

STANISŁAW KALINOWSKI

F I Z Y K A

TOM III

ELEKTRYCZNOŚĆ i MAGNETYZM



1929

WYDAWNICTWO M. ARCTA W WARSZAWIE

2.728

14-



C. 547341

S. 692/III

DRUKARNIA ZAKŁADÓW WYDAWNICZYCH
M. ARCT, SP. AKC. W WARSZAWIE
CZERNIAKOWSKA 225



MP. 1212

BG04A/012-07

P R Z E D M O W A

Z chwilą ukończenia druku tomu III „Fizyki“ mija dokładnie 10 lat od czasu ukazania się pierwszego wydania tomu pierwszego. Zdaje sobie najzupełniej sprawę z tego, na jak wielkie niedogodności naraziłem kolegów moich i uczącą się młodzież, którzy chcieli z podręcznika mojego korzystać, rozciągając na tak długi okres wykończenie całości. Niestety, nie dało się zrobić inaczej w tych warunkach, w których pracuję. Szczęśliwy jestem, że wogóle udało mi się dobrać do końca.

Podczas druku tego tomu ogarniały mnie niejednokrotnie wątpliwości, czy nie jest on za obszerny. Zważywszy jednak stan obecny nauki o zjawiskach elektromagnetycznych oraz znaczenie tego działu fizyki, rozstrzygałem zawsze te wątpliwości na rzecz nie robienia skrótów. Na taką decyzję moją najbardziej zawsze wpływała okoliczność, iż porównyując mój podręcznik z innymi, używanymi w szkołach, nie tyle widziałem różnic w ilości poruszonych tu i tam tematów, ile raczej w sposobie krótszego względnie szerszego ich omówienia. Otóż jestem przeciwnikiem skrótów i sprowadzania wykładu do typu konspektowego. Trzydziestoletnia praktyka nauczycielska kazała mi być takim przeciwnikiem. Zresztą układałem materiał w podręczniku tak, by ewentualnie poszczególne tematy mogły być opuszczone.

Jak po wydaniu pierwszego i drugiego tomów, tak szczególnie teraz, w stosunku do tomu III zależy mi bardzo na krytyce i uwagach osób, które zechcą się z książką moją zapoznać albo z niej korzystać. O krytykę taką bardzo serdecznie wszystkich proszę.

Podczas druku tego tomu korzystałem z uprzejmej pomocy tych samych osób, które mi pomagały poprzednio. Prof. M. Grotowski oraz prof. F. Zienkowski byli łaskawi przejrzeć wszystkie korekty i nie szczędzili mi swych cennych uwag. W żmudnej pracy ściśle korektorskiej (poza urzędową i bardzo sumienną korektą firmy wydawniczej) nie dałbym sobie rady, gdyby nie pomoc, jak dawniej, żony mojej. Rysunki kreślone wykonane były przez p. W. Drège. Rozwiązania zadań i skorowidz sporządził mi prof. J. Paderewski. Wszystkim tym osobom składam jak najgorętsze podziękowanie. Dziękuję też serdecznie firmie wydawniczej M. Arct w Warszawie za bardzo życzliwe traktowanie tego wydawnictwa.

AUTOR.

TREŚĆ.

CZĘŚĆ VIII. ELEKTRYCZNOŚĆ I MAGNETYZM.

Rozdział I. Nabój elektryczny. Jednostka naboju. 273. Elektryzowanie ciał przez tarcie. 274. Elektryczność dodatnia i ujemna. 275. Udzielanie naboju elektrycznych ciałom nienaektryzowanym przez dotykanie ich ciałami naektryzowanemi. 276. Dobre i złe przewodnictwo. Izolowanie. Uziemianie. 277. Elektroskop. 278. Mierzenie naboju elektrycznych. Prawo Coulomba. 279. Elektryzowanie indukcyjne (indukcja elektrostatyczna). 280. Istnienie naboju stwierdzamy tylko na powierzchni, ale nie wewnątrz naektryzowanego przewodnika. 281. Puszka Faraday'a. Powstawanie jednoczesne naboju dodatnich i ujemnych. 282. Rozmieszczenie naboju elektrycznego na przewodniku. 283. Jak sobie wyobrażamy mechanizm elektryzowania się ciał. Ćwiczenia i zadania (405 — 424) 1

Rozdział II. Pole elektrostatyczne. 284. Natężenie pola. Linje sił. 285. Doświadczalny sposób badania linii pola elektrostatycznego. 286. Ścisłejszy dowód prawa Coulomba. 287. Rurki sił pola elektrycznego. 288. Potencjał elektryczny. 289. Potencjał elektryczny (ciąg dalszy). 290. Powierzchnia naektryzowanego przewodnika jest powierzchnią ekwipotencjalną. 291. Związek między wartością potencjału w danym miejscu pola a wartością natężenia w temże miejscu. 292. Co nam dają wskazania elektroskopu? 293. Jak daje się mierzyć potencjał? Ćwiczenia i zadania (425—441) 32

Rozdział III. Pojemność elektryczna. Kondensatory. Machiny elektrostatyczne. 294. Pojemność elektryczna. Jednostka pojemności. 295. Kondensatory. 296. Pojemność kondensatora. Rola przedzielającego okładki dielektryku. 297. Energja naektryzowanego ciała. 298. Wiadomości uzupełniające o dielektrykach i polu elektrostatycznym. Ogólniejsza postać wzoru Coulomba. 299. Wiadomości uzupełniające o dielektrykach i polu elektrostatycznym (ciąg dalszy). 300. Wiadomości uzupełniające o dielektrykach i polu elektrostatycznym (dokończenie). 301. Machiny elektrostatyczne. Ćwiczenia i zadania (442—476) 70

Rozdział IV. Ogólne wiadomości o prądzie elektrycznym. Elektroliza. Ogniwa. 302. Zjawisko prądu elek-

trycznego. Kierunek prądu. 303. Spad potencjału wzdłuż drogi prądu. 304. Ogniwo voltaiczne. 305. Zjawiska chemiczne w ogniwie. Przewodniki metaliczne i elektrolity. 306. Łączenie ogni w baterje. 307. Natężenie prądu. Jednostka natężenia prądu. 308. Galwanoskopy. Galwanometry. Ampermetry. 309. Zjawisko elektrolizy. 310. Wolta-metry. 311. Faraday'a pierwsze prawo elektrolizy. 312. Faraday'a drugie prawo elektrolizy. Mechanizm elektrolizy. 313. Prądy elektryczne przewodzone i konwekcyjne. Wyznaczanie wartości naboju elementarnego na podstawie zjawiska elektrolizy. 314. Budowa ogni. 315. Wiadomości uzupełniające o budowie ogni. 316. Akumulatory. Ćwiczenia i zadania (477—490) 114

Rozdział V. Magnesy. Pole magnetyczne. 317. Magnesy naturalne i sztuczne. 318. Działanie wzajemne biegunów magnetycznych. 319. Magnesowanie indukcyjne. 320. Niemożność otrzymania magnesu o jednym tylko biegunie. 321. Wyobrażenie przybliżone o budowie magnesu. Wpływ wstrząśnień i wysokich temperatur na magnesy. 322. Prawo Coulomba. Jednostka masy magnetycznej. 323. Pole magnetostaticzne. Ćwiczenia i zadania (491—510) 160

Rozdział VI. Magnetyzm ziemski. 324. Elementy magnetyzmu ziemskiego. 325. Wyznaczanie zbroczenia magnetycznego (D) i jego znaczenie praktyczne. 326. Wyznaczanie nachylenia magnetycznego (I). 327. Mierzenie składowej poziomej (II) magnetyzmu ziemskiego. 328. Zmiany elementów magnetyzmu ziemskiego. 329. Mapy magnetyczne. Międzynarodowy charakter badań magnetyzmu ziemskiego. Ćwiczenia i zadania (511—530) 188

Rozdział VII. Pole magnetyczne prądu elektrycznego. 330. Pole magnetyczne dokola prostolinjowego przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny. 331. Pole magnetyczne dokola kołowego przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny. Solenoid. 332. Magnesowanie przez prąd elektryczny. Elektromagnesy. 333. Działania, zachodzące między przewodnikami, w których płyną prądy elektryczne. 334. Pole magnetyczne, wytworzone przez prąd konwekcyjny naboju elektrycznych. 335. Reguła zasadnicza działań elektromagnetycznych i elektrodinamicznych. 336. Galwanoskopy i galwanometry, oparte na działaniu sił elektromagnetycznych i elektrodinamicznych. 337. Jednostka elektromagnetyczna natężenia prądu elektrycznego. 338. Busola stycznych. Określenie ampera i kulomba. 339. Stosunek jednostki elektromagnetycznej do jednostki elektrostatycznej natężenia prądu elektrycznego. Ćwiczenia i zadania (531—553) 217

Rozdział VIII. Opór elektryczny. Prawo Ohma. Prawo Joule'a. 340. Pojęcie oporu elektrycznego. 341. Prawo Ohma. Jednostka oporu elektrycznego. 342. Opór przewodników, złączonych w szereg i równolegle. 343. Zależność oporu przewodnika od jego rozmiarów. Opór właściwy. 344. Mierzenie oporów. Mostek Wheatstone'a. Opornice. 345. Obwody, zawierające baterje ogni, połączonych w szereg i równolegle. 346. Praca i ciepło w obwodzie prądu. Dzielnosc prądu. Prawo Joule'a. 347. Voltmetry. Ćwiczenia i zadania (554—613). 257

Rozdział IX. Prądy termoelektryczne. 348. Zjawisko prądu termoelektrycznego. 349. Zjawisko Peltiera. 350. Praktyczne zastosowanie ogniw termoelektrycznych. Baterje termoelektryczne. Ćwiczenia i zadania (614—618) 293

Rozdział X. Wiadomości uzupełniające o polu magnetycznem i magnetycznych własnościach ciał. 351. Ciała paramagnetyczne i diamagnetyczne. 352. Przenikliwość magnetyczna. 353. Przenikliwość magnetyczna (ciąg dalszy). Postać ogólniejsza wzoru Coulomba. 354. Histereza. Koercja. 355. Okowy i zwory magnetyczne. 356. Działanie pola magnetycznego na rozchodzące się w niem promieniowanie. Ćwiczenia i zadania (619—624) . 300

Rozdział XI. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej. 357. Powstawanie prądów indukcyjnych. 358. Powstawanie prądów indukcyjnych (ciąg dalszy). 359. Reguła Lenza. 360. Siła elektromotoryczna prądu indukcyjnego. 361. Prądy Foucaulta. 362. Indukcja własna. 363. Prądnice prądu stałego. 364. Prądnice prądu przemiennego. 365. Motory elektryczne. 366. Transformatory. 367. Cewka Ruhmkorffa. 368. Telefon. Ćwiczenia i zadania (625—639) 316

Rozdział XII. Prądy elektryczne w gazach. 369. Prądy elektryczne w powietrzu przy zwykłej wartości ciśnienia atmosferycznego. 370. Prądy elektryczne w gazach rozrzedzonych. 371. Promienie katodowe. 372. Promienie katodowe (ciąg dalszy). 373. Promienie kanalikowe i anodowe. 374. Promienie Röntgena. 375. Promienie Röntgena (ciąg dalszy). 376. Jonizacja gazów. 377. Wiadomości uzupełniające o prądach elektrycznych w gazach. Ćwiczenia i zadania (640—647) 357

Rozdział XIII. Promieniotwórczość. 378. Odkrycie ciał promieniotwórczych. 379. Rad. 380. Promieniowanie α , β , γ , δ . 381. Przemiany promieniotwórcze. 382. Budowa atomów. Ćwiczenia i zadania (648—655) 392

Rozdział XIV. Fale elektromagnetyczne. 383. Wyladowanie wahadłowe kondensatora. 384. Transformator Tesli. 385. Rezonans elektryczny. 386. Fale elektromagnetyczne. 387. Fale elektromagnetyczne (ciąg dalszy). 388. Fale elektromagnetyczne, kierowane wzdłuż drutów. 389. W jaki sposób rozchodzi się fala elektromagnetyczna. 390. Teoria elektromagnetyczna światła. 391. Radio-technika. Ćwiczenia i zadania (656—665) 408

Rozdział XV. Elektryczność ziemska. 392. Pole elektryczne w atmosferze. 393. Przewodnictwo elektryczne atmosfery. 394. Stan elektryczny opadów. Pioruny. 395. Zorza biegunowa. 396. Prądy ziemskie. Ćwiczenia i zadania (666—669) 444

DOSTRZEŻONE OMYŁKI W DRUKU.

<i>Str.</i>	<i>wiersz</i>	<i>wydrukowano</i>	<i>powinno być</i>
43	7 od góry	$s_2 \frac{s_2'}{\cos \alpha}$	$s_2 = \frac{s_2'}{\cos \alpha}$
94	20 od góry	(wzór 9).	(wzór 10)
136	9 od dołu	3 minuty	1 minutę
156	9 od góry	rys. 747.	rys. 751
175	20 „ „	(wzór 4).	(wzór 3)
238	11 „ „	rys. 848)	rys. 847)
249	7 „ „	$i = \frac{5rH}{2\pi n} \operatorname{tg} \alpha$	$i = \frac{5rH}{\pi n} \operatorname{tg} \alpha$
251	7 od dołu	opuszczono obok wzoru (4)	
252	13 od góry	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$
356	7 „ „	0,01	1,01Ω

CZĘŚĆ ÓSMA.

Elektryczność i magnetyzm.

ROZDZIAŁ I.

NABÓJ ELEKTRYCZNY; JEDNOSTKA NABOJU.

273. Elektryzowanie ciał przez tarcie.

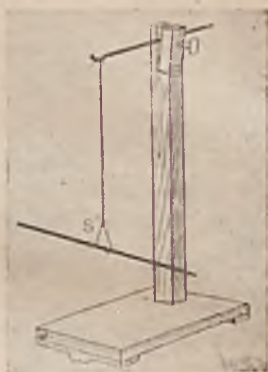
Jeżeli pocieramy kawałek bursztynu lub ebonitu suknem, albo kawałek szkła chustką jedwabną, po uprzednim dobrem wysuszeniu tych ciał, wówczas zarówno bursztyn, jak ebonit, jak szkło nabierają szczególnej własności przyciągania drobnych przedmiotów, np. strzępków waty lub skrawków papieru, której to własności przed potarciem nie objawiały. Powiadamy, iż przez pocieranie *elektryzujemy* ciała wymienione, że *naelektryzowane* wykazują własności, których przedtem w stanie *obojętnym* nie posiadały. Zjawisko to w stosunku do bursztynu znane już było w starożytności, a od nazwy greckiej bursztynu „elektron“ pochodzi zarówno wyraz „elektryczność“, jak wszystkie inne wyrazy o tym samym pierwiastku.

Zawieśmy na nitce drucik, zgięty tak, by stanowił wygodne łożysko dla pręcika. Przedstawia to rys. 627. Umieścimy na tem strzemiączku pręcik drewniany; poczekajmy, by nitka się rozkręciła i pręcik zajął określone położenie. Zbliźmy do jednego końca tego pręcika drewnianego pręt ebonitowy lub szklany, naelektryzowany w podany przed chwilą sposób. Natychmiast dostrzeżemy przyciąganie — koniec pręcika drewnianego zbliży się do pręta naelektryzowanego, przyczem nitka, utrzymująca strzemiączko, zostanie skręcona.

Polóżmy którykolwiek z prętów naelektryzowanych na strzemiączku i zbliźmy do potartego jego końca zdjęty ze strzemiączka pręt drewniany; znowu stwierdzimy takie same „przyciąganie“. Zgodnie więc z 3-cią zasadą Newtona jest tu wzajemne działanie: dane ciała „przyciągają się“.

Przesuńmy teraz kilka razy naelektryzowany pręt przez płomień lampki spirytusowej lub jeszcze lepiej palnika gazowego i powtórzmy doświadczenie. Zaobserwowanego poprzednio zjawiska przyciągania nie dostrzeżemy; dla otrzymania go trzeba powtórzyć pocieranie prę-

tów, jak wyżej. Wnioskujemy stąd, że przeprowadzenie prętów przez płomień pozbawia je w jakiś sposób tych własności, jakie przypisywaliśmy naelektryzowaniu. Odkładając na później wyjaśnienie tego faktu, możemy się nim posługiwać tymczasem dla wielokrotnego powtórzenia zjawiska, które utrwali w nas przekonanie, że dostrzegane przy-



Rys. 627.

ciąganie należy przypisywać jakiemuś nieznanemu czynnikowi, który się zjawia przy pocieraniu pręta, a którego nie można utożsamiać z grawitacją (działanie grawitacyjne jest zresztą zbyt słabe, aby w podobny sposób się ujawniło; była o tem mowa w ust. 53 tomu I-go).

274. Elektryczność dodatnia i ujemna.

Zjawisko, podane w ustępie poprzednim, nie należy do najprostszych. Celem zorientowania się w niem, musimy przeprowadzić szereg planowo pomyślanych doświadczeń z naelektryzowaniami przez tarcie ciałami. Zawieśmy, jak wyżej, na nitce ze strzemiączkiem (rys. 627) pręt np. ebonitowy, potarty suknem. Jeżeli do potartego końca pręta zawieszzonego zbliżymy koniec innego pręta ebonitowego, również potartego suknem, stwierdzimy „odpychanie się“ tych ciał (rys. 628); zawieszony pręt skreśli przytem nitkę, do której uwiązane jest strzemiączko. Takie samo zjawisko odpychania się stwierdzimy, używając dwu prętów szklanych*), potartych chustką jedwabną, z których jeden zawieśmy po potarciu na strzemiączku, a drugi zbliżymy do pierwszego. Przeciwnie, jeżeli na strzemiączku zawiesimy pręt ebonitowy, potarty suknem, zbliżymy zaś doń pręt szklany, potarty jedwabiem, stwierdzimy „przyciąganie się“ tych ciał (rys. 629).

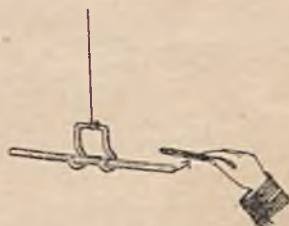
*) Używamy prętów szklanych o powierzchni gładkiej, nie matowej; dlatego, o tem niżej.

Dwa jednakowe pręty np. ebonitowe, z których każdy został potarty w jednakowy sposób sukniem, muszą posiadać własności jednakowe, a więc musimy o nich mówić jako o naelektryzowanych jednakowo. Tak samo nie mogą się elektryzować inaczej niż jednakowo dwa jednakowe pręty szklane, pocierane jedwabiem. Otóż powyższe doświadczenia pouczają nas, iż takie ciała jednakowo naelektryzowane odpychają się. Gdyby przytem szkło, pocierane jedwabiem, elektryzowało się tak samo jak ebonit, pocierany sukniem, możnaby oczekiwać, że dwa te różne pręty w trzeciem z opisanych wyżej doświadczeń będą się również odpychały; snadź jednak dzieje się inaczej, skoro stwierdzamy tam przyciąganie się.

Pocierając pręty z siarki lub laku sukniem i zbliżając je do zawieszono- go pręta ebonitowego, potartego sukniem, lub do zawieszono- go pręta szklanego, potartego jedwabiem, stwierdzamy, że oba te pręty z siarki i laku odpychają naelektryzowany pręt ebonitowy, przyciągają zaś naelektryzowany pręt szklany. Również dwa pręty z laku, potarte sukniem,



Rys. 628.



Rys. 629

a przez to naelektryzowane jednakowo i dwa pręty z siarki, w ten sam sposób naelektryzowane, odpychają się nawzajem. Wnosimy, iż siarka i lak elektryzują się przez tarcie tak jak ebonit, pocierany sukniem, inaczej zaś niż szkło, pocierane jedwabiem.

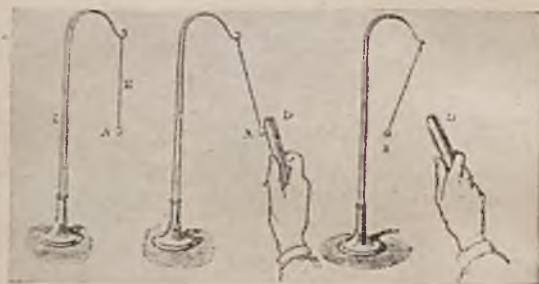
O ciałach naelektryzowanych mówimy, iż posiadają one *naboje* elektryczne, albo *ładunki* elektryczne; nabojom tym właśnie przypisujemy dostrzeganie działanie: przyciąganie i odpychanie — wszak ciała nienaelektryzowane, nie posiadające naboju elektrycznych, tych działań nie wykazują.

Dalsze badanie ujawnia, że wszystkie ciała dają się elektryzować przez tarcie, ilekroć zaś stwierdzamy, iż ciało jest naelektryzowane, ma ono zawsze albo taki nabój jak szkło, potarte jedwabiem, albo takie jak ebonit, potarty sukniem. Umówiono się nazywać nabój, otrzymany w podany sposób na szkle, nabojem elektrycznym *dodatnim*, nabój na ebonicie zaś — *ujemnym*. Opisane więc w tym ustępie doświadczenia prowadzą do wniosków następujących: 1) *Istnieją dwa rodzaje naboju elektrycznych: dodatnie i ujemne*; 2) *Jednoimiennie naboje elektryczne odpychają się, różnoimiennie przyciągają*.

275. Udzielanie nabołów elektrycznych ciałom nieniaelektryzowanym przez dotykanie ich ciałami naelektryzowanymi.

Zawieśmy na nitce jedwabnej (rys. 630 a) kuleczkę z rdzenia bżowego; otrzymamy t. zw. *wahadelko elektryczne*. Zbliżając do tej kuleczki ciało naelektryzowane, np. pręt ebonitowy, potarty sukniem, stwierdzamy, iż kuleczka przyciągana najpierw do pręta (rys. 630 b.), po dotknięciu go odskakuje i zostaje potem odpychana (rys. 630 c), t. j. zachowuje się tak, jakgdyby przez to dotknięcie zdobyła nabój tego znaku, co nabój pręta.

Dotknijmy naszym prętem, naelektryzowanym ujemnie, kuli metalowej, osadzonej na słupku szklanym, pokrytym parafiną (rys. 631); (pragnąc kulę przenieść z miejsca na miejsce, bierzemy za tę nóżkę, nie dotykając samej kuli). Przekonamy się, że kula ta, która początkowo nie zdradzała żadnego działania na wahadełko, teraz działa tak sa-



Rys. 630.



Rys. 631.

mo jak pręt w doświadczeniu, przed chwilą opisanem; zatem przez dotknięcie prętem ebonitowym kula została naelektryzowana ujemnie.

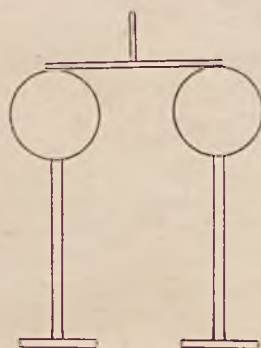
Gdy tą naelektryzowaną kulą metalową dotkniemy innej takiej samej kuli, osadzonej również na nóżce szklanej i nie wykazującej początkowo żadnego oddziaływania na wahadełko, zobaczymy, że i ta druga kula zachowuje się po tem dotknięciu w stosunku do wahadełka z rdzenia bżowego podobnie jak pierwsza; natomiast działanie pierwszej kuli wtedy słabnie — z tej samej odległości co poprzednio kuleczka z rdzenia jest słabiej odpychana. Dzieje się więc tak, jakgdyby nabój, mieszczący się początkowo na pierwszej kuli, zmałał—jakgdyby przez dotknięcie kul podzielił się jakoś pomiędzy obie kule.

Doświadczenie to można powtórzyć, używając dla odmiany pręta szklanego, pocieranego jedwabiem, zamiast ebonitowego, pocieranego sukniem. W tym przypadku będziemy mieli do czynienia z nabojami dodatnimi.

Elektryzując kuleczkę wahadelka ujemnie przez dotknięcie prętem ebonitowym, który potarliśmy sukniem, stwierdzamy, jak wyżej, że po naelektryzowaniu ten pręt ją odpycha; przeciwnie pręt szklany, potarty jedwabiem, przyciąga tę kuleczkę, ujemnie naelektryzowaną; również dotknięta naelektryzowanym prętem szklanym kula metalowa, osadzona na szklanej nóżce i nie zdradzająca początkowo własności elektrycznych, przyciąga kuleczkę z rdzenia, naelektryzowaną ujemnie. Doświadczenia te prowadzą do wniosku, że przez dotknięcie ciałem naelektryzowanym nienaelektryzowanego udzielamy temu ostatniemu naboju elektrycznego tego znaku, jaki posiada ciało naelektryzowane.

276. Dobre i złe przewodnictwo. Izolowanie. Uziemianie.

Zamiast tego, by dotykać bezpośrednio kulą naelektryzowaną nienaelektryzowanej, jak to czyniliśmy wyżej w celu udzielenia tej drugiej kuli części naboju pierwszej, można, jak się mówi, *połączyć* te kule



Rys. 632.

przy pomocy pręta metalowego, osadzonego na rękojeści szklanej czy ebonitowej, którą trzymamy w rękę (rys. 632). Po usunięciu pręta stwierdzamy, że podobnie jak po bezpośrednim zetknięciu kul ta z nich, która przedtem nie była naelektryzowana, zdradza obecność na niej naboju elektrycznego (działanie na wahadełko elektryczne).

Wszakże, jeżeli do połączenia kul użyjemy pręta nie metalowego lecz szklanego lub ebonitowego, nie uda się nam udzielić naboju kuli nienaelektryzowanej. Nabój elektryczny może być jakgdyby przeniesiony z jednej kuli na drugą za pośrednictwem metalu, nie może — za pośrednictwem szkła lub ebonitu.

Rozszerzając zakres podobnych doświadczeń na szereg innych substancyj, dochodzimy do wniosku, iż wszystkie ciała można rozpatrywać jako lepsze i gorsze *przewodniki elektryczne*. Metale stanowią naj-

lepsze przewodniki; szkło, ebonit, siarka, lak, jedwab, parafina, olej parafinowy, gazy — to naogół złe przewodniki. Nie znamy ani doskonałych przewodników, ani tak złych, byśmy je mogli nazwać doskonałymi nieprzewodnikami. Węgiel, ciało ludzkie są to względnie dobre przewodniki, znacznie gorsze od metali, lepsze niż drzewo, papier, bawełna. Zapamiętajmy sobie jeszcze, że wszystkie złe przewodniki nazywamy ogólnie *dielektrykami*.

Po tych wyjaśnieniach winniśmy rozumieć, dlaczego właściwie w doświadczeniach, wyżej przytoczonych, używaliśmy kul metalowych, osadzonych na nóżkach szklanych; chodziło wszak o to, by nie dać możliwości nabojom, mieszczącym się na kulach, przejść na inne ciało bez naszej woli—odosobnialiśmy je więc albo, jak się mówi, *izolowaliśmy*, umieszczając na podstawie ze złego przewodnika i korzystając z tego, że otaczające powietrze także jest złym przewodnikiem. Gdybyśmy nie stosowali tych środków zapobiegawczych, nabój z kuli przeszedłby na stół, dalej na podłogę i ściany pokoju, wreszcie na ziemię, która jest względnie dobrym przewodnikiem, i w ten sposób kula zostałaby *wyładowana*“.

Zauważmy przy sposobności, że na szkle skutkiem jego higroskopijności tworzy się warstewka wilgoci, będąca przewodnikiem, co niszczy własność izolującą szkła, z której pragniemy korzystać. Przez ogrzewanie można z powierzchni szkła usunąć tę szkodliwą warstewkę; zapobiega się również jej tworzeniu się przez pokrycie szkła parafiną lub szellakiem.

Sporządzając wahadełko elektryczne (rys. 630), zawieszaliśmy kulczkę z rdzenia bżowego na nitce jedwabnej również dlatego, by kulczkę izolować, jedwab bowiem jest złym przewodnikiem.

W doświadczeniach z prętami szklanymi i ebonitowymi (rys. 628, 629) mogliśmy nie zachowywać tych ostrożności; wprawdzie w miejscu zetknięcia ze strzemiączkiem naelektryzowany pręt traci nabój, który tam się mieści, wszakże w innych miejscach naboje pozostają, „nie rozchodzą się“ w tych złych przewodnikach.

Powinno być teraz zrozumiałe, dlaczego pręt metalowy, użyty do łączenia kul (rys. 632), trzymaliśmy nie bezpośrednio ręką, a za pośrednictwem szklanej lub ebonitowej rękojeści.

Dodajmy tu jeszcze wskazówkę praktyczną, iż parafina w płytkach lub prętach jest doskonałą izolacją i oddaje nieocenione usługi w doświadczeniach.

W tych przypadkach, gdy chodzi nie o zachowanie naboju elektrycznego, lecz o usunięcie go; gdy chodzi o *wyładowanie* przewodnika naelektryzowanego (np. w celu rozpoczęcia doświadczenia na nowo), łączymy go zapomocą przewodnika z ziemią, czyli *uziemiaamy go*. Wystarczy w tym celu dotknąć naelektryzowanego przedmiotu ręką, albowiem, jak już powiedzieliśmy, ciało ludzkie jest względnie dobrym przewodnikiem. Jeszcze lepiej użyć do tego drutu miedzianego, połączonego z rurą wodociągową lub gazową. Uziemianie naelektryzowanego złego przewodnika (ebonitu, laku, szkła) przez połączenie któregokolwiek miejsca z ziemią nie daje oczywiście całkowitego wyłado-

wania (dlaczego?); chcąc pozbać te ciała naboów elektrycznych, należy przesunąć je parę razy przez płomień, jak to wskazywaliśmy w ust. 273 (o tem będzie jeszcze mowa dalej).

