, że rozległość poprzecznego przecięcia solenoidu wynosi 1 cm^2 , obliczyć ilość magnetyzmu zawartą w biegunach magnesu, który wytwarzałby nazewną to samo pole, jakie wytwarza solenoid.

10. Prostokątna cewka galvanometru typu Deprez-d'Arsonval ma 5 cm długości, 1 cm szerokości; na cewce znajduje się 25 skrętów nawiniętego drutu. Cewka ta porusza się w polu 300 gaussów, sprawianem przez otaczający ją magnes. Znaleźć momenty sił, które działają na cewkę, gdy płynie przez nią prąd o natężeniu 0.001 ampera.

11. Prąd trwały, który w przeciągu 30 minut wydzielił 0.169 gr (dwuwartościowej) miedzi w woltametrze, sprawiał w busoli stycznych odchylenie igły wynoszące 45° . Obliczyć współczynnik redukcyjny busoli. Wiedząc, że obwód busoli jest 8-krotny i że promień obwodu wynosi średnio 8.15 cm, obliczyć wartość poziomej składowej natężenia magnetyzmu ziemskiego w miejscu spostrzeżeń.

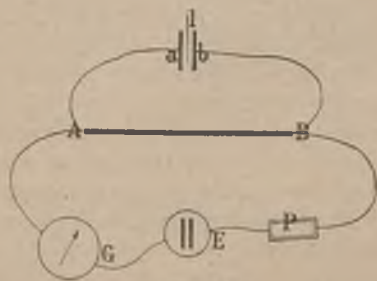
ROZDZIAŁ PIĄTY.

Prawa prądów trwałych.

§ 74. Opór elektryczny. Prawo Ohma.

Wyobraźmy sobie jednolity przewodnik obdarzony elektrycznym ładunkiem. Gdy ładunek jest w równowadze, potencjał we wszystkich punktach przewodnika jest jednakowy; lecz jeżeli w przewodniku płynie prąd elektryczny, potencjał w różnych punktach musi być rozmaity. Prądowi, jak wiadomo, przypisujemy kierunek, zwrócony od miejsc, w których potencjał ma wartość wyższą, do miejsc, w których ma niższą.

Przypuśćmy, że w obwodzie *EGABPE* (rys. 110) krąży prąd trwały, pochodzący z ogniwa *E*; w tym obwodzie znajduje się galvanometr *G*, opornica *P* oraz drut metalowy *AB*, którego poprzeczne przecięcie jest wszędzie jednakowe. Dzięki opornicy możemy zmieniać natężenie prądu w obwodzie; każde natężenie możemy zmierzyć przy pomocy galvanometru. Końce drutu *AB* łączymy z płytkami *a, b* elektrometru jednolistkowego heterosta-



Rys. 110.

tycznego, którego listek *l* naładowany jest ze źródła o potencjale wysokim i stałym; w każdym stadium doświadczenia możemy przekonać się tym sposobem, jaka różnica istnieje między wartością V_A , którą potencjał ma w punkcie *A* a wartością V_B , którą ma w punkcie *B*. Posługując się tym samym wciąż drutem *AB* i utrzymując go w temperaturze stałej (i wogóle w stanie niezmiennym), zmieniamy natężenie płynącego prądu i dla każdego natężenia i mierzymy odpowiednią wartość różnicy $V_A - V_B$; przekonujemy się bez trudności, że i oraz $V_A - V_B$ są proporcjo-

nalne wzajemnie do siebie. Stosunek różnicy potencjałów panujących na końcach przewodnika do natężenia płynącego w nim prądu jest zatem wielkością *stałą*, niezależną od tej różnicy ani od owego natężenia. Lecz gdybyśmy użyli, zamiast drutu AB , innego, cieńszego albo grubszego, krótszego albo dłuższego, gdybyśmy poddali ten sam drut AB wpływowi niższej lub wyższej temperatury, gdybyśmy go skrócili lub wydłużyli, gdybyśmy drut miedziany zastąpili przez stalowy albo nikłowy przez srebrny, stosunek $(V_A - V_B)/i$ zmieniłby się natychmiast. Stosunek ten, który w danym stanie przewodnika jest jego charakterystyczną własnością, nazywamy *elektrycznym oporem*; oznaczając go przez R , piszemy

$$1. \quad V_A - V_B = Ri.$$

Opór elektryczny przewodnika nie zależy od natężenia płynącego w nim trwałego prądu ani od różnicy potencjałów, która w przewodniku panuje; opór jest własnością przewodnika, zależną od jego postaci i rozmiarów, od jego chemicznego składu, od temperatury i innych warunków, w których go doświadczamy. Twierdzenie to, ważne w fizyce, nazywamy *prawem Ohma*.

Prawo Ohma stosuje się nie tylko do całkowitego drutu; stosuje się również do każdej jego części z osobna. Stosuje się ono także do przewodników dowolnej geometrycznej postaci. Wybieramy punkty A i B w przewodniku i prowadzimy przez nie ekwipotencjalne powierzchnie S_A i S_B ; wartości potencjału na tych powierzchniach oznaczmy przez V_A i V_B . Przez R rozumiemy opór części przewodnika, zawartej między powierzchniami S_A i S_B a zewnętrznym ograniczeniem przewodnika. Prawo (1) łączy ze sobą opór R , różnicę $V_A - V_B$ oraz natężenie i prądu trwałego płynącego w uważanej części przewodnika.

W powyższym przedstawieniu rzeczy wyobraziliśmy sobie dla określoności, że prąd płynie przez metalowy przewodnik. Prawo Ohma stosuje się jednak nie tylko do metali; gdy trwały prąd płynie przez elektrolit ciekły, prawo to jest również spełnione. Bardzo rozrzedzone ciała gazowe stanowią wyjątek; gdy przewodzą prąd elektryczny, prawo Ohma nie jest zachowane. Przewodnictwo rozrzedzonych gazów (do którego powrócimy w VIII-ym rozdziale) jest więc anormalne; natomiast przewodnictwo metali i elektrolitów jest jaknajściślej posłuszne prawu Ohma, od którego, mimo umyślnych doświadczeń, nie zależono w tych ciałach najmniejszych uchybień.

Proste prawo normalnego elektrycznego przewodnictwa, którem upamiętnił swe imię, odkrył pomiędzy 1825 a 1827 rokiem Jerzy Szymon Ohm, skromny nauczyciel szkół średnich w Kolonji; jest ono zupełnie podobne do prawa normalnego cieplnego przewodnictwa, do prawa, które kilkanaście lat przedtem odgadł był wielki francuski uczony Fourier (§§ 102 i 112 tomu II-go).

§ 75. Jednostka oporu. Ohm.

Powszechnie dziś przyjęta jednostka elektrycznego oporu nazywa się *ohmem*; jej określenie jest następujące: opór przewodnika wynosi 1 ohm, jeżeli czynna na jego krańcach różnica potencjałów równa 1 woltowi sprawia w nim natężenie prądu trwałego równe 1 amperowi. Odwołując się do równania (1) poprzedzającego artykułu, możemy zatem powiedzieć, że

$$1. \quad 1 \text{ wolt} = 1 \text{ ohm} \times 1 \text{ amper.}$$

Gdy wyraziliśmy w ohmach opór przewodnika, natężenie zaś płynącego prądu w amperach, z formuły wypowiadającej prawo Ohma wypada panująca na krańcach różnica potencjałów podana w woltach.

Jednostka elektrycznego oporu, określona przez wzór (1), otrzymała dla ścisłości nazwę *ohma prawdziwego* lub *teoretycznego*. Za urzeczywistnienie tej jednostki (czyli za t. zw. *wzorzec* elektrycznego oporu) przyjęto *ohm międzynarodowy* t. j. opór, który trwałemu elektrycznemu prądowi przeciwstawia, w temperaturze 0°C, kolumna rtęci jednostajnego poprzecznego przecięcia, mająca długość = 106.3 cm oraz masę = 14 4521 gr; rozległość poprzecznego przecięcia takiej kolumny jest bardzo mało różna od 1 mm². Ohm międzynarodowy jest prawdopodobnie 1.0003 razy większy od prawdziwego; ponieważ jednak możemy znacznie dokładniej porównywać pomiędzy sobą rozmaite opory aniżeli zbudować wzorzec prawdziwego ohma, postanowiono zatem (na konferencji w Londynie 1908 r.) posługiwać się nadal ohmem międzynarodowym, bez względu na jego istotny stosunek do prawdziwego.

Elektromagnetyczną jednostkę oporu, zgodnie z prawem Ohma, określamy jak następuje

$$2. \quad 1 \text{ el.-magn. jedn. oporu} = \frac{1 \text{ el.-magn. jedn. potencjału}}{1 \text{ el.-magn. jedn. natężenia prądu}}$$

Z twierdzeń (9) i (11) § 65-go wyprowadzamy, że

$$3. \quad 1 \text{ el.-magn. jedn. oporu} = 1 \text{ cm/sek}$$

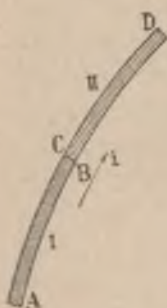
jest zatem identyczna ze zwykłą jednostką prędkości. Z określenia ohma oraz z założeń (1) i (5) § 66-go wynika, że

$$4. \quad 1 \text{ ohm} = 10^9 \text{ el.-magn. jedn. oporu.}$$

§ 76. Opór przewodników złączonych.

Wyobraźmy sobie dwa druty I i II, wyrobione z tej samej substancji, np. *AB* i *CD* (rys. 111) i przypuśćmy, że połączyliśmy je *w szereg*; wyrażenie to znaczy, że końcowy punkt *B* pierw-

szego drutu znajduje się w zetknięciu z początkowym punktem C drugiego. Oznaczmy przez V_A, V_B, V_C, V_D wartości potencjału w punktach A, B, C, D, przez R_1 i R_2 opory drutów, przez i natężenie prądu trwałego, który przez nie płynie. Według § 74-go mamy wówczas



Rys. 111.

$$1. \quad V_A - V_B = R_1 i; \quad V_C - V_D = R_2 i.$$

Skoro jednak punkty B i C dwóch chemicznie i fizycznie jednakowych drutów są w zetknięciu, przeto $V_B = V_C$, zatem

$$2. \quad V_A - V_D = (R_1 + R_2) i.$$

Rozumiejąc przez R opór całości AD złożonej z drutów I i II, mamy według prawa Ohma

$$3. \quad V_A - V_D = R i$$

z porównania zatem wzorów (2) i (3) wyprowadzamy

$$4. \quad R = R_1 + R_2.$$

Łączymy teraz początkowy punkt A pierwszego drutu z początkowym punktem C drugiego, oraz końcowy punkt B pierwszego drutu z końcowym D drugiego; powiadamy wówczas, że AB i CD tworzą *rozgałęzienia* prądu, że są włączone w obwód *równoległe* (rys. 112). Oznaczmy przez i natężenie prądu płynącego od M do (AC) lub od (BD) do N; przez i_1 rozumiejmy natężenie prądu płynącego w AB, przez i_2 natężenie prądu w CD. Skoro prądy i, i_1, i_2 są trwałe, ładunek, przenoszony w ciągu sekundy przez dowolne poprzeczne przecięcie gałęzi M(AC) lub (BD)N jest równy sumie ładunków przenoszonych w ciągu sekundy przez dowolne poprzeczne przecięcie gałęzi AB i CD; zatem

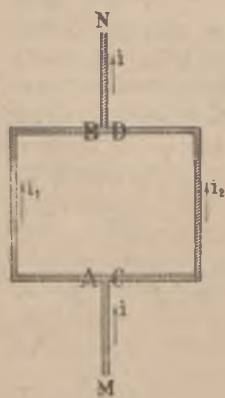
$$5. \quad i = i_1 + i_2.$$

Mamy jak wyżej

$$6. \quad V_A - V_B = R_1 i_1; \quad V_C - V_D = R_2 i_2.$$

Obecnie jednak $V_A = V_C, V_B = V_D$, dlatego z (6) otrzymujemy

$$7. \quad R_1 i_1 = R_2 i_2 \quad \text{czyli} \quad i_1 : i_2 = R_2 : R_1$$



Rys. 112.

z równań zaś (5) i (6):

$$8. \quad i = (V_A - V_B) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = (V_C - V_D) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Zespół gałęzi AB i CD spróbujmy zastąpić przez jeden drut PQ , którego opór wynosi R . Jeżeli R czyni zadosyć warunkowi

$$9. \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

wnosimy z równania (8), że PQ może przenieść trwały prąd i bez zmiany panującej na krańcach różnicy potencjałów; gdybyśmy mieli

$$10. \quad V_P - V_Q = V_A - V_B = V_C - V_D,$$

prąd w PQ miałby znowu natężenie i . Nazywamy R oporem *równoważnym* rozgałęzieniu oporów R_1 i R_2 *równolegle włączonych* (lub *spiętych*).

Z równania (7) wyprowadzamy wniosek, który ma mnóstwo zastosowań w praktyce elektrotechnicznej. Przypuśćmy, że opór R_1 drutu AB jest bardzo mały w porównaniu do oporu R_2 drutu CD ; natężenie i_1 prądu płynącego przez AB jest wówczas bardzo wielkie w porównaniu do i_2 ; niemal cały prąd i kieruje się przez AB , ku CD zwraca się tylko znikoma część prądu. Drut AB nazywamy wówczas *upustem* lub też z angielska *shuntem* (dosłownie: boczną odnogą) drutu CD . W shunt słabego oporu bywa naprzykład zwykle zaopatrzony ampermetr (§ 73); przez przyrząd mierniczy płynie drobny ułamek prądu krążącego w głównym obwodzie.

§ 77. Opór właściwy; przewodnictwo właściwe.

Wyobraźmy sobie drut AZ (rys. 113), co do ustroju i składu ściśle jednostajny; przypuśćmy, że poprzeczne przecięcie drutu jest wszędzie jednakowo rozległe. Niechaj opór drutu AZ wynosi R . Dowolnem poprzecznem przecięciem L dzielimy w myśli drut AZ na części AL i LZ , których opory oznaczamy przez R_1 i R_2 . Według § 76-go



Rys. 113.

$$1. \quad R = R_1 + R_2.$$

Przypuśćmy na chwilę, że długości AL i LZ są sobie równe; druty AL i LZ są wówczas identyczne, zatem $R_1 = R_2$; każdy z tych oporów wynosi $\frac{1}{2}R$. Gdyby długość AM była połową długości MZ , więc trzecią częścią długości AZ , opór R_1 części AM

byłby połową oporu R_2 części MZ , więc trzecią częścią oporu R całości AZ . Krótko mówiąc, *w drucie jednostajnego ustroju i składu oraz jednakowego wszędzie poprzecznego przecięcia, opór każdej części jest proporcjonalny do jej długości.*

Wyobraźmy sobie dwa przewodniki, sporządzone z tej samej substancji i w każdym względzie jednakowe; dla określoności przypuśćmy, że mają postać długich prostopadłościanów, jednakowej długości i jednakowego poprzecznego przecięcia (rys. 114);



Rys. 114.

prąd przez nie płynie w kierunku długości. Gdy złożymy ze sobą przewodniki którekolwiek ze ścian równoległych do długości, powstanie nowy przewodnik tej samej długości lecz podwójnego poprzecznego przecięcia. Ponieważ przewodniki są włączone w obwód «równolegle», przekonywamy się z formuły (9)

poprzedzającego artykułu, że równoważny opór R całości jest równy połowie oporu każdego z przewodników składowych. Gdybyśmy podobnie złożyli ze sobą trzy jednakowe przewodniki, powstałby nowy przewodnik tej samej długości ale potrójnego poprzecznego przecięcia; równoważny opór R całości byłby równy trzeciej części oporu każdego z przewodników składowych. *Gdy długość drutu pozostaje niezmienna, jego opór (caeteris paribus) jest odwrotnie proporcjonalny do rozległości poprzecznego przecięcia.*

Powyższe wnioski możemy streścić algebraicznie w twierdzeniu następującem. Wyobraźmy sobie drut jednostajnego ustroju i składu oraz jednakowego wszędzie poprzecznego przecięcia. Oznaczmy przez l długość drutu, przez S rozległość poprzecznego przecięcia. Opór R drutu piszemy w postaci

$$2. \quad R = r \frac{l}{S}$$

gdzie r jest spółczynnikiem proporcjonalności czyli stałą niezależną od l i od S , zależną od chemicznego składu drutu a także od jego fizycznego stanu, przedewszystkiem od temperatury; stałą tę r nazywamy *oporem właściwym* substancji, z której przewodnik jest sporządzony. Odwrotność oporu właściwego

$$3. \quad c = \frac{1}{r}$$

nazywamy *przewodnictwem właściwym* substancji. Jednostką oporów właściwych, jak widzimy z formuły (2), jest $1 \text{ ohm} \times 1 \text{ cm}$; jednostką przewodnictw jest $1/\text{ohm} \times \text{cm}$.

Stosując naprzykład równanie (2) do rtęci w 0°C , mamy, podług § 75-go:

$$4. \quad 1 \text{ ohm} = r_{\text{Hg}} \times 106.3 \text{ cm}/0.01 \text{ cm}^2$$

skąd otrzymujemy

$$5. \quad r_{\text{Hg}} = 0.000094073 \text{ ohm} \times \text{cm} (0^\circ\text{C}).$$

W następującej tabliczce przytaczamy wartości oporu właściwego r niektórych substancji. Wszystkie wartości odpowiadają temperaturze 0°C . Za jednostkę przyjęto wszędzie $10^{-6} \text{ ohm} \times \text{cm}$.

Srebro Ag:	1.5	Żelazo Fe:	9.5
Miedź Cu:	1.7	Platyna Pt:	11.0
Glin Al:	2.8	Ołów Pb:	19.5
Cynk Zn:	5.7	Rtęć Hg:	94.073
Aljaże: Manganin (Cu, Mn, Ni):		42.0	
Konstantan (Cu, Ni):		49.0	
Inwar (tom II, § 93):		75.0	

Najczystsza woda, jaką można dziś sporządzić: 2.5×10^{13}

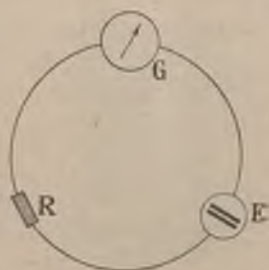
Nasycony roztwór soli NaCl w wodzie (18°C): 4.63×10^3

Roztwór 40% kwasu HCl w wodzie (18°C): 1.94×10^3

Gdy temperatura podnosi się, opór właściwy wszystkich czystych, chemicznie prostych metali *wzrasta*. W obwodzie stałego ogniwa umieścimy zwój drutu żelaznego oraz lampkę żarową; ogrzewając zwój w płomieniu gazowym, dostrzegamy, że lampka świeci słabiej; oziębiając zwój energicznie, wywołujemy silne świecenie. Jak wykazał w ostatnich czasach Kamerlingh Onnes w Lejdzie, w nadzwyczajnie niskich temperaturach, które można osiągnąć przy pomocy skroplonego helu (§ 124 tomu II-go), opór niektórych metali znika niemal zupełnie; metale te, według wyrażenia holenderskiego badacza, stają się wówczas *ponadprzewodnikami*.

Opór niektórych *aljaży* (stopów), jak konstantan, nikielin, zwłaszcza zaś *manganin*, zależy nieznacznie od temperatury; z tego powodu wzorce oporu bywają dziś zwykle sporządzane z manganinu. Do wyrobu drutów przewodzących prąd elektryczny przemysł elektrotechniczny postępuje się miedzią, często też t. zw. *bronzem* krzemowym lub fosforowym, który chemicznym składem różni się mało od miedzi.

Urządzenie *opornic* opisaliśmy wyżej w § 68-ym. Wyobraźmy sobie, że pragniemy zmierzyć opór R pewnego przewodnika (rys. 115). Tworzymy obwód, do którego, oprócz ogniwa E , włączamy nieznany opór R tudzież galwanometr G . Zmierzywszy natężenie płynącego w tych warunkach prądu, wyłączamy opór R i na jego miejsce włączamy opornicę. Gdy w opornicy dobierzemy taki opór, ażeby natężenie prądu przybrało napowrót poprzednią wartość, możemy być pewni, że suma włączonych w opornicy oporów



Rys. 115.

jest równa oporowi R , który mieliśmy zmierzyć; zakładamy przytem, że elektromotoryczna siła użytego ogniwa E jest sama przez się niezmienna. Prosty ten sposób mierzenia oporów nazywa się metodą *substytucji* (podstawienia).

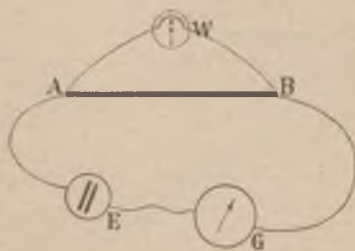
Różnicę potencjałów w dwóch punktach przewodnika, przez który płynie prąd elektryczny, możemy zmierzyć t. zw. *woltmetrem*. Jest to w zasadzie galwanometr, który przeciwstawia prądowi opór bardzo znaczny, wynoszący niekiedy tysiące ohmów. Przypuśćmy, że mamy zmierzyć różnicę wartości, które okazuje potencjał w punktach A i B obwodu $EABGE$ (rys. 116), zawierającego ogniwo E i galwanometr G . Do punktów A i B przyłączamy woltmetr W , tak iż AB staje się *shuntem* woltmetru; przez przyrząd ten kieruje się drobna część prądu, natężenie więc prądu krążącego w obwodzie głównym $EABGE$ zmienia się nieznacznie; potencjały w miejscach A oraz B będą niemal takie, jakie były przed przyłączeniem woltmetru.

Prąd, przez woltmetr płynący, aczkolwiek bardzo słaby, wychyli jednak znacznie wskazówkę, jeśli cewka galwanometru ma wysoką liczbę skrętów. Wiemy z prawa Ohma, że natężenie tego prądu będzie proporcjonalne do różnicy potencjałów czynnej pomiędzy A i B . Można zatem zaopatrzyć woltmetr w skalę, wyrażoną w woltach.

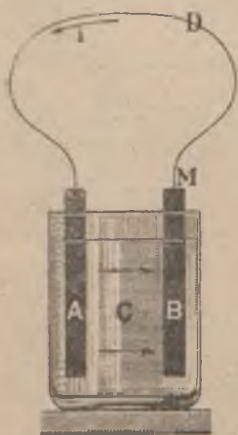
§ 78. Zastosowanie prawa Ohma do zamkniętego obwodu.

Wyobraźmy sobie dwie płyty wyrobione z dwóch różnych metali A , B i zanurzone w elektrolitycznym roztworze C (rys. 117); taka całość, jak wiadomo, jest najprostszem ogniwnem. Obwód ogniwa zamykamy drutem sporządzonym z dowolnego metalu D . Przypuśćmy, że prąd w obwodzie płynący jest trwały; że krąży w ogniwie w kierunku od A do B , w drucie zaś D od B do A . Uważajmy punkt M zetknięcia płyty B z drutem D ; niechaj wartość potencjału metalu D w punkcie M wynosi V_M . Posuwamy się od punktu M w kierunku krążenia prądu; spotykamy wówczas coraz inne wartości potencjału. Dopóki idziemy wzdłuż przewodnika jednolitego, potencjał maleje stosownie do prawa (1) § 74-go; gdy z jednego przewodnika przechodzimy do innego przewodnika, potencjał skacze

o różnicę zależną od natury i od stanu przewodników (§ 38). Lecz gdy okrążymy obwód dokoła i powrócimy do metalu D



Rys. 116.



Rys. 117.

w punkcie M , potencjał musi przybrać napowrót wartość V_M ; suma wszystkich spadków wzdłuż przewodników oraz wszystkich skoków na granicach zetknięcia musi być równa zeru. Oznaczając przez R_A, R_B, R_C opory płyt A i B oraz roztworu C , przez r opór drutu D , przez i natężenie prądu płynącego w obwodzie i posługując się, dla wyobrażenia granicznych skoków potencjału, znanymi z rozdz. II-go symbolami, mamy zatem

$$1. \quad V_M - ri + D/A - R_A i + A/C - R_C i + C/B - R_B i + B/D = V_M$$

skąd zaraz wynika

$$2. \quad D/A + A/C + C/B + B/D = (r + R_A + R_B + R_C)i.$$

Lecz podług prawa Volty (§ 39) mamy

$$3. \quad D/A + A/B + B/D = 0.$$

Rozumiejąc przeto przez

$$4. \quad R = R_A + R_B + R_C$$

łączny opór ogniwa (tak zwany jego *opór wewnętrzny*) oraz przez

$$5. \quad \mathcal{E} = B/A + A/C + C/B$$

jak dawniej (§ 39), *elektromotoryczną siłę ogniwa*, wyprowadzamy z równań (2) i (3) co następuje

$$6. \quad \mathcal{E} = (r + R)i.$$

Równanie (6) wyraża prawo Ohma w zastosowaniu do zamkniętego obwodu. Zmierzywszy, przy pomocy opornicy, opory r i R , siłę zaś elektromotoryczną $\mathcal{E}$ wyznaczywszy elektrometrycznie, możemy obliczyć natężenie prądu i z formuły (6), nie posługując się wcale galwanometrem.

Przypuśćmy, że źródłem prądu krążącego w obwodzie jest zespół n jednakowych ogniw złączonych *w szereg* (§ 40); całkowita siła elektromotoryczna czynna w obwodzie wynosi wówczas $n\mathcal{E}$, opór zaś t. zw. wewnętrzny jest nR . Natężenie i prądu płynącego w obwodzie dane jest w tym razie przez

$$7. \quad n\mathcal{E} = (r + nR)i.$$

Przypuśćmy przeciwnie, że źródłem prądu jest zespół n jednakowych ogniw spiętych *równolegle*; siła elektromotoryczna czynna w obwodzie jest wówczas $\mathcal{E}$, zupełnie tak, jak gdyby pracowało w nim tylko jedno ogniwo, natomiast opór wewnętrzny jest n razy mniejszy niż opór jednego ogniwa. Mamy w tym razie

$$8. \quad \mathcal{E} = \left(r + \frac{R}{n}\right)i.$$

§ 79. Rozpraszanie energii elektrycznej w przewodnikach.

Weźmy na uwagę dwa punkty a i b drutu, w którym, w kierunku od a do b , płynie prąd elektryczny. Oznaczmy przez V_a i V_b wartości potencjału w punktach a i b , przez R rozumiejmy opór części ab , przez i natężenie płynącego w drucie prądu. Według twierdzenia (1) § 74-go mamy

$$1. \quad V_a - V_b = Ri.$$

Z tem twierdzeniem porównujemy inną znaną nam prawdę. Podług § 37-go praca W , którą w przeciągu czasu τ łożą siły pola elektrycznego na utrzymanie między a i b prądu o natężeniu i , wynosi

$$2. \quad W = i(V_a - V_b)\tau.$$

Wyrugowawszy różnicę $V_a - V_b$ z (1) i (2), znajdujemy

$$3. \quad W = Ri^2\tau.$$

Ażeby zrozumieć znaczenie równania (3), musimy odwołać się do sposobów myślenia, do których prowadzą wielkie *zasady zachowania i rozpraszania energii*. Z różnych rozdziałów tej książki jest nam wiadomo, że praca, wykonana przeciwko zachowawczym siłom, w zachowawczym układzie, nie ginie, że gromadzi się w postaci zasobu pracy, w postaci naprzykład grawitacyjnej, sprężystej, elektrostatycznej, magnetostatycznej, wogóle *potencjalnej* albo też w postaci *kinetycznej* energii; gdy odwracamy zaszłą przemianę, czerpiemy z takiego zapasu energii i odbieramy napowrót pracę, którą wydaliśmy. Nie wszystkie jednak układy są zachowawcze; zjawiska w naturze są *nieodwracalne*. Praca wyłożona przeciwko siłom niezachowawczym, w nieodwracalnym zjawisku, wprawdzie nie znika, nie obraca się w niwecz, ale ucieka i rozprasza się, wówczas zaś najczęściej przestaje nam być pożyteczna. Najpospolitszą postacią rozproszonej energii jest ciepło. Gdziekolwiek ruch ciał materialnych natrafia na tarcie, na opór, tam pojawia się ciepło, które powstało kosztem mechanicznej energii; skoro zaś przeobraziła się w ciepło, energia przez przewodnictwo, przez konwekcję, przez promieniowanie pierzcha, rozbiega, rozplywa się. Tarcie, lepkość, dyfuzja, przewodzenie ciepła, niedoskonała sprężystość, wszystko to są przykłady *zjawisk dysypacyjnych*, w których energia, prze-

mieniając się w ciepło, wyzwala się z pod ludzkiego panowania, nieuchwytnie uchyla się od naszego kierunku i chociaż nie ulega zagładzie, nie ginie w rachunku natury, przepada dla naszych celów i dla naszego użytku. Do klasy zjawisk dysypacyjnych należy w pełni zjawisko płynięcia prądu elektrycznego przez metal lub elektrolit; przewodnictwo elektryczne jest nawet najlepszym przykładem, jest typem tych zjawisk, ponieważ jego mechanizm jest stosunkowo prosty. Metal lub elektrolit wobec sił elektrycznego pola *nie* jest zachowawczym układem; przeciwnie, jest skrajnie niezachowawczy, rozprasza całą pracę, której siły te dostarczają. *Praca W , którą obliczyliśmy w powyższem równaniu (3), w metalu lub elektrolicie zamienia się całkowicie na ciepło*; zrozumienie tej prawdy zawdzięczamy J. P. Joule'owi (1840 r.), temu samemu badaczowi, którego imię pozostanie związane z ustanowieniem pierwszej zasady nauki termodynamiki.

Rozumiejąc przez Q ilość ciepła, która wytwarza się w czasie τ w przewodniku metalicznym lub elektrolitycznym, o oporze R , gdy w przewodniku tym płynie prąd o natężeniu i , powiadamy:

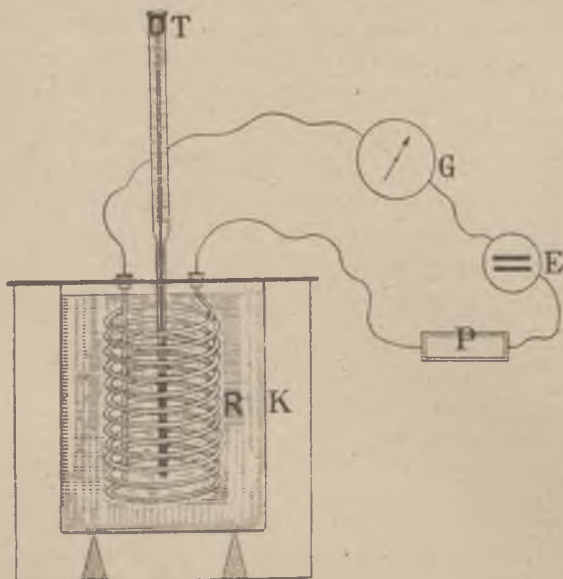
$$4. \quad Q = W = Ri^2\tau.$$

*Ilość ciepła Q zależy tylko od czasu τ ; od oporu R i od natężenia prądu i ; caeteris paribus jest proporcjonalna do długości okresu τ , do oporu R i do kwadratu natężenia prądu i . Niezliczone pomiary potwierdziły słuszność i ścisłość tych wniosków, których ogół nazywamy *prawem Joule'a*.*

Przypuśćmy, że opór R wyrażamy w ohmach, natężenie prądu i w amperach, długość okresu τ w sekundach; z równania (3) otrzymamy wówczas pracę W , z równania (4) ilość ciepła Q , wyrażone w joule'ach (por. §§ 66 i 75). Wiemy jednak z §§ 107 i 112-go tomu II go, że 1 kaloria jest równoważna 4.18×10^7 ergom czyli 4.18 joule'om; 1 joule jest przeto równoważny 0.239 kalorii. Jeżeli więc przez przewodnik o oporze R (wyrażonym w ohmach) płynie prąd natężenia i (w amperach), wówczas w ciągu czasu τ (w sekundach) pojawia się w tym przewodniku ilość ciepła, która, zmierzona w kaloriach, wynosi $0.239 Ri^2\tau$.

Prawdziwość prawa Joule'a możemy potwierdzić prostem doświadczeniem. Do obwodu, zawierającego ogniwo trwałe E , galwanometr G i opornicę P (rys. 118), włączamy węzownicę wyrobioną z drutu metalowego; węzownicę tę umieszczamy w cieczy (np. naftie lub oliwie) kalorymetru (por. rozdz. VIII-my

tomu II-go). Opór R wężownicy jest nam znany. Gdy prąd płynie w obwodzie przez pewien przeciąg czasu, termometr wskazuje, że temperatura podniosła się.



Rys. 118.

Znając ciepłą pojemność wężownicy oraz cieczy, termometru i naczynia kalorymetru, obliczamy ilość ciepła, którą prąd wiadomego natężenia wytworzył w danym okresie czasu w łonie przewodnika znanego oporu.

Wyobraźmy sobie, że do obwodu przedstawiającego opór słaby włączyliśmy drut nader cienki, którego opór jest stosunkowo ogromny; w drucie pojawia się bardzo znaczna ilość ciepła, jego temperatura podnosi się, dopóki nieuchronne ciepłe straty, które drut w czasie np. 1 sekundy ponosi, nie

dorównają dopływowi ciepła, wynikającemu w tym samym czasie z rozpraszania się elektrycznej energii. Ostateczne podniesienie temperatury drutu zależy więc od natężenia prądu, od oporu drutu oraz od zdolności i możliwości, którą on w danych warunkach posiada, oddawania otoczeniu ciepła przez przewodnictwo, konwekcję i promieniowanie (§§ 101 i 102 tomu II-go). Ażeby okazać rolę, którą gra opór przewodnika w ustanawianiu się cieplnej równowagi, przepuszczamy prąd (do statecznego natężenia) przez łańcuch, złożony ze srebrnych i platynowych naprzemian drucików jednakowej grubości (por. § 77); platynowe druciki rozżarzają się, gdy srebrne są jeszcze ciemne.



Rys. 119.

Z działalności cieplnej prądu elektrycznego korzystamy w mnóstwie zastosowań praktycznych. Powszechnie znane są narzędzia, zasilane energią elektryczną, służące do gotowania, prasowania, do spajania metali; prąd płynie w nich przez przewodniki, wyrobione zwykle z *nichromu*, aljażu niklu i chromu; w chirurgicznych *elektrokauterach* rozgrzewa się drut platynowy. W t. zw. *stopkach*, które chronią elektryczne przewody od prądów przypadkowo nadmiernych, zawarte bywają druty lub blaszki ołowiane, cynowe, niekiedy srebrne, które, topiąc się, przerywają obwód.

Tomasz Edison w r. 1879 umieścił cienkie węglowe pasemko w szklanej bańce, z której wyciągnął następnie powietrze (§ 54 tomu II-go); tym sposobem

powstała dziś tak rozpowszechniona *lamarka elektryczna żarowa*. Lampki węglowe są stosunkowo tańsze, ale mało wydajne; pasemka węglowego nie możemy w nich rozgrzewać ponad 1800°C , albowiem rozpyla się ono wówczas bardzo prędko. Znacznie wyżej podnosić możemy temperaturę metalicznych włókienek, sporządzanych zwykle z osmu, wolframu (tungstenu) lub tantalu (rys. 119); dlatego lampki żarowe, zaopatrzone w takie włókienka, przy jednakowej świetności, zużywają mniej energii na sekundę niż węglowe. Włókienka umieszcza się dzisiaj nieraz nie w próżni, lecz w czystym azocie. Zwykła lampka żarowa metaliczna wymaga *dzielności* (pracy elektrycznej na sekundę) około 0.5 watta na t. zw. *świecę*.

Zadania.

1. Przy napięciu 110 woltów lampka elektryczna wymaga natężenia prądu 0.5 ampera. Ile wynosi opór lampy?

2. Przez słup rtęci, o temp. 0°C , którego długość wynosi 53.15 cm, poprzeczne zaś przecięcie 0.5 mm^2 , płynie prąd elektryczny o natężeniu 10 amperów; jaka różnica potencjałów istnieje u końców słupa?

3. Znając opór właściwy miedzi w 0°C (§ 77), obliczyć opór linii telefonicznej, utworzonej z drutu miedzianego, długości 1 km, średnicy 1 mm, w tej samej temperaturze.

4. Dwa punkty obwodu są połączone dwoma drutami; opór jednego drutu wynosi 2 ohmy, drugiego 3 ohmy. Obliczyć opór równoważny rozgałęzieniu.

5. W jaki sposób można byłoby dowiedzieć, że elektromotoryczna siła ogniwa nie zależy od rozległości ani od wzajemnej odległości płyt metalowych, które wchodziły w skład ogniwa?

6. Siła elektromotoryczna ogniwa wynosi 1.2 wolta, opór ogniwa wynosi 3 ohmy. Pięć takich ogniw połączono w szereg, przy czem opór zewnętrznego obwodu był równy 15 ohmom; obliczyć natężenie prądu. Jakie będzie natężenie, gdy tę samą liczbę tychże ogniw, przy tym samym oporze zewnętrznym, zełączymy równolegle?

7. Połączyliśmy n ogniw pewnego typu w szereg; opór zewnętrzny wynosił r , natężenie prądu było i_1 . Tę samą liczbę tych samych ogniw spięliśmy równolegle; przy tym samym oporze zewnętrznym r natężenie prądu było i_2 . Dowiedzieć, że: jeżeli opór jednego ogniwa R jest bardzo mały w porównaniu do r (jak to na przykład wydarza się, gdy zewnętrzny obwód jest linią telegraficzną) wówczas przybliżenie $i_1 = ni_2$; jeżeli przeciwnie opór R jest bardzo duży w porównaniu do r , wówczas przybliżenie $i_2 = ni_1$.

8. Przebudowawszy ogniwo, zmniejszyliśmy jego opór do połowy poprzedniej wartości; elektromotoryczna siła ogniwa nie zmieniła się przytem. Jak zmieniło się natężenie prądu, gdy pierwotny opór wewnętrzny jest 500 razy większy, lub gdy jest 500 razy mniejszy niż opór zewnętrzny?

9. Opory dwóch drutów, srebrnego i platynowego, mają być jednakowe; w jakim wzajemnym stosunku powinny stać ich długości, jeżeli poprzeczne przecięcia mają być identyczne? w jakim stosunku powinny stać średnice poprzecznych przecięć, jeżeli długości mają być sobie równe?

10. Spięliśmy równolegle trzy druty, z których każdy ma opór 15 ohmów; jaka różnica potencjałów, czynna w końcach tego rozgałęzienia, wytwarza prąd 3 amperów?

11. W metalicznym pasemku lampki żarowej dwie nitki zetknęły się ze sobą; jaki będzie skutek zetknięcia?

12. Opór ampermetru jest 2799 razy większy niż opór shuntu, w który ampermetr jest zaopatrzony. Jaki ułamek całkowitego prądu płynie przez przyrząd mierniczy?

13. Zmierzyliśmy opór pasma lampki żarowej tantalowej przy pomocy stałego prądu, «na zimno»; obliczając natężenie prądu, potrzebnego do rozżarzenia lampki, czy możemy posłużyć się znalezionym wynikiem?