277. Elektroskop.

Będziemy mogli znacznie rozszerzyć zakres wiadomości z dziedziny elektryczności, posługując się *elektroskopem* — przyrządem, pozwalającym stwierdzić obecność naboju elektrycznego na tem lub innym ciele. Rys. 633 przedstawia elektroskop wykładowy, tem dogodny, że się daje ustawić przed latarnią i rzucić na ekran, co umożliwi jednoczesną obserwację większej liczbie osób. Na pionowym pręciku metalowym, osadzonym w oszklonej puszcze metalowej i izolowanym od pu-



Rys. 633.



Rys. 634.

szki warstwą bursztynu, zwisają dwa lekkie listki metalowe, wycięte z folji aluminiowej lub z t. zw. pozłotki. Osłona metalowa elektroskopu winna być uziemiona. Dotykając ciałem naelektryzowanym kuleczki metalowej, umieszczonej na górnym końcu pręcika, ładujemy elektroskop, który otrzymuje część naboju ciała badanego; wówczas listki elektroskopu, mając naboje jednoimiennie, rozchylają się mniej lub więcej. Dotykając główki naładowanego elektroskopu ręką lub uziemiacz jakkolwiek inaczej, wyładowujemy go i listki opadają.

Czytelnikowi winno się nasunąć pytanie, dlaczego właściwie zawsze uziemiamy osłonę metalową elektroskopu. Wyjaśnić to możemy narazie przy pomocy następujących doświadczeń. Połączmy najpierw zapomocą drutu główkę elektroskopu z tą jego osłoną; przekonamy się, że dotykanie główki elektroskopu ciałem naelektryzowanym nie wywołuje żadnego rozchylenia listków. Po rozłączeniu główki i osłony przesunmy półtarty pręt szklanym po główce; listki się rozchylają. Dotknijmy wtedy tym samym prętem osłony, a zobaczymy, że rozchy-

lenie listków natychmiast się zmniejszy; jeżeli natomiast po naelektryzowaniu listków dodatnio i zauważeniu stopnia ich rozchylenia dotkniemy osłony metalowej naelektryzowanym ujemnie prętem ebonitowym, rozchylenie listków stanie się większe. Wnosimy z tego, że wskazania elektroskopu zależą od pewnej, że tak powiemy, różnicy w stanie elektrycznym listków oraz osłony metalowej. Odkładając na później bliższe wyjaśnienie tego, o co tu chodzi, możemy już teraz zrozumieć, że, aby móc uzależniać zawsze w jednakowy sposób wskazania elektroskopu od tego, co się dzieje z listkami, należy utrzymywać osłonę zawsze w tych samych ściśle warunkach. Dlatego właśnie stale ją uziemiamy.

Rys. 634 wyobraża nieco inaczej zbudowany elektroskop. Nabój udziela się zaopatrzonemu u góry w kuleczkę nieruchomemu, pionowemu prętowi metalowemu, przetkniętemu przez metalową osłonę i oddzielonemu od tej osłony warstewką izolatora (ebonitu, lepiej burszty-



Rys. 635.

nu). W środku tego pionowego pręta osadzony jest na osi lekki pręcik, który przy elektryzowaniu odchyła się od pręta nieruchomego; odchylenie notowane jest na skali. Zacisk na osłonie służy do połączenia jej drutem z rurą wodociągową albo gazową lub do innego sposobu uziemiania.

Elektroskop bardzo prostej konstrukcji i często używany przedstawia rys. 635. Posiada on listki papierowe; poza tem budowa jego nie wymaga dodatkowych wyjaśnień. Zasadniczym brakiem tego elektroskopu jest brak osłony metalowej, którą można byłoby uziemić.

Posiadamy dziś bardzo wiele rozmaicie zbudowanych elektroskopów, przystosowanych do rozmaitych zagadnień. Niektóre z tych przyrządów poznamy jeszcze niżej.

Dla uzupełnienia tego, cośmy już omówili, możemy przerobić następujące doświadczenia z elektroskopem.

1. Dotykamy główki elektroskopu prętem ebonitowym, potartym uprzednio sukniem; listki elektroskopu rozchylają się — posiadają one

teraz naboje ujemne. Przesuwamy kilkakrotnie pręt ebonitowy po główce tak, by dotykał jej coraz to innym miejscem — listki rozchylają się coraz bardziej, z czego wnosimy, że nabój elektroskopu stopniowo się zwiększa.

2. Po wyładowaniu elektroskopu przez uziemienie powtarzamy to samo doświadczenie, używając pręta szklanego, potartego jedwabiem; zjawisko odbywa się jak wyżej; tym razem elektroskop ładuje się dodatnio.

3. Po naładowaniu elektroskopu dodatnio dotykamy jego główki prętem ebonitowym po uprzednim natarciu tego pręta suknem; listki opadają coraz bardziej w miarę jak przesuwamy pręt po główce, jak wyżej — przez dodanie naboju ujemnego kasujemy jakgdyby istniejący na elektroskopie nabój dodatni. Robiąc to doświadczenie uważnie i zrecznie, możemy doprowadzić listki elektroskopu do zupełnego opadnięcia, przy dalszem zaś przesuwaniu naelektryzowanego pręta ebonitowego po główce elektroskopu listki poczynają się znowu coraz bardziej rozchyłać. Mimowoli rodzi się tu myśl, że w ten sposób przez dodanie naboju ujemnego elektroskopowi, mającemu początkowo nabój dodatni, rozładowujemy go i następnie przeładujemy na znak ujemny.

4. Ostatnie doświadczenie powtarzamy z elektroskopem, naładowanym ujemnie, przesuwając po główce prętem szklanym, naelektryzowanym dodatnio.

Doświadczenia 3 i 4 usprawiedliwiają wprowadzenie dla naboju nazw: „dodatni“ oraz „ujemny“. Wyrażamy się też nieraz, że nabojem jednego znaku zobojętniamy znajdujący się na przewodniku nabój znaku drugiego.

5. Dotykamy główki elektroskopu, wyładowanego uprzednio, kula metalową (rys. 631) naelektryzowaną w znany już sposób dodatnio; listki elektroskopu rozchylają się, wszakże przesuwanie kulą po główce przyrzędu tak, by dotykała jej coraz to innymi miejscami swej powierzchni, nie daje nic nowego; listki odrazu rozchylają się w pewien sposób i zachowują to rozchylenie. Z dobrego przewodnika odpowiednia część całego naboju udziela się elektroskopowi odrazu, bez względu na to, które miejsce przewodnika dotyka główki elektroskopu; inaczej rzecz się ma ze złem przewodnikami (szkłem, ebonitem); tam elektroskop odbiera nabój elektryczny tylko z miejsca, bezpośrednio stykającego się z główką.

6. Kulę naelektryzowaną łączymy z uprzednio wyładowanym elektroskopem przy pomocy pręta metalowego (drułu), osadzonego na rękojeści szklanej, ebonitowej lub parafinowej, którą trzymamy w rękę (porównaj rys. 632). Listki elektroskopu rozchylają się odrazu i jest rzeczą obojętną, w którym miejscu dotyka kuli lub główki elektroskopu pręt metalowy, byle między kulą a główką istniało owo połączenie metaliczne.

7. Łącząc tę samą kulę naelektryzowaną z elektroskopem przy pomocy pręta z laku, żywicy, szkła lub nitki jedwabnej, stwierdzamy, że elektroskop się nie ładuje.

8. Używając do połączenia pręta drewnianego lub bawełny, stwierdzamy powolne, stopniowe rozchylenie się listków, zanim położenie ich ustali się. [Czy można pręt drewniany lub nitkę bawełny trzymać bezpośrednio ręką? Jak należy sobie poradzić?].

9. Dotykając główki wyładowanego uprzednio elektroskopu kulą, którą uziemiliśmy po naładowaniu, nie widzimy rozchylania się listków; przez uziemienie kula została wyładowana.

10. Dotykając w paru miejscach palcem pręta ebonitowego lub szklanego, naelektryzowanych przez tarcie, stwierdzamy, że przez takie uziemienie pręty nie zostały pozbawione naboju, można bowiem w dalszym ciągu przy ich pomocy naładować elektroskop.

11. Pocierając jedwabiem pręt mosiężny, osadzony na szklanej rękojeści, którą wtedy trzymamy w rękę, stwierdzamy przy pomocy elektroskopu, że metale przez pocieranie również elektryzują się. Doświadczenie to nie udaje się, jeżeli pręt metalowy trzymamy bezpośrednio w ręce (dlaczego?).

12. Główki elektroskopu naładowanego dotykamy na chwilę niewielką, nie posiadającą naboju kulą metalową, albo innym niewielkim przewodnikiem, osadzonym na izolującej rękojeści, którą trzymamy w ręce. Listki elektroskopu opadają nieco i pozostają mniej rozchyleni niż były poprzednio. Dotykamy główki elektroskopu raz jeszcze innym podobnym izolowanym i nienaładowanym przewodnikiem albo tą samą kulą po jej chwilowym uziemieniu; listki elektroskopu jeszcze bardziej opadają. Jak to możemy wytłumaczyć? Dlaczego radzimy użyć niewielkiego przewodnika?

W dalszym ciągu wykładu będziemy mówili o innych doświadczeniach z elektroskopem.

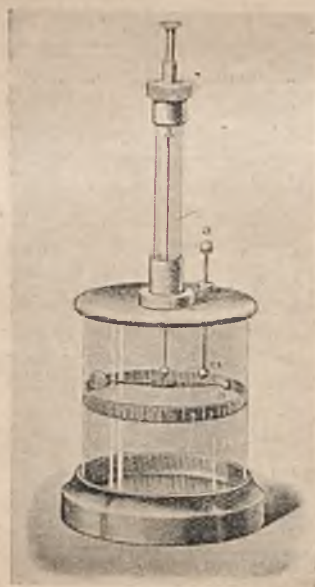
278. Mierzenie naboju elektrycznych. Prawo Coulomba.

Doświadczenia, opisane dotychczas, prowadzą do wniosku, iż naboje elektryczne są pewnymi wielkościami, które dadzą się mierzyć, jeżeli ustalimy dla nich odpowiednią jednostkę. Wszak jeśli listki elektroskopu rozchylają się raz więcej, raz mniej, możemy z tego wnosić, iż w obu przypadkach naboje na elektroskopie nie są równe — większe rozchylenie zda się wskazywać na większą wartość naboju. Z drugiej strony, wnioskując o wielkości naboju elektrycznego z takiego czy innego jego działania, stwierdzamy, iż działanie to zależy nietylko od tego naboju; tak np. gdy zbliżamy do naelektryzowanego wahadélka elektrycznego ciało, mające nabój tegoż znaku co nabój wahadélka, i obserwujemy wtedy znane już nam „odpychanie“, stwierdzamy, iż działanie to pozostaje w pewnej zależności od odległości, dzielącej owe ciało i kuleczkę wahadélka: przy odległości mniejszej działanie jest silniejsze. Doświadczenie uczy nas jeszcze, że jeżeli pomiędzy kuleczką wahadélka a tem drugim ciałem umieścimy płytę ze szkła lub parafiny *),

*) Płyty winny być dostatecznie grube, by wpływ ich dał się łatwo zauważyć.

działanie będzie słabsze niż wtedy, gdy te ciała naelektryzowane dzieli tylko powietrze.

Znakomity fizyk francuski Coulomb poddał badaniom przy pomocy t. zw. *wagi skręceń* działanie pomiędzy ciałami, mającymi na sobie naboje elektryczne. Waga skręceń zbudowana jest w sposób następujący (rys. 636). Na cienkim druciku zawieszony jest lekki pręcik ze szkła lub jeszcze lepiej szellaku; na jednym końcu pręcika przytwierdzona jest kuleczka *n* z rdzenia bżowego, na drugim lekka tarcza, równoważąca kuleczkę, a zarazem hamująca drgania pręcika, które zachodzić mogą w płaszczyźnie poziomej. Całe to urządzenie mieści się



Rys. 636.

w osłonie szklanej kształtu walcowego; na ścianie osłony widzimy podziałkę, pozwalającą wyznaczać położenie pręcika zawieszonego.

Druga podziałka mieści się na górnym końcu wąskiej rury, przez którą przechodzi drucik — ta podziałka jest potrzebna do wyznaczania ewentualnego obrotu główki, podtrzymującej drucik. Oczywiście pręcik pozostaje w równowadze, gdy drucik jest całkowicie rozkręcony; obracając główkę, możemy doprowadzić pręcik do położenia, w którym kuleczka z rdzenia bżowego przypada tuż przy drugiej takiej kuleczce *m*, osadzonej na izolującym ją pręciku pionowym, przetkniętym przez przykrywą naczynia. Jeżeli tej drugiej kuleczce udzielamy pewnego naboju elektrycznego i dotykamy nią kuleczki pierwszej, nabój dzieli się między obie, a jeżeli kuleczki są równej wielkości, mamy wszelkie podstawy do przypuszczania, że dzieli się na części równe.

Teraz następuje odpychanie się kuleczek, a ponieważ jedna z nich jest nieruchoma, druga oddala się, skręcając drucik, na którym zawieszony jest pręt z tą kuleczką. Pręt zatrzymuje się w położeniu, przy którym siły sprężyste, wywołane przez skręcenie drucika, równoważą działanie między nabojami. Podobnie jak wyżej, i tu zwracamy uwagę, że zachodzi jeszcze i grawitacyjne działanie między temi kuleczkami; wszakże działanie to dla kulek o tak małej masie z odległości kilku lub kilkunastu centymetrów jest znikomo małe, całe zatem dostrzegane zjawisko przypisać możemy mieszczącym się na kuleczkach nabojom. Kręcąc główkę, w której zaciśnięty jest górny koniec drucika, w jedną lub drugą stronę, możemy zbliżyć lub oddalić kulki, a różnym tym odległościom, mierzonym od środka jednej kuleczki do środka drugiej ^{*)}, odpowiadają różne skręcenia drutu, które odczytujemy łącznie na obu skalach dolnej i górnej (w stosunku do tego, co zanotowaliśmy na początku, gdy drucik był całkowicie rozkręcony). Ponieważ występujące tu siły sprężyste są proporcjonalne do skręceń, przeto z doświadczeń takich wnosić możemy o zmianach, którym ulegają siły, działające między nabojami elektrycznymi, gdy zmieniają się odległości pomiędzy temi nabojami. Można, oczywiście, jedną kuleczkę naelektryzować dodatnio, drugą zaś ujemnie — wówczas zachodzić będzie przyciąganie się, które badać można, zmieniając odległości między kuleczkami i mierząc odpowiadające tym zmianom skręcenia.

Z tego rodzaju pomiarów Coulomb wynioskował, iż obserwowane w doświadczeniu odpychanie się i przyciąganie nabołów elektrycznych zmienia się *odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości między nabojami* ^{**)}.

Z drugiej strony, jeżeli po zanotowaniu położenia pręcika z kuleczką już naładowaną zmienimy nabój kuleczki nieruchomej (w tym celu należy ją oczywiście po tem ponownem naładowaniu znowu wstawić na miejsce), wówczas zmieni się położenie pręcika, a więc i wartość działającej siły. Przypisując to działanie mieszczącym się na kuleczkach nabojom elektrycznym, albo — jak się również mówi — masom elektrycznym, nie mamy możności oprzeć sądu o wielkościach tych nabołów na niczem innem, jak na obserwowanych działaniach; to też przyjmujemy, że *działania te są proporcjonalne do mas elektrycznych*. Dochodzimy więc do t. zw. prawa Coulomba, które sformułować możemy w sposób następujący. *Wyobraźmy sobie, że dwa naboje e_1 i e_2 skupione są w dwu punktach, mieszczących się w odległości r jeden od drugiego; wówczas siła, działająca między obu nabojami, skierowana jest według prostej, łączącej te punkty, wielkość zaś tej siły jest wprost proporcjonalna do danych nabołów elektrycznych e_1 i e_2 i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości r .*

*) Nie wiemy jeszcze, jak są rozmieszczone naboje na kuleczkach; zakładamy; co zresztą daje się uzasadnić, że działanie nabołów jest takie, jakgdyby były one skupione w środkach obu kulek.

***) Niżej poznamy bezporównania ściślejszy dowód tego twierdzenia; nieuniknione błędy doświadczeń z wagą Coulomba pozwalają raczej odgadnąć tę ważną zależność, aniżeli jej dowieść.

Wartość rozważanej siły wyrazić możemy wzorem:

$$f = \pm k \frac{e_1 e_2}{r^2}, \dots \dots \dots (1)$$

w którym k stanowi współczynnik proporcjonalności, zaś znaki $+$ i $-$ odpowiadają: $+$ (plus) odpychaniu się (w liczniku mamy iloczyn wielkości o znaku jednakowym), $-$ (minus) przyciąganiu się (w liczniku iloczyn wielkości o znakach różnych).

We wzorze (1) f mierzy się, jak zawsze, w dynach, r w centymetrach, natomiast nie określiliśmy jeszcze jednostki, w której mierzyć się mają naboje elektryczne e_1 i e_2 . Postępując w sposób już nam znany (porów. ustalanie jednostek siły w ust. 47, pracy w ust. 63), określić możemy tę jednostkę tak, by uczynić współczynnik $k = 1$. W tym celu wystarczy przyjąć, iż *nabój elektryczny, równy jednostce, na inny nabój równy jednostce, umieszczony w odległości jednego centymetra, działa siłą równą jednej dynie*. Wtedy wzór (1) daje liczbowo

$$1 = k \frac{1 \cdot 1}{1}$$

t. j. współczynnik k staje się $= 1$.

Przy takim określeniu jednostki naboju elektrycznego zamiast wyrażenia (1) na siłę, działającą między dwoma nabojami e_1 i e_2 , mieszczącymi się w odległości r jeden od drugiego, będziemy mieli inne, a mianowicie:

$$f = \pm \frac{e_1 e_2}{r^2} \dots \dots \dots (2)$$

Musimy podkreślić, iż nie wzięliśmy tu pod uwagę własności ośrodka, przedzielającego oba naboje. Tymczasem, jak już wiemy, siła, działająca między dwoma danymi nabojami, mieszczącymi się w danej od siebie odległości, zależna jest od przedzielającego je ośrodka; inna będzie, jeżeli naboje przedzielone są powietrzem, inna, jeżeli parafiną, naftą i t. p. Narazie nie będziemy się na tem, zatrzymywali, zaznaczając jedynie, iż wzór powyższy jest ścisły tylko dla próżni, t. j. dla przypadku, gdy między rozważanymi nabojami niema żadnego ośrodka materialnego. Wzór ten jest *prawie* ścisły dla powietrza, w którym zazwyczaj odbywają się nasze doświadczenia.

Zastanówmy się jeszcze nad tem, jaki jest wymiar tej nowej jednostki, którą tu wprowadzamy. Oznaczając ten nieznanym tymczasem wymiar przez x , otrzymamy ze wzoru (2)

$$1 \text{ dyna} = 1 \frac{x^2}{\text{cm}^2}$$

albo
$$1 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{sek}^2} = 1 \frac{x^2}{\text{cm}^2}$$

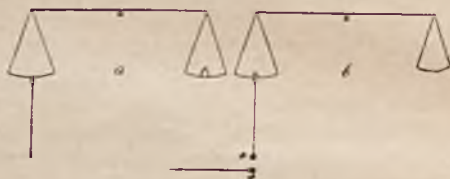
skąd
$$x^2 = \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}^3}{\text{sek}^2}$$

i ostatecznie

$$x = \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}} \dots \dots \dots (3).$$

Jak widzimy, do mierzenia nabołów elektrycznych służy jednostka, która, jak inne, jest pochodną 3-ech jednostek zasadniczych *cm*, *gr*, *sek*; po raz pierwszy tylko spotykamy tu potęgę ułamkowe.

Jest rzeczą bardzo ważną zrozumienie, iż pomiar naboju elektrycznego daje się istotnie dokonać praktycznie i wyrazić w tych oto jednostkach. Zatrzymajmy się jeszcze w tym celu na następującym przykładzie. Przypuśćmy, iż u jednej szalki czułej wagi (rys. 637) zawieszony jest pręcik z szellaku (dobry względnie izolator), na którego końcu mieści się kuleczka metalowa; na drugiej szalce leżą odważniki, równoważące pręcik z kuleczką. Elektryzujemy drugą tej samej wielkości kulkę, osadzoną na izolującej rękojeści, i dotykamy nią kuleczki



Rys. 637

zawieszonej. Nabój dzieli się pomiędzy obie kuleczki na równe części, skoro kuleczki są równe (założenie takie jest, jak się przekonamy z dalszego, najzupełniej słuszne) i, jeżeli następnie umieścimy jedną kulkę pod drugą na linii pionowej, to skutkiem zachodzącego odpychania się nabołów jednoimiennych nastąpi zakłócenie równowagi belki wagi; na szalce, pod którą wisi kulka, trzeba będzie położyć odważniki o pewnej masie *m* dla doprowadzenia belki wagi do pierwotnego położenia równowagi. Jeżeli w danym miejscu przyśpieszenie grawitacyjne jest *g*, wówczas siła ciężkości *mg* równoważy działanie między nabojami; jeżeli zaś za odległość między nabojami przyjmiemy odległość *r* między środkami kulek, nieznaną zaś nabój na każdej z kulek oznaczmy przez *x*, będziemy mieli:

$$mg = \frac{x^2}{r^2}.$$

Przypuśćmy, iż $m = 0,004 \text{ gr}$, $g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$, $r = 5 \text{ cm}$;

wówczas $0,004 \cdot 981 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{sek}^2} = \frac{x^2}{25 \text{ cm}^2}$, skąd

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{0,004 \cdot 981 \cdot 25 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}^3}{\text{sek}^2}} = \sqrt{98,1} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}} = \\ &= 9,9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}. \end{aligned}$$

Otrzymujemy więc w danym razie, iż każdy z nabojów wynosi prawie 10 ustalonych przez nas jednostek. Prawda, pomiar ten jest trudny; podczas ważenia kuleczki tracą stopniowo swoje naboje, nie mamy bowiem doskonałej izolacji; chodzi wszakże w tym przykładzie o to, by zrozumieć, iż naboje, bądź co bądź, *dają się mierzyć* oraz że do ich mierzenia służyć może jednostka, wyrażona przez wzór (3).

Ustalając jako jednostkę długości centymetr, nie wykluczamy posługiwania się ze względów praktycznych większymi lub mniejszymi jednostkami, stanowiącymi wielokrotności lub ułamki centymetra; tak np. odległości między miastami wyrażamy w kilometrach, a nie w centymetrach. Ustalona przed chwilą jednostka naboju elektrycznego, zwana *jednostką elektrostatyczną* *), jest dla celów technicznych zbyt mała; to też przyjęto jako *jednostkę praktyczną* inną wielkość naboju, której określenie poznamy później. Jednostka ta nazywa się kulombem ku uczczeniu nazwiska Coulomba. Nabój, równy jednemu kulombowi, jest $3 \cdot 10^9$ razy większy od naboju, równego jednostce elektrostatycznej, czyli

$$\text{kulomb} = 3 \cdot 10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}} \dots \dots \dots (4)$$

Nie należy wszakże sądzić, iż jednostka elektrostatyczna jest tak mała, że przypada na granicy dostrzegalności. Mamy sposoby dokładnego mierzenia nabojów, wynoszących bardzo małe części tej jednostki; jak o tem będzie mowa niżej, zdołano wymierzyć naboje, wynoszące zaledwie $4,7 \cdot 10^{-10} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$.

279. Elektryzowanie indukcyjne (indukcja elektrostatyczna).

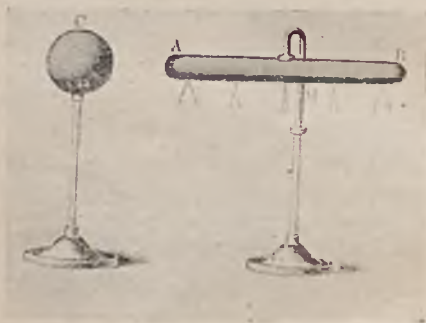
Gdy zbliżamy do elektroskopu, nie mającego naboju elektrycznego, ciało naelektryzowane, np. potarty jedwabiem pręt szklany, listki elektroskopu poczynają się rozchyłać i rozchylają się coraz bardziej w miarę zbliżania pręta. Jeżeli po zbliżeniu na pewną odległość oddalimy później pręt od elektroskopu, listki opadają stopniowo. Stwierdzamy więc obecność naboju elektrycznego na elektroskopie (listki rozchylają się), jakkolwiek elektroskopu nie dotykaliśmy i tą drogą naboju mu nie udzielaliśmy. Jednocześnie stwierdzamy, iż nabój, którego obecność elektroskop zdradza, w tym razie jest jakiś przemijający i znika, gdy oddalimy ciało, które, jak powiadamy, *elektryzuje indukcyjnie* elektroskop.

Elektryzowanie przez indukcję zachodzi nietylko wówczas, gdy elektroskop nie posiada wcale naboju, ale i wówczas, gdy jest on na-

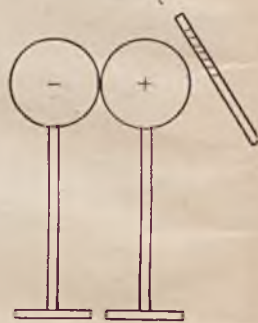
*) Elektrostatyką nazywa się ta część nauki o elektryczności, która rozważa naboje elektryczne, pozostające w spoczynku, albo — można inaczej powiedzieć — w równowadze; zapożyczamy ten termin z mechaniki (statyką nazywa się dział mechaniki, rozważający przypadki równowagi sił).

ładowany. Jeżeli np. elektroskop posiada nabój dodatni i listki jego w pewnej mierze są rozchylone, wówczas przy zbliżaniu doń pręta szklanego, potartego jedwabiem, a więc mającego nabój dodatni czyli tego samego znaku co nabój na elektroskopie, listki jego rozchylają się jeszcze bardziej, lecz opadają do pierwotnego położenia, gdy pręt oddalamy. Przeciwnie, gdy do tegoż elektroskopu naelektryzowanego dodatnio, zbliżamy pręt ebonitowy, naelektryzowany ujemnie, listki opadają, następnie zaś rozchylają się znowu do pierwotnego położenia, gdy pręt oddalamy *).

Jak widzimy, elektroskop, mający nabój znanego nam znaku, może nie tylko służyć do stwierdzania, czy dane jakieś ciało posiada nabój elektryczny, lecz pozwala rozpoznać także znak tego naboju. Wystarczy spamiętać, że nabój tegoż znaku co na elektroskopie warunkuje dalsze rozchylanie się listków, nabój znaku przeciwnego — opadanie.



Rys. 638.



Rys. 639.

Za chwilę zrobimy z tej nowej wiadomości poważny użytek.

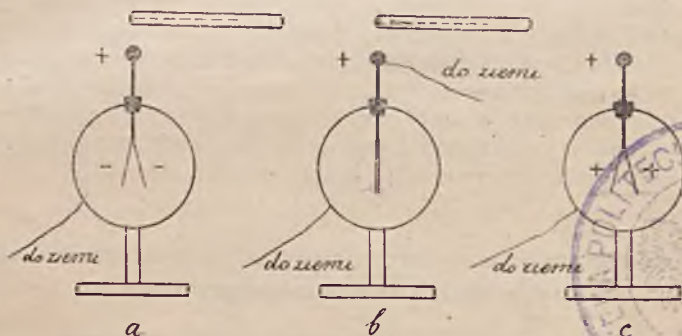
Umieścimy w kilku miejscach izolowanego metalowego walca, jak to wskazuje rys. 638, najprostsze elektroskopy, z których każdy składa się z dwu kuleczek z rdzenia bżowego, zawieszonych na druciku przy pomocy nitki bawełnianej; gdy zbliżamy do jednego końca walca ciało naelektryzowane, elektroskopy na końcach walca rozchylem swem wykazują obecność naboju elektrycznych, w mniejszym stopniu czynią to samo elektroskopy, bliżej środka walca położone, natomiast elektroskop środkowy niemal wcale nie daje wychylenia. Po usunięciu ciała naelektryzowanego wszystkie kuleczki opadają, co świadczy o zniknięciu wzbudzonych przez to ciało naboju.

W celu bliższego poznania zjawiska elektryzowania indukcyjnego wykonywamy doświadczenie następujące. Bierzemy dwie jednakowe kule metalowe na izolujących nóżkach, a po sprawdzeniu, że żadna

*) Należy powoli zbliżać pręty do elektroskopu; zdarza się, iż listki opadają, a przy dalszym zbliżaniu się pręta znowu się rozchylają. Przy prędkim zbliżaniu można nie dostrzec tego szczegółu i wyciągnąć błędne wnioski; przypadek ten rozważymy później.

z nich naboju nie posiada (co na podstawie poprzedniego umiemy uczynić), stawiamy jedną obok drugiej tak, aby się stykały i stanowiły jakgdyby jeden przewodnik (rys. 639); teraz zbliżamy z jednej strony, jak to właśnie mamy na rysunku, pręt naelektryzowany np. ebonitowy z nabojem ujemnym, ale prętem tym nie dotykamy kuli. Na podstawie przytoczonych przed chwilą doświadczeń z elektroskopem, możemy oczekiwać, że i tu nastąpi elektryzowanie indukcyjne. Można zresztą przekonać się o tem, umieszczając na obu kulach takie proste elektroskopy, jakie były na walecu w doświadczeniu poprzednim.

Wszakże, gdybyśmy, nie dotykając prętem kul, oddalili pręt i znowu zbadali czy na kulach są naboje, nie wykrylibyśmy ich. Jeżeli jednak, podczas gdy pręt trzymamy w pobliżu tak, jak to właśnie przedstawia rys. 639, odsuwamy jedną kulę od drugiej, a następnie po usunięciu pręta, który stał się już niepotrzebnym, zbliżamy każdą z kul oddzielnie do elektroskopu, mającego już nabój określonego znaku, np. dodatki, stwierdzamy, iż na kuli, która była bliżej pręta ebonito-



Rys. 640.

wego, mieści się nabój dodatni, na drugiej zaś kuli nabój ujemny. Na tem nie koniec, dotknijmy znowu jedną kulę drugiej (biorąc je oczywiście nie inaczej niż za izolujące podstawki) i zbadajmy raz jeszcze — okazuje się, że teraz kule naboju nie wykazują.

Doświadczenie to pozwala nam wnosić, że przy elektryzowaniu indukcyjnym w przewodniku powstają naboje obu znaków, przytem ilościowo równe, skoro po usunięciu czynnika, wzbudzającego elektryzację, nabój przewodnika okazuje się równym zeru; przytem w części przewodnika, zbliżonej do ciała naelektryzowanego, wywołującego tę indukcję, zjawia się nabój znaku przeciwnego niż na tem ciele, w części dalej położonej — znaku tego samego.

Zbliżając ciało naelektryzowane do przewodnika uziemionego, elektryzujemy go indukcyjnie: powstaje na nim nabój znaku przeciwnego niż ten, który się mieści na ciele wzbudzającym; nabój znaku tego samego zjawia się wówczas na ziemi, która w połączeniu z danym przewodnikiem tworzy jedną całość.

Zbliżmy do główki nienaładowanego elektroskopu na odległość kilku centymetrów naelektryzowany ujemnie pręt ebonitowy: listki elektroskopu rozchylą się; nie zmieniając położenia pręta, dotknijmy kuleczki elektroskopu ręką, przez co ją uziemimy, a natychmiast listki opadną; usuńmy teraz rękę od kuleczki elektroskopu, a następnie oddalmy pręt; listki elektroskopu znowu się rozchylą i pozostaną rozchylonemi. W ten sposób udzielamy naboju elektroskopowi, nie dotykając go ciałem naelektryzowanym, a jedynie posługując się indukcją elektrostatyczną. Łatwo możemy się przekonać, zużytkowując poznane w tym ustępie fakty, że ładując elektroskop indukcyjnie, udzielamy mu naboju nie tego samego znaku, co nabój na ciele wzbudzającym, ale znaku przeciwnego. Rys. 640 wyjaśnia schematycznie zachodzący tu proces.

Przyciąganie przez ciała naelektryzowane ciał nienaelektryzowanych (skrawków papieru, kuleczki z rdzenia bżowego) poprzedza indukcyjne elektryzowanie tych ciał. Np. gdy zbliżamy do kuleczki wahadełka elektrycznego potarty sukmem pręt ebonitowy (—), na części kuleczki, bliżej pręta położonej, powstaje przez indukcję nabój dodatni, na części dalszej — ujemny; działanie różnoimiennych nabojów jako bliżej siebie położonych przeważa, stąd obserwowane przyciąganie; gdy laską dotkniemy kuleczki, jej nabój dodatni zostaje całkowicie lub częściowo zobojętniony przez nabój ujemny, zaczerpnięty z laski w miejscach jej zetknięcia z kuleczką; pozostały na kuleczce nabój ujemny warunkuje obserwowane wtedy odpychanie.

280. Istnienie naboju stwierdzamy tylko na powierzchni, ale nie wewnątrz naelektryzowanego przewodnika.

Naelektryzujmy metalową kulę wydrążoną, osadzoną na izolującej podstawie, jak na rys. 641 *). Małą, nie mającą żadnego naboju, kuleczką metalową albo z rdzenia bżowego, przytwierdzoną do izolującej rękojeści, którą ujmujemy ręką, dotykamy któregośkolwiek miejsca powierzchni kuli naelektryzowanej. Zbliżając tę kuleczkę do elektroskopu, przekonywamy się, iż mieści się na niej pewien nabój. Po wyładowaniu tej t. zwanej *kuleczki próbnej* przez uziemienie, powtarzamy doświadczenie, dotykając innego miejsca powierzchni kuli naelektryzowanej; stwierdzamy znowu, iż kuleczka otrzymała pewien nabój elektryczny. Jeżeli jednak po uprzednim wyładowaniu kuleczki próbnej dotkniemy nią kuli naelektryzowanej od wewnątrz, zanurzając ją w wydrążeniu tej kuli, przekonamy się, iż tam kuleczka naboju nie otrzymuje. Powiadamy tedy że nabój, który dany przewodnik posiada, mieści się na jego powierzchni zewnętrznej; nie stwierdzamy go natomiast wewnątrz tego przewodnika.

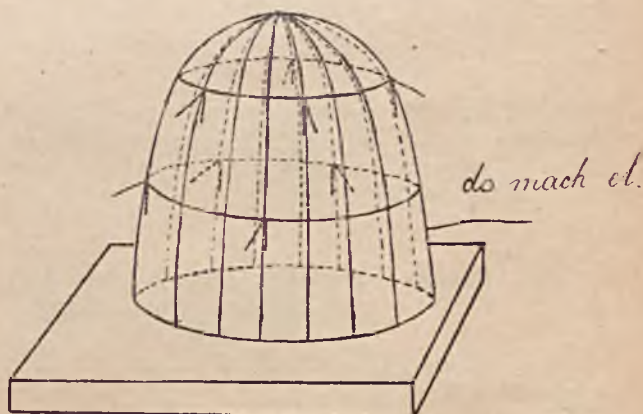
*) Do elektryzowania w tem doświadczeniu, jak w innych, posługiwać się możemy machiną elektrostatyczną, której działanie objaśnimy później; na tak zwanych biegunach takiej machiny otrzymujemy w dowolnej ilości zarówno dodatnie jak ujemne naboje elektryczne (p. niżej rys. 697).

Ciekawy ten fakt ustalić możemy jeszcze w inny sposób, posługując się jako przewodnikiem siatką metalową, z której zrobimy klosz, jak na rys. 642. Wewnątrz i zewnątrz zawieszamy na tym kloszu u jego ścian skrawki papieru, które mają odgrywać rolę wahadełek elektrycznych. Ustawiając klosz na izolującej podstawie (np. na kawałku parafiny) i elektryzując go, spostrzegamy, iż wahadełka, znajdujące się nazewnątrz, odchylają się, zdradzając tem obecność na nich nabożów jednoimiennych z nabożem na kloszu; natomiast wahadełka, znajdujące się wewnątrz klosza, zwisają jak przed naelektryzowaniem, wykazując tem brak naboju na stronie wewnętrznej naelektryzowanego klosza.

Siatkę metalową, osadzoną na izolujących prętach (rys. 643), można zwiąć tak, by to jedna, to druga jej strona stawała się zewnątrz-



Rys. 641.

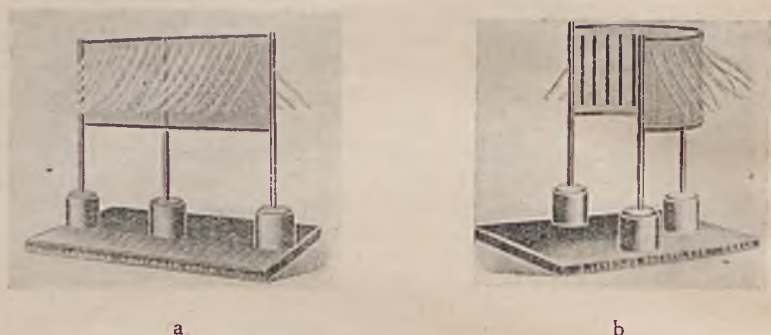


Rys. 642.

ną. Jeżeli zaopatrzymy siatkę z obu stron w wahadełka (zawieszone paski papierowe) i naelektryzujemy, to podczas gdy będzie niezwinęta, z obu stron wahadełka będą się jednakowo odchylały; natomiast gdy ją zwiniemy czy to w jedną, czy w drugą stronę, wychyła się za każdym razem tylko wahadełka, przypadające nazewnątrz, wewnętrzne zaś będą zwisały, nie zdradzając obecności naboju.

Jeżeli naelektryzowaną w jakikolwiek sposób kulką próbną dotknemy powierzchni zewnętrznej metalowej kuli z wydrążeniem jak na rys. 641, osadzonej na izolującej nóżce i nie posiadającej naboju elektrycznego, zostanie ona tą drogą naelektryzowana; przekonać się możemy, że większą część naboju, który się mieścił na kuleczce, posiada teraz kula; wszakże i kuleczka zachowa pewną część pierwotnego naboju (tem mniejszą — jak to dalej uzasadnimy — im mniejszą jest

kuleczka w porównaniu z kulą). Jeżeli jednak powtórzmy doświadczenie od początku w ten tylko sposób, iż kuleczką dotkniemy kuli nie od zewnątrz, lecz od wewnątrz, wkładając ją przez otwór do środka, kula otrzyma całkowity nabój, który mieścił się na kuleczce, ta zaś po wyjęciu i odpowiedniej próbie z najbardziej czułym elektroskopem



Rys. 643.

okaże się zupełnie pozbawiona naboju. W chwili dotknięcia kuleczki i kuli oba te ciała tworzą jeden przewodnik, na którego zewnętrznej powierzchni rozmieszcza się nabój kuleczki, tworzącej teraz część wewnętrzną tej całości.

281. Puszka Faraday'a. Powstawanie jednoczesne naboju dodatnich i ujemnych.

Fakty, podane wyżej, ująć możemy raz jeszcze i to ściślej za pomocą następujących doświadczeń z t. zw. puszką Faraday'a *). Jest to izolowana i połączona z elektroskopem puszka blaszana (rys. 644), do której wnętrza wprowadzić możemy ciało naelektryzowane; elektroskop zaopatrujemy w skalę, aby móc dokładniej obserwować stopień odchylenia pręcika ruchomego.

Przypuśćmy, iż puszka nie posiada wcale naboju elektrycznego, o czym świadczy nieodchylony pręcik elektroskopu. Do środka puszeki wprowadzić można zawieszoną na nitce jedwabnej kulkę metalową; możemy nitkę przewleć przez niewielki otwór przykrywy metalowej (D na rysunku), zaopatrzonej w izolującą rękojesć, i tą przykrywą zamknąć puszkę **). Przypuśćmy, iż kula naelektryzowana jest dodat-

*) Michał Faraday (1791—1867) znakomity fizyk angielski, genialny samouk, który z czeladnika introligatorskiego stał się wszechświatowej sławy uczonym. Zawdzięczamy jemu cały szereg odkryć, które posłużyły za podstawę do rozkwitu współczesnej nauki o zjawiskach elektrycznych.

***) Jeżeli pole otworu jest małe w porównaniu z powierzchnią puszeki, można przyjąć, że kula jest całkowicie osłonięta puszką; aby osiągnąć pod tym względem większą ścisłość, należałoby jeszcze ten otwór metalicznie zastonić.

nio i dotykamy nią któregośkolwiek miejsca wewnętrznej powierzchni puszkki. Puszka otrzymuje, jak już wiemy, cały nabój kuleczki (połączony z puszką elektroskop daje pewne wychylenie), kuleczka zaś po wyjęciu z puszkki okazuje się zupełnie nienaektryzowaną, co pokazać nam może inny elektroskop.

Naelektryzujmy ponownie kuleczkę dodatnio i dotknijmy nią, jak przed chwilą, wewnętrznej powierzchni puszkki. Kuleczka znowu straci cały swój nabój, pręcik zaś elektroskopu odchylił się jeszcze bardziej. Możemy to powtórzyć kilkakrotnie i za każdym razem stwierdzimy, że pręcik elektroskopu odchyła się coraz bardziej — wnosimy, że nabój puszkki rośnie, że do istniejącego początkowo naboju za każdym razem dodaje się nowy. Jeżeli jednak następnie elektryzujemy kulecz-



Rys. 644.

kę ujemnie, to po dotknięciu nią, jak wyżej, puszkki od wewnątrz pręcik elektroskopu opada cokolwiek — dodaniem naboju ujemnego zmniejszamy nabój dodatni puszkki. Jak już na to zwracaliśmy wyżej uwagę, naboje dodatnie i ujemne traktować możemy jako wielkości algebraiczne dodatnie i ujemne: dodanie wielkości ujemnej równa się odjęciu wielkości dodatniej. Gdybyśmy po szeregu czynności opisanych, wprowadzając do puszkki naboje to dodatnie, to ujemne, otrzymali wkońcu puszkę zupełnie pozbawioną naboju (pręcik elektroskopu byłby zupełnie nieodchylony), powiedzielibyśmy, iż stać się tak mogło przez udzielenie puszcze naboju dodatnich i ujemnych równej wielkości.

Robimy teraz inne doświadczenie, rozpoczynając od tego, że puszkka i połączony z nią elektroskop są całkowicie wyładowane. Umieszczamy w puszcze tę samą kulkę izolowaną (zawieszoną na nitce jedwabnej), naelektryzowaną dodatnio, tak, by nie dotykała ścian,

i stwierdzamy odchylenie się pręcika elektroskopu, przyczem ładuje się on dodatnio *). Po wyjęciu kuli z puszkii pręcik elektroskopu opada — puszka i elektroskop były naelektryzowane indukeyjnie: na wewnętrznej stronie puszki (bliżej kuli) powstał nabój ujemny, na zewnętrznej i na połączonym z nią elektroskopie — dodatni; powiadamy, że naboje wzbudzone były równe, skoro po usunięciu ciała, wzbudzającego je, dały w sumie nabój równy zeru.

Po ponownem wpuszczeniu do puszki kuli, naelektryzowanej dodatnio, tak, by nie dotykała ścian, łączymy na chwile puskę z ziemią. Pręcik elektroskopu opada — wzbudzony nabój dodatni udziela się teraz ziemi. Usuńmy kulę z puszki — pręcik elektroskopu odchyła się znowu, ale tym razem nabój elektroskopu okazuje się ujemny. Tu nabój ujemny, wzbudzony przez dodatni nabój kuli na wewnętrznej stronie puszki i utrzymywany przezeń na tej stronie, po wyjęciu kuli rozmieszcza się swobodnie na powierzchni zewnętrznej puszki i częściowo przechodzi na elektroskop. Niech czytelnik porówna to doświadczenie z opisanem wyżej (rys. 610).

Jeżeli po wprowadzeniu do puszki kuli naelektryzowanej dodatnio dotykamy nią puszki od wewnątrz, jak to czyniliśmy w pierwszym doświadczeniu, pręcik elektroskopu odchyła się tak samo, jak wówczas, gdy kula już znajdowała się wewnątrz puszki, ale jej nie dotykała; po usunięciu kuli, która się okazuje zupełnie pozbawioną naboju, pręcik elektroskopu pozostaje w dalszym ciągu tak samo odchylony. Fakt ten objaśniamy tak, iż naboje wzbudzone na puszcze były nie tylko sobie równe, ale równe też naboju kuli — dodatni nabój kuli wraz z ujemnym nabojem, który został wzbudzony na osłaniającej ją ze wszech stron puszcze, dały w sumie po dotknięciu kuli i puszki nabój = zeru; nabój wzbudzony dodatni, który się rozmieścił na powierzchni zewnętrznej puszki i elektroskopie, nie uległ przytem żadnej zmianie i *puszka pozostała naelektryzowana dodatnio*. Jeżeli puszka jest naładowana i pręcik połączony z nią elektroskopu odchylony, wprowadzenie do puszki ciała naelektryzowanego zmienia odchylenie pręcika; według tego, czy odchylenie to staje się większe czy mniejsze, sądzić możemy, czy wprowadzony nowy nabój jest jednoimienny czy różnoimienny z nabojem puszki. Wprowadzenie do puszki ciała nie-naelektryzowanego nie zmienia oczywiście odchylenia pręcika elektroskopu. Podkreślamy z naciskiem, iż przez dotykanie przewodnikiem naelektryzowanym wewnętrznej, otaczającej go dookoła osłony metalowej pozbawiamy go *całkowicie* znajdującego się na nim naboju.

Wróćmy teraz do doświadczeń z nabojami, otrzymanymi przez tarcie. Pocierając pręt szklany kawałkiem jedwabiu **) i zbliżając te ciała razem do elektroskopu, posiadającego nabój określonego znaku,

*) Czytelnik powinien pamiętać z poprzedniego, jak można się przekonać, czy istotnie elektroskop ładuje się dodatnio.

**) Przed pocieraniem na ciałach tych nie powinno być naboju, pozostałych po poprzednich doświadczeniach. Wyżej podaliśmy sposób wyładowania ich lub, jak się jeszcze mówi, rozbrojenia ich przy pomocy płomienia.

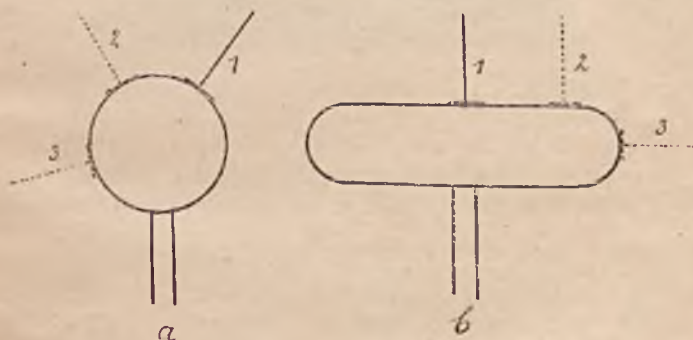
nie spostrzegamy żadnego działania, podczas gdy zbliżanie oddzielnie pręta i jedwabiu wykazuje, iż na pręcie powstał przytem nabój dodatni, na jedwabiu — ujemny. Powtórzenie tego doświadczenia przy pomocy puszki Faraday'a odpowiednio do tego przystosowanej, aby można było w niej oba te ciała zanurzyć, wykazuje w sposób bardziej jeszcze przekonywający, że na ciałach pocieranych powstają jednocześnie naboje obu znaków, a co więcej — że naboje te są równe co do wielkości *).

Powtarzając takie pomiary czy to przy elektryzowaniu ciał przez tarcie czy indukcyjnie, dochodzimy do bardzo ważnego wniosku, a mianowicie, że *ilekroć powstaje określony nabój elektryczny, zawsze towarzyszy temu powstanie równej wielkości naboju znaku przeciwnego*.

W przypadku pocierania ciał naboje te zjawiają się na obu ciałach, przy elektryzowaniu przez indukcję — na jednym i tym samym przewodniku, względnie na kilku, połączonych ze sobą i tworzących w ten sposób pewną całość (np. przewodnik uziemiony).

282. Rozmieszczenie naboju elektrycznego na przewodniku.

Przykładamy niewielki krążek metalowy **), osadzony na izolującym trzonku, do powierzchni izolowanego naelektryzowanego przewodnika w którymkolwiek miejscu tej powierzchni — rys. 645. Krążek



Rys. 645.

żek tworzy wtedy wraz z tym przewodnikiem jedną całość i w tem miejscu na jego powierzchnię przechodzi ten nabój, który uprzednio znajdował się na powierzchni przykrytej przez krążek. Odejmując

*) Można pocierać niewielką płytkę szklaną, osadzoną na szklanej rękojeści niewielkim kawałkiem jedwabiu przytwierdzonym na drugiej podobnej rękojeści; potem zanurzamy w puszcze czy to płytkę czy jedwab, czy też jedno i drugie.

**) W braku krążka może odgrywać taką samą rolę — jakkolwiek to będzie mniej dokładne — niewielka kuleczka.

krążek od przewodnika i unosząc go w kierunku prostopadłym do powierzchni, której dotykał, unosimy wraz z nim mieszczący się na nim nabój, który następnie poddać możemy badaniu czy to przy pomocy samego tylko elektroskopu, czy też—co lepsze—przy pomocy puszki Faraday'a, połączonej z elektroskopem. Dotykając np. w różnych miejscach takim krążkiem izolowanej, naelektryzowanej, pozostającej zdala od innych przewodników kuli metalowej (rys. 645a), przekonujemy się, że nabój rozmieszczony jest na powierzchni kuli jednostajnie. Dość po dotknięciu krążkiem tego czy innego miejsca kuli zanurzyć krążek do puszki Faraday'a, połączonej z elektroskopem; za



Rys. 646.

każdym razem listki elektroskopu rozchylają się jednakowo *). Możemy wynik tego badania wyrazić w ten sposób, że *gęstość elektryczna*, t. j. stosunek $\frac{e}{s}$, naboju do powierzchni, na której się znajduje, jest jednakowy w różnych miejscach powierzchni.

Inny wynik otrzymamy, badając we wskazanym sposobie gęstość elektryczną na izolowanym metalowym przewodniku cylindrycznym (rys. 645b). Tu gęstość okazuje się większą zarówno skutkiem braku izolacji, jak skutkiem tego, że odbieramy jej wciąż potrochu elektryczności. Niżej dowiemy się, że jest sposób uniknięcia tej trudności w doświadczeniu, że elektryzację kuli możemy wciąż podtrzymywać, ściśle uzupełniając ponoszone straty naboju.

*) Trzeba uwzględnić, iż przy większym szeregu takich prób daje się zauważyć coraz mniejsze rozchylanie się listków; to się tłumaczy tem, iż przecie nabój kuli stopniowo się zmniejsza zarówno skutkiem braku izolacji, jak skutkiem tego, że odbieramy jej wciąż potrochu elektryczności. Niżej dowiemy się, że jest sposób uniknięcia tej trudności w doświadczeniu, że elektryzację kuli możemy wciąż podtrzymywać, ściśle uzupełniając ponoszone straty naboju.

nika jest tem większa, im większa jest krzywizna powierzchni w danem miejscu.

Końce ostrzy można uważać za miejsca o bardzo wielkiej krzywiznie; tem się tłumaczą pewne własności ostrzy. Przewodnik zaopatrzony w kołec metalowy wzgl. kolce (rys. 646), nawet osadzony na możliwie najlepiej izolującej podstawie, wyładowuje się niemal natychmiast po naelektryzowaniu, co wykazuje połączony z przewodnikiem elektroskop; skutkiem wielkiej gęstości naboju na ostrzach elektryzują się dokoła nich cząstki powietrza, które następnie, odpychając się i oddalając, unoszą ze sobą naboje.

Tak zwany młynek Franklina, osadzony na ostrzu, na którym może się kręcić (rys. 647), a składający się z kilku prętów zaostzonych na końcach i odgiętych w jedną stronę, jak to widać na rysunku, po naelektryzowaniu *) zaczyna się natychmiast obracać jak młynek Segnera, zdradzając tem, iż u jego ostrzy tworzy się prąd powietrza, od-



Rys. 647.



Rys. 648.

powiadający swym kierunkiem wypływowi cieczy lub gazu w młynku Segnera.

Ów powstający w ten sposób „wiatr elektryczny“ wykazać można z łatwością, zbliżając ostrze naelektryzowanego przewodnika do płomienia świecy (rys. 648) — płomień odchyła się, a nawet może być zupełnie zgaszony.

Badając krążkiem próbnym powierzchnię izolowanego przewodnika, naelektryzowanego indukcyjnie, stwierdzamy, że istotnie na części jego, zbliżonej do ciała wzbudzającego elektryzację, mieści się nabój znaku przeciwnego, niż na ciele wzbudzającym, przytem gęstość naboju wzbudzonego jest tem większa, im bliżej dane miejsce znajduje się ciała wzbudzającego. Przeciwnie na częściach dalszych mieści się nabój tegoż znaku co na ciele wzbudzającym i o tem większej gęstości,

*) Łączymy w tym celu przewodnik, na którym się opiera młynek z biegunem maszyny elektrostatycznej (rys. 697).

im dane miejsce położone jest dalej. Części powierzchni przewodnika, naelektryzowanego indukcyjnie, mające naboje obu znaków, przedzielone są *pasem obojętnym*, nie mającym wcale naboju (p. rys. 638): krążek próbny po dotknięciu tego czy innego miejsca na pasie obojętnym nie wykazuje naboju. Natomiast przewodnik metalowy, połączony z ziemią i poddany elektryzowaniu indukcyjnemu, gdy w pobliżu niego trzymamy ciało naelektryzowane, wykazuje tylko nabój znaku przeciwnego niż nabój ciała wzbudzającego.

Krążek próbny pozwala nam również przekonać się, iż na powierzchni zewnętrznej puszkii Faradaya, gdy do niej zanurzamy ciała naelektryzowane, zjawia się nabój tegoż znaku, natomiast na powierzchni wewnętrznej — znaku przeciwnego; że następnie, jeżeli to ciało wewnątrz puszkii przesuwamy (byle tylko nie dotykało puszkii), gęstość elektryczna na stronie wewnętrznej ulega zmianie, nie ulega zaś jej na stronie zewnętrznej; że wreszcie, gdy ciałem tem dotknijemy puszkii, na jej wewnętrznej stronie nie pozostaje najmniejszego śladu elektryzacji, na zewnętrznej natomiast nabój pozostaje taki sam i tak samo rozmieszczony jak był, gdy naelektryzowane ciało zostało wpuszczone do puszkii i ścian jej nie dotykało.

283. Jak sobie wyobrażamy mechanizm elektryzowania się ciał.

Jakkolwiek pierwsza znajomość zjawisk elektrycznych (własności bursztynu) sięga czasów starożytnych, to jednak dopiero od początku wieku XVII zaczęło się kształtowanie nauki o elektryczności, zapoczątkowane przez słynnego uczonego angielskiego Gilberta *) w jego epokowym dziele, wydanem w r. 1600. W połowie wieku XVIII Benjamin Franklin **) podał pierwszą próbę teorii zjawisk elektrycznych. Założył on mianowicie, że elektryczność jest płynem nieważkim, którego cząsteczki odpychają się nawzajem, natomiast przyciągane są przez cząsteczki materji. Wszystkie ciała zawierają pewną ilość tego fluidu, gdy są w stanie obojętnym; nadmiar względem tej jakgdyby normalnej ilości owego płynu w ciele warunkuje elektryzację dodatnią ciała; zmniejszenie tej normalnej ilości — elektryzację ujemną. Niedługo potem Symmer podał inny obraz elektryzowania się ciał, stwarzając teorię t. zw. dualistyczną, opartą na założeniu, iż istnieją dwa rodzaje nieważkiego płynu elektrycznego: dodatni i ujemny. Obecność w ciele obu tych płynów w równej ilości daje stan t. zw. obojętny ciała; nadmiar płynu dodatniego, wzgl. ujemnego daje elektryzację dodatnią, wzgl. ujemną.

*) William Gilbert (1540—1603), słynny lekarz i uczonego angielski. Jego dzieło „O magnesie, ciałach magnetycznych i magnetyzmie ziemskim“, które się ukazało w r. 1600, było dziełem epokowym, zapoczątkowało bowiem istotną naukę o elektryczności i magnetyzmie.

**) Benjamin Franklin (1706—1790), znakomity uczonego, publicysta i polityk, współpracownik Washingtona w wielkiem dziele uniezależnienia się Stanów Zjednoczonych Ameryki Półn. Swą olbrzymią wiedzę zawdzięczał wyłącznie niemal samouctwu.

Współczesne wyobrażenia nasze o tej sprawie, oparte jednak, jak zobaczymy niżej, nie na spekulacji jedynie, ale na poważnych danych doświadczalnych, mają nieco wspólnego z obu dawniejszymi teorjami. U podstawy tych naszych wyobrażeń leżą dwa fakty: 1-o zapomocą odpowiednich doświadczeń, o których będziemy mówili potem, udało się nam otrzymać wolne, t. j. nie związane z t. zw. materją naboje elektryczne ujemne; 2-o udało się ustalić, że istnieją pewne *najmniejsze*, przytem zawsze sobie równe naboje, których wielokrotnościami są naboje inne większe. W ust. 278 przytoczyliśmy wielkość tego *elementarnego* naboju ($4,774 \cdot 10^{-10}$ jedn. el. st.), wyznaczanego dotychczas z dokładnością $\pm 0,004 \cdot 10^{-10}$ jedn. el. st. *). Ten nabój elementarny nazwano atomem elektrycznym albo *elektronem*. Otóż przypisujemy elektryczności strukturę atomistyczną, zakładając oczywiście istnienie zarówno atomów elektryczności dodatniej jak ujemnej. Wszakże dotychczas nie udało się otrzymać w doświadczeniu wolnych, t. j. nie związanych z tem, co nazywamy materją, atomów elektrycznych dodatnich, podczas gdy, jak już wspomnieliśmy przed chwilą, udało się to w stosunku do atomów elektrycznych ujemnych. Budowę materji wyobrażamy sobie w ten sposób, iż każde ciało posiada jakgdyby szkielet, utkany z nabojuw elektrycznych dodatnich, oraz pewną liczbę atomów elektrycznych ujemnych, których nabój całkowity równa się całkowitemu nabojuw dodatniemu (w przypadku t. zw. stanu obojętne-go ciała). Atomy elektryczne ujemne, czyli elektrony ujemne lub krótko elektrony **) posiadają w różnych ciałach większą lub mniejszą swobodę ruchów (ściślejszy obraz tych naszych wyobrażeń nakreśli-my potem), mogą nawet w pewnych określonych warunkach uchodzić z tych ciał, względnie przyplwać w zwiększonej liczbie. Nadmiar elektronów w stosunku do liczby, dorównywającej całym swym nabojem nabojuw dodatniemu ciała, stanowiącemu jakgdyby istotę jego materjalności, daje elektryzację ujemną ciała; zmniejszenie się tej liczby „normalnej“ dla danego ciała objawia się w elektryzacji dodatniej.