14. Prąd elektryczny o natężeniu 0.5 ampera w przeciągu 10 sekund wywołuje 6 kaloryj w pewnym przewodniku. Obliczyć opór przewodnika.

15. Do 960 gr wody, o temperaturze 13°C , zanurzamy zwój drutu, którego opór wynosi 20 ohmów; przez zwój przepuszczamy prąd 5 amperów. Zaniedbując straty ciepłe wody, obliczyć, po ilu sekundach temperatura wody dojdzie do 18°C ?

ROZDZIAŁ SZÓSTY.

Zjawiska elektromagnetycznej indukcji.

§ 80. Odkrycie praw elektromagnetycznej indukcji.

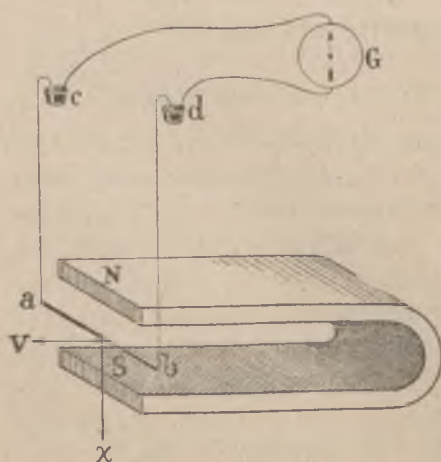
Przekonaaliśmy się w pierwszym rozdziale niniejszego tomu tej książki, że elektryczny ładunek w zbliżonym przewodniku budzi nowe ładunki, nieistniejące przedtem lub utajone (§ 6). Widzieliśmy później (§§ 49 i 59), że w pobliskim kawałku żelaza lub stali magnes wywołuje magnetyczne własności. Zjawiska te nazywaliśmy elektrostatyczną i magnetyczną *indukcją*. Czy prąd elektryczny, gdy płynie w przewodzącym obwodzie, nie indukuje prądu w innym, sąsiednim, przewodzącym obwodzie? Do podobnego a nawet, jak zobaczymy, do tego samego pytania możemy zbliżyć się z innej strony. W czwartym rozdziale zrozumieliśmy fakt bardzo ważny: prąd w swem otoczeniu sprawia pole magnetyczne; zatem zapytujemy: czy magnetyczne pole nawzajem nie wznieca prądu? Uczymy się zawsze, odwracając znane nam prawdy i z każdego twierdzenia, gdy tylko można, snując zapytanie. Pomiedzy 1820 a 1831-ym rokiem fizycy skrzętnie usiłowali odnaleźć źródła prądu w różnych polach magnetycznych statycznych; lecz Ampère przeciął przecząco wszystkie te poszukiwania. Gdy w pobliżu magnesu znajduje się przewodzący obwód (gdy naprzykład solenoid otacza magnes dokoła), w obwodzie nie dostrzegamy prądu; *pole magnetyczne statyczne w spoczywającym obwodzie nie budzi prądu*.

Nad temi zagadnieniami rozmyślał podówczas również i Michał Faraday w Londynie, *nieuczony samouk*, jak sam siebie nazywał. Ów cichy i nieśmiały samotnik zadawał pytania naturze i umiał przymuszać ją do odpowiedzi. W jesieni 1831-go roku Faraday nagle zrozumiał, w jakich warunkach powstają *prądy elektryczne indukowane* i wiekopomnym tym czynem dokończył, co Galvani i Volta, Oersted i Ampère byli zaczęli.

Następstwa elektrycznych i elektromagnetycznych odkryć XIX-go stulecia były i są nieobliczalne; prowadzą one ludzkość do zmienionych sposobów pracy i myśli, do nowych form życia na ziemi.

§ 81. Ruch przewodnika w obcym polu magnetycznem.

Wyobraźmy sobie magnes NS w kształcie płaskiej podkowy (rys. 120); linje pola idą tu oczywiście od N do S na dół pionowo.



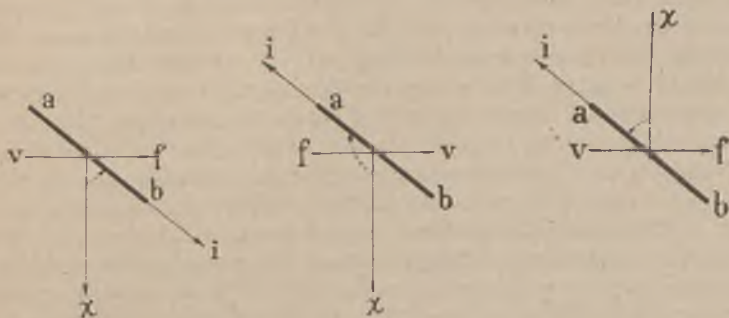
Rys. 120.

W polu tem umieszczamy drut ab stanowiący część przewodzącego obwodu $abdGca$; w obwodzie znajduje się wrażliwy galwanometr G ale niema ogniw ani innych źródeł prądu. Dzięki rtęciowym kontaktom c i d możemy poruszać drut ab jak wahadło; korzystając z tej możliwości, odchylamy ab nagłem pchnięciem, na przykład w kierunku wskazanym przez v na rysunku; galwanometr zdradza natychmiast, że w obwodzie powstaje *prąd elektryczny indukowany*, który w drucie ab płynie w kierunku od a do b .

Ale prąd ten trwa krótko; skoro tylko ruch drutu ustał, prąd znika. Spróbujemy poruszyć drut w przeciwnym kierunku; w drucie ab pojawia się wówczas prąd indukowany, zwrócony od b do a , zatem w przeciwnym niż poprzednio kierunku. Spróbujemy odwrócić kierunek linii pola magnetycznego; gdy ułożyliśmy podkowę stroną S do góry, stroną N ku dołowi, linje pola kierują się pionowo ku górze; odchylając drut ab znowu w kierunku wskazanym przez v na rysunku, przekonujemy się, że w drucie ab prąd indukowany płynie w kierunku od b do a , przeciwnym niż poprzedni, który poznaliśmy w pierwotnem położeniu magnetycznej podkowy.

Możemy streścić krótko wyniki wykonanego doświadczenia. Pamiętajmy o tem, że w cienkim drucie ab , stanowiącym składową część zamkniętego obwodu, prąd musi płynąć w kierunku osi. Widzimy zatem, że we wszystkich przypadkach *prąd indukowany* i

był skierowany prostopadłe zarówno do kierunku ruchu v drutu jak do kierunku χ linii pola magnetycznego; umieszczony wzdłuż kierunku ruchu v obserwator byłby był dostrzegł we wszystkich



Rys 121.

trzech przypadkach, iż *ruch obrotowy od χ do i odbywa się w kierunku przeciwnym kierunkowi ruchu wskazówek na tarczy zegara* (rys. 121).

§ 82. Reguła Lenza.

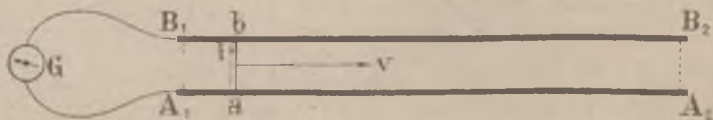
Powróćmy do rozbioru doświadczenia, którem zajmowaliśmy się w artykule poprzednim. Gdy, poruszając drut ab w kierunku v (rys. 121), powołujemy w tym drucie prąd i do płynięcia, prąd ten znajduje się w obcym sobie polu magnetycznym χ ; według §§ 71 i 72-go, drut doznaje zatem od pola ponderomotorycznej siły f prostopadłej do ab (lub do i), prostopadłej do wektora χ i tak skierowanej, że umieszczony wzdłuż siły f obserwator dostrzega ruch obrotowy od i do χ w kierunku przeciwnym kierunkowi ruchu wskazówek na tarczy zegara. Porównajmy ten wniosek z twierdzeniem § 81-go, które wskazuje, jak względem wektorów i oraz χ skierowany jest wektor v ; spostrzegamy natychmiast, że *wektory f i v , we wszystkich przypadkach, przypadają w kierunkach sobie przeciwnych*. Sprawdzamy tym sposobem na niniejszym przykładzie słuszność twierdzenia wypowiedzianego przez Lenza w r. 1834-ym: *gdy w przewodniku poruszającym się poprzez pole magnetyczne objawia się prąd indukcyjny, ponderomotoryczna siła wywierana na przewodnik sprzeciwia się ruchowi*.

Przez następstwa, które za sobą pociąga, prąd indukcyjny hamuje zatem wywołujący go ruch; *prąd indukcyjny wyczerpuje własne swe źródło*. Prosty sposób możemy okazać owo hamowanie. Usunąwszy magnetyczną podkowę NS z urządzenia doświadczenia wyobrażonego na rys. 120-ym, wprawiamy układ $cabd$ w zwykłe wahania, które on może odbywać podobnie jak wahadło; takie wahania zanikają powoli, sprzeciwiają im się słabe tarcia, nieznaczne opory; takie wahania są niemal *perjodyczne*. Przywróćmy teraz podkowę NS , umieszczając ją w położeniu pierwotnem; odchyliwszy z pionowego położenia równowagi wahadło $cabd$, dostrzegamy, że nie odbywa ono oscylacji dokoła tego położenia, lecz zmierza raczej ku niemu coraz leniwiej; porusza się *aperjodycznie*, jak gdyby było zanurzone w mazi lub smole. Ogromny stosunkowo opór, którego wahadło obecnie doznaje, jest dziełem sił ponderomotorycznych, wytwarzanych przez prąd indukcyjny w polu magnetycznem. Gdybyśmy życzyli sobie, ażeby ruch zwykłego (mechanicznego) wahadła zanurzonego w mazi lub smole nie ustawał, nie kończył się rychło, musielibyśmy ruch ten wspomagać pracą; dostarczana praca przeobrażałaby się w ciepło (§ 104 tomu II go). Pragnąc podobnie wymusić ruch niezanikający, perjodyczny, wahadła $cabd$ w polu magnetycznej podkowy, musimy ruch ten zasilać pracą; dostarczana praca zamienia się wówczas przedewszystkiem w ciepło Joule'a (§ 79) powstające w obwodzie prądu indukcyjnego.

§ 83. Elektromotoryczna siła prądu indukcyjnego.

Wyobraźmy sobie drut metalowy ab ; poruszając go z prędkością wiadomą w kierunku prostopadłym do osi drutu a zarazem prostopadłym do linii znanego obcego pola magnetycznego, możemy przekonać się, jak znaczna jest elektromotoryczna siła, budząca w drucie prąd indukcyjny. Proste doświadczenie, które w tym celu możemy wykonać, opisujemy poniżej.

Na poziomej desce stołu, w odległości 20 cm od siebie, umocowane są dwie równoległe szyny A_1A_2 i B_1B_2 , z których każda ma około 2 m długości (rys. 122); szyny te biegną *prostopadle* do płaszczyzny miejscowego południka magnetycznego. Końce A_1 i B_1 szyn łączą się ze sobą za pośrednictwem przewodu, do



Rys. 122.

którego włączony jest wrażliwy galwanometr G . Po szynach, lekko do nich przyciśnięty, poruszać się może metalowy pręt ab ; wprawiając go w ruch postępowy wzdłuż szyn, w kierunku v , dostrzegamy, że wskazówka galwanometru uychyla się; w obwodzie abB_1GA_1a pojawił się prąd indukcyjny. Ażeby fakt ten zrozumieć, przypomnijmy sobie, że wykonywamy doświadczenie w polu

magnetycznem ziemskim. Ponieważ szyny zostały ułożone prostopadłe do płaszczyzny południka magnetycznego, pręt ab zatem znajduje się w płaszczyźnie tego południka. Składowa pozioma h natężenia magnetyzmu ziemskiego (§ 60) przypada w kierunku osi pręta ab , nie wywiera więc wpływu na budzący się w nim prąd indukcyjny (§ 81); natomiast pionowa składowa natężenia magnetyzmu ziemskiego przecina pręt ab w kierunku pionowym ku dołowi; według § 81-go spółdziela więc ona w indukowaniu prądu w pręcie ab . Na rys. 79-ym oznaczaliśmy przez OV ową pionową składową, obecnie będziemy ją rozumieli przez literę χ . Gdy pręt ab posuwa się po szynach w kierunku v prostopadłym do własnej osi a zarazem prostopadłym do kierunku χ pionowej składowej pola magnetycznego ziemskiego, w pręcie pojawia się prąd i indukcyjny, płynący w kierunku od a do b (§ 81). Przypuśćmy, iż całkowity opór obwodu abB_1GA_1a wynosi 2·1 ohma. Posuwając pręt ab po szynach ruchem jednostajnym, z prędkością (przypuśćmy) 100 cm/sek, spostrzegamy w galwanometrze odchylenie, z którego wnosimy, że natężenie prądu indukowanego w obwodzie wynosiło 4 mikroampery.

Przypomnijmy sobie treść § 72-go. Oznaczmy przez l długość pręta ab . Gdy ów pręt posuwa się prostopadłe do linii pola, którego wektor ma wartość χ , płynie w nim prąd indukcyjny o natężeniu i ; pręt doznaje zatem od pola działania ponderomotorycznej siły f , której wartość wynosi

$$1. \quad f = li\chi$$

i której kierunek jest wprost przeciwny kierunkowi prędkości v ruchu (§ 82); gdy w równaniu (1) wyrażamy l w cm, χ w gaussach, i w elektromagnetycznych jednostkach natężenia prądu, f wypada wyrażona w dynach. Przypuśćmy, że posuwaliśmy pręt po szynach przez czas τ z prędkością stałą v ; posunęliśmy go o długość $v\tau$, wykonaliśmy przeto *przeciwko* sile f pracę

$$2. \quad W = f v \tau = li\chi v \tau$$

która, gdy v podaliśmy w cm/sek, τ w sek, wypada wyrażona w ergach. Założmy, że praca W , zużywszy się na wytworzenie w obwodzie prądu indukcyjnego, ostatecznie, według prawa Joule'a, zamieniła się w ciepło; założenie to czynimy dla próby, ażeby je sprawdzić. Rozumiejac przez R całkowity opór obwodu, mielibyśmy według przyjętej hipotezy

$$3. \quad W = Ri^2\tau$$

(§ 79). Z równań (2) i (3) wypadłoby wówczas

$$4. \quad Ri = v l \chi.$$

Podług rozdz. V-go, iloczyn Ri jest siłą elektromotoryczną $\mathcal{E}$ budzącą prąd i w uważanym obwodzie; mielibyśmy więc ostatecznie

$$5. \quad \mathcal{E} = v l \chi.$$

Ponieważ w tem równaniu wartość χ jest podana w gaussach czyli w elektromagnetycznych jednostkach, siła elektromotoryczna $\mathcal{E}$ również w elektromagnetycznych jednostkach wyrażona być winna. Istotnie, gdy v wyraziliśmy w cm/sek, l w cm, wartość zaś χ w gaussach, siła $\mathcal{E}$ wypada podana w jednostce $\text{gr}^{1/2} \text{cm}^{1/2} / \text{sek}^2$, która jest właśnie elektromagnetyczną jednostką potencjału oraz siły elektro-

motorycznej (por. §§ 56 i 65). Lecz jest powszechnym zwyczajem podawać w woltach wartości sił elektromotorycznych. Przypuszczając, że $\mathcal{E}$ jest obliczona w woltach i zachowując jednostki cm/sek, cm oraz gaussy po prawej stronie wzoru (5), mamy

$$6. \quad \mathcal{E} = 10^{-8} v l \chi$$

(por. § 66). Z podanych w § 60-ym wartości łatwo wyprowadzamy, że wartość składowej pionowej χ natężenia magnetyzmu ziemskiego wynosi obecnie w Polsce 0.42 gaussa; kładąc jeszcze 100 cm/sek za v , oraz 20 cm za l , otrzymujemy z równania (6):

$$7. \quad \mathcal{E} = 0.84 \times 10^{-5} \text{ wolta.}$$

Ponieważ $R = 2.1$ ohma, przeto

$$8. \quad i = 4 \text{ mikroamperom}$$

zgodnie z odczytaniem galwanometru. Upewniamy się tą drogą o słuszności założenia, którego wyrazem jest równanie (3).

W opisanem doświadczeniu sprawdziliśmy wnioski, które możemy streścić jak następuje. Gdy drut metalowy ab , długości l , porusza się z prędkością v w obcym polu magnetycznem, prostopadle do własnej osi i prostopadle do linii pola, budzi się w nim siła elektromotoryczna

$$9. \quad \mathcal{E} = v l \chi$$

gdzie χ oznacza wartość wektora pola, w którym drut porusza się. W obwodzie, którego częścią składową jest drut ab , elektromotoryczna siła $\mathcal{E}$ powołuje prąd indukcyjny o natężeniu i do płynięcia; prąd ten i w ciągu jednostki czasu wytwarza w obwodzie ilość ciepła Joule'a Ri^2 , jeżeli R jest oporem obwodu. Na drut ab niosący w sobie prąd i pole magnetyczne wywiera siłę ponderomotoryczną f sprzeciwiającą się ruchowi; przeciwko tej sile f wykonywamy pracę, ażeby wzbudzić siłę $\mathcal{E}$ oraz prąd i zmusić do płynięcia; w ciągu jednostki czasu musimy dostarczyć Ri^2 pracy, dokładnie więc tyle, ile pochłania ciepło Joule'a pojawiające się w obwodzie. Całkowita wykonywana przez nas praca przeobraża się ostatecznie w ciepło; tym sposobem rozprasza się.

§ 84. Prawo Faradaya.

Powracamy jeszcze raz do doświadczenia opisanego w artykule poprzednim. Przypuśćmy, że pręt ab (rys. 122) w chwili $t = 0$ zajmuje położenie A_1B_1 , w chwili $t = \tau$ zajmuje położenie A_2B_2 ;

przypuścmy, że przez czas τ posuwał się ze stałą prędkością v tak iż

$$1. \quad A_1 A_2 = B_1 B_2 = v\tau.$$

Obwodem prądu jest $A_1 B_1 G A_1$ w chwili $t = 0$ oraz $A_2 B_2 B_1 G A_1 A_2$ w chwili $t = \tau$. Oznaczmy przez S_0 powierzchnię (czyli rozległość) płaszczyzny opasanej przez pierwszy obwód, przez S powierzchnię płaszczyzny opasanej przez drugi; mamy:

$$2. \quad S - S_0 = \text{pow. } A_1 A_2 B_2 B_1 A_1 = v\tau l.$$

Jak powiedzieliśmy, przez tę płaszczyznę przebiegają normalnie linie i wiązki pola magnetycznego, którego wektor ma wartość χ ; według § 58-go na każdy cm^2 wypada liczba wiązek równa wartości liczbowej wektora χ t. j. liczba $\chi/1$ gauss. Ile wiązek przebiega przez powierzchnię $A_1 A_2 B_2 B_1 A_1$? Oznaczmy przez N_0 liczbę wiązek przebiegających przez powierzchnię $A_1 B_1 G A_1$, przez N rozumiemy liczbę wiązek przecinających $A_2 B_2 B_1 G A_1 A_2$; powiadamy, iż

$$3. \quad (N - N_0) : \left(\frac{\chi}{1 \text{ gauss}} \right) = (S - S_0) : 1 \text{ cm}^2.$$

Z równań (2) i (3) otrzymujemy

$$4. \quad N - N_0 = \frac{v\tau l \chi}{1 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ gauss}}$$

przez porównanie zaś wzoru (4) z formułą (9) § 83-go wyprowadzamy

$$5. \quad \frac{\mathcal{E}}{1 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ gauss}} = \frac{N - N_0}{\tau}.$$

Jak wnosimy z równania (9) § 83-go, elektromagnetyczna jednostka siły elektromotorycznej jest następująca:

$$6. \quad (\text{jedn. } \mathcal{E}) = 1 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ gauss} / 1 \text{ sek};$$

twierdzeniu (5) nadajemy więc postać

$$7. \quad \frac{\mathcal{E}}{(\text{jedn. } \mathcal{E})} = \frac{N - N_0}{\left(\frac{\tau}{1 \text{ sek}} \right)}.$$

Liczbowa wartość elektromotorycznej siły prądu indukcyjnego, wytwarzanego przez ruch części obwodu w obcym polu magnetycznym, jest równa liczbowej wartości szybkości, z jaką skut-

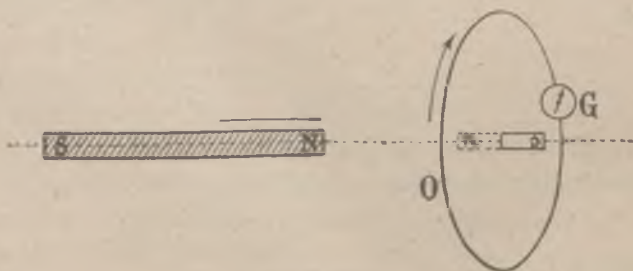
kiem ruchu zmienia się liczba wiązek pola obejmowanych przez obwód. W takiej postaci Faraday w r. 1851-ym wypowiedział prawo zasadnicze zjawisk elektromagnetycznej indukcji.

Różnica $N - N_0$ w równaniach (4), (5) i (7) wyraża zachodzącą skutkiem ruchu zmianę liczby wiązek przecinających normalnie powierzchnię okrężną przez obwód; czyli, jak powiedzieliśmy krótko, «*wiązek obejmowanych przez obwód*»; jest to oczywiście liczba oderwana (niemianowana); po obu stronach równania (7) mamy więc liczby oderwane. Sama przez się wartość (mianowana) $\mathcal{E}$ nie jest równa wartości $(N - N_0)/\tau$ lecz jest do niej proporcjonalna. Ponieważ elektromagnetyczną jednostką siły elektromotorycznej, według § 83-go, jest jednostka $1 \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{3/2} / \text{sek}^2$, zatem jednostką wyrazu stojącego po lewej stronie równania (5) jest $1/\text{sek}$, jak ze względu na prawą stronę być właśnie powinno.

§ 85. Uogólnienie reguły Lenza oraz prawa Faradaya.

W doświadczeniu poprzednim poruszaliśmy jedną, ruchomą część elektrycznego obwodu; tym sposobem zmienialiśmy liczbę wiązek obcego pola magnetycznego obejmowanych przez obwód; dostrzegaliśmy wówczas prąd indukcyjny w obwodzie, posłuszny prawu Faradaya. Ale liczbę wiązek magnetycznego pola obejmowanych przez obwód możemy zmieniać jeszcze różnemi innemi sposobami. Przytaczamy tutaj niektóre przykłady.

(I) Wyobraźmy sobie magnes NS (rys. 123) i przypuśćmy, że w jego sąsiedztwie znajduje się obwód O zawierający galwanometr G . Poruszając magnes względem obwodu lub obwód

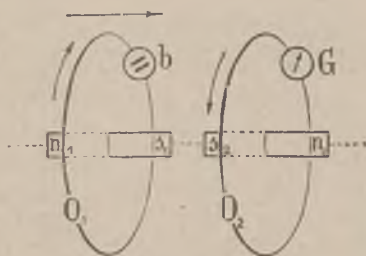


Rys. 123.

względem magnesu, dostrzegamy w obwodzie prąd indukcyjny. Wiemy istotnie z rozdz. III-go, że wiązki wychodzące z magnesu (lub doń wchodzące) są gęsto nagromadzone w pobliżu magnesu, rzadnieją zaś, oddalając się od niego; gdy zatem odległość obwodu od magnesu zwiększa się, liczba wiązek obejmowanych

przez obwód musi naogół się zmniejszać; gdy odległość ta zmniejsza się, liczba wiązek musi się zwiększać.

(II) Wyobraźmy sobie dwa obwody O_1 i O_2 (rys. 124), które znajdują się w niezbyt znacznej od siebie odległości; obwód O_1 , zwany *pierwotnym* obwodem, zawiera ogniwo lub baterję ogniw b ; w t. zw. *wtórny* obwodzie O_2 znajduje się galwanometr G , nie ma natomiast ogniwa ani innych źródeł siły elektromotorycznej. Poruszając obwód pierwotny względem wtórnego lub obwód wtórny względem pierwotnego, dostrzegamy prąd indukcyjny we wtórnym obwodzie. Wiemy istotnie z rozdz. IV-go, że wiązki pola magnetycznego, towarzyszącego prądowi w obwodzie pierwotnym, są gęsto zgromadzone w płaszczyźnie samego obwodu, ale odbiegając odeń we wszystkie strony, rozpraszają i przerzedzają się coraz bardziej (§ 63); oddalając się zatem od pierwotnego obwodu, obwód wtórny zagarnia coraz mniej wiązek jego pola we własny swój zakres; zbliżając się ku pierwotnemu obwodowi, łowi i okręża ich coraz więcej.



Rys. 124.

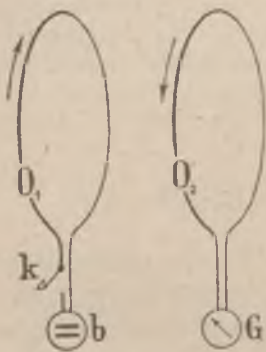
Do obu powyższych przypadków możemy zastosować regułę Lenza; musimy wypowiedzieć ją jednak nieco ogólniej niż w § 82-im; powiadamy: *wytwarzane przez prąd indukcyjny siły ponderomotoryczne sprzeciwiają się zawsze ruchowi, który jest źródłem tego prądu.*

Rozważmy dokładniej przypadek pierwszy: magnes NS , którego oś pozostaje wciąż umiejscowiona w osi płaskiego kołowego obwodu O , zbliża się ku temu obwodowi, zwracając się ku niemu biegunem swym N (rys. 123); w obwodzie O powstaje prąd indukcyjny. Ażeby móc podać kierunek prądu, wyobraźmy sobie obserwatora leżącego w osi obwodu, tak by jego głowa była zwrócona ku biegunowi N ; spoglądając na obwód, obserwator dostrzega, że prąd indukcyjny krąży w kierunku przeciwnym kierunkowi ruchu wskazówek na tarczy zegara. Sprawdźmy teraz, czy stosuje się reguła Lenza. Prąd indukowany w obwodzie O tworzy dokoła pole magnetyczne, którego wektor H w osi obwodu leżący zwraca się wprost ku biegunowi N (§ 63); to samo pole w osi obwodu wzbudziłby fikcyjny magnes ns (rys. 123), którego oś byłaby umiejscowiona w osi obwodu, biegun zaś n zwracałby się ku biegunowi N rzeczywistego magnesu. Fikcyjny magnes ns odpychałby rzeczywisty NS i nawzajem byłby przezeń odpychany; zatem obwód O , niosąc w sobie prąd indukcyjny, odpycha od siebie magnes NS ;

zbliżanie magnesu NS do obwodu O wymaga więc wykonania pracy; kosztem tej pracy tworzy się w obwodzie prąd indukcyjny.

Rozumujemy podobnie w przypadku, gdy magnes NS oddala się od obwodu O ; pomiędzy obwodem a magnesem czynne jest wówczas przyciąganie. Podobnie roztrząsamy także powyższy drugi przypadek, któremu odpowiada rys. 124.

Doświadczenie poprzednie (II) możemy łatwiej wykonać, gdy jego układ zmienimy jak następuje. Przypuśćmy, iż obadwa obwody, pierwotny i wtórny, są nieruchome (rys. 125); przy pomocy klucza k znajdującego się w pierwotnym obwodzie możemy ten obwód zamykać albo otwierać, innymi słowy, możemy przez ten obwód przesyłać prąd lub go w nim przerywać. Zamykanie pierwotnego obwodu działa podobnie jak zbliżanie go do obwodu wtórnego; otwieranie pierwotnego obwodu działa podobnie jak oddalanie go od obwodu wtórnego.



Rys. 125.

W przypadkach elektromagnetycznej indukcji, które dotychczas rozważyliśmy oraz we wszystkich innych przypadkach tego

zjawiska sprawdza się prawo Faradaya w następującej uogólnionej postaci. Przypuśćmy, że dowolny obwód O w chwili t_1 obejmuje N_1 wiązek jakiegokolwiek bądź magnetycznego pola, w chwili zaś późniejszej t_2 obejmuje N_2 wiązek tegoż pola. Niechaj t_1 i t_2 zbliżają się ku sobie coraz bardziej, spotykając się w chwili t ; N_1 i N_2 zbliżają się wówczas również ku sobie coraz bardziej; zatem różnice $t_2 - t_1$ oraz $N_2 - N_1$ zbliżają się jednocześnie do zera, natomiast stosunek $(N_2 - N_1)/(t_2 - t_1)$ dąży wówczas do pewnej wartości granicznej U , którą nazywamy *prawdziwą (w chwili t) szybkością zmieniania się liczby N wiązek obejmowanych przez obwód*. Przez $\mathcal{E}$, jak poprzednio, rozumiejąc elektromotoryczną siłę prądu indukcyjnego, czynną w obwodzie w chwili t , mamy ogólnie

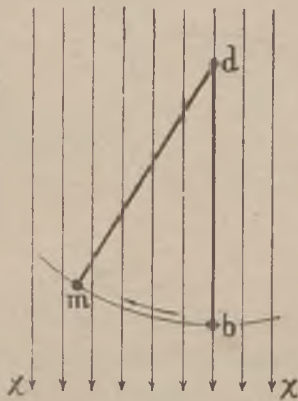
$$1. \quad \text{wart. liczb. } \mathcal{E} = \text{wart. liczb. } U$$

podobnie jak w § 84-ym.

Przypuśćmy, że w któremkolwiek z opisanych doświadczeń obwód, w którym pojawia się prąd indukcyjny, jest n -krotny (§ 64); lub też przypuśćmy, że jest solenoidem zawierającym n skrętów (§ 69). Każdy skręt przyczynia się wówczas w równej mierze do wytworzenia wypadkowej siły elektromotorycznej. Po-

dobnie jak w baterji spiętych w szereg ogniów (§ 40), siły elektromotoryczne budzące się w kolejnych skrętach dodają się do siebie; wypadkowa więc siła elektromotoryczna jest proporcjonalna do liczby n skrętów obwodu.

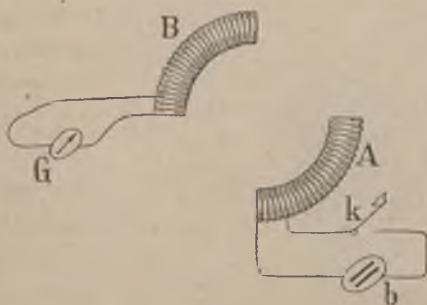
Przypomnijmy sobie doświadczenie nad elektromagnetyczną indukcją, od którego w § 81-y m roz poczęliśmy studjum praw tego zjawiska. Wyobraźmy sobie ówczesny obwód $abdGca$ (rys. 120), widziany z boku, w rzucie pionowym; przedstawia się on wówczas jako prosta bd (rys. 126). Magnetyczna podkova, jak wiemy, wytwarza tu pole, którego linie χ biegną na dół pionowo. W położeniu bd obwód nie przecina wiązek pola; możemy powiedzieć, że obejmuje liczbę wiązek równą zeru. W położeniu md obejmuje pewną liczbę wiązek, proporcjonalną mianowicie do wstawy kąta bdm odchylenia. Przypuśćmy, że bd waha się jak zawieszone w d wahadło; wiemy, że punkt ciężki takiego wahadła przebiega przez położenie b z największą prędkością. Podobnie dzieje się w niniejszym przypadku: liczba obejmowanych przez obwód wiązek zmienia się najszybciej w chwili, gdy obwód przebiega przez pionowe położenie bd ; w tej chwili elektromotoryczna siła indukcji jest więc stosunkowo największa.



Rys. 126.

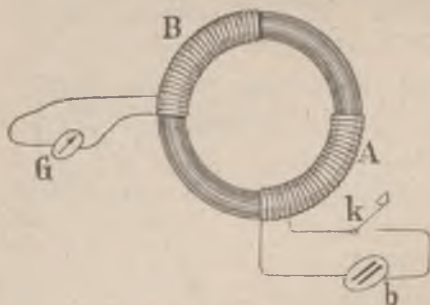
§ 86. Ponowne uogólnienie prawa indukcji.

Wyobraźmy sobie dwa solenoidy A i B (rys. 127), umieszczone naprzeciwko siebie; w obwodzie pierwotnym solenoidu A znajduje się ogniwo lub baterja b oraz klucz k ; w obwodzie wtórnym solenoidu B mamy galwanometr G . Gdy obwód pierwotny $AbkA$ zamykamy, we wtórnym obwodzie BG musi powstawać prąd indukcyjny; lecz ponieważ obwody znajdują się w niejkiej odległości od siebie, prąd indukcyjny zazwyczaj jest bardzo słaby; może być tak nikły, że najwrażliwszy galwanometr zaledwie pozwoli go wykryć. Nie zmieniając teraz urządzenia ani położenia solenoidów, nie naruszając w niczem baterji b , galwanometru G ani pozostałego układu



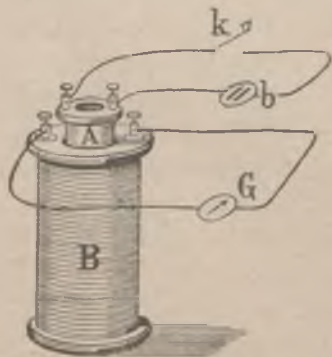
Rys. 127.

doświadczenia, poprowadźmy przez solenoidy *A* i *B* pierścień pełny żelazny, jak to objaśnia rys. 128; gdy przesyłamy prąd



Rys. 128.

przez obwód pierwotny, w obwodzie wtórnym powstaje teraz prąd indukcyjny bezporównania silniejszy aniżeli w doświadczeniu poprzednim. Fakt ten tłumaczymy bez trudności, odwołując się do wywodów §§ 59 i 70. Pod wpływem pola magnetycznego tworzonego przez pierwotny prąd w *A*, pierścień żelazny magnesuje się; pierścień wiedzie i niejako donosi aż do wnętrza solenoidu *B* linje oraz wiązki magnetycznej indukcji, które w nim teraz istnieją. Gdy przesyłamy prąd pierwotny przez *A*, lub gdy przerywamy go w *A*, liczba wiązek w pierścieniu zmienia się nagle; im raptowniej rośnie albo maleje, tem znaczniejsza jest siła elektromotoryczna, która budzi prąd indukcyjny we wtórnym obwodzie *B*. *Jeżeli z jakiegokolwiek powodu zmienia się liczba wiązek magnetycznej indukcji obejmowanych przez pewien obwód, w obwodzie powstaje prąd indukcyjny; liczbowa wartość elektromotorycznej siły tego prądu jest zawsze równa chwilowej szybkości, z jaką zmienia się liczba wiązek magnetycznej indukcji obejmowanych przez obwód.* W twierdzeniu tem uogólniliśmy jeszcze



Rys. 129.

raz prawo Faradaya. Jeżeli ośrodkiem zmieniającego się pola magnetycznego jest próżnia lub atmosferyczne powietrze, twierdzenie obecne nie różni się od poprzedzającego przytoczonego w § 85-ym; lecz jeśli tym ośrodkiem jest żelazo lub stal, uogólniona postać prawa indukcji, którą tutaj podaliśmy, przewiduje, zgodnie z rzeczywistością, ogromnie wzmoczoną siłę elektromotoryczną prądu indukcyjnego (por. §§ 59 i 70).

Słynnem doświadczeniem wykonanem przy pomocy żelaznego pierścienia Faraday wdarł się po raz pierwszy do zakresu zjawisk indukcji, do którego nikt przed nim nie umiał przeniknąć. W przedsiönku *Royal Institution* w Londynie

(instytucji, z którą imię Faradaya pozostanie nazawsze związane) stoi piękny posąg wielkiego badacza; widzimy w jego ręku ów pierścień żelazny, trwale zapisany w dziejach pojmowania natury.

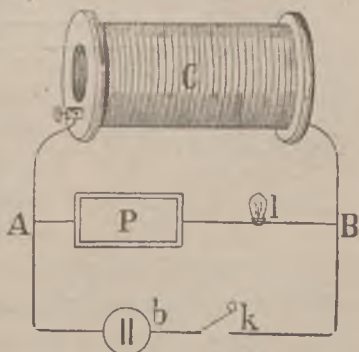
Prostą odmianą «doświadczenia z pierścieniem» jest następujące: do cewki wtórnej B , połączonej z galwanometrem G , wprowadzamy pierwotną cewkę A , w której obwodzie znajduje się bateria b oraz klucz k (rys. 129). Gdy prześlemy prąd pierwotny przez cewkę A , gdy prąd już w A płynący przerywamy, odwracamy lub jakkolwiek bądź wogóle zmieniamy, w cewce B powstaje prąd indukcyjny; gdy na przykład wysuwamy cewkę A (w której prąd płynie) z cewki B lub ją wsuwamy do B , prąd indukcyjny zdradza się natychmiast w galwanometrze G . Lecz w każdym przypadku wzbudzony prąd indukcyjny wzmacnia się znacznie, gdy do wnętrza cewki A wprowadzimy żelazny rdzeń, który wypełnia to wnętrze wiązkami magnetycznej indukcji.

§ 87. Zjawiska indukcji własnej.

Do obwodu zawierającego baterję b oraz klucz k (rys. 130) wprowadzamy cewkę C ; równolegle do cewki włączamy uboczną gałąź AB , w której umieściliśmy opornicę P oraz małą lampkę żarową l . Zamknąwszy klucz, dobieramy w opornicy opór w taki

sposób, iż lampka l zaledwie się żarzy. Gdy teraz nagle obwód otworzymy, lub go po chwili nagle zamkniemy, lampka rzuca przelotny, silny lecz krótkotrwały błysk światła.