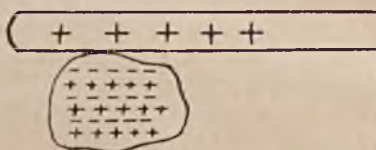
Jeśli zatem pocieramy jedwabiem szklany pręt, wyobrażamy sobie, że pewna liczba elektronów przechodzi z pręta na jedwab, skutkiem czego po potarciu szkło ma nabój dodatni, jedwab zaś równy mu nabój ujemny. Jeżeli dotykam ciałem naelektryzowanym dodatnio ciała nienaelektryzowanego, pewna liczba elektronów przechodzi z tego ciała obojętne-go na ciało naelektryzowane dodatnio, skutkiem czego nabój dodatni pierwszego ciała zmniejsza się, natomiast drugie ciało staje się również naelektryzowane dodatnio. W metalach, jak zakładamy, elektrony mogą się swobodnie przenosić z miejsca na miejsce. Gdy do przewodnika nienaelektryzowanego (rys. 638) zbliżamy ciało naelektryzowane dodatnio, elektrony przesuują się w stronę tego ciała, co

*) Dla ścisłości zauważmy, iż niektórzy fizycy podają, jakoby udaje się stwierdzić istnienie nabojuw jeszcze mniejszych; narazie nie można tego poglądu uważać za miarodajny.

**) Większość fizyków rozumie przez elektron nabój elementarny ujemny, jakkolwiek można — i tak też czynią niektórzy — mówić zarówno o elektronie dodatnim jak i ujemnym.

daje w tej części przewodnika wzbudzoną elektryzację ujemną, w dalej zaś położonych — elektryzację dodatnią; po usunięciu ciała, wzbudzającego tę elektryzację, przesunięte elektrony rozmieszczają się tak, jak były rozmieszczone uprzednio i przewodnik staje się znów „obojętny“. Gdy drutem łączę przewodnik, naelektryzowany ujemnie, z przewodnikiem nienaelektryzowanym, pewna liczba elektronów przechodzi przez drut z pierwszego ciała na drugie, przez co nabój ujemny pierwszego ciała się zmniejsza, drugie zaś elektryzuje się również ujemnie. Jeżeli zapomocą pręta metalowego albo drutu łączymy dwa przewodniki, z których jeden ma nabój dodatni, a drugi równy mu nabój ujemny, t. j. pierwszemu brakuje tyleż elektronów, ile drugi ma ich w nadmiarze, nadmiar ten po drucie przechodzi z drugiego ciała na pierwsze, skutkiem czego po takim połączeniu oba przewodniki stają się rozbrojone.

Podczas gdy elektronom w metalach przypisujemy taką swobodę ruchów, musimy co do złych przewodników (dielektryków) uczynić inne założenie, aby pozostać w zgodzie z doświadczeniem. Zakładamy mianowicie, że w dielektrykach mogą zachodzić niewielkie przesunię-



Rys. 649.

cia elektronów względem ich miejsc, że tak powiemy, normalnych. W ten sposób np. możemy sobie wyobrazić, że w przypadku, gdy do kawałka złego przewodnika zbliżamy ciało, naelektryzowane dodatnio, zachodzą w poszczególnych cząsteczkach izolatora przesunięcia elektronów w kierunku dodatnio naelektryzowanego ciała, skutkiem czego otrzymuje się stan rzeczy, z gruba przedstawiony na rys. 649, i tem daje się tłumaczyć obserwowane „przyciąganie“. Taki stan dielektryka, gdy zaszyły podobne niewielkie przesunięcia zawartych w nim elektronów w pewnym określonym kierunku, przyczem utworzyła się jakgdyby pewna prawidłowość, a mianowicie kierunkowość w jego strukturze, nazywamy jego *polaryzacją dielektryczną*.

Na tych kilku uwagach narazie poprzestaniemy, odkładając na potem bliższe omówienie naszych współczesnych wyobrażeń w tej dziedzinie. Chodzi nam tymczasem o podkreślenie pewnych głównych myśli, które staną się przydatne w dalszym wykładzie. Czytelnik zechce cierpliwie wyczekać momentu, gdy będzie mógł o tych rzeczach usłyszeć więcej. Dodajmy jeszcze tylko, że t. zw. obojętnego pod względem elektrycznym stanu ciał nie należy sobie wyobrażać, jako uwarunkowanego rozmieszczeniem naboju elementarnych, pozostających w zupełnym spoczynku. Jak zobaczymy potem, w obrębie poszczególnych

cząstek materialnych dopatrywać się musimy bardzo ożywionych, często skomplikowanych ruchów tych atomów elektrycznych; jeżeli mówimy tedy o przesunięciach elektronów, mamy na myśli przesunięcia względem pewnej normalnej sfery ich ruchów.

Ćwiczenia i zadania.

405. Pragniemy dowiedzieć się przy pomocy naelektryzowanego wahadełka elektrycznego, czy dane jakieś ciało jest naelektryzowane. Który z ewentualnych objawów prowadzi do pewniejszego wniosku: przyciąganie czy odpychanie?

406. Kulka z rdzenia bżowego zawieszona jest na nitce bawełnianej, przytwierdzonej do pręta szklanego. Kawał laku, polarty suknem, działa najpierw na kuleczkę odpychająco, z biegiem czasu wszakże działanie to słabnie, aż wreszcie stwierdzamy przyciąganie. W jaki sposób możemy to wytłumaczyć?

407. Czy można naelektryzować elektroskop, rozporządzając tylko kawałkiem futra?

408. Ładujemy elektroskop, aby później przy jego pomocy badać znak ładunku na innych ciałach. Przypadkiem udzieliliśmy elektroskopowi zbyt wielkiego naboju, listki jego są rozchyłone za bardzo i pragniemy to rozchylenie zmniejszyć, nie wyładowując wszakże zupełnie elektroskopu. Jak mamy to uczynić?

409. Cztery małe kuleczki, doskonale izolowane, posiadają naboje, wynoszące + 5 jednostek elektrostatycznych, + 10 jedn. el. st., + 5 jedn. el. st., — 5 jedn. el. st. i położone są tak, że ich środki przypadają odpowiednio w czterech wierzchołkach kwadratu o boku = 10 cm. W punkcie przecięcia się przekątnych kwadratu przypada środek piątej kuleczki z nabojem + 2 jedn. el. st. Znaleźć wartość siły, działającej na ten środkowy nabój.

410. Dwie małe kuleczki, których środki przypadają w odległości 40 cm., posiadają naboje + 50 jedn. el. st. i — 18 jedn. el. st. Gdzie należy umieścić trzeci nabój, aby wypadkowa działania nań obu pierwszych nabójów była równa zeru?

411. Mały przewodnik, którego rozmiary można zaniedbać, posiada nabój + 10 jedn. el. st. Przedstawić zapomocą wykresu zmiany siły, którą działa ten nabój na nabój jednostkowy, przypadający kolejno w odległości 5 cm., 6 cm., 15 cm. od pierwszego.

412. Naboje, mieszczące się na dwu izolowanych kuleczkach, których środki przypadają w pewnej odległości, działają na siebie siłą 5 dyn. Jaka będzie ta siła, gdy nabój każdej kuleczki zwiększymy trzykrotnie, jednocześnie zaś zwiększymy trzykrotnie odległość między środkami kuleczek?

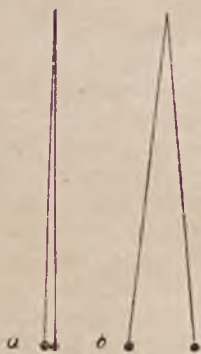
413. Jaką siłą odpychają się 2 naboje jednoimienne, z których każdy równa się jednemu kulombowi i które mieszczą się w odległości 1 kilometra jeden od drugiego?

414. Na nitce jedwabnej wisi kuleczka z rdzenia bżowego o masie = 0,02 gr., posiadająca nabój ujemny jednostkowy. Od góry zbliżamy do kuleczki drugą kulkę, osadzoną na izolującej rękojeści i naładowanej dodatnio, tak, że środki obu kulek przypadają na jednej linii pionowej; gdy odległość między środkami kulek staje się = 3 cm., kuleczka wahadełka zostaje przyciągnięta do zbliżanej zgóry kuleczki.

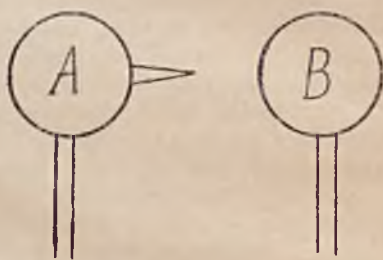
Wyznaczyć wartość naboju tej drugiej kuleczki $\left(g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} \right)$.

415. Dwie małe kuleczki równej wielkości zawieszono na nitkach jedwabnych tak, że się stykają (rys. 650 a). Elektryzujemy obie kuleczki jednakowo, dotykając prętem szklanym, polartym jedwabiem, poczem kuleczki się odpychają (rys. 650 b) i środki ich przypadają w odległości 5 cm. Znaleźć wartość naboju, mieszczących się na każdej kuleczce, jeżeli wiemy, że masa każdej kuleczki $\approx 0,1$ gr., odległość od miejsca zawieszenia nitki do środka każdej kuleczki wynosi 25 cm. przyspieszenie grawitacyjne zaś w danym miejscu $= 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$.

416. Naelektryzowaliśmy przez indukcję 2 kule metalowe, osadzone na izolujących podstawach i zestawione tak jak w doświadczeniu na str. 16 (rys. 639). Stwierdziliśmy po rozłączeniu kul w znany sposób, że mieszczą się na nich naboje różnych znaków. Dotknęliśmy następnie jedną kulę drugiej, czego wynikiem spodziewanym było rozbrojenie całkowite obu kul. Próba z elektroskopem wykazała, że jedna z kul została istotnie wyładowana, druga zaś posiada jeszcze ślady elektryzacji. Jak można wytłumaczyć tę jakgdyby sprzeczność z faktem tworzenia się zawsze jednocześnie równych naboju dodatnich i ujemnych?



Rys. 650.



Rys. 651.

417. Który ze znanych nam sposobów rozbrajania naelektryzowanych przewodników jest najdokładniejszy?

418.* Przewodniki izolowane, których używamy do elektryzowania, posiadają zawsze kształty zaokrąglone bez ostrych krawędzi lub ostrzy. Dlaczego?

419. Jeżeli postawimy obok izolowanej kuli metalowej B (rys. 651) drugą również izolowaną kulę A, zaopatrzoną w ostrze, zwrócone ku B, i jeżeli każdą z tych kul połączymy z oddzielnym elektroskopem, będziemy mogli stwierdzić co następuje:

a) po naelektryzowaniu kuli A nabój jej się zmniejsza, jednocześnie zaś kula B ładuje się, otrzymując nabój tego samego znaku, co początkowy nabój na kuli A;

b) po naelektryzowaniu kuli B nabój jej się zmniejsza, jednocześnie ładuje się nabojem tego samego znaku kula A, jakgdyby „wysysając“ przez ostrze nabój z kuli B. Wytłumaczyć te zjawiska.

420. Kładziemy na dnie puszkę Faraday'a kawałek fileu i pocieramy go końcem przeprowadzonego uprzednio kilkakrotnie przez płomień pręta ebonitowego.

Połączony z puszką elektroskop nic nie wykazuje, dopóki pręt pozostaje w puszcze, zdradza jednak natychmiast elektryzację puszek po wyjęciu z niej pręta. Wytłumaczyć zaobserwowane zjawisko.

421. Pod dostatecznie wielkim izolowanym kloszem drucianym (jak na rys. 642) z gęstej siatki, połączonym nazewnątrz z elektroskopem, a więc grającym rolę puszek Faraday'a, umieszczona jest izolowana zarówno od siatki jak ziemi machina elektrostatyczna, będąca w ruchu. Elektroskop żadnego naboju nie wskazuje. Wytłumaczyć zaobserwowane zjawisko.

422. W puszcze Faraday'a, połączonej z elektroskopem, mieści się zawieszona na jedwabnej nitce i nie dotykająca ścian puszek naelektryzowana kula metalowa. Wpuszczamy do puszek drugą kulę metalową, tak samo zawieszoną na nitce jedwabnej, ale nienaelektryzowaną, przytem tak, by nie dotykała ani ścian puszek, ani pierwszej kuli. Opisać proces elektryczny, który tu zajdzie i rozstrzygnąć pytanie, czy wskazanie elektroskopu ulegnie przytem zmianie.

423. W puszcze Faraday'a, połączonej z elektroskopem, mieści się zawieszona na jedwabnej nitce i nie dotykająca ścian puszek kula metalowa, mająca nabój $+e$. Wpuszczamy do puszek drugą kulę metalową, tak samo zawieszoną na nitce jedwabnej i mającą nabój $-e$, przytem tak, by nie dotykała ani ścian puszek, ani pierwszej kuli. Opisać szczegółowo zachodzący tu proces elektryczny?

424. Wytłumaczyć, co się dzieje, gdy do elektroskopu, naelektryzowanego dodatnio, zbliżamy powoli ciało, naelektryzowane ujemnie i, w miarę zbliżania, listki elektroskopu najpierw opadają, potem zaś rozchylają się coraz bardziej.

ROZDZIAŁ II.

POLE ELEKTROSTATYCZNE.

284. Natężenie pola. Linje sił.

Jeżeli w któremkolwiek miejscu w przestrzeni, otaczającej ciało naelektryzowane, umieszczamy inne ciało naelektryzowane, stwierdzamy znane nam już „przyciąganie“ lub „odpychanie“, które przypisujemy wzajemnemu działaniu znajdujących się na tych ciałach nabołów elektrycznych. W szczególności wystawmy sobie, że w tem czy innym miejscu, mniej lub więcej odległym od izolowanej kuli metalowej, naelektryzowanej dodatnio, mieści się mała kuleczka, której rozmiary można zaniedbać w rozważaniu, mająca również nabój dodatni (rys. 652). Mieszczący się na tej kuleczce nabój będzie podlegał działaniu siły odpychającej określonej wielkości. Tak np. w A wartość tej siły będzie, dajmy nato f , kierunek zaś jej, jak się słusznie domyślać możemy z warunków symetrii, przypadać będzie według prostej OA . Gdyby kuleczka mieściła się na tej prostej w B , odpowiednia wartość siły byłaby mniejsza, w C jeszcze mniejsza, w D , położonem bliżej kuli niż A — większa niż w A i skierowana według prostej OD i t. d. Powiadamy, że naokoło naelektryzowanego ciała tworzy się *pole elektrostatyczne*. Na nabój, mieszczący się w tym czy innym punkcie tego pola, działa siła, której wielkość zależy od wielkości tego naboju, od wielkości naboju, tworzącego rozpatrywane pole, oraz odległości rozważanego punktu od danego ciała naelektryzowanego. Umawiamy się nazywać *natężeniem pola* w którymkolwiek jego punkcie stosunek siły działającej na określony nabój, mieszczący się w tym punkcie, do wielkości tego naboju. Jeżeli więc na nabój ϵ , mieszczący się w punkcie A (rys. 652), działa siła f , natężenie pola w punkcie A jest

$$F = \frac{f}{\epsilon} \dots \dots \dots (1)$$

Można dowieść, czego tu robić nie będziemy, że nabój elektryczny, który, jak wiemy — rozmieszcza się jednostajnie na powierzchni kuli, zrobionej z dobrego przewodnika, działa na inny nabój, mieszczący się gdzieś nazewnątrz, tak, jakgdyby był cały skupiony w środku kuli.

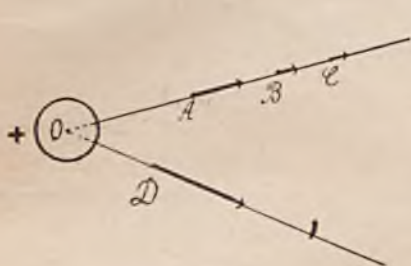
Inaczej wszakże rzeczy się miała dla przewodników innych kształtów. Przypuśćmy więc dla uproszczenia sprawy, że w punkcie O (rys. 653) mieści się nabój $+e$ i wytwarza dokoła pole elektryczne, w którym rozpatrujemy dowolne punkty A, B, C, D . Obliczmy wartość siły f , działającej na nabój $+e$ mieszczący się w punkcie A , zakładając, że między nabojami e i e mamy próżnię (jeżeli ośrodkiem otaczającym jest powietrze, praktycznie możemy je rozważać jako równoznaczne próżni).

Zgodnie z prawem Coulomba mamy, kładąc, że $OA = r$,

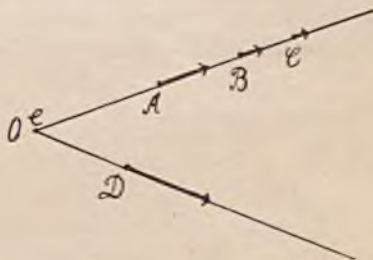
$$f = + \frac{e^2}{r^2} \dots \dots \dots (2)$$

Natężenie pola w punkcie A

$$F = \frac{f}{e} = + \frac{e}{r^2} \dots \dots \dots (3)$$



Rys. 652.



Rys. 653.

Z określenia natężenia (wzór 1) wynika bezpośrednio

$$f = F \cdot e; \dots \dots \dots (4)$$

znając zatem natężenie pola F w danym punkcie pola, znajdujemy według wzoru (4) wartość siły, która działa na nabój e , umieszczony w tym punkcie. Jak widzimy, siła równa się iloczynowi z natężenia przez wartość naboju, zatem w punkcie o danym natężeniu siła, działająca na nabój, umieszczony w tym punkcie, jest tem większa, względnie mniejsza, im większy, względnie mniejszy jest ten nabój.

Natężenie pola elektrostatycznego jest wielkością o innym wymiarze, aniżeli siła. W rzeczy samej, przypuśćmy, iż $e = 5 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$,

zaś $f = 100 \text{ dyn} = 100 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{sek}^2}$; w takim razie

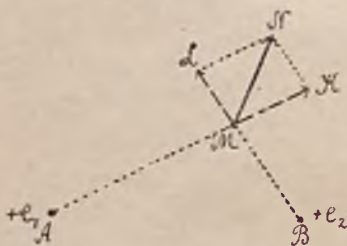
$$F = \frac{100 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{sek}^2}}{5 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}} = 20 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sek}}$$

Zatem jednostką natężenia pola elektrostatycznego jest

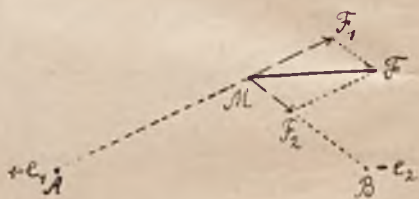
$$1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{sek}} \dots \dots \dots (5)$$

Natężenie jest wielkością kierunkową — wektorem; skierowane jest ono tak samo jak siła, działająca w danym miejscu na umieszczony tam nabój.

Przypuśćmy teraz, iż pole elektrostatyczne uwarunkowane jest nie przez jeden nabój, jak wyżej, lecz przez dwa naboje $+e_1$ i $+e_2$, mieszczące się w punktach A i B (rys. 654). Wówczas na nabój $+e$ albo jak się mówi inaczej, na biegun $+e$, mieszczący się w punkcie M , działają dwie siły: jedna, uwarunkowana przez nabój e_1 i skierowana według MK , druga, uwarunkowana przez nabój e_2 i skierowana według ML ; te dwie siły dają wypadkową, skierowaną według MN . Opierając się na podanem określeniu natężenia, powiemy, że i natężenie jest tu wypadkiem dwu natężeń, które mielibyśmy w danym punkcie, gdyby pole uwarunkowane było oddzielnie przez jeden nabój e_1 , względ-



Rys. 654.



Rys. 655.

nie przez drugi e_2 ; natężenie wypadkowe kreślimy więc w podobny sposób według natężeń składowych, jak to czynimy z siłami i wogóle wszelkimi wielkościami kierunkowymi.

W tem miejscu może się czytelnikowi nasunąć słuszna uwaga, że skoro mówimy tu o polu „wypadkowym“, to wszak każdy nabój, a więc i ten, który zakładaliśmy w punktach A, B, C, D na rys. 653 lub w M na rys. 654, także przyczynia się ze swej strony do wytworzenia pola. To też, gdy pragniemy mówić o polu danego jakiegoś naboju, musimy założyć, iż nabój — nazwijmy go „próbnym“, przy którego pomocy, jak wyżej, badalibyśmy działające w polu siły, a stąd wnosili o natężeniu pola, jest tak mały w porównaniu z nabojem, tworzącym pole, że wpływ jego na pole możemy zaniedbać.

Rys. 655 przedstawia wypadkowe natężenie F w dowolnym punkcie pola, uwarunkowanego przez dwa naboje różnych znaków $+e_1$ i $-e_2$; nie wymaga to po tem, co było powiedziane, bliższych wyjaśnień.

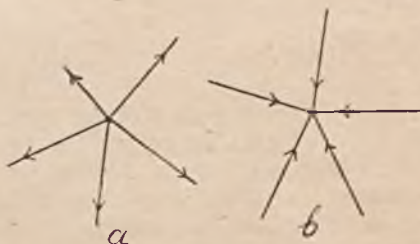
Jakiegokolwiek jest rozmieszczenie naboju, wytwarzających pole elektrostatyczne, czy przypadają one w jednym lub kilku punktach,

czy też rozmieszczone są na jakiegokolwiek powierzchni, w każdym punkcie pola mamy pewne określone pod względem wielkości i kierunku natężenie, cechujące ten punkt pola *).

Wyobraźmy sobie małe ciało, którego wymiary można zupełnie zaniedbać, obdarzone tak małym nabojem $+ \varepsilon$, iż obecność jego nie zmienia, praktycznie rzecz biorąc, danego pola, i mogące się swobodnie poruszać pod działaniem sił w tem polu. Przypuśćmy np., że rozważamy przypadek, przedstawiony na rys. 652 i zakładamy, iż to drobne ciało znajduje się w początkowym momencie w A ; będzie się ono oddalało od O według prostej $OABC$, gdyż wciąż według tej prostej działać na nie będą siły w poszczególnych punktach tej prostej; podobnie, gdybyśmy najpierw umieścili to ciało w D , poczęłoby się oddalać według prostej OD . Możemy sobie wystawić, iż z kuli rozchodzi się we wszystkich możliwych kierunkach, zgodnie z kierunkami promieni, snop linii prostych (rys. 656); według każdej z tych prostych biegłoby to ciało, gdyby zostało na niej mianowicie umieszczone; kierunkiem swego ruchu znaczyłoby ono kierunek sił, działających na nie w poszczególnych punktach, gdy coraz to inny punkt



Rys. 656.



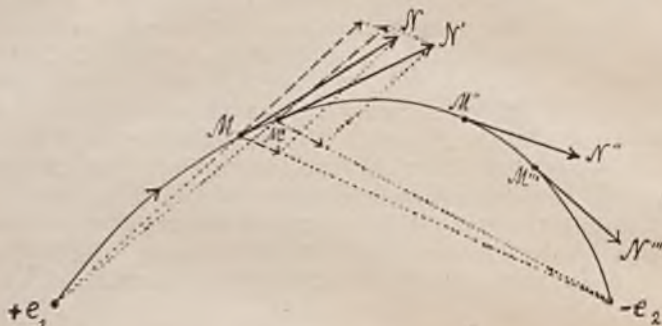
Rys. 657.

ono opuszcza i coraz to inny zajmuje; oczywiście w miarę oddalania się według którejkolwiek z tych prostych, ciało to podlegałoby działaniu coraz mniejszych sił, t. j. przechodziłoby do punktów o coraz mniejszym natężeniu, podążając w nieskończoność, gdzie natężenie pola jest równe zero. Ruch takiego próbnego ciała odbywałby się, oczywiście, w kierunku przeciwnym według tych samych prostych, gdyby nabój jego był nie tego samego znaku co nabój, wytwarzający pole, lecz znaku przeciwnego. Pierwszy z opisanych przypadków wyobraża dla naboju, mieszczącego się w jednym punkcie, rys. 657a, drugi — rys. 657b.

Rozpatrzmy ruch takiego ciała próbnego w polu, wytwarzanem przez dwa naboje znaku przeciwnego $+ e_1$ i $- e_2$, mieszczące się w punktach A i B , jak na rys. 655. Jeżeli w momencie początkowym nabój próbny $+ \varepsilon$ mieści się w M , pocznie się on poruszać według

*) Właśnie drogą przytoczonego tu sumowania otrzymujemy wypadkową wartość siły, działającej na nabój ε w punkcie A , wzgl. natężenie pola, w tym punkcie, uwarunkowane przez jednostajne rozmieszczenie naboju na powierzchni kuli (rys. 652).

prostej MN , wszakże nie pozostanie na tej prostej, oddalając się bowiem od $+e_1$ oraz zbliżając jednocześnie do $-e_2$, będzie on ulegał działaniu coraz to mniejszej siły ze strony $+e_1$, coraz większej ze strony $-e_2$, przyczem kierunki tych sił wciąż ulegać będą zmianom; skutkiem tego będzie się on zbliżał ku $-e_2$ po pewnej drodze krzywej, której kształt zależy od położenia względem siebie oraz wielkości nabożów $+e_1$ i $-e_2$ (rys. 658). Natężenie pola jest oczywiście w każdym punkcie



Rys. 658.

styczne do takiej krzywej, styczna bowiem w każdym punkcie krzywej daje jej kierunek. Gdyby np. na dwu kulkach mieściły się naboje równe znaków przeciwnych, krzywe zakreślone wypadłyby tak, jak to przedstawia rys. 659. Strzałki wskazują tu kierunek ruchu dla naboju próbnego dodatniego, poruszającego się po każdej z takich krzywych.

Naturalnie ciało próbne mogłoby za każdym razem zakreślić tylko jedną z tych dróg, wyznaczających swym kierunkiem nieprzerwane



Rys 659

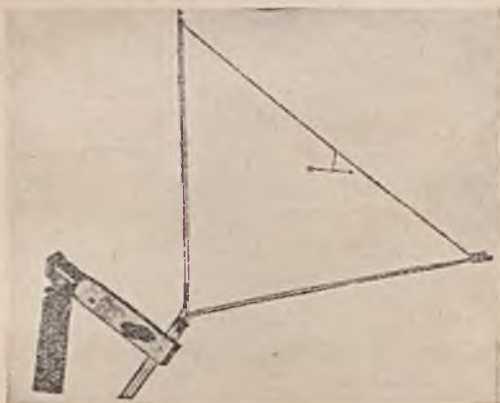
zmiany kierunku sił, którym ono kolejno podlega w polu; w żadnym razie nie mogłoby ono przeskoczyć z jednej z tych linii na drugą.

Każde pole elektrostatyczne wyobrazić sobie możemy jako wypełnione takimi linjami, które przedstawiałyby mogły drogi swobodnego naboju (nie zmieniającego swą obecnością tego pola!), poruszającego się pod działaniem sił pola; przez każdy punkt pola przechodzi jedna i tylko jedna taka linja, wskazująca swym kierunkiem

żenia pola w danym miejscu, a więc będąca jakgdyby zespołem tych stopniowo przechodzących jeden w drugi kierunków. Tego rodzaju linje nazywamy *linjami sił* lub *linjami pola elektrostatycznego*.

285. Doświadczalny sposób badania linij pola elektrostatycznego.

W doświadczeniu nie możemy wprowadzić otrzymanego takiego swobodnego ciała, któreby nieustannym swym ruchem znaczyło swobodnie w widoczny sposób te linje sił, możemy wszakże uwidocznić je inaczej. Zawieśmy na jedwabnej nitce, rozpiętej na szklanej rękojeści, jak to przedstawia rys. 660, cieniutki drucik z dwiema małymi kuleczkami z rdzenia tlenowego na końcach. Taka „igielka“ zdoła nam wykazać linje sił w tem czy innym miejscu pola elektrostatycznego. Umieść-



Rys. 660.

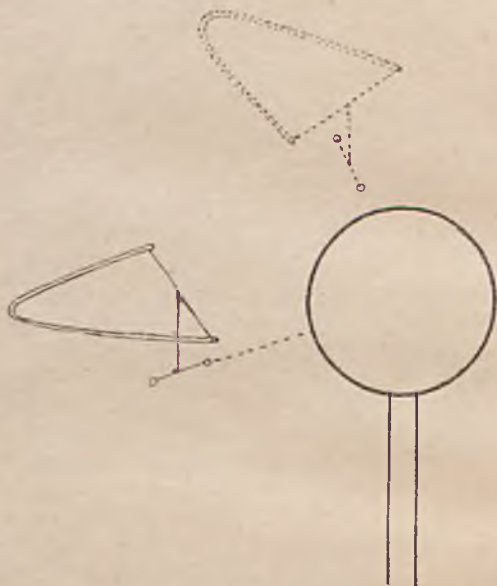
my ją naprzykład w pobliżu izolowanej naelektryzowanej kuli metalowej (rys. 661). Igła naelektryzuje się indukcyjnie i jeżeli np. nabój kuli jest dodatni, na kuleczce bliższej igielki zjawi się nabój ujemny, na dalszej — dodatni; pierwsza będzie miała dążność poruszania się pod działaniem siły pola w danym miejscu według linji pola w stronę kuli, druga w kierunku przeciwnym, co spowoduje, że igielka stanie tak, że kierunkiem swym wskazywać będzie kierunek linji, przechodzącej przez dane miejsce pola. Umieszczając taką igielkę w różnych położeniach względem kuli, przekonamy się, że igielka wciąż zwraca się ku środkowi kuli: linje sił rozchodzą się tu tak, jakgdyby wychodziły ze środka kuli *).

*) Ściśle byłoby tak tylko w razie, gdyby w pobliżu kuli nie było więcej żadnych przewodników, zakłócających pole udzielone im bezpośrednio lub przez indukcję nabojami. Również należy uwzględnić zakłócający wpływ siły ciężkości na taką igielkę.

Umieszczamy teraz igielkę w polu dwu kul, z których jedna jest naelektryzowana dodatnio, druga ujemnie, co odpowiada przypadkowi, przedstawionemu na rys. 659. Igielka staje w poszczególnych punktach tak, jak to przedstawia rys. 662, znacząc swym kierunkiem w tych punktach styczne do linii pola, przechodzących przez te punkty.

Gdyby obie kule były naelektryzowane jednakowo, igielka ustawiałaby się inaczej, stwierdzając przebieg linii sił taki, jak to przedstawia rys. 663, który proponujemy wytłumaczyć samemu czytelnikowi.

Można jeszcze w inny sposób uwidocznnić przebieg linii pola elektrostatycznego; w tym celu należy umieścić przewodnik, wzgl. przewodniki naelektryzowane w ciekłym izolatorze, zawierającym odpowiednią drobną zawiesinę np. w oleju parafinowym, w którym tworzą

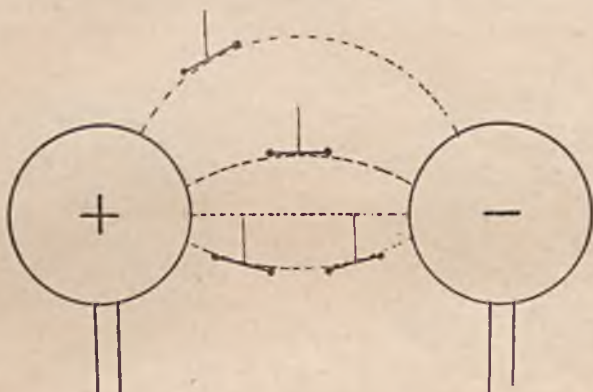


Rys. 661.

zawiesinę drobnutki krysztalki gipsu albo w oleju terpentynowym z zawiesiną, utworzoną z drobnutkich krysztalków chininy. Każdy krysztalek zachowuje się w polu elektrostatycznym na podobieństwo „igielki“, przed chwilą opisanej; to też łącznie układają się one w szeregi, znaczące kierunki poszczególnych linii. Rys. 664 jest fotograficznym odtworzeniem podobnego doświadczenia uwidocznionego pola dwu kulek metalowych, z których jedna jest naelektryzowana dodatnio, druga ujemnie *). Rys. 665 wyobraża pole między dwiema płytkami metalowymi, mającemi naboje znaków przeciwnych; widzimy

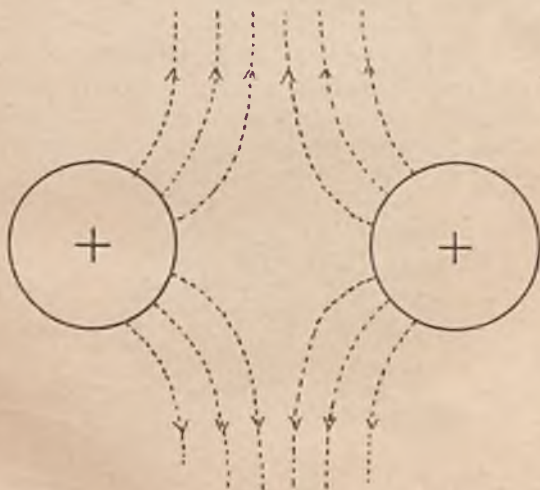
*) Kulki są połączone widocznymi na rysunku drucikami z biegunami maszyny elektrostatycznej.

tu w środkowej części pola szczególny przypadek, gdy linje sił przebiegają równoległe — tego rodzaju pole o linjach równoległych nazywamy *polem jednorodnem*.



Rys. 662.

Zwracamy uwagę, iż w przypadkach, wyobrażonych na rys. 662, 664, 665, mamy taki przebieg linii pola, iż poszczególne z nich zaczynają się u powierzchni jednego przewodnika naelektryzowanego, kończą się u powierzchni drugiego przewodnika, mającego nabój znaku przeciwnego.



Rys. 663.

Przyjmujemy za „początek“ linii to miejsce, gdzie mieści się nabój dodatni, zaś za „koniec“ to miejsce, gdzie przypada nabój ujemny; o każdej linii powiadamy, że jest skierowana od prze-

wodnika z nabojem dodatnim do przewodnika z nabojem ujemnym— w tym kierunku poruszałyby się po niej swobodny nabój próbny dodatni. Podkreślamy z naciskiem, że przebieg linii pola jest zawsze taki, t. j. że *każda* linia poszczególna zaczyna się i kończy tam, gdzie przypadają naboje znaków przeciwnych. Prawda, wspominaliśmy



Rys. 664



Rys. 665.

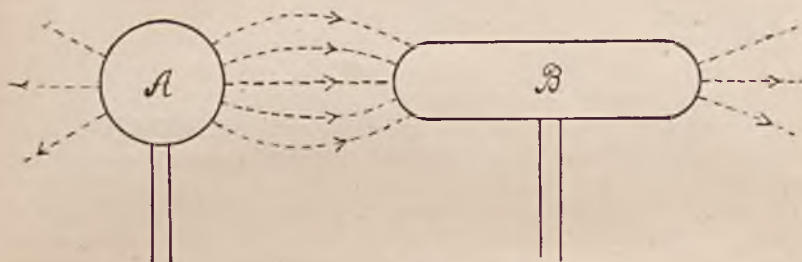
wyżej o polu pojedynczego naboju, mieszczącego się w punkcie (rys. 657), z którego linje biegą we wszystkie kierunki w nieskończoność. Wszakże jest to jedna z tych abstrakcyj, do których często się uciekamy w rozumowaniach w celu ich uproszczenia, w celu podkreślenia w nich tej istotnej cechy zjawiska, o którą nam w danym razie chodzi. Na rys. 657a rzecz jest przedstawiona tak, jakgdyby w przestrzeni nieograniczonej istniał nabój pewnego znaku w danym punkcie i nie poza tem; ale wszak już wiemy, że wytworzeniu naboju jednego znaku towarzyszy zawsze wytworzenie naboju równego tamtemu o znaku przeciwnym — już to samo mówi nam o fikcyjności (dopuszczalnej



Rys. 666.

i nawet pożytecznej!) takich pól jak na rys. 657a lub 657b, o ile wyobrażać sobie będziemy, iż linje, wychodzące z danych biegunów, biegą w nieskończoność. Wyobraźmy jednak sobie, że w punkcie mieści się mała kuleczka, której wymiary można zaniedbać i która posiada np. nabój dodatni, przyczem dokoła niej, jako środka, mieści się kulista osłona metalowa, połączona z ziemią (rys. 666). Wówczas na

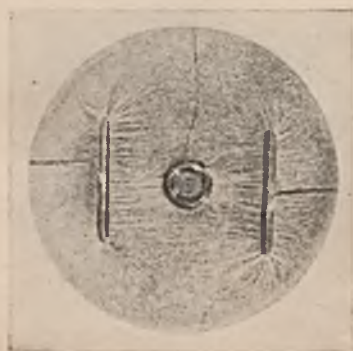
osłonie zostaje wzbudzony nabój ujemny (patrz ust. 281, gdzie mowa o puszce Faraday'a); równy mu nabój dodatni będzie posiadała ziemia (według mechanizmu elektryzacji, podanego w ust. 283, pewna liczba elektronów spływie po drucie z ziemi na tę osłonę); linie sił, bio-



Rys. 667.

jące początek w nabój, który się mieści na kulce, będą się kończyły u osłony, gdzie jednostajnie rozmieszczony jest wzbudzony nabój znaku ujemnego.

Ściany, sufit, podłoga pokoju, w którym wykonywamy nasze doświadczenia, nie są wprawdzie tak dobrimi przewodnikami jak metale, w pewnej jednak mierze są przewodnikami; to też izolowany przewodnik naelektryzowany, mieszczący się w pokoju, znajduje się w osłonie podobnie jak nabój na rys. 666; linie sił, wybiegające z powierzchni tego przewodnika, lub też kończące się tam, mają drugie



Rys. 668.

końce częściowo na powierzchniach innych przewodników, które znajdują się w pokoju i mają naboje o znaku przeciwnym, częściowo zaś na ścianach, suficie lub podłodze tego pokoju. Łatwo się zorientować, że w tym przypadku przebieg linii nie będzie taki, że tak powiemy, prosty jak na rys. 666.

Użyjmy jeszcze opisanej w tym ustępie igielki w celu zbadania pola, które mamy dookoła przewodnika A , izolowanego i naelektryzowanego, oraz B , również izolowanego, który się przez pierwszy elektryzuje indukcyjnie. Przekonamy się, że linje sił przebiegają tak, jak to przedstawia rys. 667 i co jest zgodne z tem wszystkiem, cośmy przed chwilą wyjaśnili.

Jeżeli porównamy przypadki, wyobrażone na rys. 656 i 667, nie ujdzie naszej uwagi, że obecność w pobliżu naelektryzowanej kuli A drugiego przewodnika B wpływa na zmianę kształtu linii sił. Linje, które w braku przewodnika B rozchodzą się promienisto we wszystkie strony, zakrzywiają się, jakgdyby usiłując trafić w ten przewodnik B .

To odkształcenie linii pola przez umieszczony w niem przewodnik wykazać można przy pomocy opisanej tu przez nas drugiej metody. Na rys. 668 widzimy, jak początkowo równoległe linje, przechodzące między płytkami, mającemi naboje przeciwnych znaków, zakrzywiają się ku umieszczonemu między płytkami pierścieniowi metalowemu.

Wewnątrz przewodnika naelektryzowanego, jak już wiemy, niema pola elektrostatycznego, niema zatem i linii sił. *A więc linje sił przebiegają jedynie w izolatorach, zwanych inaczej dielektrykami, zaczynając się i kończąc na pokrytych nabojami powierzchniach przewodników, bliżej czy dalej od siebie umieszczonych.*

286. Ścisłejszy dowód prawa Coulomba.

Podane w ust. 278 zasadnicze prawo, według którego dwa naboje elektryczne działają nawzajem na siebie siłą odwrotnie proporcjonalną do kwadratu ich odległości, było wnioskiem, wyciągniętym przez Coulomba z jego pomiarów przy pomocy wagi skręceń. Wszakże zaznaczaliśmy, iż pomiary takie nigdy nie są wolne od błędów, czyli że prawo to było raczej genialnym domysłem, aniżeli ścisłym wyrazem wyników doświadczenia.

Opierając się atoli na fakcie, że wewnątrz przewodnika naelektryzowanego niema pola elektrycznego, co dało się ustalić przy pomocy bardzo wielu najsubtelniejszych doświadczeń z bezwzględną niemal ścisłością, możemy drogą pośrednią dowieść słuszności prawa Coulomba.

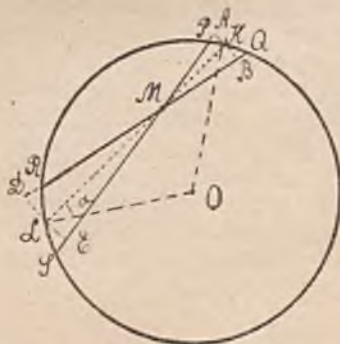
Wystawmy sobie tedy kulę naelektryzowaną (rys. 669); nabój elektryczny rozmieszczony jest na jej powierzchni jednostajnie z pewną gęstością σ . Wykreślmy dwie powierzchnie stożkowe o wspólnym wierzchołku M , o równych kątach bryłowych w tym wierzchołku i o wspólnej osi KL (kropkowanej na rysunku), tworzącej kąt α z promieniami kuli, poprowadzonymi do miejsc przecięcia się tej osi z powierzchnią kuli. Powierzchnie stożkowe wycinają na powierzchni kuli elementy PQ i RS o powierzchniach s_1 , wzgl. s_2 , na których się mieszczą naboje odpowiednio $e_1 = s_1 \sigma$ i $e_2 = s_2 \sigma$. Im mniejszy będzie kąt

bryłowy powierzchni stożkowych (czego na rysunku uczynić nie możemy, lecz co daje się pomyśleć), tem mniejszy popełnimy błąd, uważając elementy powierzchni s_1 i s_2 za płaskie. Poprowadźmy przez punkty przecięcia osi stożków z powierzchnią kuli prostopadłe do osi przekroje AB i DE , oznaczając powierzchnie tych przekrojów przez s'_1 i s'_2 . Możemy wtedy napisać:

$$s_1 = \frac{s'_1}{\cos \alpha} \quad \text{i} \quad s_2 = \frac{s'_2}{\cos \alpha}, \quad \dots \quad (1)$$

czyli wartości nabojów, mieszczących się na elementach s_1 i s_2 , są odpowiednio:

$$e_1 = \frac{s'_1 \sigma}{\cos \alpha} \quad \text{i} \quad e_2 = \frac{s'_2 \sigma}{\cos \alpha}, \quad \dots \quad (2)$$



Rys. 669.

Jeśli oznaczymy $MK = r_1$ i $ML = r_2$ i założymy, iż prawo Coulomba jest słuszne, to siły, którym podlega nabój próbny ϵ , mieszczący się w M ze strony nabojów e_1 i e_2 , są odpowiednio:

$$f_1 = \frac{e_1 \epsilon}{r_1^2} \quad \text{i} \quad f_2 = \frac{e_2 \epsilon}{r_2^2}, \quad \dots \quad (3)$$

i skierowane we wręcz przeciwne strony.

Podstawiając do (3) wartości e_1 i e_2 z (2), mamy:

$$f_1 = \frac{s'_1 \sigma \cdot \epsilon}{\cos \alpha \cdot r_1^2} \quad \text{i} \quad f_2 = \frac{s'_2 \sigma \cdot \epsilon}{\cos \alpha \cdot r_2^2}, \quad \dots \quad (4)$$

Lecz według znanego twierdzenia geometrii o przekrojach, poprowadzonych w różnych odległościach od wierzchołków stożków prostopadłe do osi, mamy:

$$\frac{s'_1}{s'_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}, \quad \dots \quad (5)$$

skąd

$$s'_2 = \frac{s'_1 \cdot r_2^2}{r_1^2}, \quad \dots \quad (6)$$

Podstawiając wartość s'_2 z (6) do wartości f_2 z (4), otrzymujemy:

$$f_1 = \frac{s'_1 \sigma \cdot \varepsilon}{\cos \alpha \cdot r_1^2} \cdot f_2 = \frac{s'_1 \cdot r_2^2 \cdot \sigma \cdot \varepsilon}{r_1^2 \cdot \cos \alpha \cdot r_2^2} = \frac{s'_1 \sigma \cdot \varepsilon}{\cos \alpha \cdot r_1^2}$$

czyli

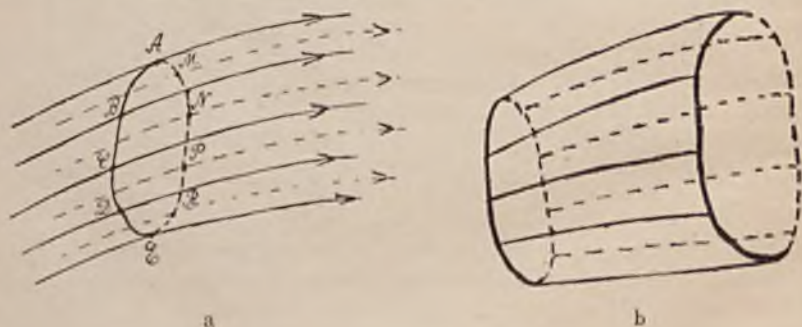
$$f_1 = f_2$$

Zatem wypadkowe działanie na próbny nabój ε , mieszczący się w M , nabojów, leżących na elementach s_1 i s_2 (PQ i RS), równa się zeru.

Możemy sobie wyobrazić, że w punkcie M schodzą się wierzchołki niezliczonej liczby podobnych par stożków, wycinających takie elementy jak s_1 i s_2 na powierzchni kuli. Powtarzając powyższe rozumowanie dla każdej z tych par, otrzymamy, że wypadkowe działanie nabojów, mieszczących się na elementach kuli, na nabój próbny w M jest równe zeru. Wnosimy stąd, że działanie całego naboju, mieszczącego się na powierzchni kuli, na nabój próbny w M równa się zeru. Ponieważ punkt M obrany jest dowolnie, przeto udowodnimy w ten sposób, że zgodnie z prawem Coulomba niema istotnie pola elektrycznego wewnątrz naelektryzowanego przewodnika. Zakładając inną zależność siły, działającej między dwoma nabojami elektrycznymi, od odległości między nabojami, nie otrzymalibyśmy tej zgodności. Dlatego właśnie powiadamy, iż fakt nieistnienia pola elektrycznego wewnątrz przewodnika naelektryzowanego jest bezporównania ściślejszym dowodem słuszności prawa Coulomba niż pomiary, dokonane przy pomocy wagi skręceń.

287. Rurki sił pola elektrycznego.

Przez każdy punkt pola elektrycznego dają się poprowadzić linie siły; w ten sposób liczba tych linii jest nieograniczona. Wszakże, uma-



Rys. 670.

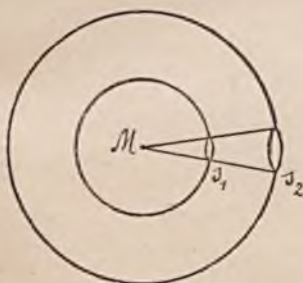
wiając się w szczególny sposób co do ich prowadzenia, zyskujemy możliwość nie tylko zaznaczania przy ich pomocy kierunku natężenia pola

w tem czy innym miejscu, ale również wartości natężenia. W tym celu wprowadzamy nowe pojęcie *rurki siły* lub krótko *rurki pola* elektrycznego.

Wyobraźmy gdziekolwiek w polu zamknięty kontur, przez którego poszczególne punkty przechodzą linie pola (rys. 670a). Utworzy się w ten sposób rurka o zmiennym naogół przekroju (rys. 670b).

Tego rodzaju tworowi nadajemy właśnie nazwę rurki pola.

Przypuśćmy, iż w punkcie *M* mieści się nabój elektryczny *e*, wytwarzający dokoła pole elektryczne. Możemy sobie wyobrazić, iż z punktu *M* rozchodzą się we wszystkich kierunkach takie rurki w kształcie stożków, jak na rys. 671. Wszystkie te rurki wypełniają przestrzeń dokoła naboju, wytwarzającego pole, ale liczba ich pozostaje nieokreślona, dopóki nie dodamy żadnego ograniczenia co do ich przeprowadzania. Umówmy się więc prowadzić te rurki w takiej liczbie, by w każdym miejscu pola, gdzie one przecinają powierzchnię



Rys. 671.



Rys. 672.

1 cm² przy prostym ustawieniu powierzchni do osi rurki liczba ta dawała wartość liczbową natężenia pola w tem miejscu. Jeżeli więc na rys. 671 powierzchnia *s*₁, wycięta przez taką jednostkową rurkę na powierzchni kuli o promieniu *r*, wynosi 1 cm², to powierzchnia *s*₂, wycięta przez tę rurkę na kuli o promieniu 2 *r* wynosi 4 cm², a więc na jeden cm² przypada $\frac{1}{4}$ przekroju rurki. Zatem na powierzchni

*s*₁ natężenie pola wynosi *jednostkę natężenia* $\left(1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sek}} \right)$, zaś na

powierzchni *s*₂ wartość natężenia $= \frac{1}{4} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sek}}$. W przypadku ogólniejszym, jeżeli przez powierzchnię *s*₁ = 1 cm² przechodzi *n*₁ rurek jednostkowych, czyli na powierzchni *s*₁ natężenie pola wynosi *F*₁ = *n*₁ jednostek natężenia, przez każdy cm² powierzchni *s*₂ (*s*₂ = 4 *s*₁)

przechodzi tych rurek $\frac{n_1}{4}$, czyli natężenie tam wynosi *F*₂ = *n*₂ jedn. natężenia = $\frac{n_1}{4}$ jedn. natężenia. Zauważmy, że iloczyn *s*₁ · *n*₁

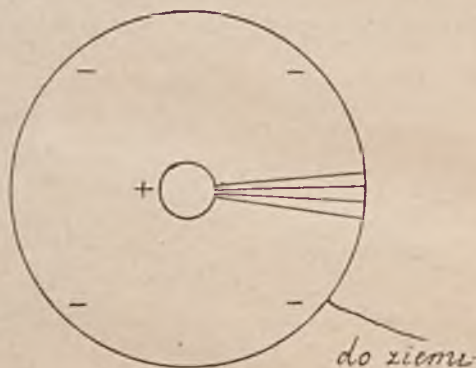
natężenia = $\frac{n_1}{4}$ jedn. natężenia. Zauważmy, że iloczyn *s*₁ · *n*₁

i $s_2 \cdot n_2$ są sobie równe; istotnie, skoro $s_2 = 4s_1$, zaś $n_2 = \frac{n_1}{4}$,
 przeto $s_2 n_2 = 4s_1 \cdot \frac{n_1}{4} = s_1 n_1$.

Twierdzenia tego można dowieść łatwo dla każdego przekroju rurki; możemy zatem je wypowiedzieć w ten sposób, że dla każdej rurki iloczyn z jej przekroju przez wartość natężenia pola w miejscu przekroju jest wielkością stałą.

$$s \cdot F = \text{const.} \quad (1)$$

albo, co na jedno wychodzi, że, jeżeli się posuwamy wzdłuż osi rurki, natężenie pola w poszczególnych jej miejscach jest odwrotnie proporcjonalne do przekroju poprzecznego rurki w tem miejscu.



Rys. 673.

Zastanówmy się teraz, ile rurek jednostkowych należy prowadzić z bieguna $= e$ jedn. el. st., by zgodnie z podanem tu określeniem scharakteryzować tworzone przez ten biegun pole. Opiszmy dokoła bieguna e kulę o promieniu $= r$ cm (rys. 672). Powierzchnia tej kuli wyniesie $4\pi r^2$. Natężenie pola w poszczególnych punktach powierzchni tej kuli wyniesie $\frac{e}{r^2}$. Z bieguna e należy zatem poprowadzić tyle rurek jednostkowych, które wypełnią całą przestrzeń, otaczającą biegun, by na każdy cm^2 wykreślonej powierzchni kulistej przypadło $\frac{e}{r^2}$ tych rurek. Ponieważ liczba cm^2 , której równa się powierzchnia kuli, jest $4\pi r^2$, przeto szukana liczba rurek będzie

$$4\pi r^2 \cdot \frac{e}{r^2} = 4\pi e \quad (2)$$

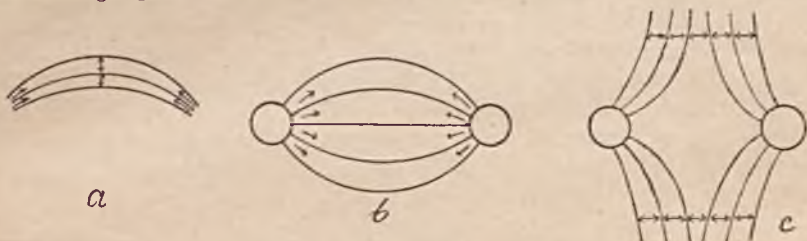
Widzimy więc, że dla uczynienia zadość żądanej charakterystyce należy prowadzić z każdego bieguna elektrycznego $4\pi e$ rurek jednostkowych.

Wróćmy do przykładu, gdy mała kuleczka o promieniu r , mająca nabój $+e$, otoczona jest metalową osłoną kulistą o promieniu R , połączoną z ziemią. Załóżmy dla uproszczenia sprawy, że powierzchnie kuleczki i kuli są współśrodkowe. Poprowadźmy w myśl ustalonej umowy z tej kuleczki $4\pi e$ stożkowych rurek jednostkowych, z których kilka wyobrażamy na rys. 673. Każda z tych rurek zaczyna się na powierzchni kuleczki, gdzie jej przekrój wynosi liczbowo $\frac{4\pi r^2}{4\pi e} =$

$\frac{r^2}{e}$ i kończy się na powierzchni osłony, gdzie jej przekrój wynosi

liczbowo $\frac{4\pi R^2}{4\pi e} = \frac{R^2}{e}$. Z drugiej strony nabój ujemny, wzbudzony

na osłonie, wynosi, jak już wiemy $-e$, t. j. gęstość tego naboju wzbudzonego przy jednostajnym w danym razie rozmieszczeniu, jest



Rys. 674.

$\frac{-e}{4\pi R^2}$. Zatem na przekroju $\frac{R^2}{e}$ rurki jednostkowej nabój równa się

$\frac{-e \cdot R^2}{4\pi R^2 e} = -\frac{1}{4\pi}$. Dla kuleczki samej otrzymujemy w podobny

sposób na przekroju rurki jednostkowej nabój $\frac{e}{4\pi r^2} \cdot \frac{r^2}{e} = \frac{1}{4\pi}$.

A więc wartości naboju, mieszczących się na przekrojach początkowym i końcowym każdej z tych rurek, są równe (naboje te różnią się tylko znakiem). Niech czytelnik spamięta sobie ten ważny szczegół.

Rozumowanie powyższe można uogólnić. Dochodzimy wtedy do twierdzenia, że jakikolwiek jest przebieg linii pola, daje się ono wypełnić owymi rurkami, rozpoczynającymi się i kończącymi na powierzchniach przewodników i mającymi przekroje mniejsze, względnie większe w miejscach, gdzie natężenie pola jest odwrotnie większe, względnie mniejsze.

M. Faraday przypisywał tym rurkom szczególne znaczenie fizyczne, porównyując je z rodzajem rozpiętych lin sprężystych, dążących do możliwego skrócenia się, a zarazem poszerzenia się, a tem samem uzewnętrzniających zjawisko ciągnięcia w kierunku ich osi, zaś rozpięcia w kierunku poprzecznym do osi (rys. 674, a). W ten sposób przyciąganie się dwu naboju elektrycznych różnoimiennych można

wyobrazić jako skutek tendencji owych rurek do skrócenia się (rys. 674, b), natomiast odpychanie się naboju jednoimiennych jako wynik owego parcia bocznego przylegających do siebie rurek (rys. 674, c). Można udowodnić, że, zakładając na wartość owego napięcia niły sprężystego jak również na wartość owego bocznego parcia

$\frac{F^2}{8\pi}$, gdzie F oznacza natężenie pola w tem czy innym miejscu rurki, jesteśmy w stanie zdać sprawę nawet ilościowo z dających się obserwować faktów przyciągania i odpychania.

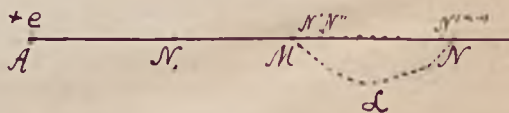
Faraday, zakładając tworzenie się pewnych napięć w dielektrykach, otaczających naelektryzowane ciała i przypisując tym napięciom właśnie dostrzegane w doświadczeniu objawy, usuwa zasadniczo t. zw. działanie z odległości, t. j. działanie bez współudziału ośrodka, przedzielającego działające na siebie ciała, jako fizycznie niepojęte. Z drugiej strony podkreślić należy, że przyciąganie się i odpychanie elektryczne dają się też obserwować i w próżni, przeto i w próżni założyć należy tworzenie się tych napięć, czyli, że przypisywać można próżni pewne własności fizyczne. Trudność wyobrażenia sobie „próżni“, obdarzonej własnościami fizycznymi w tym jak w innych przypadkach (np. przechodzenie przez próżnię fal energii promienistej) nasunęły myśl, że raczej „próżni“ niema, że bezmiar przestrzeni wypełnia t. zw. eter wszechświatowy.

288. Potencjał elektryczny.

Weźmy izolowaną wydrążoną i zaopatrzoną w niewielki otwór kule metalową, jak na rys. 675. Jeżeli przez otwór A wprowadzimy osadzoną na izolowanej rękojeści naelektryzowaną kuleczkę, zrobio-



Rys. 675.