Mamy tu przykład zjawiska, które nazywamy *indukcją własną*; na zasadzie poprzedzających wywodów możemy je łatwo zrozumieć. Wyobraźmy sobie dowolny obwód O , w którym w pewnej chwili t płynie prąd o natężeniu i ; istnieje wówczas wszędzie w sąsiedztwie pole

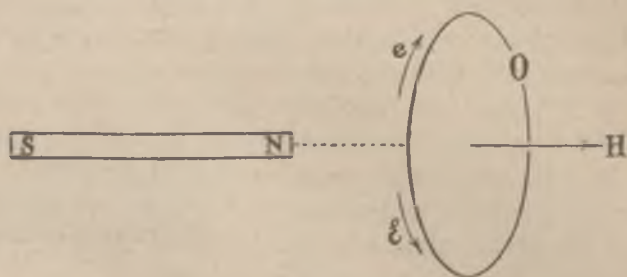


Rys. 130.

magnetyczne nieodłączne od prądu; przez obwód O przebiega pewna liczba N wiązek pola. Jeżeli obwód O nie zmienia się w niczem, liczba N , jak wiemy z rozdz. IV-go, jest proporcjonalna do natężenia i . Przypuśćmy, że natężenie i zmienia się w chwili t z jakiegokolwiek powodu i w jakkolwiek bądź sposób; liczba N zmienia się wówczas podobnie jak zmienia się i . Stosownie do § 85-go wyprowadzamy stąd wniosek, że w obwodzie O w chwili t czynna jest pewna siła elektromotoryczna, powiedzmy ϵ , proporcjonalna do szybkości, z jaką w danej chwili zmienia się N .

zatem także do szybkości, z jaką w danej chwili zmienia się i . W obwodzie może zresztą być jednocześnie czynna inna, obca siła elektromotoryczna, przypuśćmy $\mathcal{E}$, pochodząca na przykład z obecności ogniwa, baterji, maszyny elektrycznej i t. p.; siła $\mathcal{E}$ nie przeszkadza działaniu siły ϵ i wcale go nie zakłóca; obiedwie elektromotoryczne siły dodają się do siebie, gdy skierowane są zgodnie, odejmują się od siebie, gdy są skierowane przeciwnie. *Gdy z jakiegokolwiek przyczyny natężenie prądu płynącego w obwodzie zmienia się w jakiegokolwiek sposób, w obwodzie tym (niezależnie od obcych sił elektromotorycznych, które w nim mogą być czynne) występuje t. zw. elektromotoryczna siła indukcji własnej, proporcjonalna do szybkości, z jaką w danej chwili zmienia się owo natężenie.*

Wyobraźmy sobie na przykład, że kołowy obwód O zawiera baterję i klucz; obwód z początku jest otwarty, prądu w nim



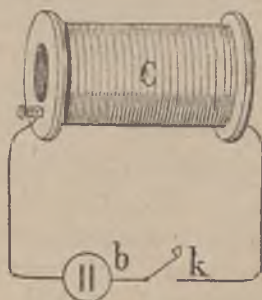
Rys. 131.

niema. Obwód O nagle zamykamy; zaczyna w nim płynąć prąd wzbudzany przez elektromotoryczną siłę $\mathcal{E}$ baterji; towarzyszące prądowi pole magnetyczne wykształca się szybko; przez obwód O dążą wiązki pola coraz gęstniejącym strumieniem. W jakim kierunku zmierzają te wiązki? W osi kołowego obwodu wyobraźmy sobie obserwatora, przez którego wektor H pola przebiega od stóp ku głowie (rys. 131); spoglądając na obwód, obserwator dostrzega, że kierunek siły $\mathcal{E}$ okrąża go przeciwnie niż posuwają się wskazówki na tarczy zegara (por. § 63). Wszystko dzieje się tak jak gdyby od przeciwnej (od głowy obserwatora odwróconej) strony zbliżał się magnes linjowy naprzód zwrócony biegunem północnym; w obwodzie O działa zatem elektromotoryczna siła ϵ indukcji własnej skierowana przeciwnie niż obca siła $\mathcal{E}$ (por. § 85). Siła ϵ przeciwdziała sile $\mathcal{E}$ i nie pozwala jej wywołać w obwodzie

prądu, który $\mathcal{E}$ sama przez się byłaby zdolna wytworzyć. Lecz siła ta ϵ jest przecież nietrwała i szybko przemija; gdy pole magnetyczne utrwala się, gdy liczba N przestaje się zwiększać, ϵ niknie i zamiera zupełnie. Natężenie prądu w obwodzie rośnie więc z czasem, poczynając od zera i dochodzi wreszcie do wartości trwałej, przepisanej przez prawo Ohma. Dla uproszczenia przypuszczaliśmy tutaj, że siła ϵ indukuje się w jednokrotnym obwodzie. Jeżeli mamy do czynienia z obwodem wielokrotnym, twierdzenia poprzednie pozostają w mocy, atoli siła elektromotoryczna ϵ indukcji własnej jest wówczas znacznie większa niż w jednokrotnym obwodzie. Dlatego posłużyliśmy się cewką C w doświadczeniu wyobrażonem na rys. 130.

Jak powiedzieliśmy w § 85-ym, siła elektromotoryczna *obcej* (niejako) *indukcji* występująca w n -krotnym obwodzie jest proporcjonalna do liczby n skrętów. Elektromotoryczna siła *indukcji własnej* rośnie szybciej z liczbą skrętów; przy niezmienniej postaci skrętów jest proporcjonalna do kwadratu n^2 ich liczby.

Weźmy na uwagę inny przypadek. Obwód O zawiera baterję b , klucz k oraz cewkę C ; działa w nim obca siła elektromotoryczna $\mathcal{E}$, która, gdy obwód jest zamknięty, wytwarza w nim prąd o natężeniu i (rys. 132). Otwieramy nagle obwód O ; prąd i spotyka nagle niezmierny opór pewnej warstwy powietrza; natężenie i maleje raptownie. Zależne od natężenia i pole magnetyczne znika również z wielką szybkością, skutkiem czego pojawia się w obwodzie siła elektromotoryczna ϵ indukcji własnej tak znaczna, że w miejscu przerwy iskra elektryczna przebija warstwę powietrza; przez pomost iskry prąd krótkotrwały płynie znowu w obwodzie. Rozumując jak wyżej, dochodzimy do wniosku, że elektromotoryczna siła ϵ jest skierowana zgodnie z obcą siłą elektromotoryczną $\mathcal{E}$, wprowadzoną do obwodu przez baterję; prąd elektryczny w obwodzie zamiera przeto powolniej aniżeli znikałby sam przez się po przerwaniu obwodu, bez spółdziałania elektromotorycznej siły indukcji własnej.



Rys. 132.

Gdy obwód O nagle *otwieramy*, występuje w nim elektromotoryczna siła indukcji własnej bezporównania znaczniejsza aniżeli ta, która pojawia się w chwili zamykania obwodu. Zjawisko to możemy objaśnić jak następuje. W chwili, w której otwieramy obwód, prąd w nim jeszcze płynie, pole magnetyczne prądu

jeszcze istnieje; pod wpływem bezmiernego oporu warstwy powietrza zalegającej miejsce przerwy, pole to w mgnieniu oka zapada się w nicość. Inaczej dzieje się, gdy zamykamy obwód. Dopóki nie domknęliśmy jeszcze obwodu, dopóki istnieje w nim przerwa, opór jest wprawdzie znowu olbrzymi, ale niema prądu w obwodzie, pole nie istnieje; zjawisko zaczyna się dopiero w chwili, w której całkowicie zwarliśmy obwód, w tej zaś chwili opór już jest stosunkowo nieznaczny. Dlatego przy otwieraniu obwodu w miejscu przerwy przeskakuje iskierka, która nie pojawia się przy zamykaniu.

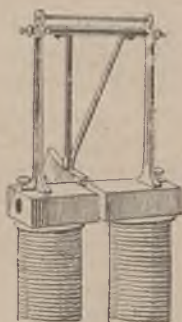
Streśćmy krótko znalezione wyniki. Gdy obwód O zamykamy, prąd wzrasta; elektromotoryczna siła ϵ stara się prąd okiełznać, jego przyrost powstrzymać; przewyciężając wpływ tej siły ϵ , obca siła elektromotoryczna $\mathcal{E}$ wytwarza wreszcie prąd trwały, zgodny z prawem Ohma. Gdy obwód O otwieramy, prąd ginie; siła ϵ wspomaga go wówczas i przedłuża jego konanie. Cokolwiek dzieje się, *elektromotoryczna siła indukcji własnej sprzeciwia się zawsze*. Wyobraźmy sobie ciało materjalne m , masywne, bezwładne, zanurzone w ośrodku, który stawia pewien (słaby) opór ruchowi ciała (por. § 46 tomu I-go); przypuśćmy, że ciało m jest poddane działaniu siły zewnętrznej stałej, dość znacznej, np. siły ciężkości. Jeżeli bryłę m poddajemy nagle działaniu siły obcej, zewnętrznej, prędkość jej wzrasta; bezwładność bryły stara się ruch okiełznać, przyrost prędkości powstrzymać; przewyciężając wpływ bezwładności, siła zewnętrzna wytwarza w końcu ruch jednostajny, zgodny z prawem Stokesa. Gdy ciało m usuwamy nagle z pod wpływu siły zewnętrznej, jego prędkość ginie; bezwładność wspomaga ruch wówczas i przedłuża jego konanie. Cokolwiek dzieje się, bezwładność sprzeciwia się zawsze. Dzięki indukcji własnej, prąd elektryczny oddziaływa zatem na pobudki obcej siły elektromotorycznej $\mathcal{E}$ mniej więcej podobnie jak ciało materjalne bezwładne odpowiada na pobudki siły zewnętrznej.

Przypuśćmy, iż punkt materjalny o masie m porusza się prostoliniowo z prędkością v pod wpływem siły zewnętrznej F oraz oporu kv , gdzie k jest współczynnikiem stałym. Natężenie i prądu elektrycznego w obwodzie O gra rolę prędkości v , obca elektromotoryczna siła $\mathcal{E}$ ogniwa lub baterji jest analogiczna do siły F , opór R obwodu O odpowiada stałemu współczynnikowi k . Przyspieszenie f punktu m zależy od szybkości zmieniania się prędkości v ; iloczyn mf w mechanicznym przypadku ma zatem to samo znaczenie, jakie ma elektromotoryczna siła indukcji własnej ϵ w elektrycznym; istotnie ϵ zależy od szybkości zmieniania się natężenia i . *Spółczynnikiem p indukcji własnej* w obwodzie O nazywamy stałą, analogiczną do masy m poruszającego się punktu; p możemy zatem poczytywać za miarę bezwładności prądu w obwodzie. Gdy jednak masa m jest zupełną stałą w dynamice, współczynnik p zależy od ukształtowania obwodu; analogja urywa się tutaj.

§ 88. Prądy Foucaulta.

Roztrząsaliśmy dotychczas prądy indukcyjne budzące się w cienkich (linjowych) obwodach; lecz oczywistą jest rzeczą, że mogą one również powstawać w masach metalicznych postaci dowolnej, np. w płytach, walcach, kulach i t. d. Takie prądy, zwane dziś zwykle *prądami Foucaulta*, zauważył już był Arago w r. 1824-ym; nie umiano ich wytłumaczyć, dopóki prawa elektromagnetycznej indukcji nie były znane.

Prawo Lenza stosuje się do prądów Foucaulta; możemy przekonać się o tem zapomocą następującego uderzającego doświadczenia. Maszynna płyta miedziana sporego wahadła może przebiegać swobodnie pomiędzy biegunami silnego elektromagnesu (rys. 133). Dopóki elektromagnes jest nieczynny, ruch wahadła ma do zwalczenia tylko słabe opory i tarcia, trwa zatem długo, zanim się uspokoi. Lecz gdy pole magnetyczne zostało wzbudzone, płyta wahadła, mimo udzielonego przez ciężkość rozpędu, nie może przebrnąć międzybiegunowej cieśniny; widać natychmiast, że spotyka tam opór ogromny, którego nie może zwyciężyć.



Rys. 133.

Kręmy na wirownicy, pomiędzy biegunami elektromagnesu, grubościenną rurkę miedzianą, którą napełniliśmy alkoholem i zamknęliśmy koreczkiem; alkohol niebawem poczyną wrzeć, tworzącą się para wyrzuca koreczek gwałtownie do góry. Pole magnetyczne elektromagnesu sprzeciwia się tu ruchowi zupełnie podobnie, jak czynią to drewniane kleszcze, którymi posłużyliśmy się w doświadczeniu, wyobrażonem na rys. 132-im, § 104 tomu II-go.

Elektryczny opór rozległych brył metalicznych bywa stosunkowo niewielki; dlatego natężenie prądów Foucaulta może niekiedy być bardzo znaczne. Energja idąca na wytwarzanie tych prądów pasorzytniczych szybko przemienia się w ciepło, wówczas zaś rozprasza się przez przewodnictwo cieplne lub promieniowanie. Elektrotechnika stara się unikać takiego niepożytecznego rozpraszania energii. Jeżeli więc rozległa metaliczna bryła, wchodząca w skład pewnej maszyny lub przyrządu, ma poruszać się w polu magnetycznem stałym lub spoczywać w polu zmiennem, buduje się ją wówczas z cienkich drutów lub prętów, z warstw albo płytek i części te składowe bryły oddziela się od siebie izolatorami.

§ 89. Induktor Ruhmkorffa.

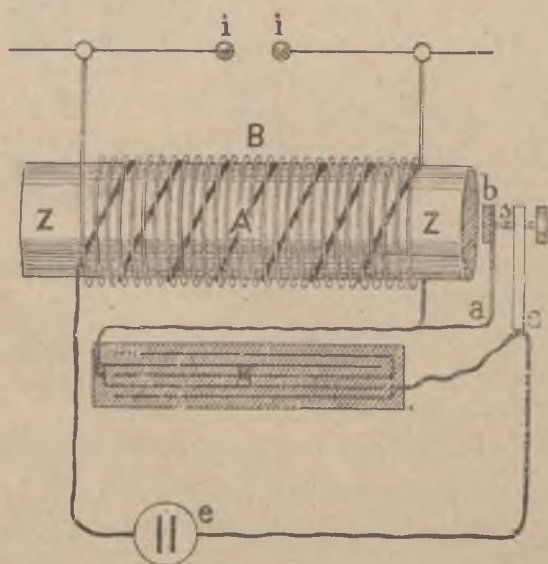
Cewka indukcyjna lub (jak dziś częściej mawiamy) *induktor* stanowi przykład zastosowania praw elektromagnetycznej indukcji

w dwóch blisko ze sobą sąsiadujących solenoidalnych obwodach. Doświadczenie opisane w § 86-ym (rys. 129) tłumaczy ogólnie zasadę działania tego przyrządu, który zaczął kształtować się w połowie XIX-go stulecia w ręku paryskiego konstruktora Ruhmkorffa, dzisiaj zaś, wszechstronnie udoskonalony, służy do mnóstwa naukowych badań oraz lekarskich i technicznych zastosowań praktycznych.

Rys. 134 wyobraża budowę zwykłego induktora w uproszczeniu schematycznym. Najważniejszą część przyrządu stanowi układ dwóch współosiowych cewek *A* i *B*. Cewki te różnią się w każdym względzie, mianowicie:

pierwotna (wewnętrzna) *A* liczy niewiele skrętów drutu grubego;
wtórna (zewnątrzna) *B* liczy bardzo wiele skrętów drutu cienkiego

Cewki są nieruchome; lecz przesyłając i przerywając pierwotny prąd w obwodzie *A*, wiele razy na sekundę, otrzymujemy prądy indukcyjne w obwodzie *B*. Celem wzmocnienia tych indukcyjnych prądów umieszczamy wewnątrz cewki *A*



Rys. 134.

gruby rdzeń żelazny *ZZ*, który składa się zwykle z izolowanych od siebie pręcików; dzięki temu urządzeniu prądy Foucaulta stają się w rdzeniu nieznaczne.

Zamykanie i otwieranie pierwotnego obwodu *A* odbywa się automatycznie; czynność tę spełnia *przerywacz*, którego odmianą najprostszą jest młoteczek Neefa, *absc* na rys. 134-ym. W pobliżu jednego z biegunów rdzenia *ZZ* znajduje się płaska sprężyna *ab* zakończona żelazną główką *b*; w środku powierzchni tej główki, naprzeciw śruby *s*, znajduje się t. zw.

kontakt, mały guziczek wyrobiony z irydjoplatyny; z tego samego aliażu składa się zakończenie śruby *s*. Śruba ta *s* przez podstawę *c* łączy się z jednym biegunem baterji *e* pierwotnego obwodu, *b* zaś przez *a* łączy się z jednym końcem cewki *A*; pierwotny obwód *eAabsce* jest więc przerywany jedynie tylko w miejscu *bs*. Przypuśćmy, że *b* dotyka *s*; prąd płynący z baterji krąży wówczas w pierwotnym obwodzie, rdzeń *ZZ* magnesuje się i przyciąga *b* ku sobie; zetknięcie *bs* przerywa się zatem, prąd znika, *ZZ* przestaje przyciągać, *ab* prostuje się, *b* odskakując uderza o *s*, co znowu zamyka obwód i przywraca w nim

prąd. Każde otwarcie pierwotnego obwodu i przerwanie w nim prądu budzi we wtórnym obwodzie prąd indukcyjny, którego kierunek zgadza się z kierunkiem pierwotnego prądu; każde zamknięcie pierwotnego obwodu i przesłanie prądu wywołuje we wtórnym obwodzie prąd indukcyjny, którego kierunek jest przeciwny kierunkowi pierwotnego prądu. Przy zamykaniu i przy otwieraniu pierwotnego obwodu zjawia się w nim jednak nowa, dodatkowa siła elektromotoryczna, mianowicie siła elektromotoryczna indukcji własnej. Gdy obwód pierwotny zamyka się, tworzące się pole magnetyczne pierwotnego prądu, dzięki działaniu elektromotorycznej siły indukcji własnej, wykształca się stosunkowo powoli; gdy obwód pierwotny otwiera się, ginące pole magnetyczne pierwotnego prądu, dzięki działaniu elektromotorycznej siły indukcji własnej, zanika stosunkowo powoli (§ 87). Wiemy jednak, że przy otwieraniu obwodu występuje w nim elektromotoryczna siła indukcji własnej bezporównania znaczniejsza aniżeli w chwili zamykania obwodu; elektromotoryczna siła indukcji czynna we wtórnym obwodzie w chwilach otwierania pierwotnego przewyższa zatem niezmiernie elektromotoryczną siłę, która rozwija się w tymże wtórnym w chwilach zamykania pierwotnego obwodu.

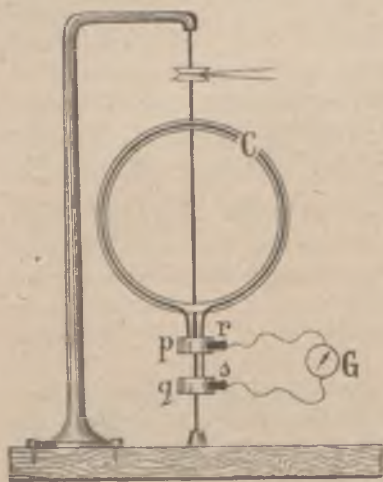
Przypuśćmy teraz, że w punktach *a* oraz *c*, równolegle do przerwy *bs* pierwotnego obwodu, włączyliśmy kondensator *K* o pojemności stosownie dobranej. Kondensator działa zgrubsza jak zbiornik elektryczny; przedewszystkiem tłumi on iskrę, która bez niego biłaby w przerywaczu w chwili otwierania pierwotnego obwodu; lub przynajmniej iskrę tę wielce osłabia i skraca. Tem samem zwiększa się znacznie siła elektromotoryczna czynna we wtórnym obwodzie w chwilach otwierania pierwotnego; pomiędzy kulkami *ii* iskiernika znajdującego się we wtórnym obwodzie wytwarza się nadzwyczaj szybko różnica potencjałów ogromna, w tem przeto miejscu bije iskra. Natomiast w chwilach zamykania pierwotnego obwodu elektromotoryczna siła działająca we wtórnym obwodzie jest słaba i nie może wywołać iskry między kulkami *ii*. We wtórnym obwodzie induktora otrzymujemy zatem prąd *przerywany*, który zaczyna płynąć, zawsze w tym samym, jednym tylko kierunku, w chwili każdego otwarcia pierwotnego obwodu. Ten prąd wtórny różni się od pierwotnego w każdym względzie. Krążąc w obwodzie pierwotnym stosunkowo słabego oporu, prąd pierwotny ma natężenie dość znaczne lecz niskie napięcie; induktor *transformuje* czyli przeobraża ten prąd, dając we wtórnym obwodzie prąd słabego natężenia (gdyż opór cewki wtórnej jest znaczny) ale bardzo wysokiego napięcia. Ażeby dać przybliżony obraz zachodzącego przekształcenia, przytaczamy, że natężenie pierwotnego prądu zasilającego induktor Ruhmkorffa wynosi zazwyczaj od kilku do kilkunastu amperów, natężenie zaś wtórnego liczy się na drobne ułamki ampera. Napięcie pierwotnego prądu wynosi po policie kilkanaście lub kilkadziesiąt woltów; napięcie w iskierniku wielkiego induktora przenosi niejednokrotnie 100000 woltów; nowoczesne potężne przyrządy wytwarzają iskry metrowej, nawet dwumetrowej długości.

Mioteczek Neefa oraz inne podobne mechanizmy, które przerywają obwód pierwotny najwyżej kilkaset razy na sekundę, byłyby bezsilne w ogromnych induktorach dzisiejszych; takie przyrządy posługują się innemi urządzeniami, np. *elektrolitycznym przerywaczem Wehnelta*. W rozcieńczonym roztworze wodnym kwasu siarkowego zanurzona jest mała elektroda platynowa; przepływając przez nią, prąd pierwotny wydziela nagle tak znaczną ilość ciepła,

że otaczająca ciecz ulatnia się szybko; prąd przerywa się wówczas, para skrapla się i zjawisko znów się powtarza.

§ 90. Przykład prądu przemiennego.

Wyobraźmy sobie doświadczenie następujące: dokoła osi pionowej, dzięki urządzeniu zrozumiałemu z rys. 135-go, kręci się spora obręcz płaska C , na której nawinięto wiele skrętów grubego



Rys. 135.

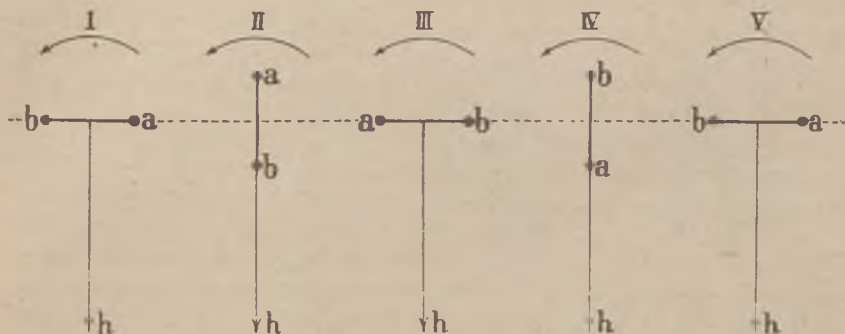
drutu miedzianego; końce tej cewki łączą się z pierścieniami metalowymi p i q , których dotykają szczoteczki kolektora r i s prowadzące do galwanometru G . Gdy obracamy cewkę C niezbyt szybko i jednostajnie, wskazówka galwanometru wychyla się z położenia równowagi naprzemian w jedną stronę i drugą; zjawisko to objaśniamy bez trudności. Gdy obracamy cewkę C , liczba wiązek pola magnetycznego ziemskiego przecinających płaszczyznę cewki zmienia się perjodycznie; w cewce powstaje zatem prąd indukcyjny, którego siła elektromotoryczna

zmienia się również perjodycznie. Ponieważ oś obrotu jest pionowa, w grę wchodzi tylko *pozioma* składowa h wektora pola magnetycznego ziemskiego (§ 60); składowa pionowa przypada zawsze w płaszczyźnie cewki, nie uczestniczy zatem w zjawisku indukcji.

Na schematycznym rys. 136-ym płaszczyzna papieru wyobraża płaszczyznę poziomą; oś obrotu cewki C jest do niej prostopadła; kierunek obrotu wskazuje wszędzie strzałka. Prosta ab wyobraża w każdym położeniu płaszczyznę cewki; punkty a i b są poziomymi przecięciami tejże cewki; h jest kierunkiem poziomej składowej natężenia magnetyzmu ziemskiego, indukującej prąd w cewce. Rozumiejmy przez N liczbę wiązek składowego (poziomego) pola ziemskiego magnetycznego, przecinających płaską powierzchnię cewki w danym jej położeniu. Gdy płaszczyzna cewki jest prostopadła do płaszczyzny południka magnetycznego (położenia I, III, V), liczba N jest największa; gdy płaszczyzna cewki przebiega przez płaszczyznę południka magnetycznego (położenia II, IV), liczba N jest równa zero. Łatwo widzimy, że w pobliżu położen I, III, V liczba N zmienia się najpowolniej i w samej chwili przejścia przez jedno z tych położen nie

zmienia się wcale; w sąsiedztwie natomiast położenia II, IV liczba N zmienia się najszybciej. Przypuszczając (jak wyżej), że obrót cewki jest jednostajny, dochodzimy zatem na zasadzie § 84-go do wniosku, iż prąd indukcyjny w cewce znika na chwilę, gdy cewka przebiega przez położenia I, III, V; w położeniach II i IV cewki prąd przeciwnie jest najsilniejszy. Kierunek indukcyjnego prądu znajdujemy łatwo na zasadzie podanych w § 85-ym przepisów, jak okazuje zestawienie następujące:

Okres:	I—II	II—III	III—IV	IV—V
N :	maleje	rośnie	maleje	rośnie
prąd	w a	do góry	na dół	na dół
	w b	na dół	na dół	do góry



Rys. 136.

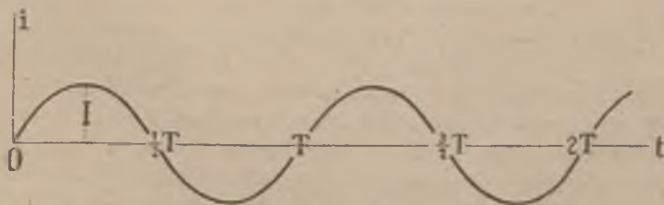
W chwilach, w których cewka przebiega przez położenia I, III, V, kierunek prądu indukcyjnego, jak widzimy, odwraca się.

Wyniki powyższe możemy zawrzeć w krótkiej formule. Rozumiejąc przez i natężenie prądu indukcyjnego płynącego w cewce C w chwili t , przez I oznaczając największą wartość tego natężenia, przez T czas trwania obrotu cewki (t. zw. *okres*), licząc wreszcie czas t od chwili przejścia cewki przez położenie I, mamy

$$1. \quad i = I \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

skąd łatwo wyprowadzamy:

I	II	III	IV	V
$t = 0$	$\frac{1}{4}T$	$\frac{1}{2}T$	$\frac{3}{4}T$	T
$i = 0$	I	0	$-I$	0

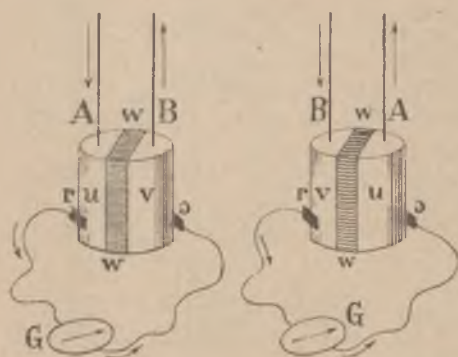


Rys. 137.

Natężenie i prądu indukcyjnego w cewce C zmienia się zatem z biegiem czasu t według praw *ruchu harmonicznego prostego* (por. § 31 tomu I-go oraz § 63 tomu II-go); I jest amplitudą, T okresem, stosunek $2\pi/T$ jest częstością zmian natężenia. Graficzny obraz zależności natężenia i od czasu przedstawia, jak wiadomo, krzywa zwana *sinusoidą* (rys. 137).

Prąd elektryczny, którego natężenie (oraz siła elektromotoryczna) zależy od czasu według praw ruchu harmonicznego prostego, jest stosunkowo prostym przykładem *przemiennego prądu*.

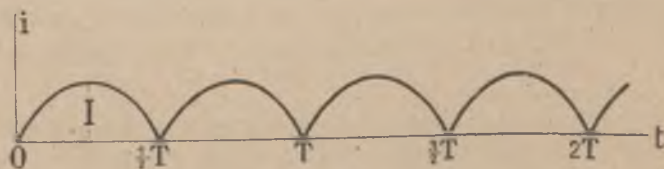
Zmierzmy jak następuje urządzenie powyższego doświadczenia (rys. 135). Końce A i B cewki C są połączone z metalowymi pół-



Rys. 138.

takim urządzeniu kolektora prąd w obwodzie rGs musi płynąć w kierunku wciąż jednakowym.

Prąd indukcyjny, który otrzymujemy obecnie w obwodzie rGs , ma kierunek stały ale natężenie zmienne; rys. 139 uzmysławia prawo zależności tego natę-



Rys. 139.

żenia od czasu. Związek krzywej rys. 139-go z sinusoidą rys. 137-go jest łatwo widoczny.

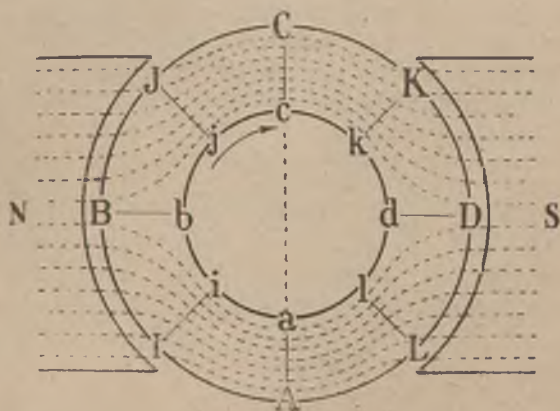
§ 91. O prądnicach.

W doświadczeniu § 90-go cewka kręciła się w polu magnetycznym obcym, nieruchomym, niezmiennym. Możemy urządzić

doświadczenie przeciwnie: w sąsiedztwie cewki nieruchomej możemy obracać magnes lub elektromagnes; wraz z magnesem poruszają się wówczas linje i wiązki jego pola, w cewce powstają zatem prądy indukcyjne.

Maszyny, które wytwarzają prądy indukcyjne kosztem pracy motorów, noszą nazwę *prądnic*. W każdej prądnicie układ cewek porusza się względem pewnego pola magnetycznego lub też, przeciwnie, pole magnetyczne porusza się względem pewnego układu cewek; w cewkach budzą się wówczas prądy indukcyjne. Każda zatem prądnica zawiera następujące części składowe istotne: (I) magnes lub elektromagnes tworzący pole magnetyczne (II) układ cewek, w których powstają prądy indukcyjne; ze znanego nam (z § 86-go) powodu cewki są umieszczone na *rdzeniu* sporządzonym z miękkiego żelaza; cały ten układ, złożony z cewek i rdzenia, nazywamy *twornikiem* prądnicy. W skład prądnicy wchodzi jeszcze (III) *kollektor*, który nieprzerwanie łączy cewki twornika z zewnętrznym obwodem maszyny.

Wynaleziony przez Gramme'a w r. 1871-ym *twornik pierścieniowy* odegrał ważną rolę w dziejach rozwoju prądnicy. Pomiedzy biegunami *N* i *S* magnesu (rys 140) wyobraźmy sobie obracalny pierścień żelazny, ze względu na prądy Foucaulta złożony z osobnych, izolowanych, cienkich obwodów kołowych (§ 88); dokoła pierścienia obiega cewka zamknięta, sama w siebie powracająca, wyrobiona z miedzianego drutu. Przez pierścień biegają wiązki magnetycznej indukcji, jak to schematycznie wskazuje rys. 140. Przypuśćmy, że *Aacc* jest osią symetrii pierścienia prostopadłą do kierunku *NS*; *BbDd* jest do *Aacc* prostopadłą. Dla określenia



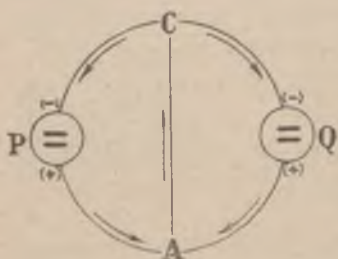
Rys. 140.

przypuśćmy, że oś obrotu jest pionowa, płaszczyzna *AaBbCcDd* pozioma i że pierścień wraz ze swą cewką porusza się w kierunku strzałki; w rzeczywistości wykonaniu oś obrotu prawie zawsze bywa pozioma, płaszczyzna pierścienia pionowa, lecz okoliczność ta nie ma istotnego wpływu na wyniki rozumowania. Weźmy na uwagę oznaczony skręt cewki i rozumiejmy przez *N* liczbę wiązek magnetycznej indukcji, które przecinają powierzchnię otoczoną przez skręt;

widzimy, że w położeniach aA oraz cC liczba N jest największa, w położeniach zaś bB i dD jest równa zeru. Liczba N zmniejsza się zatem w okresie AB ruchu, w okresie BC zwiększa się, w CD znowu się zmniejsza, w DA znowu się zwiększa. Zasadzając się na twierdzeniach § 85-go, wnosimy, iż:

w położeniu il prąd płynie: w i do góry, w l na dół
w położeniu jJ prąd płynie: w j do góry, w J na dół
w położeniu kK prąd płynie: w k na dół, w K do góry
w położeniu lL prąd płynie: w l na dół, w L do góry;

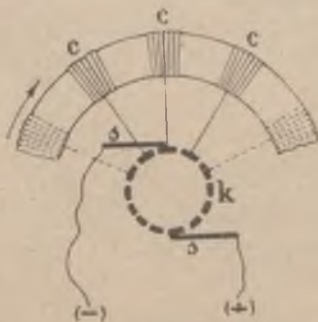
il jest którekolwiek z położeń między aA a bB , podobnie jJ jest którekolwiek z położeń między bB a cC i t. d. W skrętach leżących dla nas na lewo od osi AC prąd indukcyjny płynie więc w kierunku przeciwnym aniżeli w skrętach leżących dla nas w danej chwili na prawo od tejże osi; kierunek prądu odwraca się w położeniach aA i cC . Wyobraźmy sobie,



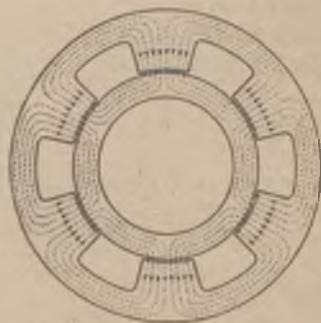
Rys. 141.

dla lepszego zrozumienia rzeczy, że przeciwstawiliśmy dwa identyczne ogniwa P i Q (rys. 141) t. j. że spięliśmy je biegunami jednoimiennymi; P dąży do przesłania prądu przez obwód w kierunku $PAQCP$, natomiast Q dąży do przesłania go w kierunku przeciwnym; prądu zatem w obwodzie wcale nie będzie. Ale potencjał w punkcie A jest oczywiście wyższy niż w punkcie C ; jeżeli zatem połączymy A z C drutem, prąd przepłynie przez drut w kierunku od A do C . Podobnie w pierścieniu Gramme'a; lewa

strona i prawa strona pierścienia zachowują się jak ogniwa P i Q rys. 141-go; gdy miejsca A i C cewki pierściennej połączymy przy pomocy szczoteczek, w obwodzie zamykającym AC otrzymujemy prąd skierowany od A do C . W rzeczywistości wykonaniu mamy osobne cewki zamiast skrętów, o których



Rys. 142.



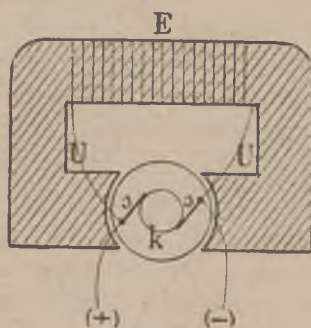
Rys. 143.

(dla uproszczenia) przed chwilą mówiliśmy; szczoteczki ss (rys. 142) nie dotykają tych poruszających się cewek c lecz raczej odrębnego kolektora k , z którego odcinkami, jak widać z rysunku, cewki są połączone.

W powyższem przedstawieniu rzeczy przypuszczaliśmy, że twornik kręci się w polu magnetycznem sprawianem przez jedną parę biegunów N i S ; taką

prądnice nazwalibyśmy *dwubiegunową*. Potężne maszyny nowoczesne są wielobiegunowe; przybliżone wyobrażenie o układzie biegunów w takiej prądnicie możemy powziąć ze schematycznego rysunku 143-go.

Wyobraźmy sobie elektromagnes (§ 70); gdy prąd budzący jego działalność jest przerywany, w rdzeniu elektromagnesu pozostaje jeszcze pamiątka po namagnesowaniu, t. zw. *magnetyczna pozostałość* (§ 49). Przypuśćmy, że twornik prądnicy kręci się pomiędzy biegunami takiego niewzbudzonego elektromagnesu; magnetyczna pozostałość rdzenia (która znajduje się w nim zawsze) wystarcza, ażeby w tworniku i w zewnętrznym obwodzie maszyny objawił się choćby słaby prąd indukcyjny. Część tego prądu odprowadźmy teraz ubocznem odgałęzieniem, t. zw. upustem *UEU* (rys. 144) do cewki elektromagnesu *E*; odprowadzony prąd wzmacnia pole sprawiane przez elektromagnes; pod wpływem tego wzmożonego pola powstaje w tworniku i w obwodzie prądnicy prąd silniejszy, który znowu oddziałuje na pole. Pole i prąd, prąd i pole podniecają się tym sposobem wzajemnie, dopóki prąd nie osiągnie pewnego natężenia granicznego, trwałego, zależnego od ustroju maszyny i od natury zewnętrznego jej obwodu. Budowa prądnic zwanych *dynamomaszynami* polega na takiej zasadzie, podanej przez Siemens'a w r. 1867, tu tylko ogólnikowo skreślonej. Dynamomaszyna popchnęła ludzką naprzód, po drodze materialnych postępów, niemniej niż przed wiekiem maszyna parowa; potężniejąca wciąż w naszych oczach sztuka elektrotechniczna tej przedewszystkiem maszynie zawdzięcza zadziwiające swoje zdobycze.



Rys. 144.

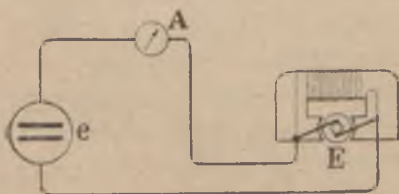
§ 92. Motor elektryczny.

Gdy twornik kręci się w polu elektromagnesu, w tym tworniku (oraz w zewnętrznym obwodzie prądnicy) powstaje prąd indukcyjny; z reguły Lenza wnosimy, że pole wywiera na twornik siły ponderomotoryczne, które sprzeciwiają się jego ruchowi. Wykonujemy więc pracę, gdy obracamy twornik normalnie funkcjonującej prądnicy; musimy wykonywać pracę, albowiem

ona jest źródłem energii wytwarzanego prądu indukcyjnego. Otwórzmy zewnętrzny obwód prądnicy, tak iż prąd nie może w nim krążyć; twornik poczyną zaraz kręcić się gładko, obrót pochłania wówczas tyle tylko pracy, ile zużywa jej tarcie. Lecz skoro obwód zamkniemy napowrót, czujemy natychmiast, że twornik obraca się trudniej.

Dostarczając prądnicę pracy, otrzymujemy zatem elektryczną energię; gdy, przeciwnie, prądnicę udzielamy elektrycznej energii, oddaje nam ona pracę do rozporządzenia. Przypuśćmy, że, obracając twornik prądnicy P w kierunku dla nas zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek na tarczy zegara, otrzymujemy prąd natężenia i oraz pewnego wiadomego kierunku; gdy przez tę samą prądnicę P przesyłamy prąd tego samego natężenia i oraz tego samego kierunku, twornik kręci się w kierunku dla nas przeciwnym kierunkowi ruchu wskazówek na tarczy zegara. Każda zatem prądnicą może być poruszana *wstecznie* i służy wówczas za *motor elektryczny*. Takie motory upowszechniły się dziś nadzwyczajnie; przy ich pomocy możemy przysyłać energię do miejscowości dowolnie odległej lub też rozdzielać ją łatwo pomiędzy liczne lecz drobne stacje odbiorcze; w obu razach ponosimy w drodze tylko taką stratę, jaka z ciepła Joule'a nieuchronnie wynika.