Rys. 676.

na z materiału przewodzącego, i dotknijemy nią wewnętrznej powierzchni kuli A , nabój kuleczki, jak już wiemy, całkowicie oddany będzie tej kuli. Po wyjęciu kuleczki naelektryzujemy ją tak samo ponownie i w ten sam sposób oddajemy jej nabój kuli A . Powtarzając to wielo-

krotnie, powiększać będziemy stopniowo nabój kuli. Zwróćmy teraz uwagę, że to elektryzowanie kuli A wymaga wykonania pewnej pracy — wszakże, gdy kuleczkę, posiadającą pewien nabój, zbliżamy do kuli, na której mieści się nabój tegoż znaku, mamy za każdym razem do pokonania odpychanie, które zachodzi między nabojami jednoimiennymi.

W celu lepszego zorientowania się w tej pracy, rozpatrzmy przykład następujący. Przypuśćmy, iż w punkcie A mieści się nabój $+e$ (rys. 676), zaś w punkcie M — mały nabój próbny $+e$, tak mały, iż możemy zaniedbać jego wpływ zakłócający na pole naboju $+e$. Nabój $+e$ podlega działaniu siły odpychającej f , której kierunek przypada według linii AM pola. Przeniesienie naboju $+e$ z punktu M do punktu bliższego N_1 wymaga nakładu pracy dla pokonania tego odpychania, które wzrasta przy zbliżaniu naboju $+e$ do A . Przeciwnie, gdyby nabój $+e$ mógł się swobodnie poruszać, oddalałby się w kierunku MN i tu moglibyśmy mówić o pracy, którą wykonywają siły pola *). Im dalej od A , tem mniejsze jest natężenie pola, tem mniejsza siła działa na nabój e , lecz zaledwie w nieskończenie wielkiej odległości od A natężenie pola staje się równe zeru, a więc znika całkowicie siła, działająca na ten nabój próbny e .

Obliczmy, jaka praca zostaje wykonana przez siły pola, gdy nabój $+e$ zostaje przesunięty przez te siły z punktu M do N . Gdyby wartość siły, działającej na nabój, była stała, należałoby tylko w tym celu pomnożyć tę wartość przez długość drogi MN ; jednakże siła ta zmniejsza się w miarę oddalania się w kierunku N . Przypuśćmy, iż $AM = r$, zaś $AN = R$; podzielmy całą odległość MN na n równych części $MN' = N'N'' = N''N''' = \dots = N^{(n-1)}N$ i oznaczmy $AN' = r_1$, $AN'' = r_2$, $AN''' = r_3 \dots$. Im większe obierzemy n , tem większe będziemy mieli prawo uważać siłę, działającą na którymkolwiek z tych odcinków, za stałą. Znajdźmy tę siłę dla pierwszego odcinka MN' ; w punkcie M siła

$$f_A = + \frac{e^2}{r^2} = \frac{e^2}{r \cdot r}, \quad \text{zaś w punkcie } N' \text{ równa się ona}$$

$\frac{e^2}{r_1^2} = \frac{e^2}{r_1 r_1}$; zakładając, że na całym tym odcinku działa nie siła coraz to malejąca na drodze od M do N' , lecz stała o pewnej wartości średniej, przyjmijmy na tę wartość średnią $\frac{e^2}{r \cdot r_1}$ (średnia geometryczna z wartości jej w punktach M i N'). Praca tej siły na drodze MN' będzie zatem

$$\frac{e^2}{r r_1} \cdot (r_1 - r) = e^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) \dots \dots (1)$$

*) Podobnie, gdy podnosimy ciało, wykonywamy pracę na pokonanie siły ciężkości; przeciwnie, gdy ciało spada, poruszając się z rosnącą wciąż prędkością, pracę na powiększenie energii kinetycznej spadającego ciała wykonywa siła ciężkości.

Podobnie znajdziemy, że praca na drugim odcinku $N'N''$ będzie

$$\frac{e^{\varepsilon}}{r_1 r_2} (r_2 - r_1) = e^{\varepsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

i t. d. Na ostatnim odcinku $N^{(n-1)}N$ praca wyniesie

$$\frac{e^{\varepsilon}}{r_{n-1} \cdot R} (R - r_{n-1}) = e^{\varepsilon} \left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{R} \right) \dots \dots \dots (3)$$

Dodając znalezione wartości prac elementarnych, dokonanych na poszczególnych odcinkach drogi MN, znajdziemy całkowitą pracę, wykonaną na tej drodze:

$$Q = e^{\varepsilon} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{R} \right) \dots (4)$$

co oczywiście daje ostatecznie

$$Q = e^{\varepsilon} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \dots \dots \dots (5)$$

Pracę tej samej wielkości należałoby wykonać, aby przenieść nabój $+ \varepsilon$ według prostej MN z punktu N do M , pokonywając przytem rosnące wciąż odpychanie.

Powstaje jednak pytanie, jaką byłaby ta praca, gdybyśmy tego zbliżenia naboju ε od N do M dokonali nie według prostej MN , lecz np. według krzywej kropkowanej MLN , albo gdybyśmy uniemożliwili naboju ε oddalanie się od M do N po prostej MN , dając mu jedynie możliwość posuwania się po krzywej MLN ? *). Odpowiedź na to pytanie dajemy, posługując się następującym rozumowaniem: gdyby praca w tym razie zależała od kształtu drogi, można byłoby dobrać dwie różne drogi tak, aby przy przechodzeniu naboju ε od M do N po jednej drodze została wykonana przez siły pola praca większa, aniżeli ta, którą należałoby wykonać, by po drugiej drodze nabój ε sprowadzić znowu z N do M ; po każdym takim całkowitym obiegu, gdy układ wracałby do stanu początkowego, mielibyśmy pewien zysk w pracy, któryby się tworzył z niczego. Należałoby w ten sposób zaprzeczyć zasadzie zachowania energii, do czego nie nas nie upoważnia. Wnosimy więc, że wartość pracy, którą wykonywają siły pola, gdy nabój ε przenosi się z M do N lub też którą należy wykonać przeciw siłom pola dla przeniesienia naboju z N do M , nie zależy od kształtu drogi, po której ten nabój się przesuwa i wyraża się wzorem (5), w który wchodzi dane, określone przez początkowe i końcowe położenie naboju ε względem naboju e , warunkującego pole **).

*) Ilustracją odpowiednią z dziedziny zjawisk grawitacyjnych byłoby zsuwanie się ciała z miejsca wyżej położonego do niżej położonego na tym samym pionie po wijącej się spiralnie równi pochyłej (z pominięciem tarcia).

**) To samo twierdzenie poznaliśmy w stosunku do pola grawitacyjnego (patrz t. I ust. 65).

Jeżeli pracę, wykonaną przy przenoszeniu naboju z M do N , uważać będziemy za dodatnią, ruchowi od N do M odpowiadać będzie praca ujemna

$$- e\varepsilon \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) = e\varepsilon \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right) \dots \dots (6)$$

Przypuśćmy, iż nabój $+e$ oddalamy (po jakiegokolwiek drodze) w nieskończoność, albo, że nabój $+e$ z nieskończenie wielkiej odległości, t. j. stamtąd, gdzie natężenie pola = 0, zostaje (po jakiegokolwiek drodze) przeniesiony do punktu M . Praca wykonana w pierwszym przypadku przez siły pola, w drugim przeciw tym siłom, przedstawia się ilościowo wzorem:

$$q = \frac{e\varepsilon}{r} \dots \dots \dots (7)$$

w tym razie bowiem $R = \infty$

Wartość tej pracy zależy nie tylko od naboju, wytwarzającego pole, oraz odległości rozważanego punktu od tego naboju, ale i od wartości przenieszonego naboju ε . *Stosunek tej pracy q do wielkości przenieszonego naboju ε*

$$V = \frac{q}{\varepsilon} = \frac{e}{r} \dots \dots \dots (8)$$

będzie wielkością charakterystyczną dla danego punktu pola. Liczbowo stosunek ten daje nam wartość pracy, wykonywanej przez siły pola, względnie przeciw siłom, gdy nabój = jednostce elektrostatycznej przeniesiony zostaje z danego punktu w nieskończoność, względnie z nieskończoności do danego punktu. Stosunek ten, zwany potencjałem pola w danym punkcie określa się wyłącznie przez wartość naboju, którego pole rozważamy, oraz położenie względem tego naboju danego punktu.

Dla przykładu obliczmy wartość potencjału w punkcie M , odległym od A o 40 cm, jeżeli w A mieści się nabój = $100 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$. Według wzoru (8) otrzymamy w danym razie

$$V = \frac{100 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}}{40 \text{ cm}} = 2,5 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$$

Jednostką potencjału jest zatem

$$1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} \dots \dots \dots (9)$$

jest to t. zw. *jednostka elektrostatyczna potencjału*. Dla celów praktycznych jednostka ta okazała się zbyt wielką; to też za jednostkę

praktyczną potencjału elektrycznego obrano *wolt* *), stanowiący $\frac{1}{300}$ jednostki elektrostatycznej.

$$\text{Wolt} = \frac{1}{300} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} \dots \dots \dots (10)$$

W celu grutowniejszego zrozumienia wprowadzonego tu nowego pojęcia potencjału, wróćmy do wzoru (5), który daje wartość pracy, wykonywanej przy przenoszeniu naboju $+e$ z miejsca znajdującego się w odległości r od bieguna, wytwarzającego pole, do miejsca, znajdującego się w odległości R od tego bieguna. Wzór (5) można napisać inaczej, uwzględniając określenie potencjału, zawarte we wzorze (8). Załóżmy, że w punkcie M potencjał jest V , zaś w punkcie N wartość potencjału jest V' .

$$\text{Wtedy} \quad V = \frac{e}{r} \quad \text{i} \quad V' = \frac{e}{R} \dots \dots \dots (9)$$

Wzór (5) przepisujemy z uwzględnieniem (9) w sposób następujący:

$$Q = e\varepsilon \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) = \varepsilon \left(\frac{e}{r} - \frac{e}{R} \right) = \varepsilon (V - V') \dots (10)$$

Jak widzimy, znając wartości potencjału w dwu punktach, znajdujemy pracę przeniesienia danego naboju z pierwszego z tych punktów do drugiego zapomocą *mnożenia wartości naboju przenieszonego przez różnicę potencjałów w obu danych punktach*.

Przypuśćmy, że różnica potencjałów równa się jednostce elektrostatycznej potencjału, t. j. $1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$, zaś nabój przenoszony równa się jednostce elektrostatycznej naboju, t. j. $1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$. Praca rozważonego przeniesienia wynosi wówczas

$$1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} \cdot 1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}} = 1 \frac{\text{gr cm}^2}{\text{sek}^2} = 1 \text{ erg.}$$

Przypuśćmy, że różnica potencjałów wynosi 1 wolt $= \frac{1}{300} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$, zaś nabój przenoszony stanowi jeden kulomb, t. j. $3 \cdot 10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$; wówczas praca takiego przeniesienia wynosi

$$3 \cdot 10^2 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} \cdot 3 \cdot 10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}} = 10^7 \frac{\text{gr cm}^2}{\text{sek}^2} = 10^7 \text{ ergów} = 1 \text{ dżul.}$$

*) Dla uczczenia i uwiecznienia w ten sposób nazwiska znakomitego uczonego włoskiego Aleksandra Volty, o którym będzie jeszcze mowa niżej.

Zatem ustalenie jednostki potencjału elektrycznego wiąże się jak najściślej z ustaleniem jednostkami pracy. Mówimy, iż różnica potencjałów w dwu punktach pola stanowi jednostkę elektrostatyczną potencjału, jeżeli praca przeniesienia między temi punktami naboju, równego jednostce elektrostatycznej naboju, stanowi jednostkę pracy — jeden erg. Podobnie mówimy, iż różnica potencjałów w dwu punktach pola wynosi praktyczną jednostkę potencjału — jeden volt, jeżeli praca przeniesienia między danemi punktami praktycznej jednostki naboju, t. j. jednego kulomba, wynosi praktyczną jednostkę pracy — jeden dżul. Dwa dane punkty pola mogą być wybierane rozmaicie; jeżeli jeden z nich założymy w nieskończoności, gdzie potencjał = 0

(we wzorze $\frac{e}{r}$ należy założyć $r = \infty$), to sprowadzamy rzecz do wyżej podanego określenia potencjału. O danym punkcie pola powiemy, że potencjał w nim równa się jednostce (elektrostatycznej lub praktycznej), jeżeli praca przeniesienia z tego punktu w nieskończoność (względnie do tego punktu z nieskończoności) jednostki naboju (elektrostatycznej, wzgl. praktycznej) wynosi jednostkę pracy (erg, wzgl. dżul).

Wzór (8) wyraża oczywiście wartość potencjału w polu, wytworzonym przez nabój czy to dodatni, czy ujemny; w tym ostatnim przypadku potencjał w którymkolwiek punkcie pola należy uważać za ujemny. Oznacza to, że w tym przypadku siły pola wykonywałyby pracę dodatnią względem bieguna ujemnego, umieszczonego w tym punkcie, podobnie jak to poprzednio działo się w stosunku do bieguna dodatniego.

289. Potencjał elektryczny (ciąg dalszy).

Zgodnie z tem, co było powiedziane w ustępie poprzednim, w punkcie M (rys. 676), którego odległość od punktu A , gdzie się mieści nabój e , jest r , potencjał elektryczny wynosi $\frac{e}{r}$.

Taką samą wszakże wartość posiada potencjał we wszystkich punktach, znajdujących się w odległości r od A , t. j. we wszystkich punktach powierzchni kulistej, opisanej dokoła A promieniem r . Taką powierzchnia, dla której wszystkich punktów wypada ta sama wartość potencjału, nazywa się *powierzchnią jednakowego potencjału* albo *powierzchnią ekwipotencjalną*. Oczywiście dokoła A opisać można cały szereg powierzchni kulistych o różnych promieniach (rys. 677); wszystkie one będą powierzchniami jednakowego potencjału, na każdej z nich wszakże potencjał będzie miał inną wartość, tem mniejszą liczbowo, im większy jest promień kuli.

Przypuśćmy teraz, że pole elektrostatyczne uwarunkowane jest przez dwa naboje $+e_1$ i $+e_2$, znajdujące się w punktach A i B (rys. 678). Jaką wartość będzie miał potencjał w którymkolwiek punkcie M pola? Odpowiedź na pytanie dajemy, opierając się na przyjętej

przez nas przy omawianiu podstaw mechaniki zasadzie niezależności działania sił; twierdziliśmy i twierdzimy, że działanie jednej siły nie zmienia działania innej. Otóż i w danym razie powiemy, że skoro nabój, mieszczący się w A , warunkuje, iż przeniesienie, z nieskończoności do punktu M jakiegoś naboju ϵ wymaga pracy q_1 , zaś nabój w B warunkuje przy tem samym przeniesieniu pracę q_2 , to oba razem warunkują wykonanie pracy $= q_1 + q_2$; z tego prostym wynikiem jest, że potencjał w punkcie M , uwarunkowany przez naboje w A i B , równa się sumie potencjałów, które w tym punkcie warunkuje każdy oddzielnie nabój, mieszczący się w A i B , a więc

$$V = V_1 + V_2 = \frac{e_1}{r_1} + \frac{e_2}{r_2} \dots \dots \dots (1)$$

Rysunek 679 przedstawia rozwiązane w ten sposób zadanie co do wartości potencjału w poszczególnych punktach pola, wytworzonego



Rys 677.



Rys 678.

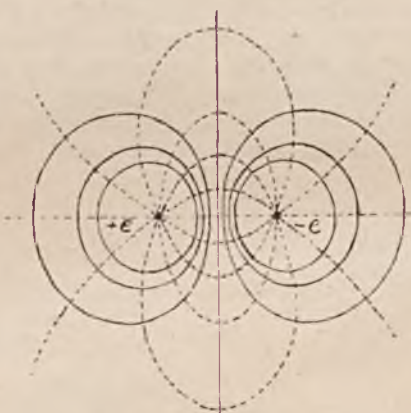
przez dwa naboje $+e$ i $-e$; zaznaczone tam są niektóre powierzchnie ekwipotencjalne (linje ciągłe).

Radzimy czytelnikowi rozwiązać w podobny sposób zagadnienie co do wartości potencjału w różnych punktach pola, uwarunkowanego przez 2 lub więcej nabojów dowolnych.

Na rys. 679 oprócz powierzchni jednakowego potencjału wykreślone są kropkami linje sił; przecinają one powierzchnię jednakowego potencjału zawsze *pod kątem prostym*, t. j. w każdym punkcie pola linja siły przebiega zawsze prostopadle do powierzchni ekwipotencjalnej. Łatwo to zrozumieć: przesunięcie jakiegokolwiek naboju po powierzchni jednakowego potencjału oznacza przesunięcie tego naboju przez punkty, w których potencjał ma wartość tę samą; praca przesunięcia będzie zatem w danym razie $= 0$ (albowiem różnica potencjałów $= 0$ (patrz wzór (10) na str. 52); z drugiej strony praca przesunięcia mierzy się, jak wogóle każda praca, iloczynem z wartości działającej siły przez przesunięcie i przez cosinus kąta, zawartego między kierunkiem siły a kierunkiem przesunięcia — praca zatem jest równa zeru, jeżeli przesunięcie jest prostopadłe do kierunku siły; skoro prze-

sunięcie zachodzi tu po powierzchni jednakowego potencjału, więc i powierzchnia ta musi z poszczególnymi linjami pola tworzyć kąty proste.

Nabój $+\varepsilon$, posiadając zupełną swobodę ruchów w danym polu elektrostatycznym, poruszałby się według którejkolwiek linii pola w kierunku malejących natężeń dodatnich, t. j. od miejsca o wyższym



Rys. 679.

potencjale dodatnim do miejsca o mniejszej wartości potencjału dodatniego, ewentualnie ku rosnącym potencjałom ujemnym. Wręcz przeciwnie poruszałby się swobodny nabój ujemny.

290. Powierzchnia naelektryzowanego przewodnika jest powierzchnią ekwipotencjalną.

Każdy naelektryzowany przewodnik posiada nabój, rozmieszczony w pewien sposób na jego powierzchni. Zagadnienie o potencjale w poszczególnych punktach pola dokoła takiego przewodnika jest zagadnieniem złożonym, należy tu bowiem sumować potencjały, uwarunkowane przez naboje, mieszczące się w poszczególnych punktach powierzchni przewodnika. W pewnych razach sprawa daje się uprościć; tak np. na naelektryzowanej kuli metalowej, zawieszonej na cienkiej nitce jedwabnej zdala od innych przewodników, rozmieszczenie naboju na powierzchni uważać możemy za jednostajne (gęst. elektr. = const.). Ze znacznem tedy przybliżeniem możemy powiedzieć, że powierzchnie jednakowego potencjału są tu powierzchniami kul współśrodkowych z daną kulą (rys. 680); przecinają one pod kątem prostym linje pola, przebiegające tu według przedłużonych promieni kuli.

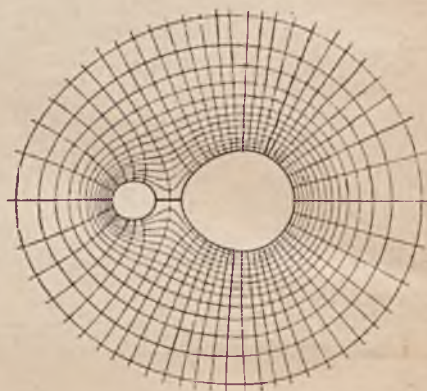
Dla przewodnika o innym kształcie wnioskowanie o przebiegu linii pola i powierzchniach ekwipotencjalnych jest trudniejsze. Dla przykładu przytaczamy bez bliższych wyjaśnień rysunek 681, wyo-

brażący układ linii pola oraz powierzchni ekwipotencjalnych dookoła dwu naelektryzowanych przewodników kształtu niemal kulistego, połączonych drutem.

Jakikolwiek zresztą jest przebieg powierzchni ekwipotencjalnych dookoła naelektryzowanego przewodnika, *sama powierzchnia tego przewodnika jest również powierzchnią stałego potencjału*. W rzeczy samej dodanie do naboju, istniejącego już na przewodniku, nowego naboju wymaga, jak wyżej wyjaśniliśmy, pracy; zatem niewątpliwie mamy prawo mówić, że poszczególne punkty powierzchni posiadają określony potencjał elektryczny. Wszakże, jeżeli nabój na przewodniku jest w równowadze, t. j. rozmieszczony jest w określony sposób na jego powierzchni, dzieć się to może tylko wtedy, gdy wszyst-



Rys. 680.



Rys. 681.

kie punkty powierzchni przewodnika posiadają jeden i ten sam potencjał. Tylko bowiem w tym razie linje pola mogą wybiegać z przewodnika prostopadle do jego powierzchni *); gdyby zaś tej prostopa-

*) Nabój, mieszczący się w jakimkolwiek miejscu powierzchni naelektryzowanego przewodnika, podlega wypadkowemu działaniu naboju, mieszczących się na reszcie powierzchni. Ta wypadkowa, skierowana właśnie prostopadle do powierzchni, usiłuje jakgdyby zepchnąć ten nabój z przewodnika w głąb otaczającego dielektryku. Objawia się w tem t. zw. *ciśnienie elektrostatyczne*, które można wykazać doświadczalnie na przewodniku o podlegającej odkształceniu powierzchni. Np., gdy elektryzujemy bańkę mydlaną (rys. 682), zwiększa się ona pod działaniem rzeczzonego ciśnienia. Rys. 682 wyjaśnia przebieg doświadczenia: bańkę wydymamy na końcu rurki metalowej, osadzonej w rurce szklanej; rurkę metalową łączymy drutem z biegunem maszyny elektrostatycznej.



Rys. 682.

dłości nie było, siły, działające na naboje w poszczególnych miejscach powierzchni, miałyby składowe w kierunku tej powierzchni, co powodowałoby ruch nabojów (elektronów) czyli zaprzeczałoby istnieniu równowagi.

Jaka jest wreszcie wartość potencjału wewnątrz naelektryzowanego przewodnika? Wiemy już, że wewnątrz takiego przewodnika nie stwierdzamy działania sił elektrycznych, niema tam pola elektrostatycznego, t. j. ewentualne przesuwanie jakichkolwiek nabojów elektrycznych nie wymaga pracy. Praca wszakże przy takim przesunięciu mierzy się iloczynem z wartości naboju przez różnicę potencjałów w punktach, między którymi dokonywa się przesunięcia (wzór 10 na str. 52); zatem ta różnica potencjałów musi być dla dowolnych punktów wewnątrz przewodnika, albo dla jakiegokolwiek punktu wewnątrz i punktu na powierzchni równa zeru; innymi słowy wewnątrz naelektryzowanego przewodnika wartość potencjału jest stała, równa wartości potencjału na jego powierzchni (zakładamy oczywiście, że wewnątrz (w wydrążeniu) rozważanego przewodnika niema innych ciał naelektryzowanych).

291. Związek między wartością potencjału w danym miejscu pola a wartością natężenia w temże miejscu.

Jak widzieliśmy w ust. 287, przebieg linii oraz rurek pola elektrostatycznego przedstawia doskonale wartości i kierunki natężenia pola w poszczególnych jego miejscach; wartość natężenia mianowicie, przy zrobionej uprzednio odpowiedniej umowie, dana jest przez liczbę rurek, przecinających prostopadłe do ich biegu ustawioną powierzchnię 1 cm^2 ; im rurki te w danym miejscu pola są gęściej sfłoczone, tem jest natężenie pola w tem miejscu większe i odwrotnie.

Między wartością potencjału w danym miejscu pola elektrostatycznego a wartością natężenia pola w tem miejscu istnieje również pewna zależność, którą pragniemy tu wyjaśnić.

Przypuśmy, iż mamy pole jednorodne między dwiema rozległymi płytami metalowymi AB i CD , z których jedna naładowana jest dodatnio, a druga ujemnie, lub też, że użyjemy innego zrozumiałego teraz zwrotu, — jedna posiada określonej wartości potencjał dodatni, druga zaś ujemny. Część tego pola wyobraża rys. 683. Linje pola przebiegają tu równoległe do siebie i prostopadłe do powierzchni płyt, powierzchnie zaś ekwipotencjalne, przechodzące przez którekolwiek punkty, przypadające między płytami, są płaszczyznami, równoległymi do płyt. MN i PQ przedstawiają dwie takie powierzchnie, na których wartości potencjałów są odpowiednio V_1 i V_2 .

Oznaczmy odległość między temi powierzchniami przez l , zaś wartość stałą natężenia we wszystkich punktach danego pola przez F ; gdyby z któregookolwiek punktu powierzchni MN do któregookolwiek

punktu powierzchni PQ miał być przeniesiony nabój e , praca przeniesienia tego naboju wynosiłaby (patrz wzór 10 na str. 52).

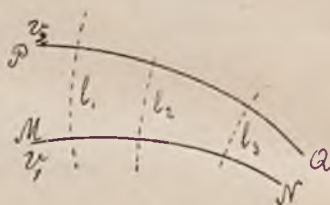
$$e (V_1 - V_2) \dots \dots \dots (1)$$

Z drugiej strony na nabój e w polu o natężeniu F działa siła Fe (p. wzór 4 na str. 33); zatem przesunięciu naboju e na drodze l między powierzchniami MN i PQ odpowiada wykonanie pracy

$$F \cdot e \cdot l \dots \dots \dots (2)$$



Rys. 683.



Rys. 684.

Wyrażenia (1) i (2) dają wartość tej samej pracy, możemy więc napisać

$$Fel = e (V_1 - V_2)$$

albo po podzieleniu obu stron równości przez e

$$Fl = V_1 - V_2 \dots \dots \dots (3)$$

Z (3) otrzymujemy

$$F = \frac{V_1 - V_2}{l} \dots \dots \dots (4)$$

Jak widzimy, istnieje związek pomiędzy wartościami potencjału i natężenia. Jeżeli stosunek $\frac{V_1 - V_2}{l}$ nazwiemy spadem potencjału na drodze l (porównaj spad temperatury w rozdz. o przewodnictwie cieplnym, t. I, ust. 180), to, jak wypada, ten spad potencjału daje nam właśnie tu wartość natężenia pola.

Rozpatrzymy teraz przypadek pola niejednorodnego. Przypuśćmy, że rys. 684 wyobraża dwie jakkolwiek przebiegające w polu powierzchni-
nie ekwipotencjalne o wartości potencjałów V_1 i V_2 , linje zaś kropko-
wane wyobrażają linje pola, przecinające — jak zawsze — powierzch-
nie ekwipotencjalne pod kątem prostym. Przeniesienie naboju e z któ-
regokolwiek punktu powierzchni MN do któregokolwiek punktu po-
wierzchni PQ wymaga wykonania pracy

$$e (V_1 - V_2) \dots \dots \dots (5)$$

Wszakże natężenie pola w różnych miejscach jest tu różne, a na-
wet na każdej linii pola wartość ta się zmienia od punktu do punktu.
Dla któregokolwiek odcinka z narysowanych tu linii pola (l_1, l_2, l_3)
można mieć tem większe prawo do założenia, że we wszystkich punk-
tach odcinka natężenie jest stałe, im krótszy jest ten odcinek. Założyw-
szy tedy, że wszystkie te odcinki są bardzo krótkie, aczkolwiek sobie
nierówne, oznaczamy, że na odcinku l_1 wartość natężenia pola wyno-
si (ściśle mówiąc średnio) F' , na odcinkach zaś l_2 i l_3 odpowiednio F''
i F''' . Wówczas przesunięciu naboju e po odcinku l_1 linii pola odpowia-
dać będzie wykonanie pracy

$$F'el_1 \dots \dots \dots (6)$$

zaś przesunięciu tegoż naboju po odcinkach l_2 i l_3 odpowiadać będą
wartości pracy

$$F''el_2 \text{ i } F'''el_3 \dots \dots \dots (7)$$

Ponieważ wszystkie te wartości równają się $e (V_1 - V_2)$, przeto na-
pisać możemy

$$\left. \begin{aligned} F'el_1 &= e (V_1 - V_2) \\ F''el_2 &= e (V_1 - V_2) \\ F'''el_3 &= e (V_1 - V_2) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

lub po podzieleniu obu stron równości przez e

$$\left. \begin{aligned} F'l_1 &= V_1 - V_2 \\ F''l_2 &= V_1 - V_2 \\ F'''l_3 &= V_1 - V_2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

skąd wreszcie otrzymujemy

$$F' = \frac{V_1 - V_2}{l_1}; \quad F'' = \frac{V_1 - V_2}{l_2}; \quad F''' = \frac{V_1 - V_2}{l_3} \dots (10)$$

I tu więc natężenie pola w poszczególnych jego miejscach dane jest
przez spad potencjału, ale spadu tego nie można brać na dowolnie
długich odcinkach linii pola, gdyż wzdłuż tych linii zachodzi zmiana

natężenia. Biorąc odcinki te pewnej skończonej wielkości, otrzymamy to, co moglibyśmy nazwać średnimi wartościami natężenia na danych odcinkach; natomiast dla znalezienia wartości rzeczywistych natężenia w jakimkolwiek punkcie, należy wziąć ten spad na tak zwanym nieskończeniu małym odcinku linii pola, mieszczącej rozważamy punkt *).

Poza tem, jak to widać z rysunku i ze wzoru (10), natężenie pola mamy mniejsze w tych miejscach, gdzie dalej od siebie przypadają powierzchnie ekwipotencjalne o określonej wartości różnicy potencjałów; wszak $F' < F'' < F'''$, gdyż $l_1 > l_2 > l_3$. Przebieg zatem powierzchni ekwipotencjalnych, wykreślonych tak np., by dla każdej z nich kolejno wartość potencjału była coraz to większa, względnie mniejsza o tę samą wielkość, daje nam doskonałe pojęcie o rozmieszczeniu wartości natężenia w polu — tam, gdzie te powierzchnie przypadają bliżej siebie, gdzie są, że tak powiemy, zagęszczone, tam wartość natężenia jest większa.

Proponujemy czytelnikowi przestudjować rys. 681 i wywnioskować z rozmieszczenia powierzchni ekwipotencjalnych, w których miejscach wyobrażonego tam pola natężenie jest większe, w których zaś mniejsze.

292. Co nam dają wskazania elektroskopu?

Z tego, co powiedzieliśmy wyżej, wynika, że naładowany elektroskop posiada określonej wartości potencjał elektryczny. Im większy nabój — przy pozostałych warunkach niezmiennych — ma elektroskop, tem większe jest rozchylenie jego listków, a zarazem tem większej pracy potrzeba dla zbliżenia doń i udzielenia mu nowego naboju, tem wyższy zatem jest jego potencjał.

Z takiego więc czy innego rozchylenia listków elektroskopu wnosić możemy o jego potencjale. Wszakże celowo umieściliśmy w poprzednim zdaniu słowa: „przy pozostałych warunkach niezmiennych“. Zróbmy oto następujące doświadczenie. Po naładowaniu elektroskopu zbliżmy do jego główki rękę (nie dotykając nią jednak główki) albo inny jakikolwiek przewodnik, połączony z ziemią, a dostrzeżemy, że listki elektroskopu opadają; gdy oddalimy rękę lub ten przewodnik, rozchylenie listków staje się takim jak było na początku, o ile izolacja w elektroskopie jest dobra i nie traci on zbyt prędko udzielonego mu naboju. Zbliżenie do naładowanego elektroskopu przewodników nieuziemionych wpływa również, jakkolwiek w mniej widoczny sposób, na rozchylenie jego listków.

Doświadczenie to poucza nas, że, chcąc wnosić cokolwiek określonego z rozchylenia listków elektroskopu, musimy go utrzymywać w jakimś określonym położeniu względem otaczających przewodników. Niebawem wyjaśnimy, o co tu właściwie chodzi; tymczasem poprze-

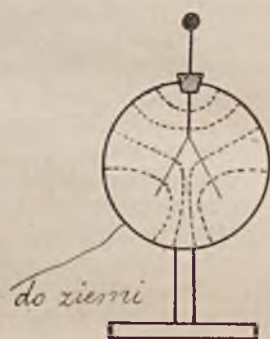
*) Porównaj wyznaczanie prędkości w ruchu jednostajnym, a także prędkości średniej i rzeczywistej w ruchu zmiennym (T I, ust. 19 i 31).

staniemy na zaznaczeniu, że elektroskop ustawiamy zawsze możliwie daleko od wszystkich otaczających przewodników, no i — jak już wyżej mówiliśmy — metalową osłonę elektroskopu zawsze uziemiamy. Otóż, o ile chodzi o uziemienie tej osłony, rzecz ta winna się nam teraz przedstawiać bardziej wyraźnie. Wiemy już (ust. 277), że, jeżeli po naładowaniu elektroskopu ładować będziemy osłonę (elektroskop stać wtedy winien na izolującej podstawie), wskazania elektroskopu będą się zmieniać w zależności od tego. W szczególności, jeżeli połączymy główkę elektroskopu z osłoną, to mimo ustawienia elektroskopu na izolującej podstawie (np. na płycie z parafiny), nie będzie on dawał najmniejszego rozchylenia listków, jakkolwiekbyśmy go elektryzowali. Wszakże w tym ostatnim przypadku osłona elektroskopu wraz z prętem, główką i listkami tworzy jedną całość, jeden przewodnik; przy takim czy innym naelektryzowaniu całość ta posiada taki czy inny potencjał, ale — co stanowi istotę rzeczy — potencjał jest ten sam dla wszystkich części tej całości. Co innego, gdy osłona oraz pręt z listkami są od siebie oddzielone i każda z tych części ma inny potencjał — wtedy listki się rozchylają ale, jak możemy wnosić, rozchylają się rozmaicie *w zależności od różnicy potencjałów, listków i osłony*.

Wprowadzając określenie potencjału, uciekaliśmy się do rozumowania, w którym zakładaliśmy zbliżanie naboju z nieskończoności do danego punktu pola albo oddalanie naboju z nieskończoności. Rzecz prosta, w doświadczeniu nie mamy nigdy do czynienia z nieskończonością; potrzebne nam to było w rozumowaniu, gdy chodziło o wskazanie teoretyczne miejsca, gdzie niema wcale działania sił pola i gdzie potencjał możemy uważać za bezwzględnie równy zeru. Teraz, gdy mamy potrzebne pojęcia już ustalone, możemy sobie przypomnieć, że w doświadczeniu dane nam jest jedynie obracanie się w dziedzinie względności i że wszędzie tam, gdzie o czemkolwiek decydują *różnice*, można obrać sobie za punkt wyjścia to, co będzie odpowiednio dogodnie. Tak np., gdy chodzi o wzniesienie poszczególnych punktów ziemi, obieramy za punkt wyjścia poziom morza; w skali temperatur obieramy sobie za 0° temperaturę topniejącego lodu; i to zupełnie nam wystarcza, jeżeli chodzi o ustalenie różnic czy to wysokości czy to temperatury. Podobnie, jeżeli chodzi o różnice potencjału, możemy obrać pewien potencjał za punkt wyjścia, oznaczając go mianem potencjału zerowego, i w stosunku do tego względnego zera potencjału ustalać wszelkie różnice potencjałów. Przyjmujemy tedy *potencjał ziemi* za taki *potencjał zerowy*, a zatem potencjał każdego uziemionego przewodnika także za równy zeru. Zgodnie więc z rozumowaniem, podanem w ust. 288, będziemy mówili o pewnym przewodniku, że potencjał jego wynosi dwie, pięć i t. d. jednostek potencjału dodatniego, jeżeli przeniesieniu jednostkowego naboju dodatniego z powierzchni tego przewodnika na ziemię będzie towarzyszyło wykonanie przez siły pola pracy równej dwu, pięciu itd. jednostkom pracy; natomiast potencjał nazywać będziemy ujemnym, gdy w tymże samym przypadku przenoszenia dodatniego naboju trzeba będzie wykonywać pracę przeciw siłom pola. Co do tego, jak znaleźć tę pracę, jak z tego wnioskować

o potencjał, wszystko to pokolei wyjaśnimy; narazie niech czytelnika zadowolą to, że już nie będzie musiał myśleć o wędrowkach w nieskończoność i z nieskończoności.

Wróćmy do elektroskopu. Osłona, połączona z ziemią, posiada zatem potencjał, równy zeru; pręt z listkami ma, dajmy na to, potencjał dodatni. Pomiedzy prętem z listkami, mającym nabój $+$, a osłoną, mającą wzbudzony na niej nabój ujemny, mamy pole elektrostatyczne, w którym przebieg linii sił przedstawia się mniej więcej tak, jak to widzimy na rys. 685. Rurki sił, przebiegające między listkami, o ile im przypiszemy własności niby sprężyste, o jakich myślał Faraday (rozpieranie boczne), odpychają te listki od siebie; rurki przebiegające między listkami a osłoną przy panujących w nich napięciach podłużnych, usiłują przybliżyć listki ku osłonie, a więc również wpływają na oddalanie się listków jednego od drugiego. Ilościowa strona tego zja-



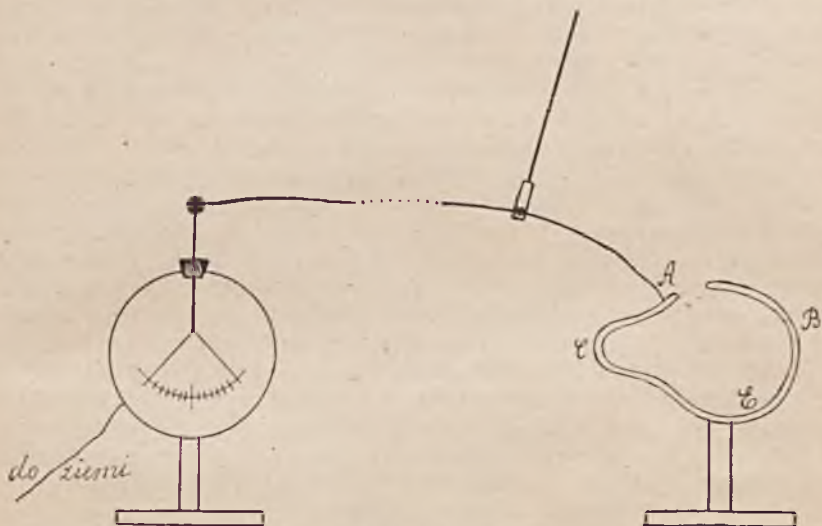
Rys. 685.

wiska zależy od różnicy potencjałów pręta z listkami i osłony, czyli — wobec stałej wartości potencjału osłony — od wartości potencjału pręta z listkami.

Gdy zapomocą długiego drutu, połączanego z dostatecznie długą izolującą rękojeścią, łączymy elektroskop z którymkolwiek punktem powierzchni zewnętrznej czy wewnętrznej *umieszczonego dość daleko* od elektroskopu przewodnika naelektryzowanego dowolnego kształtu (Rys. 686), rozchylenie listków elektroskopu pozostaje niezmiennie, niezależnie od tego, którego mianowicie punktu powierzchni dotyka drut łączący. Rozchylenie listków elektroskopu informuje nas właśnie o tej stałej dla wszystkich punktów naelektryzowanego przewodnika wartości jego potencjału, która jest jednocześnie wartością potencjału elektroskopu *), stanowiącego jedną całość elektryczną z połączonym

*) Oczywiście, gdy mowa o ładowaniu elektroskopu lub łączeniu z elektroskopem, ma się na myśli jego pręt z listkami.

z nim przewodnikiem *). Ten sam wynik doświadczenia otrzymamy, gdy zamiast jednego przewodnika weźmiemy kilka izolowanych i połączonych ze sobą metalicznie naelektryzowanych przewodników i łączyć



Rys. 686.

będziemy z elektroskopem którykolwiek punkt powierzchni któregośkolwiek z tych przewodników albo łączących je drutów.

293. Jak daje się mierzyć potencjał.

Gdy łączymy drutem naelektryzowany przewodnik z elektroskopem, część jego naboju przechodzi na elektroskop. Według współczesnych wyobrażeń przebiega przez drut w tę, czy inną stronę pewna liczba elektronów, poczem ustala się równowaga, polegająca na wyrównaniu się potencjałów przewodnika i elektroskopu. Podobnie, gdy wstawiamy termometr do cieczy, pewna ilość ciepła przechodzi czy to z termometru do cieczy czy z cieczy do termometru, aż się ustali równowaga termiczna; albo gdy połączymy rurką dwa naczynia, zawierające wodę, nalaną do różnych poziomów, woda popłynie poprzez rurkę łączącą, aż się ustali równowaga i poziom cieczy będzie w obu naczyniach przypadłał na tej samej wysokości. Tak jak w ostatnim przykładzie ustalenie się równowagi poprzedzone jest przez prąd wody, w przedostatnim — przez prąd cieplny, tak w rozważanym przypadku procesu elektrycznego ruch elektronów, poprzedzający ustalenie się

*) Podobnie termometr, wstawiony do cieczy, wskazuje swoją własną temperaturę, która, o ile równowaga cieplna już się ustaliła, jest jednocześnie temperaturą cieczy.

równości potencjału, stanowi *prąd elektryczny*. Wzmiankując o tem, odkładamy szczegółowe omówienie zjawiska prądu na później.

Musimy teraz zwrócić uwagę, że na to, by elektroskop mógł nas w określony sposób pouczyć o stanie elektrycznym tego czy innego przewodnika, połączenie z elektroskopem winno możliwie najmniej wpływać na zmianę tego stanu, inaczej to, co wskaże elektroskop, nie będzie już odpowiadało stanowi rzeczy, który chcieliśmy poznać. Zobaczymy dalej, że praktyczne rozwiązanie tego zadania jest możliwe, jakkolwiek nieraz nasuwa poważne trudności.

Chodzi jednak o coś więcej jeszcze. Mianowicie, pragniemy nie tylko móc stwierdzić, że — dajmy na to — potencjał tego lub innego przewodnika jest mniejszy lub większy od potencjału przewodnika innego, ale chcemy móc tę wartość potencjału (w stosunku do przyjętego zerowego potencjału ziemi) zmierzyć. Gdybyśmy mieli przewodniki, naelektryzowane do wiadomego dowolnego potencjału (jak zobaczymy, realizacja tego jest możliwa), moglibyśmy elektroskop, zaopatrzoney w skalę, łączyć z temi przewodnikami, a, notując za każdym razem położenie listków elektroskopu na skali, *wycechowałibyśmy* ten przyrząd, czy to w jednostkach elektrostatycznych potencjału, czy to w jednostkach praktycznych (woltach, wzgl. jego wielokrotnościach lub ułamkach). Mając taki wycechowany elektroskop, którybyśmy już nazwali *elektrometrem* — z powodu, że pozwala na dokonanie pomiaru (pierwiastek „metr“ oznacza miarę po grecku), łączylibyśmy go z jakimkolwiek naelektryzowanym przewodnikiem i wprost na skali odczytywalibyśmy wartość potencjału tego przewodnika.

Wszakże trzeba od czegoś zacząć i znaleźć gdzieś taki punkt oparcia, na którym czulibyśmy się zależni jedynie od rzeczy, przez nas ustalonych, a więc dobrze nam znanych. Taki punkt oparcia wskazał nam słynny fizyk angielski William Thomson*), podając pomysł t. zw. elektrometru bezwzględego. Jedną z odmian tego przyrządu widzimy na rys. 687, z którego poznać możemy zasadę jego budowy i użytkowania.

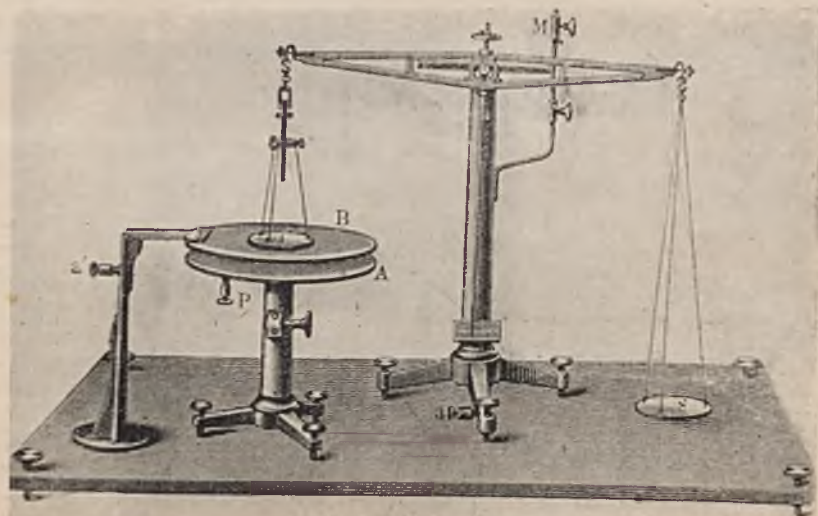
Widzimy tam metalową izolowaną płytę *A* kształtu kołowego, którą przy pomocy śrubki *P* łączyć można z przewodnikiem naelektryzowanym o potencjale nieznaney wartości. Nad płytą *A* mieści się druga płyta metalowa *B*, która przy pomocy śrubki *a'* jest uziemiona. Odległość między płytami *A* i *B* daje się regulować przez podnoszenie lub obniżanie płyty *A* zapomocą obrotu główki *K*. W środku płyty *B* zrobiony jest kołowy otwór, w którym przypada zawieszona u jednego ramienia czulej wagi kołowa tarcza metalowa *C*, mająca taką samą grubość jak płyta *B* oraz średnicę eokolwiek tylko mniejszą od średnicy otworu kołowego, tak, że między *C* i *B* utworzona jest wąska szpara kołowa; *B* zatem jest płaskim pierścieniem, okalającym tarczę *C*. Tarcza *C* połączona jest z pierścieniem *B* tak cieniutkim wiotkim dru-

*) William Thomson (1824—1908) zaszczycony za zasługi tytułem lorda Kelvina, profesor uniwersytetu w Glasgow, jeden z największych fizyków czasów ostatnich.

cikiem (niewidocznym na rysunku), że nie hamuje on jej ruchów. Dzięki temu połączeniu tarcza C jest uziemiona *).

Podczas gdy płyta A nie posiada ładunku, wyregulowuje się położenie tarczy C tak, by przypadła w jednej płaszczyźnie z B , gdy belka wagi jest w równowadze. Dwa pręciki poziome, przesuwalne na pręcie pionowym M , umocowują się tak jeden powyżej, drugi poniżej belki, by przy ewentualnem wychyleniu się jej z położenia równowagi mogła się ona oprzeć o te pręciki, unikając w ten sposób zbyt wielkiego wychylenia.

Gdy płyta A jest połączona z przewodnikiem, którego potencjał V chcemy zmierzyć, a więc gdy jest ona naładowana, dajmy na to, do-



Rys. 687.

datnio, C i B ładują się przez indukcję ujemnie i ruchoma tarcza C zbliżałaby się do A , gdybyśmy nie zrównoważyli tego przyciągania odpowiednim odważnikiem, położonym na szalce S , dobierając ten odważnik tak, by w dalszym ciągu tarcza C przypadła w płaszczyźnie otaczającego ją „pierścienia ochronnego“ B . Między A oraz B i C mamy wtedy pole elektrostatyczne, które w części środkowej — tam gdzie przypada tarcza C , może być uważane za jednorodne (p. ust. 285). Pierścień B , u którego krawędzi zewnętrznej pole nie jest już jednorodne (porów. rys. 665), służy właśnie do tego, by ochronić jednorodność pola przy C . Przebieg linii danego pola przedstawia rys. 688. na którym zaznaczony jest przez D drucik, łączący B i C .

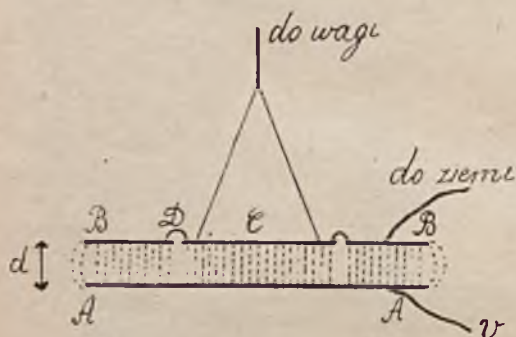
*) Można ewentualnie uziemienia tego dokonać za pośrednictwem drucików, na których jest zawieszona tarcza C , oraz belki i słupka wagi, połączonego z ziemią przy pomocy śrubki a ; wtedy niepotrzebny jest drucik, łączący B i C .

Jeżeli m oznacza masę odważników, leżących na szalce S i równoważących przyciąganie C przez A , zaś g jest wartością przyśpieszenia grawitacyjnego w miejscu doświadczenia, wówczas

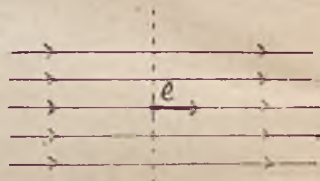
$$f = mg \dots \dots \dots (1)$$

daje wartość tej siły przyciągania.

Znajdźmy teraz wartość tejże siły, wyrażoną w zależności od mierzonoego potencjału V . Zgodnie z określeniem natężenia pola (ust. 284), jeżeli w polu jednorodnym o natężeniu F umieścimy nabój elektryczny e (rys. 689), nabój ten będzie podlegał działaniu siły o wartości eF . Gdybyśmy jednak, oznaczając przez $-e$ nabój, wzbudzony na tarczy C , zaś przez F natężenie pola między płytami, chcieli przez iloczyn eF wyrazić wartość siły, której podlega nabój na tarczy, a przeto i sama tarcza C , popełnilibyśmy błąd (znak może tu nie być brany pod uwa-



Rys. 688.



Rys. 689.

gę, chodzi nam bowiem o wartość liczbową siły; pole jest tu skierowane od A do C , przeto nabój ujemny na C podlega działaniu siły o kierunku, przeciwnym kierunkowi pola). W przypadku, przedstawionym na rys. 689, pole elektrostatyczne znajduje się wszędzie dookoła naboju i całe działanie na nabój może być rozważane jako suma dwu równych działań, wywieranych przez część pola, przypadającą po lewej stronie na rysunku względem przekroju pola, oznaczonego kropkami, oraz taką samą część po stronie prawej. Tymczasem w stosunku do tarczy C pole istnieje tylko po jednej stronie. Wnosimy z tego, że wartość siły szukanej jest

$$f = \frac{eF}{2} \dots \dots \dots (2)$$

Dalej, jak wiemy z ust. 287, każdy nabój e rozważać możemy jako źródło $4\pi e$ rurek jednostkowych, względnie, o ile to jest nabój ujemny — miejsce, gdzie się kończy tyłeż rurek, wychodzących z innego źródła. Zatem liczba rurek Faraday'owskich, wiążących, że tak powie-

my, tarczę C z płytą A , jest $4\pi e$, jeżeli zaś S oznacza powierzchnię tarczy C , to zgodnie z określeniem stosunku, jaki zachodzi między wartością liczbową natężenia pola a gęstością rurek, mamy

$$F = \frac{4\pi e}{S} \dots \dots \dots (3)$$

czyli

$$e = \frac{FS}{4\pi} \dots \dots \dots (4)$$

Wreszcie, jeżeli różnica potencjałów między tarczą C a płytą A jest V , odległość zaś między płytami $= d$, to według wzoru (4) ust. 291

$$F = \frac{V}{d} \dots \dots \dots (5)$$

Ze wzorów (2) i (4) mamy:

$$f = \frac{eF^2}{2} = \frac{F^2 \cdot S}{8\pi} \dots \dots \dots (6)$$

zaś po uwzględnieniu (5)

$$f = \frac{V^2 \cdot S}{8\pi d^2} \dots \dots \dots (7)$$

Porównywając wyrażenia (1) i (7) jako dające tę samą wielkość, otrzymujemy

$$mg = \frac{V^2 \cdot S}{8\pi d^2} \dots \dots \dots (8)$$

skąd

$$V^2 = \frac{8\pi mgd^2}{S}$$

i ostatecznie

$$V = d \sqrt{\frac{8\pi mg}{S}} \dots \dots \dots (9)$$

Wymierzywszy zatem powierzchnię S tarczy C (oczywiście mowa tu nie o całkowitej powierzchni, a o jednej tylko jej stronie) i odległość d między płytami, znając g dla danego miejsca i wreszcie masę m odważników, równoważących dane przyciąganie elektryczne, wyznaczamy szukaną wartość potencjału, ściśle biorąc jego różnicę względem potencjału ziemi, przyjętego za $= 0$.

Zatrzymajmy się jeszcze chwilę na opisanym tu przyrządzie i rozważmy rzecz z innego nieco stanowiska. Wyobraźmy mianowicie sobie, jak to czynił Faraday, że obserwowane przyciąganie tarczy C przez A jest wynikiem niby sprężystego napięcia mieszczących się między C i A rurek pola. Wzór (6) daje odrazu wartość tego napięcia (p. t. I, ust. 85):

$$\frac{f}{S} = \frac{F^2}{8\pi}, \dots \dots \dots (10)$$

którą podaliśmy na str. 48 bez dowodu.

Ćwiczenia i zadania.

425. Pole elektrostatyczne utworzone jest przez nabój $= 100$ jedn. el. st., mieszczą się na małej kuleczce, której wymiary można zaniedbać. Znaleźć wartość natężenia pola w odległości 5 cm, 10 cm, 20 cm od środka kuleczki?

426. W punktach A i B , leżących w odległości 10 cm jeden od drugiego, mieszczą się naboje elektryczne, tworzące pole. Wykreślić linje pola, przypadające w płaszczyźnie rysunku, gdy:

a) w punkcie A nabój $= + 10$ jedn. el. st., zaś w B nabój $= - 5$ jedn. el. st.?

b) w A nabój $= + 15$ jedn. el. st., w B nabój $= + 5$ jedn. el. st.

427. Dla obu przypadków zad. 426 wyznaczyć wartości potencjałów w poszczególnych punktach pola. Wykreślić kilka linii ekwipotencjalnych (przekrojów powierzchni ekwipotencjalnych z płaszczyzną rysunku)?

428. Przewodnik izolowany posiada pewien nabój dodatni. Aby mu udzielić jeszcze $+ 100$ jedn. el. st., trzeba wykonać pracę $= 10^3$ ergów. O ile woltów wzrośnie przytem wartość potencjału przewodnika?

429. Wykreślić linje pola w przypadku naelektryzowanych dwu kulek z rdzenia bżowego, jak na rys. 650 i wytłumaczyć „odpychanie“ się kulek, posługując się Faraday’owskim wyobrażeniem o własnościach rurek pola?

430. Uczynić to samo, co w zad. 429 dla przypadku naelektryzowanego pręta, przyciągającego nienaelektryzowaną kulkę z rdzenia bżowego.

431. Uczynić to samo, co w zad. 429 dla przypadku, gdy do główki nienaładowanego elektroskopu zbliżamy pręt naelektryzowany?

432. Uczynić to samo, co w zad. 429 dla przypadku, gdy dwie kule izolowane o nabojach równych, lecz różnoimiennych najpierw są umieszczone w pewnej odległości od siebie, a potem w odległości mniejszej?

433. Uczynić to samo, co w zad. 432, lecz w przypadku, gdy obie kule mają naboje równe znaku tego samego.

434. Co wskaże nam elektroskop, który połączymy przy pomocy długiego drutu z którymkolwiek punktem powierzchni wewnętrznej wydrążonego, izolowanego i naelektryzowanego przewodnika?

435. W puszcze Faraday’a mieści się zawieszona na nitce jedwabnej naelektryzowana kula metalowa. Jeżeli puszkę uziemiamy, połączony z nią elektroskop nie daje żadnego wychylenia. Wszakże na puszcze mieści się wtedy nabój elektryczny. Czy niema w tem sprzeczności?

436. Umieszczamy izolowaną kulę metalową A , nie posiadającą naboju, w pobliżu przewodnika B , naelektryzowanego ujemnie. Na chwilę łączymy te dwa przewodniki przy pomocy drutu, trzymanego za izolującą rękogę. Potem po rozłączeniu, nie zmieniając względnego położenia przewodników A i B , uziemiamy przewodnik B . Co się dzieje z wartością potencjału przewodnika A przy tych czynnościach?

437. W jaki sposób daje się wykazać doświadczalnie, że dwie części jednego i tego samego przewodnika mogą posiadać naboje różnych znaków, mając jednocześnie tę samą wartość potencjału?

438. W pobliżu izolowanego naelektryzowanego przewodnika A mieści się uziemiony przewodnik B . Czy nabój, wzbudzony na B , jest równy, większy, czy mniejszy od naboju na A . Uzasadnić należyście odpowiedź.

439. Czy we wzorze (9) ust. 293 wymiary prawej i lewej strony są zgodne? Co właściwie daje nam ten wzór?

440. W jaki sposób można, rozporządzając elektrometrem bezwzględny, wycechować elektroskop listkowy, zaopatrzony w skalę, i w ten sposób uczynić z tego elektroskopu również elektrometr?

441. Z jaką dokładnością daje się mierzyć potencjał przy pomocy elektrometru bezwzględnego, jeżeli promień krążka ruchomego wynosi 2 cm, odległość między płytami = 0,5 cm, ważyć zaś można z dokładnością do 0,01 gr?

ROZDZIAŁ III.

POJEMNOŚĆ ELEKTRYCZNA. KONDENSATORY. MACHINY ELEKTROSTATYCZNE.

294. Pojemność elektryczna. Jednostka pojemności.

Zaopatrmy się w trzy niewielkie kuleczki metalowe jednakowej średnicy, poza tem w jedną o średnicy dwa razy większej i jeszcze jedną o średnicy trzy razy większej, wszystkie zawieszone na dość długich nitkach jedwabnych *) (średnice kuleczek mogą być np. 1 cm, 2 cm, 3 cm). Zawieśmy kuleczki tak, by się nawzajem dotykały, i naelektryzujemy przez dotknięcie potartym prętem szklanym lub ebonitowym. Wszystkie zostaną naelektryzowane do tego samego potencjału.

Zanurzymy wtedy te kulki w porządku następującym w puszcze Faraday'a, połączonej z elektroskopem, mającym skalę, czyniąc to wszystko dostatecznie prędko, by kulki możliwie zachowały udzielone im naboje; nie dotykajmy przytem kuleczkami ścian puszeki.

A więc:

1) wpuszczamy jedną z najmniejszych kulek i notujemy wskazanie elektroskopu;

2) wpuszczamy drugą kulkę tejże wielkości, nie wyjmując pierwszej, i znowu notujemy wskazanie elektroskopu;

3) nie wyjmując dwu pierwszych, wpuszczamy trzecią kulkę tejże wielkości i znowu notujemy wychylenie elektroskopu;

4) po wyjęciu wszystkich trzech małych kulek, wpuszczamy kulkę o promieniu 2 razy większym i stwierdzamy, że wychylenie elektroskopu jest takie, jakie było w przypadku 2-im;

5) po wyjęciu kuleczki, użytej w przypadku 4-ym, wpuszczamy kulkę o promieniu trzykrotnym i stwierdzamy, że wychylenie elektroskopu jest takie, jak w przypadku 3-im.