Wyobraźmy sobie obwód, w którym znajduje się bateria akumulatorów e , ampermetr A oraz prądnicą E (rys. 145). Oznaczmy przez ϵ elektromotoryczną siłę baterji, przez R opór całkowitego obwodu. Gdy twornik nie porusza się,



Rys. 145.

ϵ jest jedyną siłą elektromotoryczną w naszym obwodzie; płynie w nim wówczas prąd o natężeniu i , gdzie

$$1. \quad \epsilon = Ri.$$

Praca ϵi wykonywana przez baterję w jednostce czasu (§ 37) zużywa się całkowicie na ciepło Joule'a Ri^2 po-

wstające w obwodzie w tej samej jednostce czasu. Zasilajmy teraz prądnicę prądem płynącym z baterji; twornik prądnicy porusza się i wykonywa naze-
wną pracę, prądnicą funkcjonuje jako elektryczny motor, ale przeciwstawia wówczas pewną siłę elektromotoryczną δ elektromotorycznej sile ϵ baterji. Po-
nieważ δ działa w obwodzie przeciwnie niż ϵ , mamy zatem obecnie

$$2. \quad \epsilon - \delta = Ri$$

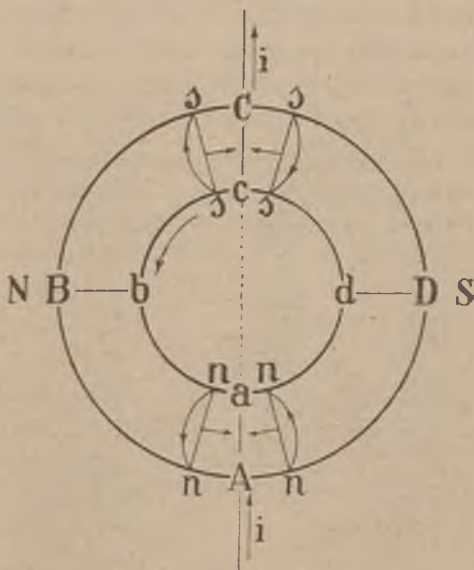
tem samem

$$3. \quad \epsilon i = Ri^2 + \delta i.$$

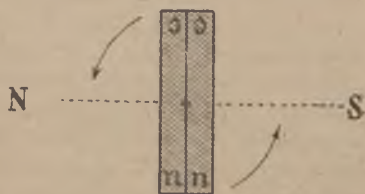
Praca ϵi wykonywana przez baterję w jednostce czasu zużywa się obecnie po części na ciepło Joule'a Ri^2 , po części na mechaniczną pracę skuteczną przez elektromotor; ta ostatnia wynosi, jak widzimy, $\mathcal{E}i$ w jednostce czasu. Im szybciej porusza się elektromotor, tem większa jest $\mathcal{E}$; równanie (2) powiada zatem, że, im prędzej kręci się twornik, tem natężenie i prądu musi być słabsze, co też potwierdza ampermetr. Gdy ruch twornika hamujemy, natężenie i wzrasta.

Przypomnijmy sobie doświadczenie wyobrażone na rys. 101 ym, § 71. Przesyłając prąd i przez drut CD , w polu magnesu NS , wytwarzaliśmy ponderomotoryczną siłę F , która dążyła do obrócenia obwodu dokoła osi AB ; widzimy obecnie, że to doświadczenie objaśnia zasadę działania elektrycznego motoru. Nie przepuszczamy teraz prądu przez obwód lecz obracamy go dokoła osi AB , w tem samym jak poprzednio magnetycznym polu, w kierunku przeciwnym kierunkowi siły F ; w drucie CD pojawi się prąd indukcyjny i skierowany jak na rys. 101-ym; to zatem odwrotne doświadczenie ilustruje zasadę prądnicy. Odwracalność, której podaliśmy tu przykład, stwierdzamy w każdym niemal doświadczeniu tłumaczącem prawa elektromagnetycznej indukcji.

Przypuśćmy, że posługujemy się pierścieniem Gramme'a jako twornikiem elektrycznego motoru; rys. 146 wyobraża schematycznie ten pierścień. Obecny prąd, którym zasilamy motor, wpływa w punkcie A do skrótu przebiegającego przez miejsce aA , rozdziela się tutaj na dwa półskręty, opływa zatem wszystkie dalsze skręty czyli solenoidy ABC i ADC w sensie przeciwnym; płynące przez te solenoidy prądy łączą się napowrót w punkcie C i zjednoczone wracają do baterji. Jeżeli płaszczyzna $ABCD$ rys. 146 go jest pozioma, wskazane są na nim tylko górne półskręty; kierunek prądu podaje strzałka. Na zasadzie §§ 69 i 70-go sprawdzamy, że północny biegun nn solenoidu ABC znajduje się w aA , południowy ss w cC ; północny biegun solenoidu ADC znajduje się również w aA , południowy również w cC ; ażeby czytelnik mógł łatwo przekonać się o słuszności tych twierdzeń, przecięcia nn , nn są nieco odchyłone od położenia aA , które rzeczywiście zajmują; przecięcia ss , ss są podobnie odchyłone od cC ; prostopadła do każdego przecięcia



Rys. 146.



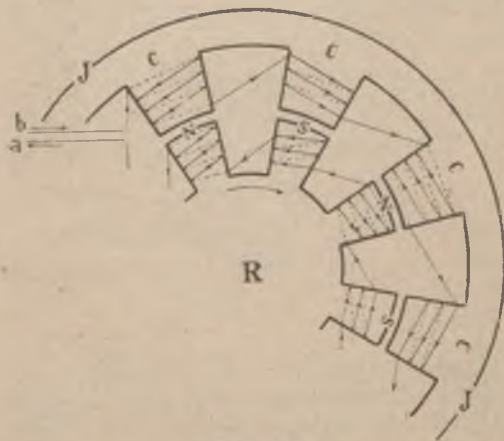
Rys. 147.

strzałka wyobraża przewidzianego w § 69-ym obserwatora. Mamy tu ostatecznie dwa solenoidy ABC i ADC złożone biegunami jednoimiennymi; w polu magnetycznym pochodzącym od biegunów N, S zachowują się one jak dwa magnesy $n s$ wyobrażone na rys. 147-ym; oczywistą jest rzeczą, że będą się one starały wykręcić się, jak wskazują strzałki.

§ 93. Alternatory.

Obracając cewkę płaską kołową w jednorodnym polu magnetycznym, wytwarzamy w niej prąd indukcyjny przemienny; przekonaaliśmy się o tym fakcie w § 90-ym. Doświadczenie opisane w powołanym artykule tłumaczy ogólnikowo zasadę działania t. zw. *alternatorów* t. j. prądnic mających dostarczać prądu przemiennego.

Pospolite urządzenie alternatora możemy do pewnego stopnia zrozumieć ze schematycznego rys. 148-go. Zaczynamy opis od ruchomej, wewnętrznej części maszyny czyli od t. zw. *rotoru* R ; jest to żelazny walec, który dźwiga na sobie elektromagnesy N, S ; elektromagnesy te zasila prąd obcy, stałego kierunku,



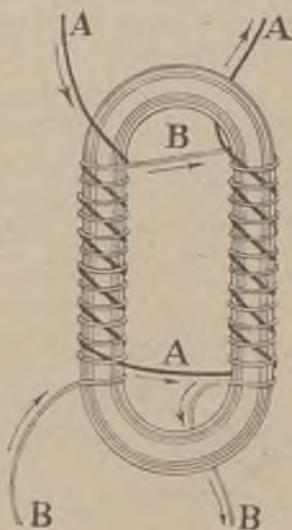
Rys. 148.

płynący z baterji lub innego źródła pomocniczego. Cewki elektromagnesów N, S są nawinięte naprzemian przeciwnie, ich bieguny są zatem naprzemian północne N i południowe S . Rotor kręci się we wnętrzu nieruchomego *statora*, składającego się z zewnętrznego żelaznego *jarzma* JJ i z osadzonych w niem, nawewnątrz zwróconych cewek CC ; w tych cewkach tworzy się prąd przemienny. Jak widać z rysunku, cewki CC , nawinięte naprzemian przeciwnie, stanowią wszystkie razem jeden obwód wspólny, którego zewnętrzne bieguny

znajdują się w a oraz b . Przypuśćmy na chwilę, że cewki CC są nawinięte zgodnie; w każdej cewce, przed którą przebiega biegun N , powstawałby wówczas prąd indukcyjny przeciwnego kierunku niż w cewce sąsiedniej, przed którą jednocześnie przesuwają się S ; prąd nie tworzyłby się więc wcale w obwodzie $aCCb$. Lecz skoro cewki CC są nawinięte naprzemian przeciwnie, indukcyjne prądy rodzące się w cewkach sąsiednich nie znoszą się lecz się do siebie dodają. Prąd krążący w obwodzie $aCCb$ jest oczywiście przemienny; kierunek tego prądu odwraca się w chwilach, w których bieguny rotora przebiegają przed cewkami statora; strzałki umieszczone na rysunku we wspomnianym obwodzie odwracają się w owych chwilach na strzałki przeciwne; strzałki wskazane w obwodzie $NSNS$ pozostają niezmiennie.

§ 94. Przetwornica.

Elektrotechnika posługuje się dziś coraz częściej prądem przemiennym, przede wszystkim z powodu, iż może *transformować* go łatwo: z przemiennego prądu o niskim napięciu może otrzymywać przemienny o napięciu wysokim albo też, przeciwnie, z przemiennego prądu o wysokim napięciu może wytwarzać prąd przemienny o niskim napięciu. Posługujemy się w tym celu t. zw. *przetwornicą*, która w zasadzie jest induktorem, znacznie jednak sprawniejszym choć uproszczonym. W induktorze transformujemy prąd pierwotny, którego kierunek pozostaje wciąż jednakowy; żeby tego dokonać, musimy periodycznie otwierać i zamykać obwód pierwotny. Gdy życzymy sobie przetworzyć prąd pierwotny przemienny, same już wahania natężenia oraz zmiany kierunku pierwotnego prądu wywołują prądy indukcyjne we wtórnym obwodzie; przerwacz induktora (a także i jego kondensator) staje się zatem zbędny. Wyobraźmy sobie, że dokoła ramion żelaznego, zamkniętego w samym sobie rdzenia (rys. 149) nawinięte są, jeden na drugim, dwa solenoidalne obwody *A* i *B*; obwód *A* liczy stosunkowo niewiele skrętów drutu stosunkowo grubego, *B* zawiera znacznie więcej skrętów drutu stosunkowo cienkiego. Jeden obwód jest pierwotnym, drugi wtórnym obwodem; w tych dwóch przypadkach czynność przetwornicy jest wprost przeciwnej natury:



Rys. 149.

Jeżeli		Napięcie prądu jest	
<i>A</i> jest obwodem	<i>B</i> jest obwodem	pierwotnego	wtórnego
pierwotnym	wtórnym	niskie	wysokie
wtórnym	pierwotnym	wysokie	niskie

W pierwszym razie przetwornica podnosi napięcie, w drugim je obniża; powiadamy, że w pierwszym przypadku działa *do góry*, w drugim *na dół*. Pod wpływem pola prądu pierwotnego rdzeń przetwornicy periodycznie magnesuje się i odmagnesowuje;

namagnesowanie to oscylujące, uwięzione w żelazie, niemal bez strat niepożytecznych działa na obwód wtórny, budząc w nim prąd wtórny przemienny. Wszystko to dzieje się w łonie substancji obwodów i rdzenia; przetwornica jest prawdziwie *molekularną* machiną, której organów możemy się tylko domyslać.

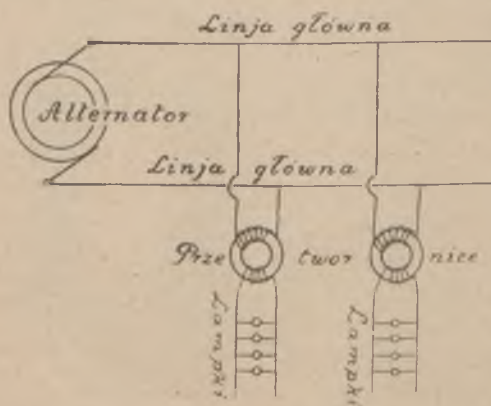
Oznaczmy przez e_1 i e_2 napięcie pierwotnego i wtórnego prądu, przez n_1 i n_2 rozumiejmy liczbę skrętów pierwotnego i wtórnego obwodu; według § 85-go mamy przybliżenie

$$1. \quad e_1 : e_2 = n_1 : n_2.$$

Dla przykładu przypuśćmy, że alternator czynny w elektrowni miejskiej wytwarza prąd przemienny o napięciu 2200 woltów; byłoby to wielką nieostrożnością, gdybyśmy wprowadzali do mieszkań ludzkich prąd o tak nie-

bezpiecznem napięciu; w każdym zatem domu, jak to tłumaczy rys. 150, pierwotny prąd miejski transformuje się na prąd wtórny, o napięciu np. 110 woltów; w każdej przetwornicy obwód wtórny liczy 20 razy mniej skrętów aniżeli obwód pierwotny.

Przypuśćmy, że pragniemy przesyłać energję z miejscowości P do miejscowości Q ; niechaj będzie W ilością energii, którą mamy przesyłać w ciągu sekundy; zakładamy, że ilość W jest nam dana. Oznaczmy przez i natężenie prądu, któ-



Rys. 150.

rym posługujemy się, przez $\mathcal{E}$ jego napięcie. Na wytwarzanie prądu w miejscowości P łożymy w sekundzie pracę $\mathcal{E}i$; zatem

$$2. \quad W = \mathcal{E}i.$$

Jeżeli R jest oporem linii PQ , musimy stracić po drodze, w każdej sekundzie, ilość Ri^2 energii na niepożyteczne ciepło Joule'a. Gdy ilość W jest dana, natężenie i będzie tem mniejsze, im $\mathcal{E}$ jest wyższa; im mniejsze zaś i , tem mniejsza (w kwadratowym stosunku) jest strata Ri^2 . Dlatego więc inżynierowie, gdy pragną przesyłać energję na znaczną odległość, transformują napięcie, najprzód w miejscowości P do góry, w Q napowrót na dół. W Kalifornji zbudowano na przykład, niedawno, linję długości 1770 km, która przenosi prąd o napięciu 220000 woltów.

§ 95. Ampermetry cieplne.

Natężenia przemiennego prądu niepodobna jest zmierzyć przy pomocy zwykłego galwanometru lub ampermetru. Organy ruchome

tych przyrządów (igła magnesowa, cewka i t. p.) są w pewnym stopniu bezwładne; pewien przeciąg czasu upływa, zanim przybiorą położenie odpowiadające natężeniu wprowadzonego prądu; jeżeli tymczasem prąd już zmienił kierunek, igła lub cewka, zanim odchyliła się ostatecznie w jedną stronę, już w przeciwną musi zawrócić. Prąd powoli przemienny może więc wywołać wahania w mierniczym przyrządzie; bardzo szybko przemienny nie sprawia żadnego wogóle wychylenia.

Skutki cieplne każdego prądu, jak uczy prawo Joule'a, są proporcjonalne do kwadratu natężenia prądu, nie zależą zaś wcale od jego kierunku; prąd przemienny rozgrzewa drut metalowy lub pasemko żarowej lampki, podobnie jak czyni to prąd stałego kierunku. Wyobraźmy sobie metalowy pręcik, którego jeden koniec jest nieruchomy, drugi zaś działa na obracalną wskazówkę, podobnie jak to widzimy na rys. 118 tomu II go; gdy przez taki pręcik płynie prąd (stałego czy zmiennego kierunku), pręcik ogrzewa i wydłuża się, wskazówka odchyła się z położenia zero. Na takiej zasadzie polega budowa t. zw. *ampermetrów cieplnych*.

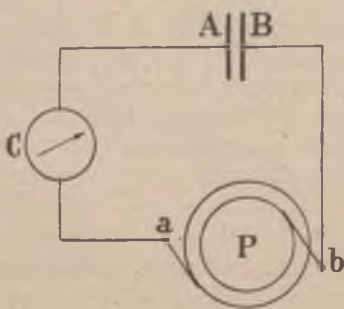
Oznaczmy przez I amplitudę zmian natężenia przemiennego prądu; powiadamy, że natężenie takiego prądu w ciągu każdego okresu T waha się nieustannie w granicach od zera do I . Średnia wartość kwadratu natężenia w czasie jednego okresu wynosi zatem $I^2/2$; skąd wynika, że prąd przemienny sprawia takie skutki cieplne, jakie wywołałby prąd niezmiennego kierunku i natężenia stałego, wynoszącego $I/\sqrt{2}$; wartość tę nazywamy *skutecznym natężeniem* przemiennego prądu.

ROZDZIAŁ SIÓDMY.

Drgania i fale elektryczne.

§ 96. Hypoteza Maxwella.

Przypuśćmy, że a i b są biegunami alternatora P (rys. 151); bieguny te łączymy z okładkami A i B kondensatora płaskiego, między którymi zalega warstwa pewnego dielektryka, np. nafty, parafiny, powietrza; do obwodu wprowadzamy jeszcze cieplny ampermetr C . Obwód $PCABP$ nie jest zamknięty; pomiędzy A i B jest przerwany przez warstwę dielektryka. Mimo to przecież,



Rys. 151.

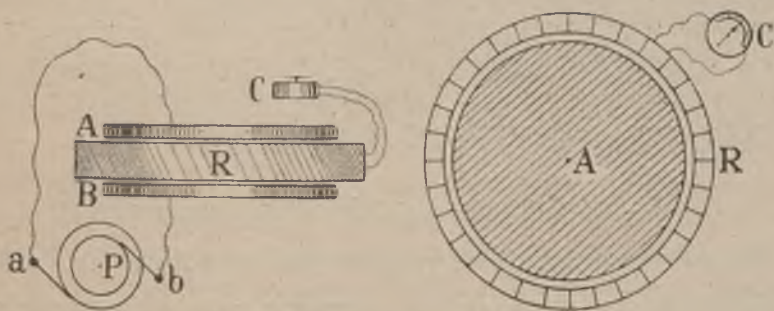
gdy alternator jest czynny, wskazówka ampermetru odchyła się; w obwodzie płyną zatem prądy. Gdyby zamiast alternatora działała w obwodzie prądnicą dostarczająca prądu o stałym kierunku, ładowałaby ona okładki kondensatora, lecz, wobec olbrzymiego oporu dielektrycznej warstwy, nie mogłaby wytworzyć w obwodzie prądu trwałego, płynącego wciąż w jednym kierunku.

Jakim więc sposobem, gdy w P

alternator jest czynny, prąd w obwodzie dochodzi do skutku? Przypuśćmy, że alternator zaczyna funkcjonować w chwili $t=0$; okres przemennego prądu niechaj nazywa się T . W pierwszej połowie okresu, od $t=0$ do $t=\frac{1}{2}T$, załóżmy, iż a jest dodatnim biegunem prądnic, ujemnym zaś b ; okładka A otrzymuje wówczas dodatni, okładka B ujemny ładunek. W drugiej połowie okresu, od $t=\frac{1}{2}T$ do $t=T$, okładka A otrzymuje ujemny, okładka B dodatni ładunek. Widzimy zatem, że w obwodzie płynie istotnie prąd z alternatora, raz w jednym kierunku, to znowu w przeciwnym. Ale naładowany kondensator rozbraja się

oczywiście, gdy jego okładki zostały ze sobą połączone metalicznie; do prądów wytwarzanych w obwodzie przez alternator dodają się zatem (lub też, zależnie od kierunku, odejmują się od nich) dalsze prądy przemienne, wzbudzone przez kondensator.

Okładki *A* i *B* w doświadczeniu powyższym otrzymują, jak powiedzieliśmy, naprzemian dodatnie i ujemne ładunki. W warstwie dielektrycznej między okładkami wytwarza się zatem pole elektryczne również przemienne, pole *oscylacyjne*. Linje tego pola skierowane są prostopadłe do płaszczyzn powierzchni okładek; lecz jeśli w pewnej fazie zjawiska linje te dążą np. ku górze, wkrótce gasną one i nikną, natomiast pojawiają się inne, ku dołowi biegnące; i te również giną niebawem, ustępując miejsca nowym znów linjom, skierowanym ku górze. Posuwamy



Rys. 152.

się teraz w doświadczeniu o ważny krok naprzód. Pole elektryczne przemienne w warstwie dielektrycznej otaczamy żelaznym pierścieniem *R* (rys. 152), który owijamy skrętami solenoidu; obwód solenoidu zamykamy cieplnym ampermetrem *C*; rys. 152 wskazuje układ doświadczenia w widoku bocznym i górnym. Gdy alternator jest czynny, ze wskazań ampermetru wynika, że w obwodzie solenoidu płyną prądy indukcyjne; w pierścieniu *R* istnieje zatem przemienne pole magnetyczne; linje tego pola — przybliżenie prostopadłe do skrętów solenoidu, obiegają pierścień dokoła, okrążają zatem linje pionowe pola elektrycznego, które w dielektrycznej warstwie pomiędzy *A* i *B* chwieje się nieustannie. *Przemienne w dielektryku pole elektryczne wytwarza w otoczeniu pole magnetyczne przemienne; linje magnetycznego pola okrążają wówczas linje pola elektrycznego w obwodach zamkniętych.*

Prawda, którą tu poznajemy, jest tylko szczególnym przypadkiem ogólnego twierdzenia, jednego z najważniejszych w dzisiejszej budowie teorii zjawisk elektromagnetycznych. W polu przemiennem zarówno wartość jak kierunek wektora pola zmienia się periodycznie. Nietylko jednak takie, przemienne pole elektryczne, każde wogóle, jakkolwiek bądź z czasem *zmienne* pole elektryczne, bez względu na to, czy w próżni, w dielektryku czy w metalu jest czynne, sprawia dokoła skutki magnetyczne, podobnie jak sprawia je, według rozdz. IV-go, zwykły prąd elektryczny w przewodniku płynący. *Każde z czasem zmienne pole elektryczne tworzy w otoczeniu pole magnetyczne.* To ważne uogólnienie odgadł James Clerk Maxwell około 1864 go r.; przenikliwym wzrokiem dostrzegł w naturze przez nikogo wówczas nieprzeczuwane zjawisko, które, jak zobaczymy, jest istotnem ogniwem w jej mechanizmie. Lecz jeśli chcemy zrozumieć całą treść i doniosłość hipotezy Maxwella, musimy sięgnąć wstecz do dawniejszych naszych wywodów; musimy wysnuć z nich pewne wnioski ogólne, pewne oderwane twierdzenia.

§ 97. Zasadnicze prawa pól elektromagnetycznych.

Przypominamy przedewszystkiem dwie prawdy:

*pole elektryczne statyczne nie wytwarza pola magnetycznego;
pole magnetyczne statyczne nie wytwarza pola elektrycznego.*

O słuszności tych twierdzeń przekonaaliśmy się wielokrotnie. Statycznemu polu niezmiennych i nieruchomych ładunków elektrycznych nie towarzyszy magnetyczne pole. Statyczne pole niezmiennych i nieruchomych magnesów nie indukuje elektrycznych prądów. Z IV-go i VI-go rozdziału czerpiemy pewność, że oba dwa te przeczące orzeczenia są prawdziwe.

Posuwamy się dalej i wypowiadamy nowe dwa założenia:

*pole elektryczne zmienne wytwarza pole magnetyczne;
pole magnetyczne zmienne wytwarza pole elektryczne.*

W pierwszym zdaniu powtarzamy tylko hipotezę Maxwella, przytoczoną w artykule poprzednim. W drugim twierdzeniu streszczamy prawa zjawisk elektromagnetycznej indukcji, znane z VI-go rozdziału. Zważmy istotnie, że niema pola elektrycznego bez różnic potencjału; gdyby potencjał w pewnym obszarze miał wartość wszędzie jednakową, wektor elektryczny byłby

w nim wszędzie równy zeru (§ 26). Przypuśćmy, że w zmiennem polu magnetycznem pojawia się metaliczny przewodnik; według powyższego drugiego twierdzenia powstają w przewodniku różnice potencjału, budzi się w nim zatem prąd, który nazywamy «indukcyjnym». Jeśli umieściliśmy przewodnik w polu magnetycznem statycznym, prądu w nim nie ma.

Pole rodzące się pod wpływem zmiennego pola magnetycznego jest więc elektrycznem lecz wcale nie jest elektrostatycznym polem; różni się ono owszem od elektrostatycznego pola w istotnym względzie. Ażeby się o tem upewnić, przypomnijmy sobie, że, *kiedy zmienne pole magnetyczne wywołuje pole elektryczne, linje wywołanego elektrycznego pola okrążają linje pola wywołującego w obwodach zamkniętych*. Przykłady trafności tego spostrzeżenia spotykamy we wszystkich niemal przypadkach opisanych w rozdz. VI-ym; najprostszy jest może przykład doświadczenia, wyobrażonego na ryss. 123-im lub 131-ym; linje indukowanego elektrycznego pola biegną tam oczywiście przez cały obwód O dokoła. Zgoła inaczej dzieje się w polu elektrostatycznym; linje takiego pola poczynają się, jak wiadomo (§ 18), na dodatnich elektrycznych ładunkach, kończą się na ujemnych; *linje pola elektrostatycznego nie stanowią nigdy obwodów zamkniętych*. Z § 20-go wynika, że elektryczne ładunki są niejako *zakończeniami elektrycznych wiązek*. Możemy więc powiedzieć, że elektromagnetycznie wzbudzone pole elektryczne jest osobiliwe: *jest to pole elektryczne bez elektrycznych ładunków*.

Wyobraźmy sobie pole elektrostatyczne i przypuśćmy, że wywiadowczy ładunek q posuwa się w niem, niezmiernie powoli, z punktu A do punktu B . Rozumiejac przez V_A i V_B wartości potencjału utworzone w A oraz w B , powiadamy, że praca W wykonana przez pole przy wspomnianem przejściu wynosi

$$1. \quad W = q (V_A - V_B)$$

(por. § 26). Przypuśćmy, że, wyruszywszy z miejsca A , ładunek q odbywa obieg zamknięty (kołowy) i powraca wreszcie do A ; wówczas $V_B = V_A$ i otrzymujemy

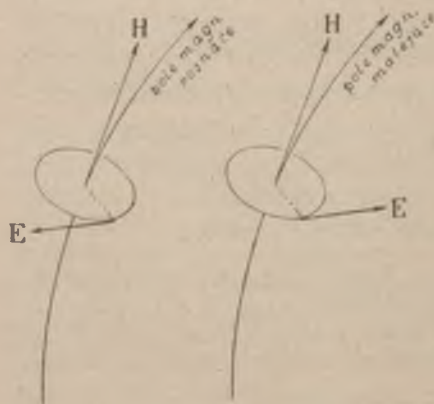
$$2. \quad W = 0.$$

Taka zresztą jest fundamentalna własność każdego pola *zachowawczego*, jak nam z § 83-go tomu I-go wiadomo. Lecz gdyby obwód zamknięty w całym swym przebiegu kierował się zgodnie z pewną wybraną linią pola, praca W wzdłuż obwodu wykonana nie byłaby równa zeru; każdy element obwodu przypadałby wówczas w kierunku miejscowego wektora E , na każdym więc elemencie siła qE wykonałaby pracę elementarną dodatnią (§ 70 tomu I-go); z takich dodatnich składników nie mogłaby powstać suma równająca się zeru. Idąc w polu elektrostatycznym wzdłuż pewnej upatrzonej linii pola *nie* powra-

camy więc do punktu wyjścia. Odbywając w takim polu obiegi zamknięte, musimy *przecinać* linje, albowiem one ciągną się w polu jak łańcuchy otwarte.

Co powiedzieliśmy o własnościach pola elektrycznego indukowanego przez zmienne pole magnetyczne, stosuje się również do pola magnetycznego, które, według hipotezy *Maxwella*, tworzy się pod wpływem zmiennego pola elektrycznego; powstaje wówczas pole magnetyczne lecz bynajmniej *nie* magnetyczne statyczne. Jak widzieliśmy w przykładzie przytoczonym w § 96-ym, linje wzbudzonego magnetycznego pola okrążają linje budzącego elektrycznego w obwodach zamkniętych; tymczasem w zewnętrznym polu statycznym trwałego magnesu linje ciągną się otwartymi pasmami i nie stanowią nigdy obwodów zamkniętych (rozdz. III-ci). Pole tworzące się pod wpływem zmiennego elektrycznego pola jest wprawdzie magnetyczne ale magnetycznych biegunów w niem *niema*.

Przypuśćmy, że pod wpływem zmiennego pola magnetycznego pojawia się pole elektryczne. Wyobraźmy sobie obserwatora,

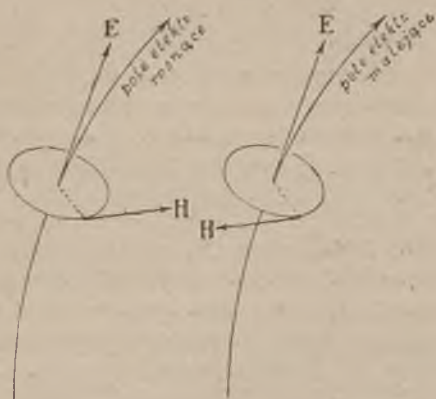


Rys. 153.

przez którego, od stóp do głowy, biegną w danym miejscu linje magnetyczne a zatem biegnie i wektor H pola (rys. 153). Przypuśćmy, że w wybranym miejscu i w uważanej chwili pole magnetyczne wzmacnia się; spoglądając na elektryczne linje, obserwator dostrzega, że okrążają go one w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek na tarczy zegara. Przypuśćmy przeciwnie, że w upatrzonym

miejscu i w danej chwili pole magnetyczne słabnie; spoglądając na elektryczne linje, obserwator dostrzega, że okrążają go one w kierunku przeciwnym kierunkowi ruchu wskazówek na tarczy zegara. Wyobraźmy sobie na chwilę, że kółka otaczające magnetyczne linje na rys. 153-im przedstawiają obwody sporządzone z drutu metalowego; kierunek stycznego do nich wektora E wskazuje, jak płynie pojawiający się wówczas w obwodzie prąd indukcyjny.

Przypuśćmy, że pod wpływem zmiennego pola elektrycznego budzi się pole magnetyczne. Wyobraźmy sobie znów obserwatora, przez którego, od stóp do głowy, biegną w danym miejscu linie elektryczne a zatem biegnie wektor E pola (rys. 154). Załóżmy że w umówionem miejscu i w uważanej chwili pole elektryczne potężnieje; spoglądając na magnetyczne linie, obserwator dostrzega, że okrążają go one w kierunku przeciwnym kierunkowi ruchu wskazówek na tarczy zegara. Załóżmy przeciwnie, że w pewnem oznaczonem miejscu i w pewnej wybranej chwili pole elektryczne maleje; spoglądając na magnetyczne linie, obserwator dostrzega, że okrążają go one w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek na tarczy zegara. Kierunek wektora H na rys. 154-ym okazuje, jak poruszałby się wywiadowczy biegun magnetyczny północny, gdyby umieszczony był w polu zupełnie swobodnie (por. § 56).



Rys. 154.

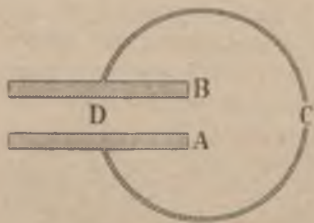
Uderzającą jest symetria twierdzeń, które tutaj poznaliśmy. Podstawiając przymiotnik «elektryczny» zamiast «magnetyczny» i na odwrót w wypowiedzeniu tych praw przechodzimy od pierwszej do drugiej lub od drugiej przeciwnie do pierwszej; w kierunkach wzbudzanych pól zachodzi jednak *przeciwieństwo*, jak wnosimy z porównania reguł kierunkowych ze sobą i jak z zestawienia ryss 153 i 154-go natychmiast wynika. Z tem zastrzeżeniem, symetria praw pola elektromagnetycznego jest zatem doskonała *w próżni*. Atoli w materialnych ośrodkach symetria tych praw jest niedoskonała. Materialne substancje przewodzą prąd elektryczny; t. zw. izolatory przewodzą go źle, elektrolity i metale przewodzą go dobrze; wszystkie jednak w pewnej mierze przewodzą. Prąd elektryczny przewodzony tworzy w otoczeniu pole magnetyczne, którego prawa znamy z rozdz. IV-go; wiemy, że powstające tym sposobem pole jest magnetyczne, lecz nie jest magnetyczne statyczne; wiemy, że jest to pole magnetyczne bez magnetycznych biegunów. Linie tego pola okrążają linie elektrycznego pola w obwodach zamkniętych, podobnie jak czynią to linie magnetycznego pola towarzyszącego zmiennemu polu elektrycznemu; lewa strona rys. 154-go mogłaby być poczytana za ilustrację praw pola sprawianego przez prąd elektryczny linijowy, płynący w kierunku tamtejszego wektora E . Lecz do przewodzonego prądu elektrycznego *nie*ma odpowiednika w magnetycznych zjawiskach. Niema magnesów, których bieguny pod wpływem pola mogłyby płynąć swo-

bodnie, zobojętniać się i magnetyczną energję w ciepło przemieniać; niema «przewodników magnetycznych» ani też «prądu magnetycznego przewodzonego»; nie możemy powiedzieć, czy taki prąd wytwarzałby w otoczeniu pole elektryczne bez ładunków, jak wymagałaby tego symetria.

Przypomnijmy sobie prawa pola magnetycznego, towarzyszącego pr. stolinjowemu elektrycznemu prądowi; wypowiedzieliśmy je w rozdz. IV-ym, § 62. Linje takiego pola, jak wiemy, okrążają kierunek prądu w obwodach zamkniętych, kołowych (ryss. 84 i 85). Wyobraźmy sobie, że w punkcie M jednego z powołanych rysunków umieściliśmy wywiadowczy biegun magnetyczny północny obdarzony ilością m magnetyzmu i że biegun ten zmuszamy następnie do (niezmieranie powolnego) obejścia raz w koło orbity na rysunkach wskazanej, której środkiem jest C . Taki obieg jest oczywiście zjawiskiem kołowym, w znaczeniu § 83 go tomu I-go; lecz ponieważ wzdłuż całej drogi kierunek przemieszczenia zgadza się z kierunkiem działającej siły mH , wnosimy zatem, jak wyżej, że praca W wykonana przez pole magnetyczne podczas całkowitego obiegu jest dodatnia, *nie* jest równa zeru. Czyżby zatem pole magnetyczne prądu trwałego nie było zachowawcze? Obnosząc dokoła prądu biegun magnetyczny, czyżbyśmy mogli utworzyć *perpetuum mobile*? Nie zapominajmy o tem, że prostolinjowy przewód prądu trwałego oraz biegun magnetyczny północny nie stanowią *odosobnionego* układu (§§ 81 i 83 tomu I go); pewien układ elektromotoryczny zewnętrzny (np. bateria ogniów lub akumulatorów, maszyna elektryczna, prądnica) musi pracować, ażeby w przewodzie AZ (ryss. 84 i 85) płynął trwale prąd elektryczny. Obnosząc biegun magnetyczny dokoła prądu AZ po orbicie kołowej, pobieramy pracę kosztem energii owego zewnętrznego źródła elektromotorycznego.

§ 98. Oscylacyjne rozbijanie się kondensatora.

Wyobraźmy sobie kondensator płaski, którego okładki A i B (rys. 155), oddzielone od siebie dielektryczną warstwą D , posiadają ładunki znaków przeciwnych: A ma ładunek dodatni,



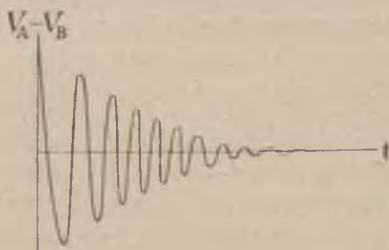
Rys. 155.

B ujemny. Przez V_A i V_B oznaczmy wartości potencjałów okładek A oraz B ; różnica $V_A - V_B$ jest dodatnia. W pewnej chwili początkowej $t = 0$ łączymy A z B zapomocą metalowego drutu C . Układ $ACBDA$ możemy uważać za obwód, przerwany w D , zresztą zaś przewodzący; oczekujemy zatem, że on zachowa się podobnie jak obwód O

zawierający baterję, który otwieramy nagle w chwili $t = 0$ (§ 87). Gdy jednak w obwodzie O § 87-go była czynna elektromotoryczna siła baterji, trwała siła elektromotoryczna, odnawiająca się nieustannie, w obecnym układzie $ACBDA$ mamy tylko róż-

nicę potencjałów $V_A - V_B$, która w chwili $t = 0$ pewnej elektromotorycznej sile jest równoważna, później jednak przez sam przepływ prądu wyczerpuje się rychło. W tym odmiennym charakterze siły elektromotorycznej, zzewnątrz przyłożonej, leży różnica obu przypadków. Gdy w obwodzie O czynna była trwała siła elektromotoryczna, porównywaliśmy prąd w nim płynący do ruchu ciała materialnego, który pod wpływem siły stałej dochodzi do skutku. Lecz w obecnym przypadku elektromotoryczna siła zmienia się w przebiegu zjawiska; przyrównamy go zatem do ruchu wahadła, w którym również, jak wiadomo, objawia się działanie siły zmiennej (moglibyśmy nawet powiedzieć *przemiennej*). Jak widzieliśmy w § 63-im tomu I-go, punkt ciężki wahadła pobudza do ruchu siła MT (ówczesny rys. 64). Weźmy na uwagę pierwszą fazę ruchu, ruch od A do C ; w A siła MT jest największa, podczas ruchu szybko zanika, w C jest równa zeru. Mimo to punkt M wahadła nie zatrzymuje się w C ; rozpęd bezwładności przenosi go do części CB toru, gdzie siła MT , skierowana przeciwnie aniżeli w AC , coraz usilniej sprzeciwia się ruchowi, aż go wreszcie wstrzymuje w miejscu B ; następna faza BCA jest już tylko odwróceniem poprzedniej ACB . Podobnie dzieje się w zagadnieniu elektrycznym, którem jesteśmy obecnie zajęci. W pierwszej fazie zjawiska, pod wpływem dodatniej siły elektromotorycznej $V_A - V_B$, prąd w drucie C płynie w kierunku od A do B ; lecz różnica $V_A - V_B$ zmniejsza się przez to i niebawem spada do zera. Prąd w tej chwili dopiął celu, zniweczył mianowicie pierwotną różnicę potencjałów; ale zjawisko nie kończy się na tem, prąd nie ginie u celu; uniesiony rozpędem indukcji własnej (która, jak z § 87-go wiemy, przedłuża jego obumieranie) prąd musi «przeholować». Okładka B otrzymuje teraz ładunek dodatni, okładka A przybiera ujemny; różnica $V_A - V_B$, która jest teraz ujemna, rosnąc w wartości bezwzględnej, sprzeciwia się coraz bardziej prądowi skierowanemu od A do B w drucie C ; znosi go wreszcie i wytwarza prąd przeciwny, od B do A w drucie C skierowany. Następująca faza zjawiska jest już tylko odwróceniem pierwszej, którą poznaliśmy. *Rozbrajanie się naładowanego kondensatora jest oscylacyjnem zjawiskiem.* Ważny ten fakt teoretycznie przewidział i zbadał Lord Kelvin w r. 1853-im, gdy w ówczesnym doświadczalnym zasobie wiedzy nie było nawet wskazówki jego istnienia.

Powinniśmy jednakże o tem pamiętać, że prąd elektryczny w każdym przewodniku natrafia na opór; gdziekolwiek prąd płynie, jego energia w pewnej mierze przemienia się w ciepło. Jeżeli więc ruch wahadła ma być wiernym obrazem elektrycznych wahań w obwodzie kondensatora, wahadło to musimy w myśli zanurzyć w ośrodku stawiającym opór; kinetyczna energia wahającego się wahadła przeradza się wówczas stopniowo w ciepło. Ruch wahadła w tym razie nie jest ściśle perjodyczny; kolejne



Rys. 156.

fazy ruchu nie są identyczne, ich amplitudy stopniowo maleją; ruch jest *tlumiony* i po jakimś czasie staje się niedostrzegalny. Podobnie dzieje się w obecnym naszym elektrycznym zagadnieniu: *rozbrajanie się naładowanego kondensatora jest następstwem drgań elektrycznych znikających*. Graficzny obraz takich

drgań znajdujemy w załączonym rys. 156 ym; wysokość każdej rzędnej wyraża chwilową wartość różnicy potencjałów okładek kondensatora, odcięta przedstawia długość odstępu czasu, który upłynął od początkowej chwili zjawiska. W pospolitych warunkach doświadczeń każde drganie trwa niezmiernie krótko a ich ogół zanika tak szybko, że do wiadomości naszej dochodzi tylko wynik ostateczny procesu: zubożenie się ładunków okładek, wyrównanie się wartości ich potencjałów.

Ażeby ilościową stronę zjawiska ogólnikowo zrozumieć, sięgnijmy jeszcze raz do mechanicznego porównania. Jak widzieliśmy w § 63 im tomu I-go, wywołująca ruch wahadła siła MT (w oznaczeniach ówczesnych) wynosi $-mgx/l$; zasadzając się na drugim prawie ruchu i zanedbując opór ośrodka, otrzymujemy zatem ówczesny związek (4):

$$1. \quad \text{przyśpieszenie wahadła} = -gx/l.$$

Innymi słowy, szybkość, z jaką zmienia się szybkość zmieniania się wartości x jest proporcjonalna do x ; współczynnik proporcjonalności g/l utożsamiliśmy z wielkością ω^2 § 31-go tomu I-go, skąd wyniknął wzór (6) ówczesny, wyznaczający długość T okresu ruchu wahadła. Postąpmy podobnie w elektrycznym obecnym zadaniu. Rozumiejąc przez Q ładunek (dodatni) okładki A kondensatora, przez $\mathcal{E}$ różnicę potencjałów okładek A i B , przez C pojemność kondensatora, mamy podług § 28-go

2.

$$Q = C\mathcal{E}.$$

Stosownie do § 34-go, natężeniem i prądu chwilowo płynącego w drucie, w kierunku od A do B nazywamy szybkość zmniejszania się ładunku Q ; podług (2) możemy zatem powiedzieć, iż

$$3. \quad \text{szybkość zmieniania się } \delta = -i/C.$$

Z drugiej strony, zgodnie z wywodami § 87 go możemy założyć:

$$4. \quad \delta = p \times (\text{szybkość zmieniania się } i)$$

gdzie rozumiemy przez p , jak w § 87-ym, współczynnik indukcji własnej uważanego obwodu; zatem również

$$5. \quad \text{szybkość zmieniania się } \delta = p \times (\text{przyśpieszenie zmieniania się } i).$$

Porównawszy ze sobą twierdzenia (3) i (5), dochodzimy do wniosku

$$6. \quad \text{przyśpieszenie zmieniania się } i = -i/pC$$

który w uważanym elektrycznym zadaniu wyraża fakt analogiczny do treści powyższego równania (1) w ruchu wahadła lub do założenia wypowiedzianego w (5) § 31-go tomu I-go. Oznaczając więc przez T długość okresu elektrycznych oscylacji w zjawisku rozbrajania się kondensatora, otrzymujemy słynną formułę Lorda Kelvina

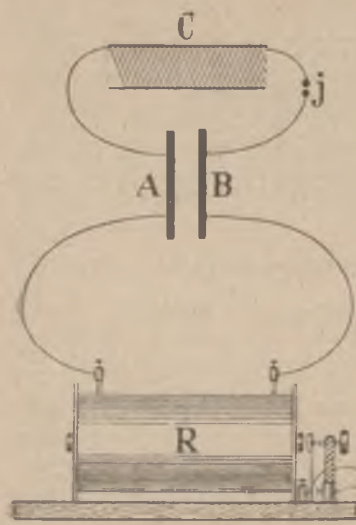
$$7. \quad T = 2\pi \sqrt{pC}.$$

W rozumowaniu powyższem zaniedbaliśmy wpływ elektrycznego oporu obwodu; gdyby ten opór był bardzo znaczny, oscylacje mogłyby stać się niemożliwe. Wyobraźmy sobie, że punkt ciężki M wahadła (rys. 64 tomu I-go) jest zanurzony w nadzwyczaj zawieszistej mazi lub smole; opuszcza się on wówczas, wychodząc z miejsca A , lecz porusza się następnie coraz leniwiej i nie dosięga położenia C nawet po upływie czasu bardzo długiego. Podobnie dzieje się w elektrycznym zjawisku, gdy obwód kondensatora przeciwstawia drganiom opór ogromny; początkowa różnica potencjałów okładek maleje coraz opieszale, aż wreszcie po długim czasie staje się niedostrzegalna. Takie wyładowanie nazywamy *aperjodycznem*.

Czy można przekonać się o tem doświadczalnie, że w obwodzie rozbrajającego się kondensatora odbywają się rzeczywiście drgania elektryczne? czy takie wahania można chociażby pośrednio dostrzegać oraz badać ilościowo, dokładnie? Są to pytania, które postawił sobie po raz pierwszy Feddersen w r. 1857-ym; pokonał on pomyślnie niemałe trudności, które wówczas nastręczała odpowiedź. Znamy dzisiaj wiele sposobów okazania i mierzenia drgań elektrycznych; wspominamy o najprostszych pokrótce.

Wyobraźmy sobie doświadczenie, którego schemat widzimy na rys. 157-ym. Do obwodu cewki wtórnej induktera R włączono kondensator AB (np. butelkę lejdejską); do kondensatora dołączono jeszcze drugi obwód, który zawiera po-

mocniczą cewkę C tudzież t. zw. iskiernik j (układ dwóch metalowych kulek, w nieznacznej odległości od siebie). Prąd indukcyjny powstający w cewce wtórnej



Rys. 157.

induktora ładuje okładki kondensatora. Gdy różnica potencjałów okładek osiąga wartość dostatecznie wysoką, kondensator rozbraja się; w j tworzy się iskra, która przez krótką chwilę udziela stosunkowo znacznego elektrycznego przewodnictwa warstewce powietrza znajdującej się między kulkami iskiernika. Rozbrojenie kondensatora ma dwie drogi do wyboru w tem doświadczeniu: jedną drogę $ACjB$, drugą zaś prowadzącą przez wtórną cewkę induktora. Lecz dzięki ogromnej indukcji własnej wtórnej cewki induktora droga druga praktycznie nie wchodzi w rachubę; rozbrojenie dokonywa się nieomal wyłącznie w drodze pierwszej.

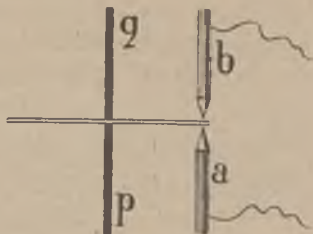
Wyobraźmy sobie, że, gdy w j biją iskry, biegnące od nich świetlne promienie padają najpierw na zwierciadło obracające się szybko dokoła osi pionowej (por. rys. 106 tomu II-go), następnie na soczewkę, która tworzy obraz iskry na kliszy fotograficznej. Gdyby iskra była zjawiskiem ciągłym, jej obraz, rozciągnięty skutkiem obrotu zwierciadła, wyglądałby jak wstęga jednostajnie świecąca. Tymczasem otrzymujemy obraz wcale odmienny; jako przykład przytaczamy zdjęcie wykonane przez uczonego włoskiego, profesora Battelli



Rys. 158.

(rys. 158). Musimy mieć na uwadze, że na rys. 158-ym czas upływa niejako w kierunku od lewej ręki ku prawej; nadto, iż najmocniej świeci część iskry wybiegająca z anody. Na rys. 158 ym widzimy najprzód jasność u góry, ciemność u dołu; za chwilę widok jest odwrócony, znów przywrócony, znów odwrócony i t. d. Anodą była tu zatem raz górna, to znowu dolna elektroda; *wytlądowanie rzeczywiście było oscylacyjne*. Jasne smugi nie są pionowe, są zakrzywione na prawo; świecenie iskry zaczyna się zatem na anodzie, następnie posuwa się wzdłuż iskry z pewną, niezbyt nawet znaczną prędkością.

W doświadczeniach prof. Battelliego okres drgań wynosił w przybliżeniu od jednej milionowej do jednej stotysięcznej części sekundy. Posługując się kondensatorami znacznej pojemności oraz pomocniczymi cewkami, których współczynnik indukcji własnej ma wartość wysoką, możemy wywoływać drgania elektryczne, których okres, zgodnie z formułą Lorda Kelvina, jest bezporównania dłuższy, wynosi na przykład parę setnych lub nawet dziesiątych części sekundy. Śledzenie drgań tej częstości udaje się łatwo. Gdy skierujemy dość silny strumień powietrza ku elektrodom iskiernika, towarzyszące oddzielnym oscylacjom iskry rozłączają się i stają się zosobna widzialne. Krążek wycięty z kartonu niechaj kręci się szybko dokoła osi pq (rys. 159); jeżeli naładowany kondensator rozbraja się między elektrodami a i b iskiernika, z jednorazowego naładowania otrzymujemy nie jedną dziurkę u brzegu krążka, lecz całe ich mnóstwo.

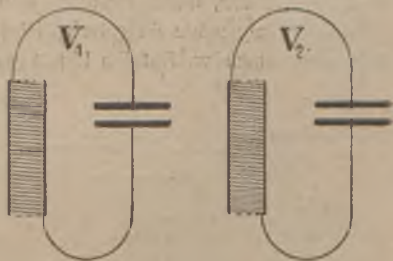


Rys. 159.

§ 99. O rezonancji elektrycznej.

W obwodzie rozbrajającego się kondensatora, jak nam teraz wiadomo, płynie prąd oscylujący; natężenie tego prądu nieustannie faluje, kierunek odwraca się wiele razy w ciągu sekundy. Magnetyczne pole takiego prądu zmienia się równie szybko i w ślad za prądem odwraca się także, wiele razy w czasie jednej sekundy; w każdym zbliżonym przewodzącym obwodzie powstają przeto silne prądy indukcyjne, również przemienne.

Przypuśćmy, iż w pewnym obwodzie V_1 , który będziemy odąd nazywali *elektrycznym wibratorem*, odbywają się drgania elektryczne (rys. 160). Jednorazową pobudką wywołujemy drgania w wibratorze, następnie pozostawiamy go samemu sobie; niezakłócone drgania, które w odosobnionym wibratorze dochodzą do skutku, nazywamy jego *swobodnymi* lub *własnymi* drganiami; tą samą nazwą w podobnym znaczeniu posługiwaliśmy się w § 86 tomu II go. Elektryczne swobodne drgania, podobnie jak mechaniczne, mają okres zależny od ustroju układu; na przykład wibratorowi V_1 właściwy jest pewien okres T_1 drgań swobodnych, dany przez jego pojemność oraz indukcję własną. Przypuśćmy,



Rys. 160.

że w sąsiedztwie wibratora V_1 znajduje się inny V_2 , którego okres drgań własnych wynosi T_2 . W wibratorze V_2 , pod wpływem drgań w V_1 , wytwarzają się drgania, o których, jak w § 87 ym tomu II go, powiemy, że są *wymuszone*, odbywają się bowiem w okresie T_1 właściwym wibratorowi V_1 , pod przymusem sił w tym okresie zmiennych, pochodzących od drgań wibratora V_1 ; obok tych drgań wymuszonych, niezależnie od nich, w wibratorze V_2 mogą odprawiać się jednocześnie jego drgania własne, w okresie T_2 . Działanie dysypacyjne elektrycznego oporu usiłuje stłumić obadwa rodzaje drgań, wymuszone i własne; lecz wymuszone, zasilane dopływem obcej energii, są trwalsze niż własne, które, znikąd nie mając pomocy, muszą niebawem umilknąć. Jeżeli długość okresu T_2 różni się wybitnie od długości okresu T_1 , drgania wymuszone w wibratorze V_2 są stosunkowo nieznaczne. Lecz jeżeli, zmieniając na przykład pojemność kondensatora zawartego w obwodzie V_2 , uczynimy długość okresu T_2 ściśle lub bardzo przybliżenie równą długości T_1 , znajdzie wówczas wyjątkowy przypadek *rezonancji*, którym zajmowaliśmy się w § 88-ym tomu II-go; amplitudy drgań indukowanych w wibratorze V_2 powiększają się wówczas z biegiem zjawiska, drgania rozrastają się nadzwyczajnie. Wibrator V_2 tak dostrojony nazywamy *elektrycznym rezonatorem*.

Jeżeli opór rezonatora jest znikomy, rezonancja zaczyna się wówczas dopiero, gdy okresy drgań własnych wibratora i rezonatora stały się niemal dokładnie jednakowe; zaczyna się, innemi słowy, dopiero przy niemal ścisłym *izochronizmie*. Najlżejsze rozstrojenie obwodów niszczy w tym razie rezonancję. Gdy opór rezonatora jest bardzo duży, rezonancja występuje wprawdzie już przy jakimkolwiek, nawet grubym zbliżaniu się do izochronizmu, bywa jednak wówczas znacznie słabsza, mniej zaakcentowana, aniżeli w przypadku poprzednim.

Wyobraźmy sobie dwie butelki lejdejskie V i R (rys. 161), dokładnie jednakowych rozmiarów. Butelka V jest wibratorem czyli układem pierwotnym w tem



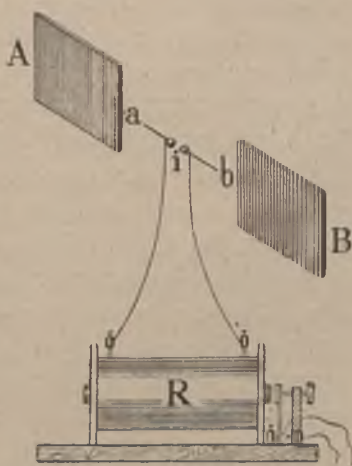
Rys. 161.

doświadczeniu; łączymy jej okładki z biegunami maszyny Wimshursta lub induktora Ruhmkorffa; butelka ładuje się i rozbraja się przez obwód uvi , przyczem w iskierniku i biją iskry. W pobliżu obwodu $VuviV$ znajduje się drugi $RpqrR$, który zawiera rezonator R ; przesuwając ruchomy łącznik pq , możemy zmieniać długość i postać owego drugiego obwodu. Od wewnętrznej okładki butelki R idzie pasek yz folii cynowej, kończąc się w małym odstępnie od brzegu zewnętrznej okładki tej butelki. Przesuwając łącznik pq tam i napowrót, zestrzajamy obwód $RpqrR$ z obwodem $VuviV$ w taki sposób, że, skoro tylko w i ukazują się iskierniki, zjawiają się również w przerwie dzielącej yz od zewnętrznej okładki butelki R ; mamy wówczas rezonancję. Umieszczając pq w innem położeniu, spostrzegamy, że rezonancji już nie ma.

§ 100. Odkrycia Henryka Hertza.

Zajmowaliśmy się dotychczas elektrycznymi drganiami, które dokonywają się w obwodach bądź ściśle zamkniętych bądź też *niemal zamkniętych* t. j. zawierających tylko drobną przerwę dielektryczną. Widzieliśmy, że okres drgań zależy od elektrycznej pojemności obwodu oraz od indukcji własnej, która w nim może być czynna. Idąc torem myśli Maxwella, Henryk Hertz (w Karlsruhe, następnie w Bonn), pomiędzy 1887 a 1891-ym rokiem, od takich doświadczeń przeszedł odważnie do badania drgań elektrycznych w obwodach zgoła *otwartych*; znakomicie tym sposobem zmniejszając pojemność oraz indukcję własną w vibratorze, zdołał po raz pierwszy wytworzyć drgania elektryczne *nadzwyczaj szybkie*, drgania, których okres jest niezmiernie krótki a częstość olbrzymia. Udowodniwszy, że od takich drgań poczynają się *fale elektryczne* (lub raczej, jak zobaczymy niebawem, *elektromagnetyczne*), które szerzą się dokoła w otaczającym ośrodku, Hertz świetnymi temi odkryciami zdobył nam nowy zakres zjawisk fizycznych, wagi nadzwyczajnej, zarówno dla oderwanej myśli naukowej jakoteż dla swobody i łatwości ludzkiego życia na ziemi.

Pierwszą, ogólnikową wskazówkę o sposobie doświadczeń Hertza możemy powziąć z następującego opisu. Wyobraźmy sobie dwie metalowe płyty A i B ,

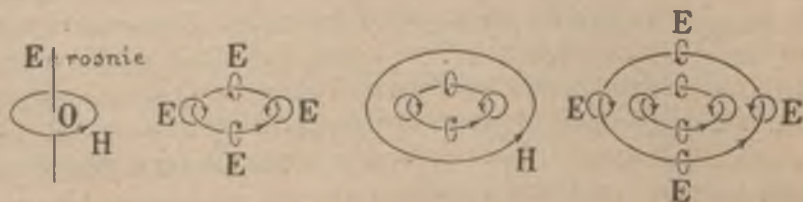


Rys. 162.

stosunkowo od siebie odległe (rys. 162); łączą się one drutem prostoliniowym ab , który jednak jest przerwany przez iskiernik i . Z pomocą cienkich metalowych drutów łączymy kulki iskiernika z biegunami cewki wtórnej induktora Ruhmkorffa R . Po między płytami A i B , poprzez drut ab oraz iskrę w i przeskakującą, płynie prąd elektryczny wahający się nieustannie, prąd, który odwraca się nadzwyczaj wiele razy w czasie jednej sekundy. W pierwszych doświadczeniach Herta częstość drgań elektrycznych wynosiła około 10^8 na sekundę; umiemy posunąć się dzisiaj jeszcze znacznie dalej, jak o tem powiemy pokrótce w jednym z artykułów następnych.

§ 101. Fale elektromagnetyczne.

Przypuśćmy, że w pewnym punkcie przestrzeni, np. w miejscu O (rys. 163), w chwili $t=0$, pojawia się pole elektryczne; lub też, że istniejące tam już pole w chwili $t=0$ zaczyna się wzmacniać.



Rys. 163.

Ażeby mieć przed oczyma przykład konkretny, wyobraźmy sobie, że O leży na drodze iskry bijącej w iskierniku wibratora Herta; podczas odbywających się w wibratorze drgań, przez punkt O w chwili $t=0$ zaczyna płynąć prąd elektryczny skierowany pionowo do góry. Taki stan rzeczy uzmysławia pierwszy (od lewej ręki) szkic schematyczny rys. 163-go. Dokoła punktu O , podług § 97-go, powstaje natychmiast pole magnetyczne, którego linje okrążają rosnący wektor E pola elektrycznego w obwodach zamkniętych; jedną taką zamkniętą linię H widzimy w pierwszym zaraz stadium rys. 163-go. Lecz jeżeli elektryczne pole w punkcie O jest periodycznie zmienne, rodzące się dokoła O magnetyczne pole jest również periodycznie zmienne. Wyobraźmy sobie, że wartość wektora H wzrasta w każdym punkcie magnetycznego obwodu H poprowadzonego w pierwszej części rysunku; dokoła każdego takiego punktu budzi się znów pole elektryczne, którego

linje (podług praw znanych z § 97-go) okrążają rosnący wektor H w obwodach zamkniętych; cztery takie linje dostrzegamy w drugim z kolei stadjum rys. 163-go. Podobnie dzieje się dalej, jak objaśniają następne figury rysunku. Gdziekolwiek potężniejsze lub słabnie pole elektryczne, tam poczyną się dokoła pole magnetyczne; gdziekolwiek wzmaga się lub podupada pole magnetyczne, tam pole elektryczne dokoła wyrasta; pierwotne zaburzenie szerzy się tym sposobem coraz dalej i dalej. Od charakteru początkowego zaburzenia zależy przebieg zjawiska. Nagłe, urwane wstrząśnienie staje się źródłem *pulsu* elektromagnetycznego (por. § 61 tomu II go); zaburzenie przeciągłe, które dokonywa się według pewnego prawa zależności od czasu, daje początek *ciągłowi* czyli *układowi fal elektromagnetycznych*. Jeżeli zakłócenie pierwotne powtarza się periodycznie, w okresie np. T , układ fal w otoczeniu również jest periodyczny; w każdym punkcie przestrzeni, który został dotknięty zawichrzeniem, elektryczne i magnetyczne zmiany pól odbywają się w tym samym okresie T .

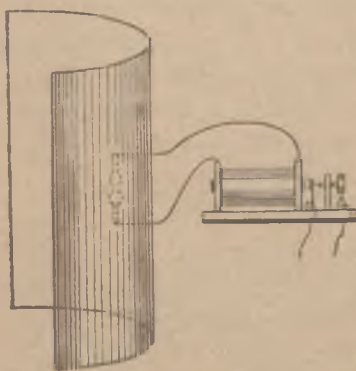
Widzieliśmy, jak ze wschodzących lub zachodzących pól elektrycznych i magnetycznych wyłaniają się nowe, magnetyczne i elektryczne pola. Nasuwa się wielkiej wagi pytanie: czy proces ten wymaga czasu? czy wyobrażone na rys. 163-im stadjum zjawiska są sobie spójne? czy następują raczej kolejno w pewnych, choć niewątpliwie nadzwyczaj krótkich odstępach czasu? Zapytujemy innemi słowy, czy *fale elektromagnetyczne biegną w przestrzeni ze skończoną prędkością*? W tomie II im przekonaliśmy się, że fale głosowe biegną ze skończoną, dokładnie znaną prędkością; ale podobieństwo elektromagnetycznych fal do głosowych niewątpliwie jest powierzchowne. Fale głosowe niosą się w powietrzu i w wodzie, w pręcie, w strunie lub skale; ale przez próżnię nie przenikają. Fale elektromagnetyczne biegną w próżni; a nawet najłatwiej, najprędzej rozchodzą się w próżni. Już u wstępu niniejszego tomu tej książki zwróciła naszą uwagę głęboka różnica dzieląca zwykłe mechaniczne i elektromagnetyczne zjawiska. Wiemy jednak, że istnieje w naturze fundamentalne zjawisko, które rozgrywa się w próżni: *światło* lub (poprawniej powiedzmy) *promieniowanie* przenosi się nieustannie przez puste obszary otchłani niebios, biegnąc z ogromną (lecz jednak skończoną) prędkością

$$c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/sek.}$$

Czy elektromagnetyczne fale dążą przez próżnię z tą samą prędkością? Pierwszy Maxwell zrozumiał, że tak jest istotnie; już około r. 1864-go, następnie zaś w dziele *A Treatise on Electricity and Magnetism*, które ukazało się w r. 1873-im, Maxwell, ze spokojną świadomością odniesionego zwycięstwa, uzasadnia twierdzącą odpowiedź na powyższe pytanie. Ogół uczonych pojął i uznał potrzebę odkryć Maxwella dopiero w czternaście lat później, gdy doświadczenia Hertza dały dowody, w oczy bijące, ich doniosłości. A zatem Maxwell był fal elektromagnetycznych prawodawcą, zanim one w pracowni fizyka sztucznie wytworzone zostały; optykę przyłączył do zakresu nauki o elektromagnetycznych zjawiskach, zanim ktokolwiek ze współczesnych zrozumiał, czego dokonał. Od dzieł wiekopomnych Maxwella rozpoczął się nowy okres badania natury.

§ 102. Odbijanie się fal elektromagnetycznych; długość fali.

Przypuśćmy, że elektryczny wibrator pobudza do drgań umieszczony w pobliżu elektryczny rezonator. Pomiędzy wibratorem a rezonatorem niechaj znajdzie się, przypuśćmy, płyta metalowa dostatecznie rozległa; działanie wibratora na rezonator natychmiast ustaje. Metale pochłaniają zatem fale elektromagnetyczne, które padają na ich powierzchnię; czy mogą je również odbijać? Rys. 164 wyobraża schematycznie doświadczenie, w którym Hertz dał odpowiedź na to pytanie.



Rys. 164.

W ogniskowej linii dużego metalicznego, parabolicznie wygiętego zwierciadła umieszczal wibrator; w tym wibratorsie wywoływał drgania w znany nam sposób, przy

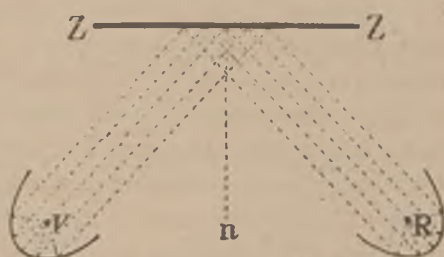


Rys. 165.

pomocy induktora Ruhmkorffa. Ażeby zdać sobie sprawę z biegu fal elektromagnetycznych w przestrzeni, musiał posłużyć się stosownym rezonatorem. Dwa proste pręty metalowe, leżące w przedłużeniu wzajemnym i kończące się naprzeciwko siebie kulkami (rys. 165), mogą stanowić taki rezonator;

jeżeli okres drgań własnych rezonatora zgadza się z okresem drgań własnych wysyłającego fale wibratora, rezonancja zdradza się iskierką przeskakującą w iskierniku rezonatora. Naprzeciwko zwierciadła otaczającego wibrator (rys. 164) wyobraźmy sobie drugie podobne zwierciadło; w linii ogniskowej drugiego zwierciadła ustawmy rezonator równoległe do iskiernika wibratora; fale od wibratora idące, skupione przez pierwsze zwierciadło, skoncentrowane przez drugie, działają silnie na rezonator.

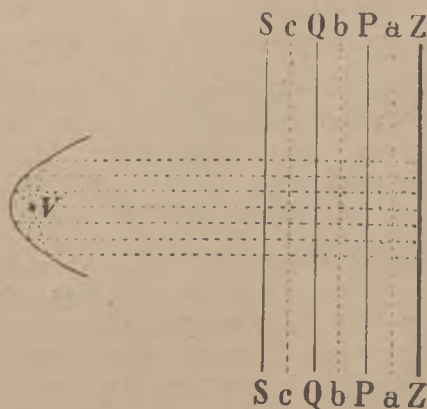
W opisanem przed chwilą doświadczeniu osi użytych parabolicznych zwierciadeł tworzyły ze sobą kąt 180° ; ustawmy obecnie te osi w taki sposób, ażeby przecinały się pod kątem prostym (rys. 166).



Rys. 166.

normalną n pod kątem 45° do kierunku odbicia, rezonator natychmiast zaczyna «odpowiadać». Odchylając zwierciadło od należytego położenia, doprowadzamy znów rezonator do zupełnego milczenia. Jak w § 70-ym tomu II-go, wnosimy zatem, że kierunek odbijania się fal leży w płaszczyźnie przechodzącej przez kierunek ich padania oraz przez normalną n do powierzchni granicznej; kąt odbicia jest przytem równy kątowi padania.

Naprzeciwko parabolicznego zwierciadła zawierającego w linii ogniskowej wibrator V ustawiamy płaskie metaliczne zwierciadło ZZ (rys. 167); po-



Rys. 167.

między wibrator a zwierciadło wprowadzamy rezonator, umieszczając go (równoległe do iskiernika wibratora) w rozmaitych

odległościach od zwierciadła. W bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni zwierciadła rezonator milczy; nie odpowiada również w punktach płaszczyzn PP , QQ , SS , równoległych do ZZ ; najsilniejsze natomiast drgania dostrzegamy, gdy rezonator znajduje się w jednej z płaszczyzn aa , bb , cc i t. d., które leżą w środkach odstępów ZP , PQ , QS . Przypomniawszy sobie treść §§ 65, 66 i 77-go tomu II-go, wyjaśniamy z łatwością te spostrzeżenia. Fale wysyłane przez wibrator wraz z odbijającymi się nieustannie od zwierciadła falami tworzą widocznie przez interferencję *układ fal stojących*; jak w Kundta akustycznym doświadczeniu, długość ZP lub PQ lub QS jest widocznie równa połowie długości fali wysyłanej przez wibrator. Przypuśćmy, iż znamy długość T okresu drgań dokonywających się w wibratorze; długość tę możemy obliczyć, naprzykład rozważając obraz iskry wibratora, utworzony w obracającym się zwierciadle (§ 98). Oznaczając przez λ długość biegnącej fali, przez c prędkość jej posuwania się, przez T długość okresu, mamy, jak wiadomo, zawsze

$$\lambda = cT$$

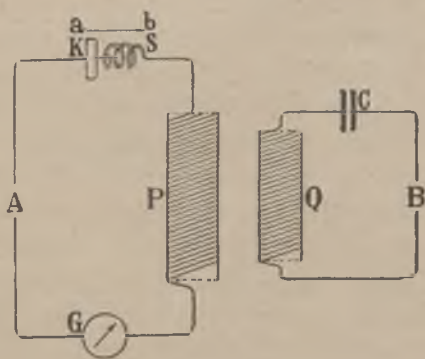
(por. §§ 62 i 63 tomu II-go); z równania tego możemy zatem obliczyć wartość prędkości c , jeżeli znamy T i zmierzylśmy λ . Taką drogą Hertz sprawdził, że prędkość rozchodzenia się elektromagnetycznych fal w zwykłym atmosferycznym powietrzu (które względem tych fal zachowuje się niemal tak samo jak próżnia) zgadza się rzeczywiście, jak to Maxwell przewidział, z prędkością rozchodzenia się światła w próżni (§ 101).

Przed chwilą widzieliśmy, że fale elektromagnetyczne odbijają się oraz interferują według praw przytoczonych w rozdz. V ym tomu II-go; podobnie zachowują się fale świetlne, jak o tem w wykładzie nauki optyki szczegółowiej powiemy. Hertz przekonał się również, że fale elektromagnetyczne mogą *załamywać się* (np. w pryzmacie stosownych rozmiarów, wyrobionym z parafiny lub siarki), podobnie jak załamują się świetlne. Jakkolwiek zatem we własnościach fal elektromagnetycznych i świetlnych wiele jest podobieństwa, wszelako co *do długości* między pierwotnymi elektromagnetycznymi falami Hertza a falami świetlnymi zachodziła różnica ogromna: w doświadczeniach Hertza długości otrzymanych fal wynosiły zwykle kilka metrów; tymczasem długość *fali świetlnej* (na które organ nasz wzrokowy jest wrażliwy) porusza się, jak zobaczymy, w granicach od 4 do 8 setosięcznych części centymetra. Następcy Hertza dokładali więc starań usilnych, ażeby, zmniejszając rozmiary użytych wibratorów, uzyskać fale elektromagnetyczne możliwie najkrótsze. Fizyk rosyjski Lebediew zbudował w r. 1895-ym wibrator, którego długość wynosiła załedwie 2·6 mm; pobudzany do drgań elektrycznych, wibrator ten wywoływał fale o długości 6 mm,

blisko tysiąc razy krótsze niż pierwotnie przez Hertza wytworzone fale. W ostatnich czasach zdołano zejść jeszcze niżej; umiemy otrzymywać dzisiaj fale elektromagnetyczne, których długość leży poniżej 0,3 mm. Ażeby wyjaśnić, dlaczego przekroczenie tej granicy jest godnym uwagi naukowym postępem, musimy powołać się jeszcze raz na wiadomości, które dopiero w następujących rozdziałach będziemy mogli szczegółowiej przedstawić. Tak zwane *źródła światła* wysyłają zazwyczaj nie tylko świetlne fale, lecz również i znacznie krótsze (*poza-fioletowe*) i znacznie dłuższe (*pozaczerwone*); na przykład w łuku elektrycznym, bijącym pomiędzy rtęciowymi elektrodami, powstają, pośród innych, również i fale pozaczerwone o długości 0,342 mm. Umiemy zatem już dzisiaj wzbudzać w pracowni, sztucznie, fale elektromagnetyczne *krótsze* niż te, które zauważono w promieniowaniu pewnych łuków elektrycznych; nasze elektryczne wibratory potrafią wzniesić fale krótsze niż fale, którym atomy rozżarzonych ciał materialnych dają niekiedy początek.

§ 103. Krystaliczny detektor.

Pragnąc przekonać się o obecności lub ustroju fal elektromagnetycznych w danym zakresie lub punkcie przestrzeni, Hertz, jak widzieliśmy, posługiwał się rezonatorem, w którego przerwie, gdy sprzyjają warunki, powstaje elektryczna iskierka. Taki przyrząd jest grubym, mało wrażliwym *detektorem* elektromagnetycznego falowania; zadowolnić się nim możemy tylko wówczas, gdy mamy do czynienia z długimi i energicznymi falami. Znamy dziś doskonalsze przyrządy, które pozwalają dogodniej wykrywać i badać dokładniej drgania elektryczne, bądź w obwodach zamkniętych, bądź w otwartych rezonatorach Hertza. Wspominamy tu krótko o t. zw. *krystalicznym* detektorze, który bywa dziś w częstym użyciu. Wyobraźmy sobie obwód zawierający cewkę *P* oraz zwykły galwanometr *G*; do tego obwodu włączona jest płytka *K*, wyrobiona ze stosownego krystalicznego materiału; uciska ją lekko ostry koniec metalowej sprężynki *S*; z przeciwnej strony płytka jest połączona niezmiennie z drutem prowadzącym do pozostałych części obwodu (rys. 168). Układ złożony ze sprężyny i płytki okazuje szczególną właściwość: przewodzi stosunkowo dość łatwo prąd płynący w jednym kierunku, prądowi zaś



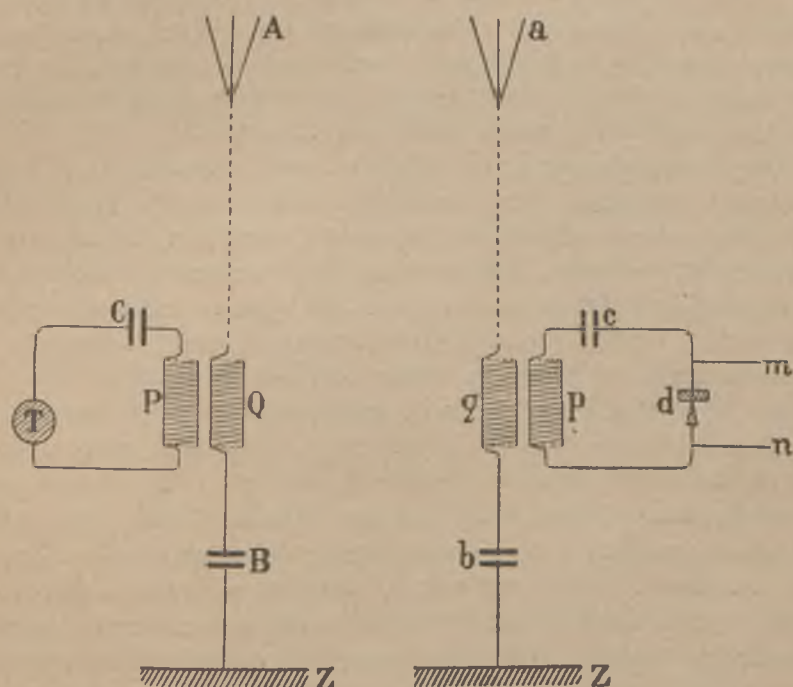
Rys. 168.

płynącemu w przeciwnym kierunku przeciwstawia opór nieporównanie znaczniejszy. W którym kierunku opór jest stosunkowo mały, w którym ogromny, zależy przedewszystkiem od natury ciał, z których detektor jest zbudowany. Przypuśćmy dla określoności, że detektor *KS* przepuszcza łatwo prąd w kierunku *ab*; praktycznie rzecz biorąc, możemy powiedzieć, że znosi prąd płynący w kierunku *ba*. Wyobraźmy sobie teraz, że na obwód *AKSPGA* działa indukcyjnie, za pośrednictwem cewki *P*, inny obwód *BQCB*, w którym odbywają się drgania elektryczne. Gdyby obwód *AKSPGA* nie zawierał detektora, powstawałyby w nim prądy elektryczne przemienne, które, jak wiadomo z § 95-go, nie sprawiałyby wychyleń wskazówki w zwykłym galwanometrze *G*. Ale detektor *KS* pozwala płynąć w obwodzie *AKSPGA* li tylko prądom skierowanym jak *ab*; galwanometr *G* doznaje zatem szybko po sobie następujących, w jedną tylko stronę działających impulsów, które, łącząc się, wywołują w nim trwałe wychylenie. Detektor *wyprostowyywa* więc prąd płynący w obwodzie; dlatego możemy wykrywać i mierzyć ów prąd, nawet i wówczas, gdy jego natężenie jest bardzo słabe.

§ 104. Radjotelegrafia i radjotelefonja.

Wkrótce po dokonanych przezeń odkryciach, zapytywano Henryka Hertza, czy nie można byłoby zastosować fal elektromagnetycznych, które nas nauczył wytwarzać, do przesyłania sygnałów poprzez mury i ściany, poprzez góry i morza, bez pośrednictwa przewodów niezbędnych w zwyczajnym elektrycznym telegrafie. W odpowiedzi na to pytanie wielki badacz wyraził się powściągliwie, sceptycznie. A jednak już w kilka lat po tej rozmowie, w roku 1896-ym, młody włoski inżynier Guglielmo Marconi wstąpił śmiało na drogę, która zdaniem Hertza rokowała mało nadziei. Dziś, jak wiadomo, t. zw. *telegraf* i *telefon bez drutu* niemal po całej powierzchni kuli ziemskiej roznosi rozmowy, sygnały lub dźwięki muzyczne. Słuchamy owych wieści, dzięki przybiegającym elektromagnetycznym falom, na stacjach *odbiorczych*, które bywają odległe o setki i o tysiące kilometrów od stacyj wysyłających fale, *nadawczych*; co więcej, dzięki wrażliwości nowoczesnych detektorów stacje odbiorcze stają się coraz prostsze, coraz łatwiej dostępne. *Radjotelegrafia* i *radjotelefonja* urasta szybko w potęgę, która dokąd nas doprowadzi, niepodobna przewidzieć.

O urządzeniu stacyj radjotelegraficznych i radjotelefonicznych możemy powziąć niejaki wyobrażenie ze schematycznego rys. 169 go. Na stacji nadawczej, po lewej stronie rysunku, spostrzegamy obwód *TCPT*, który zawiera kondensator *C*, cewkę *P* oraz t. zw. *generator* (twornicę) *T* drgań elektrycznych; takim generatorem może być iskra elektryczna pobudzana przez induktor, pewien typ prądnic (prądnice *Alexandersona*) albo np. potężna *lampa elektronowa*, przyrząd, o którego budowie



Rys. 169.

i działalności będzie mowa w następującym rozdziale. Odbywające się w obwodzie *TCPT* drgania za pośrednictwem cewki *P* działają indukcyjnie na cewkę *Q*, która wchodzi w skład t. zw. *antenny A*. Antenną jest wysoki, izolowany, metaliczny przewodnik, który składa się zazwyczaj z układu zbiegających się drutów; oprócz cewki *Q* antena zawiera zwykle jeszcze kondensator *B*, którego jedna okładka łączy się z ziemią *Z*. Antenna, w istocie rzeczy, jest wibratorem Hertza, bardzo znacznych rozmiarów. Podniecana do drgań przez drgania dokonywające się

w obwodzie $TCPT$, antenna wysyła w otaczające obszary fale elektromagnetyczne tem potężniejsze, im dokładniej ona jest *dostrojona* do obwodu $TCPT$. Częstość drgań wytwarzanych w obwodzie $TCPT$ zależy przedewszystkiem od pojemności kondensatora C tudzież od współczynnika indukcji własnej cewki P (§ 98); te zatem przyrządy są tak urządzone, że można zmieniać w szerokich granicach (czyli *regulować*) pojemność kondensatora oraz współczynnik indukcji własnej cewki. Częstość drgań, które w $TCPT$ dochodzą do skutku, rozstrzyga o długości fal wysyłanych przez antenę A . Posługujemy się zwykle bardzo długimi falami w radjotelegrafii i radjotelefonii; długość λ tych fal wynosi niekiedy kilkaset metrów, często bywa jednak znacznie większa, dochodząc nawet kilkunastu kilometrów.

Fale elektromagnetyczne wysłane przez antenę stacji nadawczej dobiegają, choć oczywiście osłabione, do stacji odbiorczej. Stacja odbiorcza (por. prawą część rys. 169-go), podobnie jak nadawcza, jest zaopatrzona w antenę a , która gra rolę wielkiego rezonatora Hertza. Jeżeli okres drgań własnych tej anteny zgadza się z okresem zmienności pól w fali elektromagnetycznej, na której spotkanie ona jest wystawiona, fala ta budzi w antenie energiczne drgania, które z kolei, przez indukcję, wywołują drgania elektryczne w obwodzie $pcdp$. Detektor d wyprostowuje te drgania (§ 103), tak iż do ubocznego obwodu mn odpływa prąd stałego kierunku; taki prąd, jak wiadomo, możemy wykryć np. zwykłym galwanometrem. Podobnie jak antenna A stacji nadawczej, antenna a stacji odbiorczej musi być dostrojona do obwodu z nią sprzężonego, zatem do $pcdp$; obadwa przyrządy muszą być dostrojone do okresu fal przybiegających. Pojemności kondensatorów b i c oraz współczynników indukcji własnej cewek p i q są zmienne w szerokich granicach, co ułatwia wspomniane dostrajanie.

Wyobraźmy sobie, że, przy pomocy stosownego mechanizmu, pozwalamy działać tylko przez pewien, krótszy lub dłuższy odstęp czasu owym pobudkom, które wznecają drgania elektryczne w obwodzie $TCPT$. Fale dobiegające stacji odbiorczej będą wówczas *przerywane* w odstępach czasu zgodnych z pauzami, które im narzucamy na stacji nadawczej. Ze stacji nadawczej do odbiorczej przenoszą się tym sposobem sygnały telegraficzne; z sygnałów łatwo składają się zgłoski, wyrazy i zdania. Gdy pragniemy telefonować «bez drutu», zmieniamy natężenie pły-

nących w antenie *A* prądów, na przykład działaniem fal głosowych na mikrofon włączony do tej anteny; w tym razie, na stacji nadawczej, posługujemy się najlepiej lampą elektronową jako generatorem *nie* zanikających drgań elektrycznych.

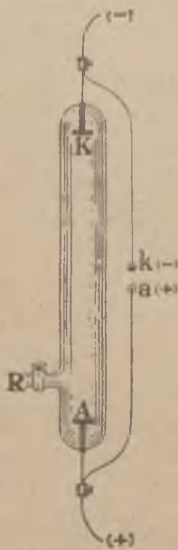
Antenną stacji odbiorczej bywa niekiedy cewka drutu, zwykle kilkumetrowej średnicy. Przypuśćmy, że linje magnetyczne fal uderzających o cewkę przebiegają przez nią nawskroś, w kierunku osi; w skrętach cewki indukują się wówczas prądy elektryczne przemienne, które budzą drgania elektryczne w obwodzie *p c d p*. Taką cewkę nazywamy *antenną ramową*.

ROZDZIAŁ ÓSMY.

Elektrony.

§ 105. Strumienie katodowe.

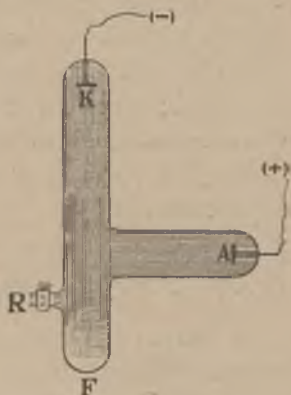
Wyobraźmy sobie rurę szklaną AK (rys. 170), wypełnioną powietrzem; w jej zakończeniach wtopione są elektrody: anoda A i katoda K ; elektrody te łączą się metalicznie z biegunami a i k induktora Ruhmkorffa (§ 89). Boczna, zaopatrzona kurkiem,



Rys. 170.

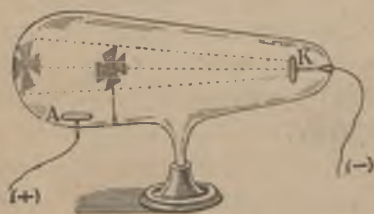
rurka R pozwala rozrzedzać powietrze w przyrządzie (np. przy pomocy rotacyjnej pompy, por. § 54 tomu II-go) lub też wprowadzać doń obce gazy. Dopóki powietrze zawarte w rurze ma normalną gęstość atmosferycznego powietrza, wyładowania elektryczne odbywają się pomiędzy a i k , nie odbywają się pomiędzy A i K ; droga ak jest krótsza, jej opór jest mniejszy. Lecz jeżeli rozrzedzimy powietrze w AK , tak iż jego ciśnienie wynosi kilka milimetrów rtęci (§ 39 tomu II-go), wyładowania pomiędzy a i k ustają, zaczynają się zaś pomiędzy A i K ; opór przeciwstawiany wyładowaniom przez kolumnę gazu zmniejsza się zatem, gdy gęstość gazu maleje. Przenosząc się z ak do AK , wyładowania przybierają zarazem nową postać. pomiędzy biegunami a i k biła od czasu do czasu nagła, ostra, wąziutka błyskawica, trzaskając jak wystrzał; w rozrzedzonym gazie, w rurze AK , widzimy słup świetlny, trwały, przynajmniej napozór nieprzerwany; barwa, granice, budowa słupa zależą od natury gazu, służącego do doświadczeń, od panującego w nim ciśnienia, od rodzaju elektrycznych pobudzeń, wzniecających świecenie. Powszechnie znane, uderzające zjawiska *jarzenia się* gazów rozrzedzonych, wywoływane przez elektryczne wyładowania,

zajmują oddawna uwagę uczonych; nie wejździemy tu jednak w ich opis ani w wytłumaczenie. Przypuścimy odrazu, że, rozrzedzając coraz bardziej gaz, który w rurze pozostał, zmniejszyliśmy jego ciśnienie do kilku tysięcznych części milimetra rtęci; jarzenie się gazu blednie i znika, natomiast ścianki szklanej rury poczynają świecić, zwykle zielonkawem, dosyć mdłym światłem. Świecenie to szkła, zwane jego *fluorescencją*, wynika z działania na ściankę jakiegoś *wyptywu*, *strumienia*, *idącego z katody*. Ażeby przekonać się o tem, powtórzmy doświadczenie w rurze *AK* zgiętej, jak okazuje rys. 171; szkło fluoryzuje wówczas w okolicy *F*, gdzie trafia je wypływ wysłany przez katodę *K*; kolanko zawierające anodę *A* fluoryzuje bardzo słabo i tylko w części zbliżonej do drogi katodowej emisji. Szkło w miejscu *F* rozgrzewa się niebawem mocno; strumień biegnący z katody przynosi widocznie ze sobą pewną, stosunkowo dość znaczną ilość energii.



Rys. 171.

Już ostatnie doświadczenie pozwalało przypuszczać, że emisja katodowa płynie w kierunkach linii prostych; że jest tak istotnie, upewniamy się o tem w następującem, przez Crookesa wskazanem doświadczeniu. Na drodze katodowych strumieni umieszczamy krzyżyk metalowy (rys. 172); na przeciwległej ścianie rury spostrzegamy wówczas *cień* świadczący, iż katodowa emisja, podobnie jak promienie



Rys. 172.

światła, porusza się w przestrzeni po drogach prostych. Nadajmy katodzie postać wklęsłej czaszy czyli odcinka powierzchni kuli, której środ-



Rys. 173.

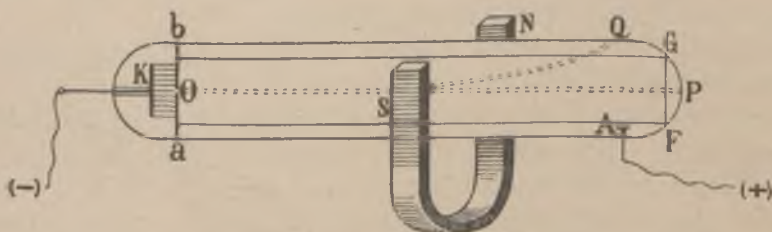
kiem jest punkt *O* (rys. 173); wypływ z katody biegnący zbiera się wówczas, jak w ognisku, w punkcie *O*; umieszczona tam

platynowa blaszka rozżarza się do białości. Każdy zatem element powierzchni katody wyrzuca emisję w kierunku swej (oczywiście zewnętrznej) *normalnej*.

Szczególny rodzaj wypływu, który (jak pokrótce tu powiedzieliśmy) w gazach rozrzedzonych wybiega z katody, został odkryty przez niemieckiego uczonego Plückera w r. 1859-ym; nosi on dotychczas nazwę *katodowych promieni*, którą mu późniejsi badacze nadali. Lecz nazwa ta, jak zobaczymy niebawem, jest nie stosowna; strumień płynący z katody *nie* jest promieniowaniem. Czemże on jest? *co* mianowicie porusza się w strumieniu katodowym? Odpowiedzi na to pytanie musimy szukać znów w doświadczeniu.

§ 106. Działanie pola magnetycznego na strumień katodowy.

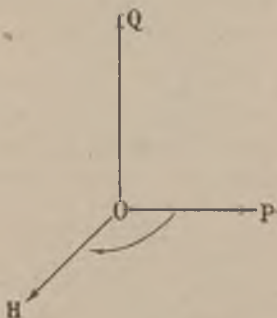
W rurze wyobrażonej na rys. 174-ym katodą *K* jest płaski krążek, płaską swą powierzchnią zwrócony prostopadłe do osi rury; *A* jest anodą, której położenie i postać, jak wiemy, nie ma



Rys. 174.

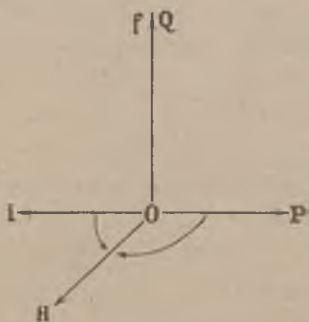
wpływu na przebieg zjawiska. Naprzeciwko katody, równolegle do niej, znajduje się sporządzona z miki płaska ścianka *ab*; przepuszcza ona tylko ostrą wiązkę katodowego strumienia, tę mianowicie, która przebiega przez mały otwór *O* ścianki; poza tym otworem wiązka porusza się wzdłuż płytki *OFG* pokrytej platynocyjankiem barowym lub innym związkiem zdolnym do żywej fluorescencji. Muskając płytkę *OFG* stycznie, wiązka strumienia katodowego pozostawia na niej prostolinjową smugę świetlną *OP*; na ściance rury, w *P*, pojawia się znana nam plamka fluorescencyjna. Zbliżywszy teraz do rury magnes lub elektromagnes *NS*; ustawiamy go w taki sposób, ażeby linie pola magnetycznego przecinały prostopadłe drogę wiązki katodowego strumienia. Wiazka *OP* zakrzywia się wówczas i odchyła,

przybierając postać OQ ; plamka fluorescencyjna pojawia się w Q . Przypuśćmy, że pierwotna wiązka OP kierowała się poziomo i dla nas biegła *na prawo*; przypuśćmy, że linie pola magnetycznego dążą *ku nam* poziomo, prostopadłe do kierunku OP ; biegun N leży zatem *poza* płaszczyznę rys. 174-go, biegun S leży *przed* nią. Wiązka OP odgina się wówczas w pionowej płaszczyźnie OPQ ; znak P względem nas posuwa się *ku górze*. Związek tych kierunków możemy wyrazić jak następuje. Wyobraźmy sobie trzy wzajemnie do siebie prostopadłe kierunki: kierunek OH linii pola magnetycznego, kierunek OP pierwotnej wiązki katodowego strumienia, kierunek OQ , w którym, pod wpływem magnetycznego pola, posuwa się plamka P (rys. 175); obserwator przez którego, od stóp do głowy, biegnie kierunek OQ , dostrzega, iż ruch obrotowy od OP do OH odbywa się w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek na tarczy zegara.



Rys. 175.

Spostrzeżenia, które streściliśmy, pozwalają utworzyć pierwsze, ogólnikowe wyobrażenie o istocie katodowej emisji. Przypuśćmy, że z katody wybiega nieustanny grad jakichś maleńkich cząstek, obdarzonych *ujemnie* elektrycznymi ładunkami; ponieważ katoda jest biegunem ujemnym, pojmujemy natychmiast, dlaczego odpycha cząstki ujemnie naładowane, dlaczego wypędza je w kierunkach, do każdego elementu powierzchni normalnych (§ 18). Przypuśćmy, że katodowa emisja składa się z takich cząstek; wyrzucone z katody, biegną one ławą przez rurę; dzięki swobodzie, z której w rozrzedzonej gazie korzystają, biegną prostoliniowo, przez zwykłą bezwładność. Jakże zachowałyby się w polu magnetycznym taka lawina tryskających z katody cząstek ujemnych? Ponieważ każda cząstka jest naładowana ujemnie, jej ruch w kierunku OP (rys. 176) jest równoważny pewnemu słabemu elektrycznemu prądowi płynącemu w przeciwnym kierunku Oi (§ 34). Z rozdz. IV-go

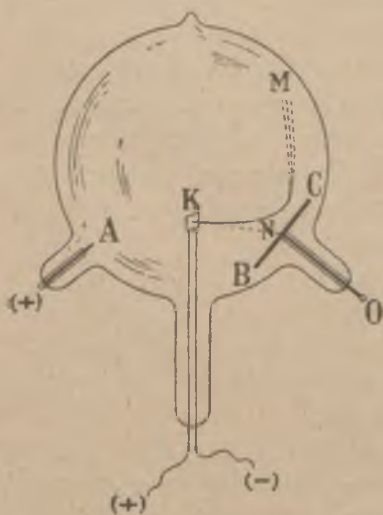


Rys. 176.

wiemy, jak działa pole magnetyczne na umieszczony w niem element prądu. Według § 72-go, jeżeli Oi (rys. 176) wyobraża kierunek prądu, OH zaś kierunek linii pola, obserwator umieszczony wzdłuż siły Of , którą pole wywiera na element prądu, dostrzega, iż ruch obrotowy od Oi do OH odbywa się przeciwnie niż poruszają się wskazówki na tarczy zegara (por. rys. 104 § 72-go). Widzimy obecnie, że kierunek OQ odchylenia się wiązki katodowej zgadza się z kierunkiem Of działania pola magnetycznego na biegnące cząstki. *Emisja katodowa zachowuje się w polu magnetycznem, jak gdyby była strumieniem cząstek niosących na sobie ujemne elektryczne ładunki.*

§ 107. Działanie pola elektrycznego na strumień katodowy.

Jeżeli strumień katodowy, jak przypuściliśmy, składa się z cząstek naładowanych ujemnie, powinien poddawać się w takim razie wpływowi pola nie tylko magnetycznego lecz również i elektrycznego. W przyrządzie wyobrażonym na rys. 177-ym A jest



Rys. 177.

anodą, katodę zaś K stanowi mała i cienka platynowa (lub irydjoplatynowa) blaszka, na której powierzchni znajduje się odrobina tlenku wapniowego, barowego lub strontowego. Działaniem osobnego (pomocniczego) prądu elektrycznego rozgrzewamy katodę K do białości; przy pomocy prostego urządzenia (opuszczonego na rysunku), nie wyłączając pomocniczego prądu, który rozżarza katodę, możemy włączyć do bańki napięcie wynoszące od 100 do 200 woltów; gdy tak postąpimy, z katody wybiega wiązka ostro odgraniczona, łatwo widoczna dzięki jarzeniu się, które

na drodze swej wywołuje w gazie rozrzedzonym. W bańce znajduje się jeszcze metalowa płytka BC , osadzona na pręciku metalowym ON . Dopóki płytka BC nie jest naładowana, wiązka katodowa, wybiegłszy z katody w kierunku normalnej, porusza się

dalej po torze prostoliniowym KN ; lecz skoro płytkę BC naelektryzujemy *ujemnie*, widzimy natychmiast, jak wiązka odgina i odchyła się, przybierając postać KM . Emisja katodowa jest więc niewątpliwie rojem *ujemnych* elektrycznych pocisków.

Katoda, którą tu opisaliśmy, wynaleziona przez Wehnelta w r. 1904-ym, wysyła strumień nadwyzczaj podatny na działanie wykręcające pola magnetycznego; przekonywamy się o tem w doświadczeniu następującem. Do katodowej bańki Wehnelta zbliżamy solenoid, przez który płynie silny prąd elektryczny (rys. 178); świecąca wiązka katodowa zakręca się w obwód niemal zamknięty, kołowy, którego osią jest oś solenoidu. Wiemy istotnie z § 69-go, że linie pola magnetycznego tworzonego przez solenoid są niemal ściśle prostymi, równoległymi do osi solenoidu; dokoła tych linii okręca się droga katodowego strumienia. Piękne to doświadczenie uzmysławia budowę pola magnetycznego, sprawianego przez solenoidalny prąd elektryczny; potwierdza ono zarazem nacznie, że strumień katodowy pod wpływem stosownie skierowanego pola magnetycznego zakrzywia się w koło, jak tego mogliśmy oczekiwać podług artykułu poprzedzającego.

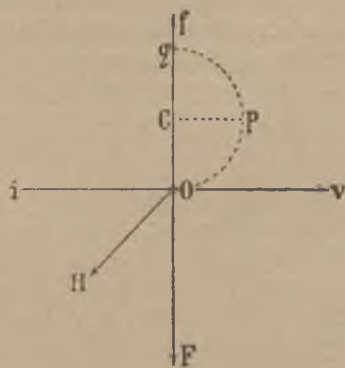


Rys. 178.

§ 108. Własności cząstek katodowych.

Czemże są cząstki w katodowym strumieniu biegnące? jaka jest ich właściwa natura? rozwiązanie tych trudnych zagadnień powiodło się dopiero w r. 1897-ym. Znakomity uczony angielski Sir J. J. Thomson w Cambridge pokazał, że można zmierzyć masę, ładunek i prędkość katodowych pocisków; z tych zaś pomiarów wynika odpowiedź na ważne pytania, które postawiliśmy sobie. Udowodnimy przedewszystkiem co następuje: mierząc odchylenie, którego wiązka katodowa doznaje w znanem polu magnetycznem i elektrycznem, możemy znaleźć wartość ilorazu: ładunku cząstki katodowej podzielonego przez jej masę.

Przypuśćmy, iż cząstką o masie m , rzuconą w punkcie O (rys 179) z prędkością v , w kierunku Ov , porusza się (pod wpływem pola magnetycznego) po kołowym obwodzie Opq , którego środek znajduje się w C ; promień CO tego obwodu



Rys. 179.

oznaczamy przez r . Na zasadzie § 28-go tomu I go twierdzimy, że cząstka m w ruchu kołowym okazuje przyspieszenie dośrodkowe v^2/r . W miejscu O cząstka m znajduje się zatem pod wpływem siły mv^2/r skierowanej ku C (por. § 67 tomu I-go); siłę tę wywiera pole magnetyczne.

Rozumiejmy przez e bezwzględną wartość ładunku cząstki m i przypuśćmy, że w jednostce objętości, dokoła O , znajduje się N takich katodowych cząstek; każda biegnie z prędkością v w kierunku Ov , w czasie t zatem odbywa w tym samym kierunku drogę vt . Wyobraźmy sobie mały kwadracik, rozciągłości S , umieszczony prostopadłe do Ov w punkcie O ; przez S w czasie t przebiega w kierunku Ov liczba $SNvt$ cząstek (por. § 74 tomu II-go); przenoszą one ładunek ujemny, którego bezwzględna wartość wynosi $SNevt$. Przez kwadracik S w jednostce czasu przepływa więc w kierunku Ov ładunek ujemny, którego bezwzględna wartość jest $SNev$; podług § 34 go możemy powiedzieć, że ten przepływ jest równoważny elektrycznemu prądowi skierowanemu wprost przeciwnie niż Ov , prądowi, którego natężenie i wynosi

$$1. \quad i = SNev.$$

Wiemy z §§ 72 i 106 go, że magnetyczne pole, którego linie są skierowane prostopadłe do Ov , mianowicie jak OH na rys. 179 ym, wywiera na element l tego prądu siłę skierowaną jak Of na tymże rysunku; jeżeli H jest wektorem pola, siła ta wynosi

$$2. \quad liH = lSNevH.$$

Wyobraźmy sobie element, którego podstawą jest S , wysokością zaś l ; objętość elementu wynosi lS , zawarta w nim liczba cząstek jest lSN . Na tę właśnie liczbę lSN wywierana jest siła (2); na jedną zatem cząstkę przypada siła evH . Siłę evH , w punkcie O skierowaną ku C , przyrównujemy wspomnianej dośrodkowej sile mv^2/r ; otrzymujemy

$$3. \quad mv = eHr.$$

W obecnym zadaniu mamy dwie niewiadome: prędkość v oraz iloraz e/m ; za wiadome uważamy wartości H oraz r . Równanie (3) jest pierwszym związkiem pomiędzy niewiadomymi a wiadomymi nam wielkościami. Ażeby uzyskać związek drugi, moglibyśmy zastosować do ruchu katodowej cząstki prawo dynamiki, wypowiedziane w równaniu (7) § 74-go tomu I go; oznaczając przez V różnicę potencjałów czynną w katodowej rurze, piszemy (por. § 26):

$$4. \quad \frac{1}{2}mv^2 = eV;$$

z ubocznych jednak powodów, w które tu nie wejdziemy, twierdzenie (4) stosuje się tylko przybliżenie do obecnego zadania. Dokładniejsze wyniki otrzymujemy, działając na katodowe cząstki dodatkowym (zewnętrznym) polem elektrycznym, skierowanym prostopadłe zarazem do Ov i do OH ; jeżeli E jest wektorem tego pola, wywierana przez nie siła

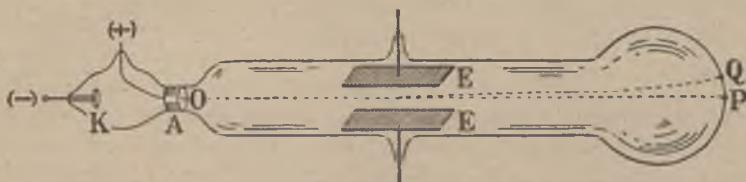
$$5. \quad F = eE$$

ma równoważyć się z siłą evH . Ponieważ cząstki katodowe są naładowane ujemnie, wektor E musi być skierowany przeciwnie niż siła F działać powinna. Dopóki takie pole elektryczne dodatkowe nie jest czynne, cząstka m biegnie po torze Opq (rys. 179); gdy pole zostało wzbudzone, skutek siły evH jest

zniesiony, cząstka porusza się po torze prostoliniowym Ov , tym samym, który zataczała poprzednio, zanim została poddana wpływowi pola magnetycznego. Mamy wówczas

$$6. \quad eE = evH \quad \text{zatem} \quad v = E/H.$$

Przy pomocy przyrządu, wyobrażonego na rys. 180-ym, można dokonać podobnych pomiarów; A jest tutaj anodą, K jest katodą; wybiegająca z O wiązka uderza w miejscu P o szklaną ściankę rury, dopóki ani magnetyczne ani dodatkowe elektryczne pole jeszcze nie jest czynne. Jeżeli działa tylko magnetyczne



Rys. 180.

pole (takie samo, jak w doświadczeniu przedstawionem na rys. 174-ym), wiązka OP zakrzywia i odchyła się, tworząc w Q plamkę fluorescencyjną; gdy wreszcie magnetyczne i dodatkowe elektryczne pole jednocześnie są czynne, katodowa wiązka przybiera napowrót prostą początkową postać OP . Elektrody EE umieszczone w rurze służą do wytwarzania w niej dodatkowego pola elektrycznego, którego działanie znosi wpływ pola magnetycznego. Jak widzimy, opisane doświadczenie jest wyborną ilustracją prawdy, zawartej w dwóch pierwszych zasadach Newtona dynamiki; o ich słuszności przekonywamy się dogodniej i dokładniej w przypadku katodowego strumienia aniżeli na przykładzie kamienia rzuconego lub biegnącego dokoła ziemi księżycu.

Wывód powyższy objaśnia ogólnikowo sposoby postępowania, którymi posługują się fizycy celem znalezienia wartości ilorazu e/m ładunku katodowej cząstki i jej masy. Wartość ta, jak zobaczymy natychmiast, jest bardzo ważna; dla poznania jej uczeni, od ćwierci wieku, nie szczędzą wysiłków. Główne wyniki tych badań możemy streścić krótko jak następuje. Utworzony dla cząstek katodowych iloraz e/m nie zależy od natury gazu, który w wielkiem rozrzedzeniu pozostaje w rurce katodowej; nie zależy również od natury katody ani anody, od postaci i urządzenia rurki, od rodzaju źródła, które ją elektrycznym prądem zasila; z pewnem zastrzeżeniem, o którym niżej powiemy (§ 116), nie zależy od prędkości v cząstek ani od napięcia V w rurce. Utworzony dla katodowych cząstek iloraz e/m jest zatem *stałą powszechną*; według najlepszych spóczesnych pomiarów wartość tej stałej wynosi około

$$7. \quad \left(\frac{e}{m} \right)_{\text{cz. kat.}} = 5.3 \times 10^{17} \text{ el.-stat. jedn. ład./gram.}$$

Wobec tych faktów niepodobna przypuścić, ażeby cząstki biegnące w katodowym strumieniu były zwyczajnymi, znanymi nam z chemii, atomami materji. Sir J. J. Thomson pierwszy, w r. 1897-ym, wypowiedział hipotezę, dziś potwierdzoną wielokroć razy, według której *cząstki te są swobodnymi elektronami*, odłączonemi od towarzyszy, wraz z którymi tworzą zwyczajnie normalne, elektrycznie obojętne czyli *neutralne* chemiczne atomy (§ 42). Jeżeli zgodzimy się na to założenie, musimy katodowej cząstce przypisać elektryczny ładunek, co do znaku przeciwny ładunkowi kationu wodorowego w zjawiskach elektrolizy (§ 43) ale co do bezwzględnej wartości e dokładnie taki sam jak ładunek e_H tego kationu. Z równania (3) § 43-go jest nam wiadomo, że iloraz e_H/m_H utworzony dla kationu H jest dany przez odwrotność $1/A_H$ elektrochemicznego równoważnika wodoru; według § 43 go możemy zatem założyć

$$8. \quad \frac{e_H}{m_H} = \frac{10^{15}}{3.482} \text{ el.-stat. jedn. ład./gram.}$$

Przypuszczając (jak powiedzieliśmy), że ładunek e cząstki katodowej i ładunek e_H kationu wodorowego są identyczne, wyprowadzamy z (7) i (8), iż

$$9. \quad m_H = 1845 m_{\text{cz. kat.}}$$

Kation wodorowy jest resztą, pozostającą z normalnego atomu wodoru po stracie jednego elektronu (§§ 42 i 43); skoro więc *masa cząstki katodowej jest 1845 razy mniejsza niż masa wodorowego kationu, jest ona tem samem 1846 razy mniejsza niż masa normalnego atomu wodoru*. Taki wniosek ma pierwszorzędną doniosłość. Odkąd Dalton, dla wytłumaczenia praw tworzenia się związków chemicznych, w początku XIX-go stulecia, odwołał się do hipotezy atomistycznej (§ 25 tomu II-go), t. zw. *atom chemiczny* był najdalszą granicą ilościowego badania materji; u progu chemicznego atomu, przez blisko sto lat, zatrzymywał się wzrok wiedzy. Od czasu odkryć Sir J. J. Thomsona wiemy niewątpliwie, że *istnieją w przyrodzie masy mniejsze niż masa atomu wodoru*, najdrobniejsza z pomiędzy znanych w chemji mas atomowych. Od czasu tych odkryć atomy wodoru, tlenu, chloru, rtęci i t. p. przestały być dla nas niepodzielnymi jednostkami; uważamy je dzisiaj za układy zawite, za mechanizmy, których koleje i ustrój przenikamy coraz dokładniej.

Wspominamy tu jeszcze o prędkości ruchu elektronów w katodowym strumieniu. Z równania (4) wynika (skoro iloraz e/m jest stały), że kwadrat prędkości elektronu v^2 jest proporcjonalny do użytego w katodowej rurce napięcia V . Przypuśćmy, że pracujemy stosunkowo słabym napięciem 110 woltów (np. w rurce Wehnelta); z równania (4) wypada w przybliżeniu

$$10. \quad v = 6 \times 10^8 \text{ cm/sek.}$$

W stosunku do prędkości, z którymi miewamy zazwyczaj do czynienia w dynamice brył materialnych, jest to prędkość ogromna; wszakże przeciętna prędkość wystrzelonej z rewolweru kuli waha się około 3×10^4 cm/sek; prędkość rozchodzenia się głosu w zwykłym atmosferycznym powietrzu wynosi około 3.4×10^4 cm/sek, prędkość punktu na równiku ziemi, w jej ruchu obrotowym dziennym względem gwiazd stałych, jest 4.63×10^4 cm/sek. Prędkość (10) jest przeszło 10000 razy większa niż trzy przytoczone prędkości. Ale dla cząstki katodowej jest to prędkość stosunkowo nieznaczna. Badając katodowe strumienie, znajdujemy w nich często prędkości dochodzące wartości

$$11. \quad v = 10^{10} \text{ cm/sek,}$$

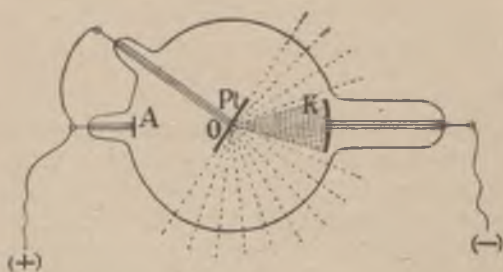
niekiedy nawet przechodzące tę wartość; według związku (4) odpowiada ona napięciu przenoszącemu 28000 woltów. *Bieg cząstek katodowych*, jak widzimy, bywa *dziesiątki lub setki tysięcy razy szybszy aniżeli najszybsze ruchy, jakie dostrzegamy na ziemi.*

§ 109. Promieniowanie Röntgena.

W listopadzie 1895 go roku, W. C. Röntgen, podówczas profesor Uniwersytetu w Würzburgu, dokonał nieoczekiwanego i doniosłego odkrycia. Zajęty badaniem własności katodowych strumieni, uczony ten umieścił kartę papieru pokrytą platynocyjankiem barowym w pobliżu rury, w której te strumienie wytwarzał. Skoro tylko w rurze rozpoczął się bieg katodowego strumienia, platynocyjanek poczynął świecić światłem fluorescencyjnym; świecenie nie przerywało się, choć rurkę zasłanianio czarnym, nieprzezroczystym papierem; w odległości nawet dwóch metrów od rury fluorescencja była niewątpliwie widoczna. Wkrótce Röntgen już wiedział, że szklana ściana rury a także i inne ciała stałe, gdy uderzają o nie katodowe strumienie, wysyłają dokoła promieniowanie szczególnego rodzaju, o nowych i zadziwiających własnościach.

Wyobraźmy sobie bańkę katodową następującej budowy: A jest w niej anodą, dowolnego zresztą położenia i kształtu (rys. 181); katoda K , jak w opisanem poprzednio doświadczeniu Crookesa (§ 105), jest wklęsła; w ognisku O zbiegają się

zatem wyrzucane z katody, z fantastyczną prędkością pędzące elektrony; w tem miejscu spotykają one t. zw. *antykatodę Pt*,



Rys. 181.

plytkę połączoną metalicznie z anodą. Antykata, zasypywana gradem elektronów, wysyła promieniowanie, które nazywamy bądź *X-promienio-*
waniem, bądź częściej *promieniowaniem Rönt-*
gena.

Antykatodę sporządzano dawniej z platyny lub z irydoplatyny; w nowszych przyrządach, np. w rurach Coolidge'a, antykata jest wyrobiona z wolframu (tungstenu); za katodę służy płaska spiralna sprężynka drutu również wolframowego; rozgrzana do wysokiej temperatury, taka katoda wysyła obfity strumień elektronów.

Obserwujemy w ciemności szklaną bańkę Röntgena będącą w działaniu; zauważymy, że poprowadzona przez powierzchnię antykaty płaszczyzna dzieli kulę na dwie półkule; półkula leżąca naprzeciw antykaty fluoryzuje zielonkawo, przeciwna półkula pozostaje ciemna. Umieszczając małą tabliczkę pokrytą platynocyjankiem barowym w rozmaitych miejscach d. koła bańki, stwierdzamy niewątpliwie, że promieniowanie Röntgena wybiega z antykaty. Szkło uranowe, siarczan wapniowy lub kadmowy (zwłaszcza, gdy zawierają przymieszkę siarczanu manganowego), siarczek cynkowy (zwany blendą Siodła) fluoryzują również pod działaniem promieniowania Röntgena, atoli słabiej niż platynocyjanek barowy.

Promieniowanie Röntgena, jak widzimy, ma wiele własności wspólnych z własnościami pospolitego promieniowania: budzi fluorescencję, działa na klisze fotograficzne, wywołując w nich zmiany chemiczne podobnie jak czyni to światło. Podobnie jak światło, promieniowanie Röntgena biegnie w przestrzeni w kierunkach linii prostych. Ale promieniowanie to przenika łatwo przez ciała nieprzezroczyste dla światła, jak drewniana deska, porcelana, sukno, gruba tektura lub papierowa księga; cienka cynowa blaszka zaledwie je wstrzymuje, warstwa aluminjowa, nawet kilku milimetrów grubości, osłabia je nieznacznie.

Inne jednak metale, np. żelazo, cynk, rtęć, są trudno przenikliwe dla promieniowania Röntgena; ołów oraz platyna, nawet w cienkiej warstwie, stanowią dla niego walną zaporę. Woda czysta przepuszcza promieniowanie Röntgena; wodny roztwór soli pewnego metalu wstrzymuje to promieniowanie w stosunku swej zawartości metalu; tak zachowuje się np. wodny roztwór octanu ołowio-
wego, podobnie działa biel ołowiana, która jest ołowio-
wym węglanem. Szkło,

zawierające związki ołowiu, chociaż jest przezroczyste dla światła, pochłania energicznie promieniowanie Röntgena; nawet zwyczajne szkło, dzięki potasowemu lub sodowemu krzemianom, które w jego skład wchodzi, jest niedoskonale przenikliwe dla tego promieniowania; z tego względu bańki Röntgena sporządzane obecnie bywają ze szkła litowego.

Promieniowanie Röntgena, jak powiedzieliśmy, rozchodzi się prostoliniowo; gdy zatem ciało nieprzezroczyste lub niedość przezroczyste wstrzymuje całkowicie lub częściowo promieniowanie biegnące ku płycie fluoryzującej lub fotograficznej, na takiej płycie powstaje *cień*. Ilustracją tego faktu jest słynne doświadczenie, które po raz pierwszy Röntgen wykonał. Części mięsne ciała ludzkiego są łatwiej przenikliwe dla promieniowania Röntgena niż szkielet kostny, co tłumaczy się wpływem wapnia zawartego w kościach. Fotografując zatem np. cień ręki, na którą pada promieniowanie Röntgena, otrzymujemy *röntgenogram*, o którym rys. 182 daje wyobrażenie; odróżniamy tu łatwo zarys układu kostnego, metalowego pierścionka oraz dwóch tkwiących w ręce ziarenek śrutu. Niepotrzeba tłumaczyć niezmiernej doniosłości, którą dla chirurgii miało odkrycie Röntgena.

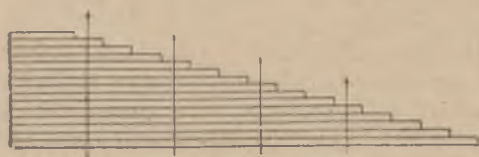


Rys. 182.

Przytoczone własności promieniowania Röntgena możemy uwydatnić mnóstwem doświadczeń. Dzięki tym własnościom możemy ukazać na fluoryzującym ekranie, lub odfotografować na kliszy, na przykład: nożyczki lub cyrkle, zamknięte w drewnianym pudełku, srebrne lub złote monety schowane w głębi skórzanego woreczka lub za podszewką ubrania, cygara zawarte w aluminiowej cygarniczce; poprzez kerpertę możemy odczytać litery nakreślone metalicznym atramentem; prawdziwy (przezroczysty) rubin możemy odróżnić od naśladownictw, sporządzonych z trudno przenikliwego, zabarwionego szkła i t. p. Przy takich doświadczeniach należy mieć na uwadze, że promieniowanie Röntgena, gdy często lub długo działa na organizm, wywołuje zmiany poważne w skórze lub głębszych narządach, co może za sobą pociągnąć groźne cierpienia; wypada zatem posługiwać się wówczas *nieustannie* zasłonami sporządzonymi z ołowiu lub grubymi szybami wyrobionymi ze szkła ołowiowego.

Wytwarzane w pewnej katodowej bańce promieniowanie Röntgena przebiega tem łatwiej przez metale i inne powstrzymujące je substancje, im wyższe jest czynne w bańce napięcie, im zatem prędzej poruszają się elektrony bijące w antykatodę. O promieniowaniu łatwo przenikającym przez ciała materialne mówimy, że jest ostre czyli *twarde*; trudno przenikające promieniowanie nazywamy łagodnem lub *miękkim*.

Wyobraźmy sobie układ cienkich aluminiowych kartek, ułożonych na sobie naksztalt schodów, jak objaśnia rys. 183. Ażeby ocenić stopień twardości pewnego



Rys. 183.

promieniowania, badamy, ile następujących po sobie kartek aluminiowych utrudnia bieg promieniowania w tej samej mierze jak czyni to pewna wybrana, cieniutka blaszka platynowa. Przypuśćmy na przykład, że dane promienio-

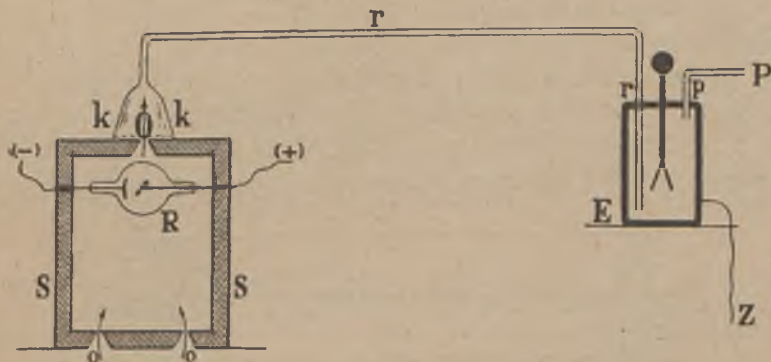
wanie Röntgena jest wstrzymywane przez 20 kartek *Al* (z których każda ma 0.02 mm grubości) tak samo jak przez blaszkę *Pt* o grubości 0.002 mm; takie promieniowanie otrzymuje N° 20 na t. zw. *skali twardości*. Postępowanie to ma oczywiście cele tylko praktyczne.

W najsilniejszych polach magnetycznych lub elektrycznych, jakie umiemy wytworzyć, promienie Röntgena nie zakrzywiają się ani też nie zbaczają od prostych kierunków, w których z antykatody wysłane zostały. Promieniowanie Röntgena odróżnia się zatem stanowczo od katodowych strumieni, zbliża się natomiast do zwykłego promieniowania, którego biegu w próżni nie zmienia pole elektryczne lub magnetyczne statyczne. Czemże jest promieniowanie Röntgena? Dzięki odkryciom ostatnich lat kilkunastu natura tego promieniowania, długo niejasna, stała się zrozumiała; poznanie istoty tego promieniowania otworzyło nieoczekiwane widoki budowy materji. O tych jednak postępach wiedzy możemy uczynić wzmiankę dopiero w ostatnich rozdziałach tej książki, które są poświęcone nauce o promieniowaniu.

§ 110. Ionizacja gazów.

Przypuśćmy, iż udzieliliśmy dodatniego lub ujemnego ładunku wrażliwemu elektroskopowi; jego listki są rozchylone. Lecz jeśli w pobliżu elektroskopu, lub choćby nawet w odległości jednego lub dwóch metrów od niego, zacznie funkcjonować rura katodowa, z której wybiega promieniowanie Röntgena, listki elektroskopu opadają natychmiast. Ażeby zrozumieć przebieg zjawiska, powtórzmy doświadczenie w zmienionej postaci. Rurę katodową *R* (rys. 184), która jest źródłem promieniowania Röntgena, umieszczamy w skrzynce *SS*, wyłożonej grubą blachą ołowianą; dzięki temu urządzeniu elektroskop *E* jest zabezpieczony od bezpośredniego wpływu promieniowania. W dolnem dnie skrzynki

znajdują się dwa otwory *o*, w górnym jest trzeci otwór *O*; naprzeciwko *O* otwiera się szklany lejek *kk*, który przechodzi w rurkę szklaną *rr*, wiodącą do wnętrza skrzynki elektroskopu. Ładujemy elektroskop *E*, bańkę *R* wprowadzamy w działanie, wreszcie przy pomocy pompy przeciągamy przez przyrząd dowolny prąd powietrza drogą *ooOkkrrrPP*; elektroskop traci wówczas ładunek, którym był obdarzony. Jeżeli nie przeciągamy



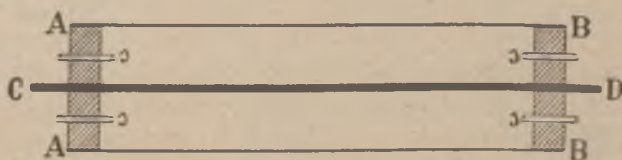
Rys. 184.

powietrza, elektroskop nie rozbraja się. Pod wpływem promieniowania Röntgena powietrze staje się więc znacznie lepszym elektrycznym przewodnikiem niż jest nim zwyczajnie i zachowuje przynajmniej przez pewien czas wzmożone to przewodnictwo. Skoro nadaliśmy pewnemu gazowi przewodnictwo elektryczne bezporównania znaczniejsze aniżeli jego normalne (zwykle bardzo słabe) przewodnictwo, mówimy, że gaz jest *zionizowany*; stan niezwykle wysokiego przewodnictwa nazywamy *ionizacją*.

Do rurki *rr* (rys. 184) wprowadźmy nieszczelny korek sporządzony z waty szklanej albo też włączmy do rurki butelkę zawierającą wodę, przez którą przeciągające powietrze przechodzi w postaci banieczek; lub wreszcie rurkę szklaną *rr* zastąpmy wąziutką i długą rurką miedzianą albo mosiężną. Przypuśćmy, że pompa dzielnie pracuje, tak iż powietrze zionizowane płynie przez przyrząd równie wartko jak przedtem; mimo to elektroskop *E* nie traci swego ładunku. Filtrując zatem zionizowane powietrze przez watę szklaną, przeciągając je przez wodę lub przez wąskie metalowe rurki, odbieramy powietrze anormalne-przewodnictwo; wnosimy, iż to przewodnictwo musi wynikać

z obecności w gazie jakichciś cząstek, których nie zawiera powietrze normalne; cząstki te dla krótkości nazywamy *ionami*.

Zmieniamy jeszcze raz układ poprzedniego doświadczenia; dotychczasową szklaną rurkę *rr* zastępujemy przez szeroką rurę metalową *AABB* (rys. 185), w której osi rozciąga się pręt *CD* również metalowy, izolowany od *AB*. Przez rurki *ss* aspirujemy znowu powietrze, które ionizuje się w *SS* (rys. 184) działaniem promieniowania Röntgena. Jeżeli pręt *CD* i ściany rury *AABB* znajdują się na jednakowym potencjale, elektroskop *E* (rys. 184) traci po dawnemu ładunek, który był na początku doświadczenia otrzymał. Lecz jeżeli pomiędzy *CD* a *AABB* wytworzymy dostatecznie znaczną różnicę potencjałów, elektroskop zachowuje pierwotny ładunek. Możemy zatem usuwać iony z gazu działaniem



Rys. 185.

obcego pola elektrycznego; co dowodzi, że one są obdarzone elektrycznymi ładunkami. W zionizowanym gazie muszą być obecne zarówno dodatnie jak ujemne iony; w przeciwnym razie pewna masa zionizowanego gazu musiałaby okazywać dodatni lub ujemny ładunek, czego nie dostrzegamy. Streszczając się, powiadamy: w zionizowanym gazie znajdują się iony dodatnie i ujemne, zwykle bardzo nieliczne; jeżeli gaz nie pozostaje pod wpływem pola elektrycznego, iony błakają się śród obojętnych molekuł podobnie jak cząstki obcego, dyfundującego, bardzo rozrzedzonego gazu; jeżeli takie pole jest czynne, iony pod jego wpływem dążą ku elektrodom, mniej więcej podobnie jak dzieje się w zjawiskach zwykłej elektrolizy (§ 41).

Przypuśćmy, że zionizowaliśmy pewną ilość gazu działaniem promieniowania Röntgena; gdy przeryjemy to działanie, gaz nie pozostaje trwale zionizowany; ionizacja z biegiem czasu słabnie, w końcu znika zupełnie. Dodatnie i ujemne iony szukają się zatem w tłumie neutralnych cząsteczek; odnalazłszy, łączą i zobojętniają się, powracając do roli obojętnych, zwyczajnych molekuł. Wyobraźmy sobie, że pewną ilość gazu poddajemy nieprzerwanemu działaniu promieniowania Röntgena; chociażby to działanie trwało bardzo długo, liczba obecnych w gazie ionów jest zawsze stosunkowo szczupła. Objaśnienie tego faktu leży znowu w spotykaniu i łączeniu się różnoimiennych ionów. Promienio-

wanie Röntgena swym wpływem przysparza ionów, spotkania ich ujmując; gdy przeciwne te działania równoważą się, tworzy się stan *trwały*, w którym liczba ionów jest niezmienna.

§ 111. Własności gazowych ionów. Ładunek elektronu.

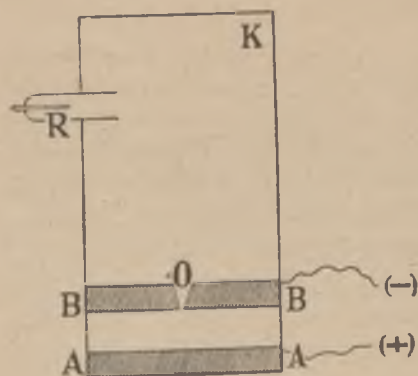
W § 123-im tomu II-go poznaliśmy zjawiska rosy, mgły oraz innych opadów, które wynikają ze skraplania się pary wodnej zawartej w atmosferycznym powietrzu. Wspomnieliśmy wówczas, że skraplająca się para osiada najłatwiej na cząstkach pyłu, unoszących się zwykle w powietrzu. Wiemy dzisiaj, że jony obecne w gazie zionizowanym zachowują się mniej więcej podobnie jak takie okruszyny; stają się one łatwo *zarodkami*, na których przedewszystkiem skrapla się para wodna w przesyconej nią atmosferze.

Gotujmy wodę destylowaną na silnym płomieniu; tworząca się para niechaj uchodzi w powietrze, przez otwór wąskiej rurki, w postaci cienkiego strumienia.. Strumień pary jest przezroczysty na długości pierwszych paru centymetrów, licząc od wylotu rurki; oświetlony mocnem bocznem światłem, nie rzuca on, w początkowej swej części, niemal żadnego cienia na pobliską białą zasłonę. Wdmuchując w strumień pary jakikolwiekbaż miazłki proszek, spostrzegamy, że niewidoczna dotychczas część strumienia jaśnieje i błyszczy przez chwilę; cień na zasłonie staje się wówczas zupełnie wyraźny. Podobnie jak drobny pył, działa promieniowanie Röntgena; przekonujemy się o tem, otwierając i przerywając dostęp promieniowania w stałych odstępach czasu; strumień rozjaśnia się i gaśnie w tych samych okresach. Niewidzialna część strumienia składa się z nieskropionej pary wodnej; dokoła pyłków lub ionów tworzą się maleńkie wodne kropelki, które, rozpraszając padające światło, błyszczą przez chwilę, zanim nie wyparują.

Tworzące się w zjawiskach ionizacji jony gazowe wiążą się chętnie nietylko ze skraplającą się parą wodną lecz z wszelkimi wogóle drobnymi, ciekłymi albo stałymi cząstkami pływającymi w gazie; na przykład z kropeczkami oliwy, okruszynami rozpylonej metalowej elektrody, odrobinami pyłu, kurzu, sadzy i t. p. Dym tytoniowy skupia się szybko dokoła wytworzonych w nim nagle gazowych ionów; jeśli poddamy go wówczas działaniu elektrycznego pola, podąży niebawem ku elektrodom.

Nadzwyczaj interesujące i ważne są spólczesne badania fizyka amerykańskiego, prof. R. A. Millikana, nad zachowywaniem się kropelek w zionizowanym powietrzu. Wyobraźmy sobie komorę *K* (rys. 186), do której wazniutką rurką *R* wpryskujemy strumień drobnych kropelek oliwy; spadają one w komorze powoli ku dołowi. Wydarza się niekiedy, że kropelka przenika przez kanalik *O* wycięty w płycie *BB* kondensatora, którego *AA* jest drugą płytą; pomiędzy *AA* i *BB* obserwator może wzbudzać pole i jego linje według woli kierować ku górze lub ku dołowi; każdej chwili może pole zniweczyć, potem je znowu wytworzyć. Stosownie oświetlając krople spoglądając na nie przez

lunetę, obserwator każdą wyraźnie dostrzega jak jasną gwiazdkę na tle ciemnem; ruch każdej kropli może śledzić dokładnie. Łączące się z rozpylaniem tarcie



Rys. 186.

wytwarza ładunki na kropelkach oliwy. jeżeli więc pole między *AA* i *BB* jest odpowiednio skierowane, kropla podąży np. ku *BB*; zanim spoczęła na *BB*, obserwator odwraca pole; tym sposobem może ją zniewalać, po wielokroć razy, do ruchu pod górę i na dół. Ruch kropeł jest zawsze powolny i *jednostajny*. Jeżeli ładunek kropli wynosi *q*, *E* zaś jest wektorem pola, pole działa na kroplę siłą qE ; ponadto na kroplę działa jeszcze siła mg , gdzie *m* jest masą kropli, *g* przyspieszeniem ciężkości; kropla doznaje bądź sumy bądź różnicy sił qE i mg . Ale kropla nie

porusza się w próżni; przedziera się ona przez ośrodek gazowy, przez gęsty tłum obojętnych molekuł; opór ośrodka znosi przyspieszenie, ruch zatem jest *jednostajny*, jego prędkość jest proporcjonalna do wypadkowej siły działającej na kroplę (§ 46 tomu I-go).

Jak powiedzieliśmy, ruch kropelek odbywa się naogół z prędkością stałą. Lecz *gdy powietrze w przyrządzie jest zionizowane*, wydarza się, iż prędkość kropli nagle mocno rośnie lub maleje; ładunek jej widocznie wzmożł lub zmniejszył się nagle; do kropli przylgnął jeden z pomiędzy ionów, które błędzą w zionizowanym powietrzu. Z tych nagłych zmian prędkości można obliczyć zysk lub stratę ładunku, czyli innemi słowy ładunek ionu, który przywarł do kropli. *Najmniejszy ładunek*, jaki niosą na sobie tworzące się w gazieiony, wynosi według Millikana:

$$1. \quad e = 4.774 \times 10^{-20} \text{ el.-stat. jedn. ład.}$$

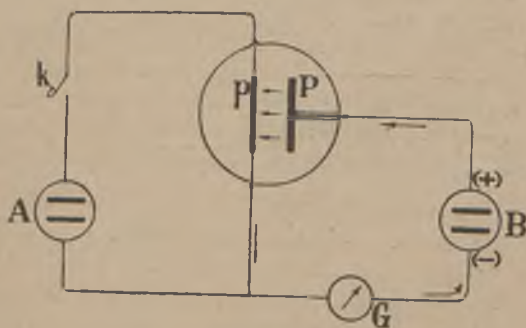
Ów najmniejszy ładunek gazowego ionu jest bezwątpienia niepodzielną jednostką elektrycznego ładunku, którą nazywamy *elektronem*. Millikan mierzył nie tylko *zmiany ładunku*, których krople doznawały w chwili pochwylenia i przyłączenia ionu; badał także *początkowe ładunki*, które kropelki przynosiły, wpadając do komory przyrządu. Wynik pomiarów był uderzający: wytworzone przez tarcie *ładunki kropelek są bez wyjątku całkowitemi wielokrotnościami najmniejszego ładunku *e* jednego gazowego ionu*. Zwykłe elektryczne ładunki, które roztrząsamy w elektrostatyce składają się zatem również z elementarnych jednostek *e*, z elektronów.

W opisanych doświadczeniach sprawdzają się, jak widzimy, zasadnicze założenia, o których wspomnieliśmy u wstępu elektrostatyki (§ 4), na których zasadzaliśmy wytłumaczenie elektrolizy (§ 42), do których powróciliśmy wreszcie w niniejszym rozdziale, ażeby zdać sprawę z własności katodowych strumieni (§ 108); sprawdzają się, innemi słowy, hipotezy wzięte za podstawę

spółczesnej *teorii elektronów*. Sir J. J. Thomson, C. T. R. Wilson i inni uczeni już przed ćwierć wiekiem badali starannie ruchliwość gazowych ionów w polu elektrycznym; śledzili również przebieg ich dyfuzji poprzez gęstwinę obojętnych gazowych molekuł. Z takich spostrzeżeń wyprowadzili już wówczas wniosek, że najmniejszy możliwy ładunek gazowego ionu jest identyczny z ładunkiem kationu wodorowego w zjawiskach elektrolizy (§ 43). Jednostkowy ładunek gazowego ionu, najmniejszy możliwy elektrostatyczny ładunek, elektrolityczny ładunek wodorowego kationu, ładunek cząstki biegnącej w katodowym strumieniu, są to tylko rozmaite przykłady *powszechnej jednostki wszelkich w naturze ładunków, ładunku elektronu*.

§ 112. Lampa elektronowa.

Wyobraźmy sobie, że p na rys. 187-ym jest włókienkiem lub pasemkiem lampki elektrycznej żarowej; znajduje się ono w bańce szklanej, w której wytworzono bardzo dobrą próżnię, zarazem włączone jest w obwód baterji ogniów lub akumulatorów A . Naprzeciwko pasemka p , izolowana od niego, znajduje się metalowa płytka P połączona z dodatnim biegunem



Rys. 187.

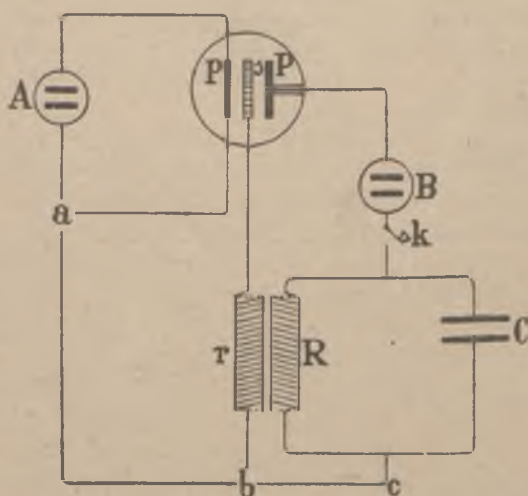
z dodatnim biegunem innej baterji B , jak pokazuje rysunek. Przypuśćmy z początku, że obwód $ApkA$ jest otwarty w k , prąd w nim przeto nie płynie; pasemko p pozostaje «chłodne». Wówczas, jak widzimy ze wskazań galwanome-

tru G , niema prądu w obwodzie $BPpGB$, co zresztą jest zrozumiałe; pomiędzy p a P obwód ten jest przerwany. Kluczem k zamykamy obwód $ApkA$; pasemko p rozżarza się do białości; spostrzegamy natychmiast, że w obwodzie $BPpGB$ płynie prąd w kierunku wskazanym przez strzałki. Spostrzeżenie to, oddawna już uczynione przez Edisona, możemy łatwo zrozumieć. Z rozżarzonego pasemka p wydobywają się tłumy elektronów, niosących na sobie ujemne ładunki; płytka P , która działaniem ba-

terji B jest naładowana dodatnio, przyciąga te elektrony ku sobie; ustanawia się strumień elektronów skierowany od p do P , równoważny zatem przepływowi dodatnich ładunków w kierunku przeciwnym, od P do p . Ten przepływ stanowi pomost, który zamyka prąd w obwodzie $BPpGB$.

Wyobraźmy sobie, że w opisanym doświadczeniu zastąpiliśmy baterję B przez alternator czyli prądnicę wytwarzającą prąd przemienny (§ 93). Przez połowę okresu działalności alternatora płytka P jest teraz dodatnio naładowana, przez następującą połowę jest naładowana ujemnie. W pierwszej części okresu wszystko odbywa się, jak objaśniliśmy wyżej; w drugiej części okresu elektrony, odpychane przez płytkę P , odwracają się od niej, pomiędzy P a p prąd wcale nie płynie. Powstający w alternatorze prąd przemienny *wyprostowuje się* zatem dzięki działaniu *lampy elektronowej* pP : może płynąć tylko od P do p i dalej w tym samym kierunku przez obwód, w przeciwnym kierunku ma drogę przeciętą. Prostując prądy przemienne lub drgania elektryczne w obwodzie, lampa elektronowa jest zatem wybornym ich *de-tektozem* (§ 103); taka jest zasada *elektrycznego wentyla*, który zawdzięczamy uczonemu angielskiemu prof. J. A. Flemingowi.

Ważnym ulepszeniem elektrycznego wentyla Fleminga jest t. zw. *lampa o trzech elektrodach*, której pomysł zawdzięczamy amerykańskiemu inżynierowi



Rys. 188.

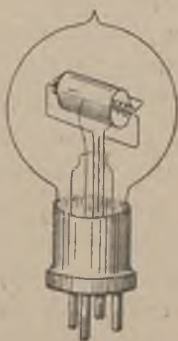
wymienione obwody. Kondensator C ładuje się i wyładowuje; przy spółdziałaniu elektromotorycznej siły indukcji własnej, pojawiającej się w obwodzie CRC ,

Lee de Forest. Przy-
puśćmy, że do wyżej opi-
sanej lampy pP (rys. 188),
pomiędzy pasemko p a płyt-
kę P wstawiamy jeszcze
trzecią elektrodę, mianowi-
cie kratkę albo siatkę s ,
którą łączymy z nowym
odgałęzieniem obwodu ba-
terji B , jak pokazuje sche-
matyczny rys. 188. Mamy te-
raz dwa obwody zamknięte
w lampie przez pomost elek-
tronowych strumieni, mia-
nowicie: t. zw. *obwód płytki*
 $PpabcRkBP$ oraz t. zw.
obwód siatki $PsrbcRkBP$.
Zamykając klucz k , prze-
syłamy nagle prąd, płynący
z baterji B , przez obadwa

w obwodzie tym rozwijają się drgania (§ 98). Gdyby obwód *CRC* był odosobniony, drgania w nim wszechne, pod dysypacyjnym wpływem jego elektrycznego oporu, zanikłyby w niezmiernie krótkim czasie. Lecz obwód *CRC* nie jest odosobniony; w pobliżu jego cewki *R* znajduje się cewka *r*, stosownie włączona w obwód siatki; drgania odbywające się w *CRC* działają indukcyjnie, dzięki temu urządzeniu, na obwód siatki, w którym również wytwarzają się drgania. Potencjał siatki *s* zmienia się więc periodycznie. Ale najślabsze nawet wahania wartości potencjału siatki wzmagają znacznie prądy płynące w obwodzie płytki, wzmagają zatem drgania dochodzące do skutku w obwodzie *CRC*. Drgania w tym obwodzie są nie tylko energiczne; podniecane przez impulsy, pochodzące z obwodu siatki, drgania te stają się ściśle periodyczne, *nie* zanikają. Lampa elektronowa o trzech elektrodach może więc służyć za generator drgań elektrycznych niezanikających, niezbędnych w radjotelefonii, jak o tem wspomnieliśmy w § 104-ym.

W § 5-ym tomu I-go objaśniliśmy wzajemne działanie, które odbywa się, w zwykłym wahadłowym zegarze, pomiędzy wahadłem i kotwicą z jednej strony a kołem wychwytem i opadającym ciężarem z drugiej. Jeżeli obwód obecny *CRC*, w którym drgania elektryczne dochodzą do skutku, przyrównamy do wahającego się wahadła, obwód siatki musimy uznać za odpowiednik koła wychwytemego; bateria *B* dostarczająca bezzwrotnego prądu gra rolę opadającego ciężkiego ciała w zegarze.

Jak powiedzieliśmy, wyobrażenie trójelektrodowej lampy na rys. 188-ym jest schematyczne. W rzeczywistości wykonaniu pasemko (sporządzone z wolframu lub platyny, przykryte niekiedy warstwą strontowego lub barowego tlenku) bywa zazwyczaj otoczone dokoła siateczką wyrobioną z cieniutkiego molibdenowego lub niklowego drutu; siatekę znów obejmuje aluminiowa lub niklowa lub miedziana anoda (poprzednia płytka *P*) zwinięta w kształt walca. Rys. 189 przedstawia model lampy, często używanej w radjotelegrafii i radjotelefonii.



Rys. 189.

§ 113. Odkrycie promieniotwórczości.

Cząsteczki związków chemicznych składają się z atomów. Jak budowniczy ufa mocy kamieni, belek i cegieł, z których według jego myśli powstają gmachy i domy, podobnie, od mniej więcej stu lat, chemicy, tworząc coraz rozleglejsze i misterniejsze molekularne konstrukcje, nie wątpili nigdy o trwałości ich składników niezłomnych: atomów tlenu, wodoru, węgla, azotu, chloru, wszystkich, krótko mówiąc, t. zw. *chemicznych atomów*. Od stu lat uważano za pewnik, że chemiczne atomy są nieskruszone, że kończy się na nich ludzka zdolność badania i łamania architektury materji. Należy pamiętać o takim sposobie myślenia, opartym na doświadczeniu lat długich, pragnąc zrozumieć wra-

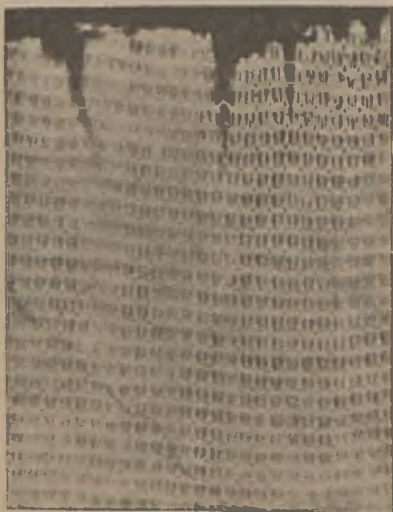
zenie, wywołane w końcu XIX-go stulecia przez odkrycie *promieniotwórczości*. Okazało się nagle, że nie wszystkie chemiczne atomy są proste, niepodzielne, niezmiennie. Okazało się, że atom jest ustrojem zawitym, że jest światem przechodzącym dziwne koleje; że żywot atomu ma pewne granice, ma przepisany okres istnienia. Gdybyśmy dowiedzieli się, że istnieją domy, w których ze ścian, z podłóg, z sufitów, samowolnie, bez żadnej zzewnątrz podniety, od tysięcy lat sypią się niezliczone pociski, zdziwienie nasze byłoby może podobne do uczuć ówczesnych badaczy, postawionych nagle w obliczu faktów promieniotwórczości. Przekonał się wówczas raz jeszcze, że nauka nie jest nigdy ukończona, zamknięta; że, mimo tylu prac, tylu odkryć, musimy uczyć się wciąż od natury; że będziemy się od niej zapewne zawsze uczyli.

Dnia 24 lutego 1896 roku Henryk Becquerel składa paryskiej Akademii Umiejętności krótką notatkę, w której donosi, że niektóre związki *uranu*, bez żadnej zzewnątrz pobudki, wysyłają promieniowanie szczególnego rodzaju, które wywołuje fluorescencję, ionizuje ciała gazowe, sprawia na kliszy chemiczne reakcje; promieniowanie to przenika z łatwością ciała nieprzezroczyste dla światła jak sukno, gruba tektura lub drewno. O ciałach zachowujących się podobnie jak wspomniane związki uranu, mówimy, że są *promieniotwórcze*; powiadamy, że wysyłają one *promieniowanie Becquerela*. Uran i wszystkie związki uranu są zatem, według Becquerela, promieniotwórcze; okazało się wkrótce, że (z pomiędzy znanych wówczas pierwiastków) również i *tor* jest promieniotwórczy; wszystkie związki toru są promieniotwórcze, podobnie jak związki uranu. Wiemy obecnie, że jeszcze *potas* i *rubid*, choć bardzo słabo, są promieniotwórcze.

Wyobraźmy sobie, że za ilościową miarę promieniotwórczej działalności uranu, toru lub związku uranu albo toru przyjmujemy sprawianą przez ten pierwiastek lub związek ionizację powietrza; możemy przekonać się wówczas, że promieniotwórczość czystego związku uranu lub toru jest ściśle proporcjonalna do zawartej w nim masy promieniotwórczego pierwiastka. Do wysyłania promieniowania Becquerela zdolny jest zatem *tylko sam atom* uranu lub toru; ta jego czynność nie zależy od temperatury, ciśnienia, oświetlenia, od obecności obojętnych cząstek materji (np. molekuł rozpuszczalnika, w którym sól uranową lub torową rozpuściliśmy); ta czynność nie zmienia się nawet, gdy

atom uranu lub toru wchodzi w związek chemiczny. Żadnym więc fizycznym ani chemicznym sposobem nie umiemy wywrzeć wpływu na promieniotwórczą działalność promieniotwórczego pierwiastka; nie możemy jej w niczem dopomóc ani przeszkodzić, nie potrafimy jej wzmocnić ani osłabić ani tembardziej powstrzymać. Wobec zjawisk radioaktywnych jesteśmy dotychczas równie bezsilni jak wobec ruchu słońca, planet i gwiazd na sklepieniu niebieskiem; nie umiemy oddziaływać ani na te przepotężne ani na tamte znikome zjawiska.

Badając w r. 1898-ym promieniotwórczość rozmaitych naturalnych minerałów, rodaczka nasza, pani Marja ze Skłodowskich Curie zauważyła fakt zadziwiający: promieniotwórczość niektórych okazów była silniejsza aniżeli, *caeteris paribus*, promieniotwórczość czystego uranu lub toru. Tak zachowywały się zwłaszcza niektóre okazy smołowcowej blendy, podobnie okazy naturalne karnotytu i chalkolitu, chociaż sztuczny chalkolit (fosforan krystaliczny uranu i miedzi), zgodnie ze znaną nam prawidłowością powszechną, okazywał promieniotwórczość normalną, proporcjonalną do zawartości uranu. Nasuwało się domniemanie, że w badanych okazach są obecne drobne ilości nieznanymi, mocno promieniotwórczymi pierwiastków; udało się rzeczywiście pani Curie (przy pomocy małżonka, zmarłego w r. 1906-ym Piotra Curie) odkryć niebawem takie pierwiastki, z których najważniejszym okazał się *rad* Ra, o masie atomowej 226. Inne jeszcze, ważne radioaktywne substancje są następujące: *polon* (został odkryty przez panią Curie w r. 1898-ym i nazwany na cześć Polski), *aktyn* (znaleziony przez Debierne'a w r. 1899), *ion* (poznany przez Boltwooda w r. 1907).



Rys. 190.

W t. zw. żarowo-gazowych lampach Auera von Welsbach rozgrzewają się t. zw. *koszulki*, przepojone zazwyczaj związkami toru oraz innych rzadkich pierwiastków. Rozcinamy taką koszulkę i przygniatamy ją najpierw blaszką wyciętą z najcięższej folii aluminiowej.

następnie czułą fotograficzną kliszę; wszystko to czynimy w ciemni, jak w zwykłym postępowaniu fotograficznym. Po upływie około 8 dni wywołujemy obraz, wytworzony na kliszy przez promieniowanie toru. Rys. 190 przedstawia zdjęcie otrzymane tym prostym sposobem.

§ 114. Składniki promieniowania Becquerela.

Jak nam wiadomo, promieniowanie Becquerela działa na kliszę fotograficzną; zarazem ionizuje powietrze i inne ciała gazowe. Wykonajmy w tym względzie kilka prostych doświadczeń. Na drodze promieniowania uranu umieścimy blaszkę aluminową grubości 0.5 mm; jeżeli *na kliszy fotograficznej* chcemy uzyskać takie samo działanie, jakie otrzymujemy bez blaszki, doświadczenie musi trwać mniej więcej dwa razy dłużej; po przejściu warstwy glinu grubości 0.5 mm, promieniowanie działa przeto na kliszę dwa razy słabiej. Zbadajmy teraz wpływ *ionizujący* promieniowania uranowego, które przesłaliśmy przez warstwy glinu różnej grubości; przy pomocy elektroskopu, jak w § 110-ym, przekonywamy się, czy dane promieniowanie ionizuje powietrze i jak dalece energicznie to czyni. Spostrzegamy, że już po przebyciu warstwy glinu grubości 0.02 mm (25 razy cieńszej niż w doświadczeniu poprzednim) promieniowanie wysyłane przez uran jest niezdolne do ionizowania powietrza. Nasze wyniki w pierwszej chwili mogą wydać się sprzeczne; możemy je zrozumieć, przypuszczając, że z uranu wybiegają co najmniej dwa różne gatunki promieniowania: jedno, łatwo pochłaniane przez glin, energicznie ionizuje powietrze; drugie, przez glin słabo powstrzymywane, działa wybitnie na kliszę fotograficzną. Takie składniki w promieniowaniu Becquerela odróżnił od siebie po raz pierwszy Sir Ernest Rutherford w r. 1899-ym; nazwał on pierwsze *promieniowaniem α* , drugie *promieniowaniem β* . Tor oraz rad, podobnie jak uran, wysyłają α - oraz β -promieniowanie; polon wytwarza tylko α -promieniowanie.

Ołów powstrzymuje skutecznie α - oraz β -promieniowanie; po przebyciu warstwy ołowiu mającej kilka milimetrów grubości, α - a także β -promieniowanie uranu jest tak osłabione, że mogliśmy je wykryć tylko wyjątkowo wrażliwymi metodami badania. Rad jednak daje początek promieniowaniu, które poznajemy bez trudu nawet i poza grubą ołowianą zasłoną; po przebyciu warstwy ołowiu o grubości 3 cm, promieniowanie idące od paru miligramów bromku radu działa jeszcze ionizująco na powietrze. Takie

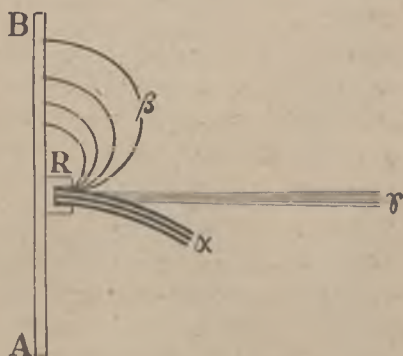
nadzwyczajnie przenikające promieniowanie nazywamy γ -promieniowaniem.

Powietrze pochłania promieniowanie Becquerela bezporównania słabiej niż czyni to glin, tem bardziej niż ołów, lecz pochłania je niewątpliwie; stosunkowo najbardziej powstrzymuje α promieniowanie, znacznie słabiej działa na β -promieniowanie, dla γ -promieniowania jest niemal zupełnie przezroczyste.

§ 115. Istota promieniowania Becquerela:

Zjawiska odbywające się w rurze katodowej przypisaliśmy strumieniom rozpędzonych elektronów; promieniowanie Röntgena zaliczyliśmy przeciwnie do objawów prawdziwego promieniowania, z których najlepiej znanym objawem jest światło. Czemże jest promieniowanie wysyłane przez promieniotwórcze substancje? Spostrzegając, iż strumień wody, który tryska w polu ciężkości, zatacza parabolę podobnie jak kamień rzucony, wnosimy, iż woda składa się z cząstek ciężkich, przyciąganych przez ziemię. Gdy obserwujemy, jak zachowuje się strumień katodowy w polu magnetycznym, domniemywamy się analogicznie, z jakich cząstek składa się strumień.

Przekonajmy się zatem, czy pole magnetyczne wywiera wpływ na bieg promieniowania Becquerela. Wyobraźmy sobie doświadczenie następujące: w grubościennym naczynku ołowianem R znajduje się pewna ilość związku radu (rys 191); z otworu naczynia wybiega wiązka radowego promieniowania. Naczynko i zawarty w niem promieniotwórczy preparat umieszczamy w sil-



Rys. 191.

nem polu magnetycznym, którego linje dążą ku nam poziomo, prostopadle do płaszczyzny rysunku. Dzięki działaniu pola składniki promieniowania rozłączają się. Promieniowanie γ biegnie tak samo jak biegło, gdy pole nie było czynne; w najpotężniejszych magnetycznych polach nie zauważono dotychczas skrzywienia lub odchylenia biegu tego promieniowania. Promieniowanie β , za-

krzywając się mocno, przebiega po orbitach kołowych, które leżą w płaszczyźnie rysunku, prostopadłej do linii pola; porównawszy rys. 191 z ryss. 174, 176 i 179 ym, przekonywamy się, że *kierunek odchylenia się promieniowania β w magnetycznym polu jest taki sam, jaki zauważyliśmy w strumieniu katodowym (§§ 106 i 108)*. Promieniowanie α zakrzywia i odchyła się również, lecz znacznie słabiej niż β -promieniowanie a przytem *w stronę przeciwną*; biegnie ono w polu magnetycznym po łukach kół, położonych znów w płaszczyźnie rysunku ale o bardzo znacznym promieniu. Odwołując się do wywodów §§ 106 i 108-go, powiadamy: *promieniowanie β składa się ze strumieni cząstek niosących na sobie ładunki ujemne; promieniowanie α składa się ze strumieni cząstek niosących na sobie ładunki dodatnie*; promieniowanie γ nie składa się z naładowanych cząstek, musimy zatem przypuszczać, że, jak promieniowanie Röntgena, należy do zjawisk prawdziwego promieniowania. Będziemy wyrażali się odtąd inaczej aniżeli dotychczas; będziemy mówili, że promieniotwórcze substancje wysyłają: cząstki β ujemne, cząstki α dodatnie oraz jeszcze promieniowanie γ .

Przypuśćmy, że AB na rys. 191-ym jest fluoryzującym ekranem. Odwracając kierunek linii magnetycznego pola, przetrzucamy wówczas świecenie ekranu z góry na dół lub przeciwnie; znosząc pole, niweczymy świecenie. Ponieważ ekran świeci na stosunkowo szerokim obszarze, przeto promienie orbit kołowych zataczanych przez cząstki β muszą być bardzo rozmaite; promieniowanie β jest widocznie *niejednorodne*. Jak zaznaczono na rysunku, cząstki α w powietrzu nie biegną daleko, urywają się nagle; nie dobiegają one zatem ekranu AB . Dla jasności rysunku, zakrzywienie orbit cząstek α jest na nim przesadne.



Rys 192.

Państwo Curie sprawdzili bezpośrednio, że cząstki β wyrzucane przez rad, gdy padają na nienaelektryzowaną metalową płytkę, udzielają jej ujemnego ładunku; cząstki β w tem doświadczeniu muszą poruszać się w niemal doskonałej próżni, albowiem ionizują gazy bardzo energicznie; w gazie niedość rozrzedzonym ładunek płytki znikałby natychmiast.

Wyobraźmy sobie, że pewną ilość radu otoczyliśmy ściankami, które wstrzymują cząstki α , natomiast przepuszczają prawie wszystkie cząstki β ; tracąc ładunek ujemny unoszony przez cząstki β , rad musi wówczas przybrać ładunek dodatni. Wniosek ten sprawdzamy w następującem doświadczeniu, które zawdzięczamy prof. Struttowi, dzisiejszemu Lordowi Rayleigh.

Rurka szklana A (rys. 192) cienkościennea, zawieszona na kwarcowej nici B , zawiera preparat radowy; dzięki stosownej powłoce rozłostartej na wewnętrznej powierzchni rurki, preparat ten jest przewodząco połączony

z listkami elektroskopowymi CC . Jeżeli w przyrządzie, poza A , panuje nadzwyczaj niskie ciśnienie, listki CC rozchylają się natychmiast. Dotknąwszy okładek EE (sporządzonych z cienkiej metalowej folii i połączonych z ziemią), listki wyładowują się, opadają, poczem zjawisko powtarza się ponownie.

§ 116. Własności cząstek β .

Powróćmy do porównania, którem posłużyliśmy się w artykule poprzedzającym. Mierząc postać paraboliczną, którą w polu ciężkości przybiera strumień cieczy, tryskający z otworu ze znaną prędkością, możemy wyznaczyć wartość ilorazu ciężaru p cząstki wody i jej masy m czyli przyspieszenie g ciężkości (§ 59 tomu I-go). Badając orbity cząstek β , załączane w magnetycznym polu, moglibyśmy znaleźć podobnie iloraz ładunku e cząstki i jej masy m ; lecz musielibyśmy wiedzieć w tym celu, z jaką prędkością v cząstka ta wybiega z promieniotwórczego atomu. Nie znając prędkości v , poddajemy strumień cząstek β działaniu drugiego jeszcze pola, elektrycznego (§ 108); wyniki znalezione w obu doświadczeniach pozwalają obliczyć wartości zarówno ilorazu e/m jak prędkości v . Takie badania rozpoczął Kaufmann w r. 1901-ym; powtarzano je później niejednokrotnie. Streścimy najważniejsze wnioski, które z nich wynikają.

(I) Cząstki β wybiegają z promieniotwórczych atomów z prędkościami olbrzymimi; dostrzegano wartości v dochodzące 2.97×10^{10} cm/sek. Prędkości cząstek β będziemy odnosili do prędkości c rozchodzenia się światła w próżni

$$1. \quad c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/sek.}$$

Powiemy na przykład, że największa znana prędkość cząstki β wynosi $0.99 c$; pozostawia ona daleko za sobą prędkość jakichkolwiek innych ruchów obserwowanych na niebie lub ziemi.

(II) Dopóki prędkość cząstki β nie przekracza wartości mniej więcej $0.3 c$, wielkość e/m utworzona z jej ładunku i masy zachowuje wartość

$$2. \quad 5.3 \times 10^{17} \text{ el.-stat. jedn. ład./gram,}$$

k którą okazuje dla katodowych cząstek (§ 108); tak samo zatem jak katodowe cząstki, *cząstki β są swobodnie biegnącemi elektronami*. Z naszych katod nie umiemy jednak wypędzać elektronów z prędkością większą aniżeli mniej więcej $0.33 c$; natomiast natura w niezmiernie misternych swoich przyrządach bezporównania

sprawniej wywiązuje się z podobnego zadania; jak powiedzieliśmy, atom radu ze swego łona wyrzuca elektrony z prędkością dochodzącą do $0.99c$. Dla cząstek poruszających się z tak ogromną prędkością wielkość e/m nie zachowuje powyższej stałej wartości; im większa jest prędkość v elektronu, tem mniejsza wypada wartość e/m ; gdy prędkość v dąży ku wartości c , wielkość e/m zmierza ku zeru. *Masa elektronu zwiększa się, gdy wzrasta się prędkość jego ruchu; masa ta rośnie ponad wszelką wartość skończoną, gdy prędkość elektronu zbliża się do prędkości, z którą światło biegnie w próżni.* Szalony pęd elektronów w radowym β -strumieniu poddaje zasady dynamiki Newtona próbie surowej, której one nie wytrzymują. Dochodzimy tutaj do kresu, u którego masa poruszającego się ciała przestaje być jego cechą niezmienną a tem samem druga zasada Newtona przestaje obowiązywać (por. §§ 35 i 32 tomu I-go). Dochodzimy tutaj do kresu, u którego ustaje wszelki wogóle ruch; jeżeli dla wartości v zmierzających ku c masa poruszającej się cząstki przekracza wszelką skończoną granicę, przeto ruch o prędkości większej niż c oczywiście jest niemożliwy.

Miedzy masą m a prędkością v elektronu zachodzi prosta zależność; powiedzieli ją, wychodząc z zasad teorii, Heaviside, Lorentz, Einstein; badania Bucherera i innych fizyków potwierdziły prawdziwość tych przewidywań. Oznaczmy przez m_0 wartość, którą przybiera zmienna m dla $v=0$; tę graniczną wartość nazywamy *masą spoczynkową*. Rozumiejac, jak wyżej, przez c prędkość światła w próżni, mamy

$$3. \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Stosunek m/m_0 zwiększa się szybko, gdy stosunek v/c zbliża się ku jedności; przekonywamy się o tem z następującego zestawienia:

$\frac{v}{c} =$	0.40	0.50	0.80	0.900	0.990	0.999
$\frac{m}{m_0} =$	1.09	1.15	1.66	2.29	7.09	22.37

Wartość, którą podaliśmy wyżej pod (2), wyraża oczywiście wartość graniczną e/m_0 ilorazu ładunku i masy elektronu; iloraz e/m zależy od v , jak obecnie wiemy.

Stojąc na stanowisku teorii elektronów, można zrozumieć, dlaczego masa poruszającej się, naładowanej cząstki musi zależeć od prędkości ruchu. Liegnący w próżni elektron rozciąga dokoła elektryczne i magnetyczne pole; ażeby wytworzyć energję tych pól, musi ronić część własnej swej energji. Wszystko zatem tak się odbywa, jak gdyby elektron w swym ruchu doznawał oporu, jak gdyby okazywał bezwładność, jak gdyby obdarzony był masą. Masa elektronu

jest tylko *pozorna* i wynika z oddziaływania nań jego pól; nietrudno zrozumieć, że taka pozorna masa może wzrastać się, gdy prędkość ruchu się zwiększa.

§ 117. Własności cząstek α .

Jak wiadomo z § 115-go, cząstka α , naładowana dodatnio, znacznie słabiej poddaje się działaniu magnetycznego pola aniżeli cząstka β ; dlatego znacznie jest trudniej znaleźć dla cząstki α wartość ilorazu e/m jej ładunku i masy oraz prędkość v wyznaczyć, z którą taka cząstka wybiega z promieniotwórczego atomu. Znamy jednak wartości te w przybliżeniu. Mamy na przykład dla pewnych α -cząstek pochodzących z radu:

$$1. \quad (e/m)_{\alpha} = \text{około } 1.45 \times 10^{14} \text{ el.-stat. jedn. ład / gram}$$

$$2. \quad v_{\alpha} = 0.192 \times 10^{10} \text{ cm/sek} = 0.064 c$$

ale dane te, zwłaszcza zaś pierwsza, są przybliżone. Porównajmy (1) z wartością ilorazu $(e/m)_H$ elektrolitycznego kationu wodorowego, którą przytoczyliśmy w § 108-ym a także z utworzoną dla cząstki β wartością tegoż ilorazu (§ 116); powiadamy, iż w przybliżeniu

$$3. \quad \left(\frac{e}{m}\right)_{\alpha} = \text{około } \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m}\right)_H = \text{około } 0.0003 \left(\frac{e}{m}\right)_{\beta}.$$

Dopóki nie znamy ładunku cząstki α , możemy tylko domniemywać się, że masa tej cząstki jest znacznie większa niż masa cząstki β ; być może, iż jest wielkością rzędu masy atomu wodoru.

Już w r. 1902-im Rutherford i Soddy odgadli, że cząstka α jest (pozbawionym niektórych elektronów, dlatego dodatnio naładowanym) *atomem helu*, owego słynnego pierwiastka, który, odkryty na słońcu w r. 1868-ym przez Janssena i Lockyera, dopiero w r. 1895-ym przez Sir Williama Ramsaya odnaleziony został na ziemi. Innemi słowy, mamy według Rutherforda i Soddy'ego:

$$4. \quad m_{\alpha} = 4 m_H;$$

ze związku (3) otrzymujemy wówczas

$$5. \quad e_{\alpha} = 2 e_H;$$

cząstka α jest więc resztą, która pozostaje z normalnego atomu helu, gdy odłączyły się odeń dwa elektrony. Powiadamy inaczej: cząstka α jest jądrem helowem, podwójnie dodatniem, tak zwanym heljonem. Jeżeli cząstka α , biegnąc przez materjalny ośrodek,

potrafi pochwycić dwa elektrony i przywiązać je do siebie, staje się napowrót normalnym (obojętnym) atomem helu. Jak niżej powiemy, przypuszczenie Rutherforda i Soddy'ego jest dziś potwierdzone ponad wszelką wątpliwość.

Rad wytwarza t. zw. *emanację radową*, czyli promieniotwórczy pierwiastek, który w temperaturze pokojowej i pod atmosferycznym ciśnieniem jest ciałem gazowym; przy tej przemianie jedna cząstka α uchodzi z atomu radu. Rozpadając się dalej, emanacja wytwarza nową promieniotwórczą substancję, przyczem nowa cząstka α zostaje wydalona. Wyobraźmy sobie szklaną rurkę *A* (rys. 193); grubość jej ścianek wynosi mniej niż 0.01 mm. Do takiej rurki Rutherford i Roysd wprowadzili pewną ilość gazowej emanacji radu. Cząstki α , wyrzucane z atomów z olbrzymią prędkością, przebiegają ścianką szklaną nawskróś, lecz nie nadwerężają jej całości, nie wyrrywają w ścianie otworów, jak uczyniłyby to ziarenka wystrzelonego śrutu; ta sama szklana ścianka, która, jak sito, swobodnie przepuszcza cząstki α , stanowi nieprzebytą zaporę dla atomów emanacji, grubszych i masywniejszych a przytem bezporównania powolniej biegnących. W części *B* przyrządu oraz w rurce *R* pojawiają się więc cząstki α ; jest ich tam wkrótce tyle, że można wykryć obecność w *R* zwykłego helu sposobami t. zw. *analizy widmowej*, której zasady poznamy w nauce optyki. Że z emanacji radu samowolnie i niepowstrzymanie, choć bardzo powoli, wytwarza się hel, wie-



Rys. 193.

dziano o tem już od r. 1903-go, gdy Ramsay i Soddy fakt ten odkryli, udawadniając (po raz pierwszy w dziejach chemji), że pierwiastek chemiczny może przeradzać się w inny pierwiastek.

Sztucznie zwiększając liczbę ionów tworzonych przez α -cząstki (tak iż można było obserwować ionizujące działanie jednej) Rutherford i Geiger zdołali *porachować* cząstki α wysyłane przez rad. Dzielnik łączny ładunek cząstek przez ich liczbę, doszli do wniosku, że ładunek jednej cząstki α wynosi około 9.4×10^{-10} el.-stat. jednostek; wynik ten zgadza się dobrze z podwójną wartością ładunku jednego elektronu (§ 111).

Z doświadczeń Rutherforda i Geigera, o których wspomnieliśmy, wynikało, że gram radu wyrzuca rocznie 1.073×10^{18} cząstek α . Późniejsze badania (Rutherforda, Lawsona i Hessa, Geigera i Wernera) prowadzą do liczb nieco wyższych; możemy przyjąć za prawdopodobne, że gram radu wytwarza rocznie 1.110×10^{18} cząstek α . Wiemy jednak skądinąd, jaką ilość helu wydziela rad rocznie; na zasadzie pomiarów Dewara oraz Rutherforda i Boltwooda powiadamy, że gram radu wytwarza w przeciągu roku ilość helu, która, zmierzona w 0°C i pod ciśnieniem 1 atmosfery, zajęłaby objętość 40 mm³. Przekonałiśmy się w § 45-ym, że 1 cm³ gazu doskonałego, w 0°C i pod ciśnieniem 1 atmosfery, zawiera liczbę 2.71×10^{19} molekuł; ponieważ molekuła helu składa się z jednego atomu, przeto gram radu rodzi rocznie 1.084×10^{18} atomów helu. Zgodność powyższych wyników: liczby cząstek α oraz liczby atomów helu, wytwarzanych przez rad, świadczy o prawdziwości hipotezy, według której cząstka α jest jądrem helowego atomu

Oznaczajmy przez e , jak zwykle, bezwzględną wartość ładunku jednego elektronu. Z badań Hendersona i Rutherforda dowiedzieliśmy się w ostatnich czasach, że cząstka α , gdy biegnie przez materjalne ośrodki, może chwytać i wiązać niekiedy dwa, niekiedy jeden tylko elektron; istnieją wówczas w ośrodku trzy gatunki cząstek He: zwykłe cząstki α , obdarzone ładunkiem dodatnim $2e$, cząstki mające ładunek dodatni e , wreszcie wcale nienaładowane, obojętne atomy helu. Jak zobaczymy, cząstka α przez długie pasmo stuleci może przebywać w łonie promieniotwórczego atomu. Gdy nagły kataklizm uwolnił cząstkę, jest swobodna i pędzi przed siebie, lecz ten okres swobody trwa tylko przez drobny ułamek sekundy; przez krótką tę chwilę cząstka wiele tysięcy razy zyskuje i traci i znów łowi i gubi przypadające jej dwa elektrony.

Porównajmy bieg cząstek α i cząstek β w polu magnetycznem. Według równania (3) § 108 go promień r orbity kołowej, którą w polu H zatacza cząstka obdarzona ładunkiem e , wynosi mv/eH . Postępując się znanymi wartościami prędkości v oraz wielkości e/m , stosującami się do cząstek α i β , przekonujemy się, że promień r orbity zataczanej przez cząstkę α jest około 234 razy dłuższy niż promień orbity, po której w tem samym polu biegnie cząstka β . Pojmujemy teraz, dlaczego, w danem polu, orbity cząstek α są bezporównania mniej zakrzywione niż tory cząstek β .

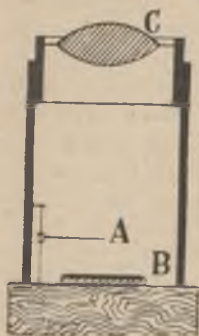
Poruszając się z prędkością v , ciało o masie m okazuje kinetyczną energję $\frac{1}{2}mv^2$; stosunek tej energii do masy ciała wynosi $\frac{1}{2}v^2$; wyrażenie $\frac{1}{2}v^2$ możemy więc nazwać *gęstością* kinetycznej energii. Jeżeli cząstka α biegnie z prędkością 0.2×10^{10} cm/sek, gęstość jej kinetycznej energii wynosi 2×10^{18} cm²/sek², jest zatem około 400 milionów razy większa niż gęstość kinetycznej energii kuli wystrzelonej z karabinu. Tak nadzwyczajne skoncentrowanie energii na małych cząstkach ułatwia zrozumienie ich wyjątkowych własności.

Już w r. 1903-im odkryli Curie i Laborde, że preparaty radu nieustannie wydzielają ciepło; z późniejszych pomiarów wiadomo, że 1 gram radu wytwarza w ciągu godziny około 25.1 kaloryj. Podobnie zachowują się inne promieniotwórcze substancje. Ale to wydzielanie ciepła jest tylko wtórnem, ubocznem zjawiskiem; niemal cała uwalniana ilość ciepła jest równoważnikiem kinetycznej energii cząstek α , które zatrzymują się w łonie promieniotwórczej substancji; odbierana cząstkom kinetyczna energia zamienia się w ciepło.

§ 118. Scyntylacje. Tory cząstek alfa.

Promieniowanie Becquerela, jak wiemy, pobudza do fluorescencji niektóre związki, np. blendę Sidota (siarczek cynku, ZnS). Skutek ten sprawiają niemal wyłącznie cząstki α ; przekonujemy się o tem, umieszczając na drodze promieniowania, pomiędzy jego źródłem a fluoryzującym ekranem, blaszkę glinu wystarczającą do powstrzymania α -cząstek (§ 114). Wyobraźmy sobie, że płytkę B (rys. 194) pokryto cienką warstewką blendy Sidota i że zbliżono do niej igłę A , na której końcu znajduje się ślad radowego preparatu; powierzchnia B jarzy się wówczas mdłym

światłem fluorescencyjnym. Przyglądamy się powierzchni B , w zupełnej ciemności, przez szkło C silnie powiększające; prze-



Rys. 194.

konywamy się, że niecała powierzchnia B błyszczy jednostajnie; dzieje się tutaj coś całkiem innego. To tu, to ówdzie na powierzchni B , rozsypane bezładnie, pojawiają się co chwila drobne punkciki świecące; jak «spadające gwiazdy» na sklepieniu niebieskiem, punkciki te przez mgnienie oka jaśnieją i gasną natychmiast. Takie przebliski, wywoływane przez cząstki α na fluoryzującym ekranie, nazywają się *scyntylacjami*; odkrył je Sir William Crookes, któremu zawdzięczamy też pomysł prostego przyrządu przedstawionego na rys. 194-ym, t. zw. *spintaryskopu*.

Nieustannie uderzając o blendę, cząstki α po jakimś czasie przegryzają jej cienką warstwę i czynią ją do świecenia niezdolną; lecz jeśli zużytą blendę zastąpimy świeżą, scyntylacje rozpoczynają się znowu, z biegiem czasu nie słabnąc. Widomym tym znakom, które α -cząstki dają nam bezpośredni dowód swojej sprawności, powinniśmy przyglądać się z największym podziwem. Przeminie wszyscy, którzy dostrzegamy dziś scyntylacje, znikną nasi następcy i następcy naszych następców, przejdą stulecia, zanim wyczerpie się odrobina radu umieszczona na końcu igły spintaryskopu, zanim z łona swego przestanie wyrzucać helowe pociski.

Przypuśćmy, że pewna ilość radu wysyła cząstki α które, padając na ekran fluoryzujący, wywołują w nim scyntylacje. Z doświadczeń nad ionizującym działaniem cząstek α wiadomo, jak powiedzieliśmy w § 117-ym, ile takich cząstek w przeciągu np. godziny wysyła np. 1 gram radu. Lecz, z drugiej strony, można bez trudności porachować przebliski, które pewna ilość radu sprawia w pewnym odstępie czasu, można zatem obliczyć liczbę scyntylacji, które 1 gram radu wywołałby w przeciągu godziny. Wymienione dwie liczby: liczbę cząstek α wyrzucanych przez gram radu w przeciągu godziny i liczbę scyntylacji wytwarzanych przez tę samą ilość radu w tym samym okresie czasu, porównali ze sobą po raz pierwszy Rutherford i Geiger w r 1908-ym. Wynik był zadziwiający: obiedwie liczby wypadły sobie równe. Każda zatem cząstka α , która uderza o blendę, sprawia scyntylacje i każda sprawia jedną scyntylację; rachując scyntylacje, liczymy zarazem cząstki α . Pewne warunki, dotyczące się energii cząstek oraz budowy warstwy fluoryzującej, winny być zachowane, ażeby ważny ten wynik nie został zakłócony.

Biorąc na uwagę niezmierną wrażliwość ludzkiego organu wzroku na świetlne pobudki, pojmujemy, że pośrednio możemy *zobaczyć* uderzenie cząstki α o ekran fluoryzujący. Masa cząstki α jest 4 razy większa niż masa atomu wodoru, którą obliczyliśmy w § 45-ym; przyjmując wartość (4) podaną w przytoczonym arty-

kule i zakładając, że cząstka α porusza się z prędkością 0.2×10^{10} cm/sek, przekonywamy się, że energia kinetyczna cząstki α wynosi około 1.3×10^{-5} erga. Nawet drobna część tej energii, zamieniona przez scyntyłację na świetlną energię, przenikając do naszego oka w nadzwyczaj krótkim czasie trwania scyntyłacji, przewyższa wielokroć razy granicę *minimum visibile*.

Wiadomo jest dzisiaj, że wypędzone przez rad pewne cząstki α przebiegają w atmosferycznym powietrzu około 7 cm, w temperaturze pokojowej, zanim ich kinetyczna energia tak dalece się zmniejszy, iż cząstki już nie potrafią ionizować napotykanym gazowych molekuł; jednakże na długości tej drogi (tego, jak powiadamy, charakterystycznego *zasięgu*) cząstka α ionizuje około 237000 molekuł; dopiero po dokonaniu tak znacznej pracy działalność cząstki ustaje.

Jak wiadomo z § 111-go, wytworzone w gazie jony stają się łatwo zarodkami, koło których para wodna, w przesyconej nią atmosferze, skrapla się chciwie. Wyobraźmy sobie, że cząstka α



Rys. 195.



Rys. 196.



Rys. 197.

porusza się w takim ośrodku gazowym, nadmiernie wilgotnym; na ionach, które ona wytwarza, osiadają natychmiast maleńkie wodne kropelki. Na kliszy fotograficznej można uchwycić znikome wodne skupienia tworzące się wzdłuż przebiegu cząstki α , oświetlając i fotografując je błyskawicznie, zanim jony, przez dyfuzję lub przez konwekcję, zdążą odbiec od linii przebiegu.

Takich zdjęć fotograficznych dokonał, po raz pierwszy, fizyk angielski C. T. R. Wilson w r. 1912-ym. Na ryss. 195-i 196-ym przytaczamy dwie z pomiędzy fotografii Wilsona; na rys. 197-ym podajemy dla porównania fotografię otrzymaną, gdy przez gaz, przesycony parą wodną, przebiega wiązka promieniowania Röntgena; wiązka ta, jak widzimy, z otaczających molekuł wyzwala elektrony, które, rozpraszając się dokoła, gromadzą na sobie wodne kropelki. Piękne te obrazy są naocznym dowodem udoskonalenia, do którego, w badaniu ustroju materji, doprowadzone dziś zostały metody naukowe.

§ 119. Budowa atomu; sztuczna promieniotwórczość.

Jak wiadomo z § 117-go, cząstki α mogą nawskróś przebiec cienką ściankę szklaną, nie uszkadzając jej wcale, tak iż pozostaje przegrodą nieprzenikliwą dla zwykłych molekuł gazowych. Sir Ernest Rutherford oraz inni uczeni wyjaśnili w ostatnich czasach, jak odbywa się spotkanie cząstki α z atomami materji. Wyobraźmy sobie nadzwyczaj ostrą, nierozbieżną wiązkę pędzących cząstek α ; ich tory tworzą nadzwyczaj cienki snop równoległych promieni. Dopóki cząstki mkną w próżni, biegną prosto-linjowo, wiązka zatem zachowuje pierwotną swą postać; lecz skoro napotka po drodze warstewkę złota lub glinu, warstwę wodoru albo azotu, rozszerza i rozpościera się zaraz. Z rozbioru takich spostrzeżeń Rutherford wyprowadził wniosek, iż *cząstka α , choć sama przez się jest masywnym materialnym pociskiem, najczęściej (lecz jednak niezawsze) przebiega swobodnie poprzez materialne atomy*. Gdy na przykład porusza się w warstwie metalicznego glinu, cząstka α przecina dziesiątki tysięcy atomów Al, zanim jej kinetyczna energia wyczerpie się w tych spotkaniach. Chemiczne atomy muszą zatem mieć budowę szeroko otwartą, podobnie jak układ słoneczny, przez który, bez wielkich zaburzeń, mogłaby przebiec bryła obca, ożywiona ogromną prędkością. Według hipotezy, wypowiedzianej przez Rutherforda, rozwiniętej następnie przez Niels Bohra w Kopenhadze i innych uczonych, atom składa się z maleńkiego, masywnego, nadzwyczaj w sobie skupionego, dodatnio naładowanego *jądra* oraz z krążących dokoła niego, znacznie większych, luźniejszych elektronów, niosących na sobie ładunki ujemne. Jeżeli N jest liczbą elektronów zawartych w atomie, łączna suma

ich ujemnego ładunku ma wartość bezwzględną Ne ; w normalnym (niezjonizowanym) atomie jądro musi być obdarzone tym samym dodatnim ładunkiem Ne . Liczba N elektronów krążących dokoła jądra jest zatem równa liczbie niezobojętnionych jednostek e zawartych w ładunku jądra; ta liczba N , jak dziś wiemy, jest najważniejszą cechą chemicznego pierwiastka. Najprostszym atomem chemicznym jest atom wodoru, w którym $N=1$; drugim z kolei jest atom helu, dla którego $N=2$. Atom litu zawiera 3 elektrony, atom glinu 13, atom srebra 47, atom złota 79 elektronów. Najzawilsze są promieniotwórcze atomy: atom Em (emancji radu) liczy 86 elektronów, atom Ra 88, atom Ac 89, atom Th 90, atom Ur zawiera 92 elektrony; nie znamy atomu, który mieściłby więcej niż 92 elektrony.

Gdy spotyka obcy atom, cząstka α , w przeważającej większości przypadków, wpada do luźnego tego układu i wypada zeń zaraz, nie sprawiając zmian głębokich i trwałych; wydarza się jednakże *niekiedy*, że cząstka α trafia celniej rdzenny szkielet atomu i wstrząsa go silniej. W najnowszych czasach Rutherford udowodnił, że, pod wpływem takich wyjątkowych uderzeń, w jądrach niektórych atomów (o ile dotychczas wiadomo, w jądrach boru, azotu, fluoru, sodu, glinu, fosforu) wydarzają się nagle wybuchy, przyczem nowe cząstki, *nie* α cząstki, wybiegają z atomu z olbrzymią prędkością. Te nowe cząstki wywołują znów scyntylacje, ionizują gazy, obdarzone są również dodatnimi ładunkami; ich masy są 4 razy mniejsze niż masy cząstek α . Niema już dziś wątpliwości, że cząstki te są *wodorowemi jądrami*; nazywamy je *protonami*.

Wyobraźmy sobie, że rwący potok cząstek α płynie przez zwykły glin metaliczny; przez atom glinu przebiega średnio około miliona cząstek bez zawichrzenia atomu, jedna na milion wywołuje wyżej opisany, wyjątkowy kataklizm. Lecz gdy wydarzy się owa eksplozja, wybiegający z atomu wodorowy proton miewa zazwyczaj *więcej* kinetycznej energii aniżeli heljonowa cząstka, która go uwolniła z uwięzi; skąd wnosimy, że cząstka α nie rozbija, nie kruszy uderzeniem atomu, lecz raczej wszczyna w nim katastrofę, że (jak iskra w prochni) *wyzwala* w nim wybuch. Szczególną jest przytem okolicznością, że pękające w takich warunkach atomy mają wszystkie niewysoką, zawsze nieparzystą liczbę elektronów:

dla atomów:	B	Az	Fl	Na	Al	Ph
liczba $N=$	5	7	9	11	13	15

Sąsiednie atomy, w których liczba N jest parzysta, np. węgiel C ($N=6$), tlen O ($N=8$), neon Ne ($N=10$) i t. d., nie tryskają, pod gradem cząstek α , strumieniem protonów.

Zadziwiającymi temi odkryciami Rutherford otwiera przed nami nową, najnowszą dziedzinę zjawisk natury: *sztuczną promieniotwórczość*. Wielkie, zawile, masywne, widocznie nietrwałe atomy: Em, Ra, Ac, Th, Ur samowolnie strzelają heljonowymi strzałami; małe, stosunkowo proste i trwałe atomy, dopiero pod ulewą takich pocisków, rozsądzone odwewnątrz, sypią gradem protonów. Owe wyrzucane pociski, heljony, protony, przynoszą nam wieści z niedostępnego i mało jeszcze znanego nam świata: z zarodki materji, ze szkieletu atomów, z ich *jąder*; niezmierna energja, którą stamtąd przynoszą, świadczy o straszliwych, ukrytych i zmagających się siłach.

§ 120. Promieniotwórcze przemiany.

Wiemy, że atom promieniotwórczy jest układem nietrwałym; wcześniej lub później, każdy taki atom przeobraża się, wyrzucając ze swego łona elektron (cząstkę β) lub heljon (cząstkę α); powstaje wówczas atom innej substancji. Atom uranu na przykład, t. zw. Ur I, po kilku wybuchach, może utworzyć atom ionu Io, który, oddaliwszy cząstkę α , przemienia się w atom radu Ra; atom Ra z kolei, znów wypędziwszy cząstkę α , staje się atomem emanacji radowej EmRa, który również przekształca się dalej; polon (RaF) jest jednym z późniejszych ogniw dziwnego tego łańcucha, t. zw. *rodziny uranu i radu*; jej bocznem, jak się zdaje, rozgałęzieniem jest *rodzina aktynu*; jak przypuszczamy obecnie, tak zw. Ur II jest w rodzinie uranu i radu ogniwem, z którego wybiega rodzina aktynu. Osobną, równoległą rodzinę stanowi, o ile dotychczas wiadomo, *rodzina toru*. Ostatnimi niejako potomkami tych rodzin są różne dziś znane ołowię, t. zw. *izotopy ołowiu*. Każdy więc atom promieniotwórczy istnieje tylko przez pewien okres czasu; każdy powstaje w chwili przewrotu, który kres życia poprzednika położył. Atom promieniotwórczy utworzony zostaje na czas ułamka sekundy lub pasma stuleci; wcześniej czy później ginie w ponownym wybuchu, pozostawiając po sobie najbliższego w szeregu następcę.

Jak długo trwa *przeciętny* żywot *atomu radu*? Obliczmy przede wszystkim, ile atomów zawiera 1 gram tego pierwiastka. Masa atomu radu jest 226 razy większa niż masa atomu wodoru; tę ostatnią zaś obliczyliśmy wyżej w § 45-ym. Dochodzimy zatem do wniosku, że masa atomu radu wynosi $3\,756 \times 10^{-22}$ gr; a więc

gram radu zawiera 2662×10^{21} atomów. Wiemy jednak z § 117-go, że w gramie radu rozpada się rocznie 1.110×10^{18} atomów. Dzielic pierwszą liczbę przez drugą, otrzymujemy, jako przeciętny okres T istnienia atomu radu, wartość

$$1. \quad T = 2397 \text{ lat.}$$

Jedne atomy radu mogą żyć krótko, inne bardzo długo; wartość (1) jest tylko *średnią* długością żywota atomu. Ziarenko radu, ważące gram jeden, zawiera tłum nieprzejrany atomów; gdyby w tym tłumie każdy atom Ra istniał przez 2397 lat i gdyby regularnie co 3×10^{-11} sekundy ginął jeden atom, wszystko odbywałoby się *dla nas* tak właśnie, jak spostrzegamy.

Według nowszych, inną drogą wykonanych obliczeń średni czas T istnienia atomu radu wynosi 2322 lata. Dla niektórych innych promieniotwórczych substancji przytaczamy średnie czasy T istnienia atomu:

Ur I:	6.3×10^9 lat;	Th:	23×10^9 lat
EmRa:	5.55 dni;	EmAc:	5.6 sekundy.

RaF (polon): około 200 dni.

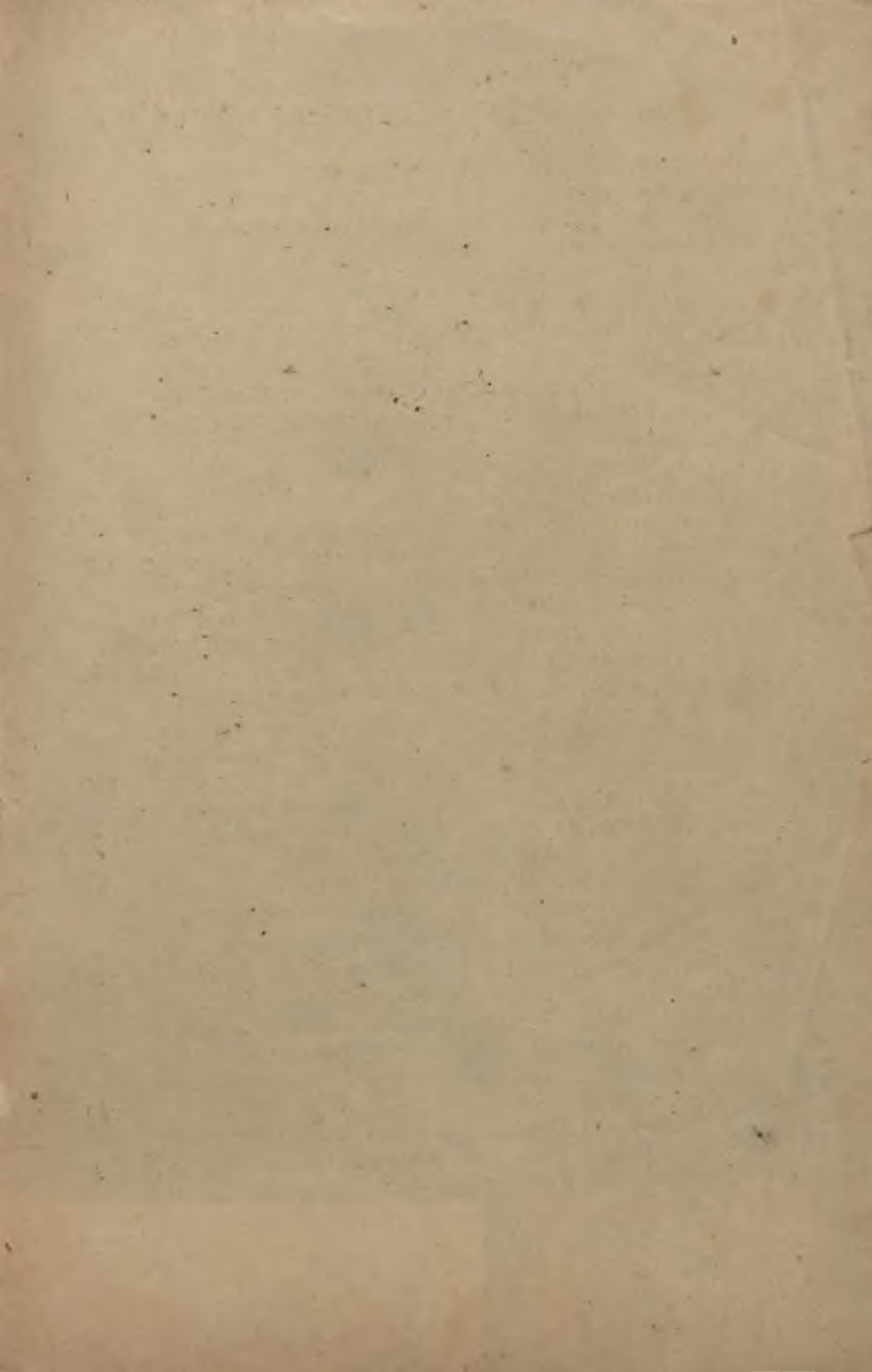
Istnieją, jak się zdaje, promieniotwórcze atomy, których średnie okresy istnienia T są rzędu 10^{-6} a nawet 10^{-11} sekundy.

Gram radu wydziela rocznie energję równoważną 220000 kalorjom (§ 117). Przypuśćmy, że gram radu żyje przez 2397 lat; zanim całkowicie zostanie przeobrażony, musi on oddać energję równoważną 528 milionom kaloryj. Ażeby uzyskać tę samą liczbę kaloryj, musielibyśmy spalić 64.4 kg węgla (por. § 109 tomu II-go); w równej więc masie rad ogrzewa 64400 razy energiczniej niż płonący węgiel. W stosunku do swojej masy, ziarenko radu jest bezporównania hojniejszym źródłem energii niż lampa, ognisko lub którekolwiek w przestworzu rozżarzone słońce. Gdyby tylko milionowa część masy naszego słońca składała się z atomów radu, jego dzisiejsza promienista działalność byłaby wytłumaczona.

W łonie promieniotwórczych atomów są zatem ukryte niezmiernie zasoby energii. Ale takie atomy są i muszą być rzadkie. Są to ostatni, jeszcze żywi i czynni świadkowie straszliwego twórczego procesu, który kiedyś, w mrocznej dla nas epoce, dźwigał grube zręby obecnego ustroju natury. Inne atomy, cała reszta dzisiejszej materji, to zapewne tylko odpadek, tylko rumowisko i próchno pozostałe po owem tytanicznem zjawisku.

lecz i te prostsze atomy, jak poczynamy domniemywać się dzisiaj (§ 119), mogą zawierać niespodziewane skarby energii. Wiemy bardzo mało dotychczas o istotnej naturze jąder w atomach; zaledwie dowiedzieliśmy się o obecności i roli tego rdzenia wszelkiej materji; zaledwie zaczynamy przenikać dziwne jego tajemnice. Co przyniesie pokoleniom następnym dalszy rozwój naukowego badania? Czy rozplątanie zagadek, których dopiero domyślamy się dzisiaj, nie będzie dla nich warunkiem zachowania życia na ziemi? Na te i podobne pytania niepodobna jest nam odpowiedzieć.





WYDAWNICTWA GEBETHNERA I WOLFFA

- Arlitewicz Z.: Tematy matematyczne z rozwiązaniami i objaśnieniami dla klas wyższych szkół średnich . . . 2-65
- Bóbr St.: Badanie funkcji linjowej oraz trójmianu drugiego stopnia. Z 41 rys. 1-20
- Bruner L. i Tołłoczko St.: Chemja nieorganiczna. Z 88 figurami w tekście i tablicą widmową. Na nowo opracował prof. Dr. Stanisław Tołłoczko. Wyd. 6-te w druku.
- Chemja organiczna. Z 26 rys. w tekście. Wyd. 5-te . . . 5-40
- Domaniewski J.: Zarys geografji zwierząt. Z 200 ilustr. w tekście 5—
- Ernst M. Dr.: Kosmografja. Wykład elementarny z 76 rys. w tekście. Wyd. 4-te (w druku).
- Gabszewicz Z.: Trygonometria. Podręcznik dla kształcących się w zakresie kursu szkół średnich. Wyd. 2-gie . . . 1-35
- Hłasiwetz H. Dr.: Podręcznik do jakościowej analizy chemicznej, do użytku przy praktycznych zajęciach w pracowni chemicznej. Przełożył z 13-go niemieckiego wydania H. Wdowiszewski 0-50
- Hryniewiecki B. prof. Dr.: Zielnik i muzeum botaniczne. Wskazówki praktyczne: jak zbierać, preparować, konserwować, oznaczać rośliny i układać zbiory botaniczne. Z 18 rys. w tekście 1-50
- Karczewski St.: Geologia i mineralogja w szkole średniej. Metodyka. Z licznemi rysunkami w tekście . . . 1-35
- Lewiński J. prof. Dr.: Podstawy mineralogji i geologii dla klas wyższych szkół średnich. Z 151 rys. w tekście . . . 3-90
- Natanson Wł. prof. Dr. i Zakrzewski K. prof. Dr.: Nauka fizyki. Podręcznik przeznaczony do użytku uczniów klas wyższych szkół średnich. Tom I z 128 rys. . . . 2-10
- Tom II z 148 rys. w tekście 2-90
- Tom III (i ostatni) w dwóch zeszytach, w druku.
- Wojtowicz Wł.: Tablice matematyczno-fizyczne czterocyfrowe do użytku szkół średnich. Wyd. 2-gie poprawione i rozszerzone 1-20
- Trygonometria płaska do użytku szkół średnich. Ze 102 rycinami. Wyd. 3-cie (w druku).

Pedagogiczna Biblioteka Wojewódzka
w Gdańsku

P 6502/3/1



041000006502

Pedagogiczna
Biblioteka
Wojewódzka

Gdańsk-Wrzeszcz
ul. J. Hallera 14

MUZEUM
P 6502