Nie mamy żadnego powodu do przypuszczenia, że przy takim naelektryzowaniu, jakiego dokonaliśmy, którakolwiek z trzech najmniejszych kuleczek elektryzuje się inaczej niż inne tej samej wielkości. Możemy zresztą przekonać się o tem, zanurzając w puszcze Faraday'a

*) Dlatego mówimy o dostatecznie długich nitkach jedwabnych, by przy wpuszczaniu kulek do puszeki nie być zmuszonym zbliżyć zanadto do niej ręki. Po przeczytaniu rozdz. III czytelnik będzie rozumiał to zastrzeżenie.

pokolei każdą z tych kulek i stwierdzając, iż za każdym razem wskazanie elektroskopu jest takie samo. Zatem na tych trzech równych sobie kulczkach naboje elektryczne są w danym razie równe. Inaczej rzecz się ma z kulkami większemi.

Przypomnijmy sobie, że wskazania elektroskopu, połączonego z puszką Faraday'a, uwarunkowane są większą lub mniejszą wartością potencjału, do którego ładuje się puszkę przez nabój wzbudzony, równy umieszczonemu w jej wnętrzu i rozmieszczony na jej zewnętrznej powierzchni (nabój wzbudzony na powierzchni wewnętrznej jest tu, że tak powiemy, „związany“ nabojem na wpuszczonej kulceczce i działanie jego nie uzewnętrznia się). O ile umieszczamy w puszcze naboje różnej wielkości, ładujemy ją do różnej wartości potencjału *).

Z wykonanej przed chwilą serji doświadczeń wnioskujemy przede wszystkim, że zapomocą elektroskopu, połączonego z puszką Faraday'a, możemy sądzić o wielkości naboju elektrycznych, t. j. po odpowiedniem wycechowaniu tego przyrządu (o czem niżej będzie jeszcze mowa) posługiwać się nim do mierzenia naboju.

Następnie — i o to w danym razie nam chodzi, że kule, użyte w doświadczeniu opisanem, posiadając jednakową wartość potencjału, mają różne ładunki elektryczne. Kula o promieniu dwukrotnym w stosunku do kulek mniejszych ma nabój dwa razy większy od tamtych, kula o promieniu 3-krotnym ma nabój 3 razy większy. Innemi słowy, widzimy, że dla naelektryzowania różnej wielkości przewodników do tego samego potencjału trzeba udzielić im różnej wartości naboju elektrycznych.

Wniosek ten formułujemy, mówiąc, iż poszczególne przewodniki posiadają naogół różną *pojemność elektryczną*. Im większa jest pojemność elektryczna przewodnika, tem większego naboju trzeba mu udzielić, by doprowadzić go do pewnej wartości potencjału **). Wyrazić to możemy wzorem następującym, jeżeli przez e oznaczymy nabój elektryczny, przez c pojemność przewodnika, zaś przez V potencjał

$$\frac{e}{c} = V \dots \dots \dots (1)$$

co można napisać inaczej:

$$e = c \cdot V \dots \dots \dots (2)$$

*) Zwracamy ponownie uwagę czytelnika na ważne fakty: przewodnik uziemiony, na którym mieści się ładunek, wzbudzony przez znajdujący się w pobliżu inny przewodnik naelektryzowany, ma potencjał = 0; zatem przewodnik może mieć potencjał = 0, mimo iż posiada nabój elektryczny; natomiast, gdy wpuszczamy do puszki Faraday'a przewodnik naelektryzowany, całkowity nabój na puszcze = 0 (mieszczą się bowiem na niej dwa naboje równe znaków przeciwnych); mimo to puszka posiada wtedy potencjał różny od zera.

***) Podobnie na to, by do słojuw cylindrycznych o różnych przekrojach nalać wody do tego samego poziomu, należy użyć różnych ilości wody. Również inną ilość ciepła trzeba udzielić 10 gramom wody, inną zaś 25 gramom, by temperaturę jej podnieść o tę samą liczbę stopni w tych samych granicach. Mówimy tedy o różnych pojemnościach naczyn, o różnych pojemnościach cieplnych poszczególnych ciał.

Wzór (2) mówi, że dla danego przewodnika o danej pojemności elektrycznej c nabój jest proporcjonalny do wartości potencjału, t. j. im do wyższego potencjału pragniemy przewodnik naładować, tem większego naboju musimy mu udzielić, c jest tu zatem charakterystycznym dla danego przewodnika współczynnikiem proporcjonalności.

Zobaczmy, w jakich jednostkach winna być mierzona pojemność elektryczna, skoro mamy już ustalone jednostki naboju elektrycznego i potencjału. Podobnie do tego, cośmy czynili już niejednokrotnie, powiemy, że wskazane jest obrać za jednostkę pojemności pojemność takiego przewodnika, który przez udzielenie mu jednostki elektrostatycznej naboju ładuje się do jednostki elektrostatycznej potencjału.

Ze wzoru (2) otrzymujemy

$$c = \frac{e}{V} \dots \dots \dots (3)$$

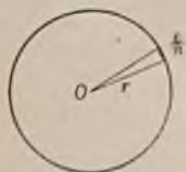
Oznaczając przez x nieznaną narazie wymiar nowej jednostki pojemności i biorąc znane już nam wyniary jednostek naboju elektrycznego i potencjału, mamy

$$x = \frac{\frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}}{\frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}} = \text{cm} \dots \dots \dots (4)$$

Dochodzimy więc do wniosku, iż pojemność jest wielkością, dającą się mierzyć w centymetrach. Wiąże się to doskonale z wynikiem przytoczonych przed chwilą doświadczeń, że pojemności kul są proporcjonalne do ich promieni — wszak okazało się, że kula o trzykrotnym w stosunku do innej promieniu ma pojemność też trzykrotną w stosunku do pojemności kuli mniejszej.

Można tedy umówić się, że obieramy za jednostkę pojemności pojemność kuli o promieniu 1 cm i szukać następnie sposobów porównywania innych pojemności z tą obraną jednostką, czyli sposobów mierzenia pojemności. Tak też istotnie czynimy, znajdując uzasadnienie w następującem rozumowaniu, które zarazem wyjaśnia, dlaczego mianowicie mówimy tu o promieniu kuli, a nie o jej średnicy (wszak w tym samym stosunku pozostaje średnica, co promień).

Rozważmy natomiast pytanie, do jakiej wartości V potencjału ładuje się kula o promieniu r , jeżeli udzielimy jej naboju e (rys. 690). Możemy się przede wszystkim przekonać przy pomocy takich doświadczeń, jak opisane na początku tego ustępu, że czy kule będą jednolite, czy puste wewnątrz, czy ściany ich będą grube czy cienkie, pojemności ich będą takie same, o ile promienie ich powierzchni zewnętrznych będą równe.



Rys. 690.

Przypuśćmy tedy, że mamy kulę metalową pustą w środku o promieniu r , na której mieści się nabój e , jednostajnie rozmieszczony, o ile niema w pobliżu innych przewodników, zakłócających to rozmieszczenie.

Jak już wiemy, w każdym punkcie wewnątrz kuli wartość potencjału jest taka, jak na powierzchni przewodnika. Dla znalezienia zatem potencjału kuli wystarczy znaleźć wartość potencjału w jej środku O , co jest zadaniem łatwym. Istotnie, podzielmy w myśli całą powierzchnię kuli na bardzo wielką liczbę n części; na każdym z tych elementów powierzchni mieści się nabój

$$\varepsilon = \frac{e}{n} \dots \dots \dots (5)$$

Zgodnie z wzorem (8) na str. 51 potencjał w punkcie O , uwarunkowany nabojem jednego z takich elementów wynosi $\frac{\varepsilon}{r}$. Całkowita wartość potencjału w O jest sumą wartości potencjałów, wytworzonych w tym punkcie przez naboje, mieszczące się na wszystkich elementach powierzchni, czyli

$$V = n \cdot \frac{\varepsilon}{r}$$

albo z uwzględnieniem (5)

$$V = \frac{e}{r} \dots \dots \dots (6)$$

Ogólnie jednak, jeżeli przez c oznaczamy pojemność kuli, mamy (patrz wzór 1).

$$V = \frac{e}{c} \dots \dots \dots 7$$

Porównanie wzorów (6) i (7) daje

$$c = r, \dots \dots \dots (8)$$

co właśnie dowodzi słuszności przytoczonego wyżej twierdzenia, że *pojemność elektryczna kuli mierzy się jej promieniem i wyraża się w centymetrach. Za jednostkę pojemności przyjmujemy 1 cm. co się rozumie w ten sposób, iż jest to pojemność kuli, mającej promień jednego centymetra. Jest to t. zw. elektrostatyczna jednostka pojemności.*

Udzielając kuleczce metalowej o promieniu 1 cm, zawieszonej na nitce jedwabnej zdala od innych przewodników, jednostki elektrostatycznej naboju, ładujemy ją do potencjału = jednostce elektrostatycznej potencjału $\left(1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}\right)$. Udzielając teźże kuleczce nabo-

ju = 5 jednostkom el. st., ładujemy ją do potencjału = 5 jednostkom el. st. potencjału $\left(5 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}\right)$ i t. d. Biorąc natomiast kuleczkę o promieniu 5 cm, musimy udzielić jej 5 jedn. el. st. naboju, aby doprowadzić ją do potencjału = $1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$, zaś na to, by ją naładować do potencjału = $5 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$, należy udzielić jej naboju = 25 jed. el. st., t. j. $25 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$.

Pojemność 1 cm jest bardzo mała, o ile chodzi o zagadnienia praktyczne, zwłaszcza techniczne. To też wprowadzono inną jeszcze *jednostkę praktyczną pojemności* zwaną *faradem* *). Przez farad (*F*) rozumiemy *pojemność takiego przewodnika, który przez udzielenie mu naboju jednego kulomba ładuje się do potencjału jednego wolta*. Zgodnie ze wzorem (2) napisać możemy

$$1 \text{ kulomb} = 1 \text{ farad} \cdot 1 \text{ wolt} \dots \dots \dots (9)$$

albo

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ kulomb}}{1 \text{ wolt}} \dots \dots \dots (10)$$

Podstawiając na kulomb i wolt ich wartości, wyrażone w jednostkach elektrostatycznych, otrzymujemy

$$\text{farad} = \frac{3 \cdot 10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}}{\frac{3 \cdot 10^9}{300} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}} = 9 \cdot 10^{11} \text{ cm} \dots \dots (11)$$

Jak widzimy, pojemność jednego farada posiada kula o promieniu $9 \cdot 10^{11}$ cm, czyli 9 milionów kilometrów (promień ziemi wynosi tylko ok. 6370 km). Mogłoby się здаwać, że jest to pojemność kolosalna, zgoła niedostępna w naszym doświadczeniu. Jak zobaczymy, bynajmniej tak nie jest. W wielu razach można posługiwać się i posługuje się jeszcze inną jednostką, t. zw. *mikrofaradem* (*MF*), stanowiącym *jedną milionową część farada* (*F*)

$$MF = 10^{-6} F = 9 \cdot 10^5 \text{ cm} \dots \dots \dots (12)$$

Mikrofarad jest więc pojemnością, którą posiada kula o promieniu $9 \cdot 10^5$ cm czyli o promieniu 9 km.

*) Ku uczeniu w ten sposób znanego już nam wielkiego fizyka samouka M. Faraday'a.

Przypuśćmy teraz, iż mamy kilka dość daleko od siebie i od ziemi położonych izolowanych przewodników, których pojemności są odpowiednio c_1, c_2, c_3, \dots , i że wszystkie one są naładowane do potencjału V . Naboje, mieszczące się na przewodnikach są odpowiednio

$$e_1 = c_1 V, e_2 = c_2 V, e_3 = c_3 V \dots \dots \dots (13)$$

Ustalmy metaliczne połączenie między temi przewodnikami — nic się nie zmieni, gdyż wszystkie przewodniki są przy tym samym potencjale V ; teraz wszakże po połączeniu wszystkie one tworzą jakgdyby jeden przewodnik, jedną elektryczną całość, której nabój równa się, oczywiście, $e_1 + e_2 + e_3 + \dots$. Oznaczmy pojemność tej całości przez c ; w takim razie:

$$e_1 + e_2 + e_3 + \dots = cV \dots \dots \dots (14)$$

z drugiej jednak strony według (13)

$$e_1 + e_2 + e_3 + \dots = c_1 V + c_2 V + c_3 V + \dots = V (c_1 + c_2 + c_3 + \dots) \quad (15)$$

Porównanie (14) i (15) daje

$$c = c_1 + c_2 + c_3 + \dots \dots \dots (16)$$

Zatem pojemność kilku połączonych ze sobą przewodników równa się sumie pojemności poszczególnych. Jest to wniosek bardzo ważny; niżej niejednokrotnie będziemy z niego robili użytek.

295. Kondensatory.

Powtórzmy doświadczenie, opisane na początku ust. 292, i rozpatrzmy je, uwzględniając wprowadzone tu przez nas nowe pojęcia.

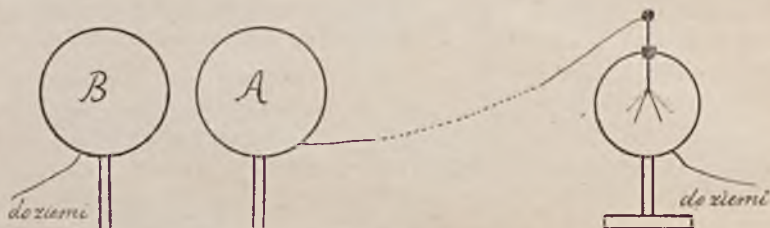
Elektryzujemy kulę izolowaną A , połączoną z daleko od niej umieszczonym elektroskopem (rys. 691); listki elektroskopu rozchylają się w określonej mierze. Wtedy zbliżamy do tej kuli drugą uziemioną (B). Listki elektroskopu opadają, lecz z chwilą usunięcia kuli B znowu wracają do pierwotnego rozchylenia. Jak wiemy, wskazania elektroskopu informują nas o potencjale połączonego z nim przewodnika. Jeżeli listki elektroskopu opadają z chwilą zbliżenia uziemionej kuli B do kuli A , świadczy to, że przy takim zbliżeniu potencjał kuli A zmniejsza się. Wszakże nabój jej nie uległ zmianie.

Ze wzoru
$$e = cV, \dots \dots \dots (1)$$

ustalonego w ustępie poprzednim, wynika — skoro e pozostaje bez zmiany, zaś V się zmniejsza — że c się zwiększa, t. j. że *przez zbliżenie do kuli A uziemionego przewodnika B pojemność jej wzrasta*. Na to, by elektroskop dał wtedy, gdy B stoi koło A , takie samo wskazanie,

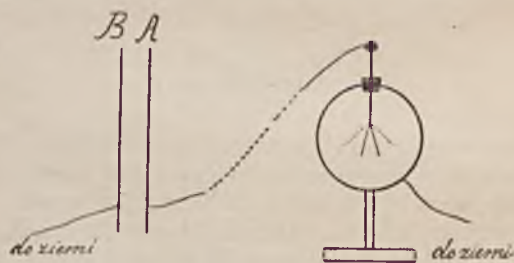
jak poprzednio, gdy kula B nie była w pobliżu, należałoby zwiększyć naboż kuli A .

Zamiast kul lepiej jest użyć płyt w tem doświadczeniu, jak to widzimy na rys. 692. Gdy płytę A , połączoną z elektroskopem elektryzujemy, a następnie zbliżamy do niej ustawioną względem niej równoległe płytę uziemioną B , listki elektroskopu opadają. W ten sposób zwiększamy pojemność płyty A ; aby doprowadzić ją wtedy do tej samej wartości potencjału, jaką miała w nieobecności płyty B , należy jej udzielić znacznie większego naboju.



Rys. 691.

Jak widzimy zatem, urządzenia, podobne do tych, które są wyobrażone na rys. 691 i 692, pozwalają zwiększać pojemność przewodników, a przez to gromadzić na nich większe naboje przy tej samej wartości potencjału. Tego rodzaju urządzenia nazywają się ogólnie *kondensatorami*.



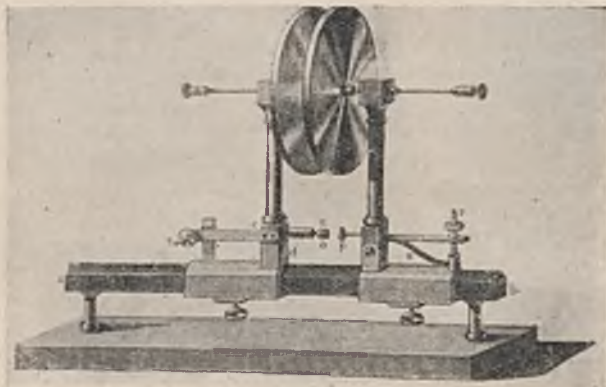
Rys. 692

Urządzenie takie jak na rys. 693 przedstawia jedną z form tak zwanego *kondensatora płaskiego*, odpowiadającego schematowi z rys. 692.

Mamy tu dwie płyty metalowe, osadzone na izolujących nóżkach, dające się przesuwać i ustawiać w różnej od siebie odległości; jedną z płyt ładujemy, drugą uziemiamy.

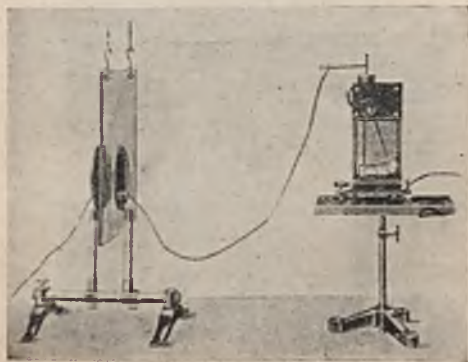
Jeżeli między płyty płaskiego kondensatora wstawimy płytę z jakiegokolwiek izolatora np. szkła, ebonitu i t. p. (doświadczenie takie przedstawia rys. 694), przekonamy się, że w ten sposób zwiększa się pojemność w porównaniu do tego, co się dzieje, gdy między płytami

znajduje się powietrze (przy niezmienionej odległości płyt); przytem zwiększa się w rozmaitej mierze, zależnie od tego, której mianowicie substancji izolującej użyjemy. Temu faktowi poświęcamy dalej więcej uwagi.



Rys. 693.

W prosty sposób daje się sporządzić płaski kondensator, jaki widzimy na rys. 695. Na dwu stronach płyty szklanej (lub ebonitowej) przyklejamy równej wielkości arkusze cynfolji, tworzące t. zw. „okładki“ kondensatora. Jedną z okładek łączymy w celu ładowania ze źró-

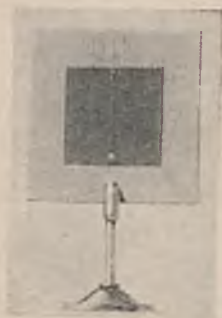


Rys. 694.

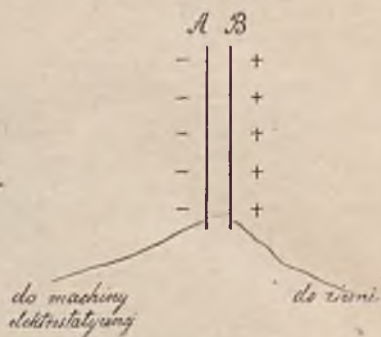
dłem elektryczności, drugą podczas ładowania uziemiamy przy pomocy drutu lub poprostu dotykając ręką.

Zastanówmy się nad mechanizmem ładowania kondensatora. Przypuśćmy, że okładka A kondensatora powietrznego (między okładkami jego mieści się powietrze) łączy się ze źródłem nabożów, np.

ujemnych (dajmy na to z t. zw. biegunem ujemnym maszyny elektrostatycznej (rys. 697), której budowę i działanie omówimy niżej).

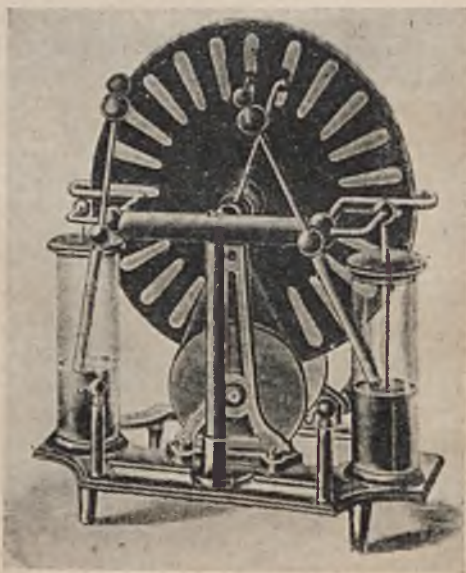


Rys. 695.



Rys. 696.

Do okładki *A* dopływają elektrony i ładuje się ona ujemnie, jednocześnie uziemiona okładka *B* ładuje się indukcyjnie dodatnio (elektrony uchodzą z niej ku ziemi). Między okładkami *A* i *B* tworzy się pole elektrostatyczne; w większej części (środkowej) pole to jest jed-



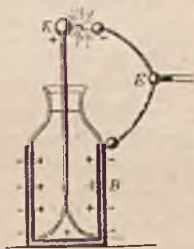
Rys. 697.

norodne (linje i rurki pola, równoległe względem siebie, przebiegają prostopadle do okładek); u krawędzi okładek, oczywiście, nie jest już ono jednorodne. Gdyby nie było okładki *B*, nabój pewnej wartości,

mieszczący się na okładce *A*, ładowałby ją do pewnego potencjału (ujemnego); obecność na okładce *B* naboju dodatniego wytwarza w miejscu, gdzie się mieści okładka *A*, potencjał dodatni, przez co zmniejsza wartość tamtego potencjału ujemnego, czyniąc koniecznem, w celu osiągnięcia większej jego wartości, udzielenie okładce *A* większego naboju ujemnego. Po naładowaniu więc kondensatora mamy na jego okładkach naboje przeciwnych znaków, przyczem okładki posiadają różną wartość potencjałów — okładka *A* bowiem potencjał ujemny, okładka *B* (uziemia) potencjał = 0. Gdybyśmy teraz okładki połączyli metalicznie (drutem), potencjały okładek zrównałyby się (o szczegółach tego zrównania mowa będzie potem), na skutek tego, że elektrony podążyłyby z okładki *A* ku *B*, tworząc w łączącym drucie nowe dla nas zjawisko prądu elektrycznego, z którym zawrzemy niebawem bliższą znajomość. Dokonalibyśmy wtedy *rozbrojenia* kondensatora.



Rys. 698.



Rys. 699.



Rys. 700.

Do uskutecznienia podobnego rozbrojenia dogodnie jest użyć t. zw. *rozbrajacza* (rys. 698).-

Dwa pręty metalowe, zakończone kulkami, zgięte łukowato, osadzone są na rękojeści szklanej (lub ebonitowej) na zawiasach w ten sposób, że można kulki ustawiać bliżej lub dalej jedną od drugiej. Dotykając jedną kulką jednej okładki naładowanego kondensatora, zbliżamy drugą kulkę do drugiej okładki, aż do zetknięcia z nią. Zanim jeszcze nastąpi to drugie zetknięcie, dostrzegamy iskrę, przeskakującą między kuleczką a okładką kondensatora. Iskra jest szczególną formą prądu elektrycznego, który się tworzy w powietrzu przy rozbrajaniu kondensatora; drugim nośnikiem tego prądu jest tu metalowa część rozbrajacza.

Rys. 699 przedstawia schematycznie rozbrojenie przy pomocy takiego rozbrajacza innego, bardzo rozpowszechnionego typu kondensatora, znanego pod nazwą *butelki lejdejskiej*. Rys. 700 przedstawia rzeczywisty wygląd takiej butelki. Okładki cynfoljowe przyklejone tu są na stronie zewnętrznej i wewnętrznej cylindra szklanego. Okładkę zewnętrzną przy ładowaniu uziemiaamy, wewnętrzną łączymy ze źródłem elektryczności przy pomocy dotykającego jej, zakończonego ku-

lęczką pręta metalowego. Zarówno w kondensatorze płaskim (rys. 695), jak w butelce lejdejskiej okładki nie sięgają do samych krawędzi przedzielającego je izolatora. Robi się tak dlatego, by uniknąć zbytniego zbliżenia do siebie okładek, które umożliwiłyby samorzutne rozbrojenie się kondensatora.

296. Pojemność kondensatora. Rola przedzielającego okładki dielektryku.

Wiedząc, że pojemność elektryczna kuli dana jest przez jej promień, i rozporządzając wycechowanym elektrometrem, pozwalającym mierzyć potencjały, możemy zmierzyć pojemność jakiegokolwiek kondensatora, np. butelki lejdejskiej, w sposób następujący. Ładujemy butelkę tak, jak to opisane powyżej, przyczem jej okładka wewnętrzna połączona jest drutem z wycechowanym elektrometrem. Dajmy na to naładowaliśmy ją do potencjału V . Łączymy następnie wewnętrzną okładkę butelki zapomocą cienkiego drutu*), osadzonego na izolującej rękojeści, z zawieszoną na nitce jedwabnej i dość daleko od innych przewodników położoną kulą metalową odpowiedniego rozmiaru**), nie przerywając połączenia z elektrometrem. Elektrometr wskazuje natychmiast mniejszej wartości potencjał V' ($V' < V$). Jest to zrozumiałe: wszak teraz nabój, który mieści się na butelce, częściowo przechodzi na kulę; tym samym nabojem ładuje się teraz dwa przewodniki — kulę i butelkę, których pojemność razem jest większa niż samej butelki***). Oznaczmy promień kuli, a zatem i jej pojemność przez r , nieznana zaś pojemność butelki przez x . Przypuśćmy wreszcie, że nabój elektryczny, który początkowo mieścił się tylko na wewnętrznej okładce butelki****), a potem mieści się na butelce i kuli, jest e . W takim razie dla przypadku, gdy nabój mieści się tylko na butelce, mamy zgodnie z wzorem (2) ust. 294.

$$e = x \cdot V \dots \dots \dots (1)$$

Potem zaś, gdy nabój mieści się na butelce i na kuli

$$e = (x + r) \cdot V' \dots \dots \dots (2)$$

*) T. zw. nagiego, t. j. nie owiniętego izolacją.

**) Chodzi o to, by pojemność kuli była niezbyt mała w porównaniu z pojemnością butelki. Dlaczego?

***) Podobnie, gdybyśmy np. cylinder z wodą, sięgającą w nim do pewnego poziomu, połączyli z drugim cylindrem pustym, obok pierwszego na tym samym stole ustawionym, ciecz znalazłaby się w obu cylindrach, ale na niższym poziomie niż początkowo w pierwszym cylindrze.

****) Zakładamy więc, że izolacja jest w doświadczeniu doskonała. Należy przeto zadość temu warunkowi.

Porównyując wzory (1) i (2), otrzymujemy

$$x \cdot V = (x + r) \cdot V', \dots \dots \dots (3)$$

Skąd

$$x = \frac{rV'}{V - V'} \dots \dots \dots (4)$$

Wykonywając w podobny sposób pomiary pojemności, możemy użyć do doświadczeń kondensatora płaskiego — takiego, jaki przedstawiony jest na rys. 693, i umieszczać między jego okładkami różne substancje: szkło, parafinę, ebonit, siarkę i t. p. Okazuje się wtedy, że przy tych samych kształtach kondensatora, przy tych samych rozmiarach okładek i tej samej między nimi odległości, pojemność jego (jak o tem wyżej wspominaliśmy) jest różna, zależnie od rodzaju substancji, wypełniającej przestrzeń między okładkami. Jeżeli wykonywamy takie pomiary z bardzo wielką dokładnością, a między innymi wyznaczamy pojemność tego kondensatora, gdy między jego okładkami mamy próżnię *); jeżeli rozszerzamy badania i na ciecze, przyczem płyty kondensatora będą w tych cieczach zanurzone, to się okazuje, że, oznaczywszy pojemność kondensatora w przypadku próżni przez c , na pojemności jego przy różnych substancjach, wypełniających całkowicie przestrzeń między okładkami, przy tej samej odległości okładek otrzymujemy, co następuje:

w przypadku powietrza atmosferycznego **)	1,0006 c
„ łyseczku	ok. 6 c
„ siarki	ok. 4 c
„ terpentyny	ok. 2 c
„ ebonitu	ok. 2,5 c
„ parafiny	ok. 2 c
„ szkła	ok. 6 c
„ nafty	ok. 2 c
i t. d.	

Liczby te, wskazujące, ile razy pojemność kondensatora próżniowego staje się większa, jeżeli zamiast próżni mamy między okładkami dany jakiś dielektryk, są dla tych dielektryków charakterystyczne i noszą nazwę *stałych dielektrycznych*. Jeżeli więc stałą dielektryczną próżni uważać będziemy za jedynekę, to stała dielektryczna powietrza praktycznie może być uważana za taką samą, jest bowiem tylko bardzo niewiele większa, natomiast np. stała dielektryczna szkła będzie 6, ebonitu 2,5 i t. d., co pozwala ułożyć tabelkę:

*) Kondensator winien się mieścić wtedy pod kloszem, gdzie można ową t. zw. próżnię osiągnąć.
 **) W odróżnieniu od powietrza w innych ciśnieniach.

Stała dielektryczna *).

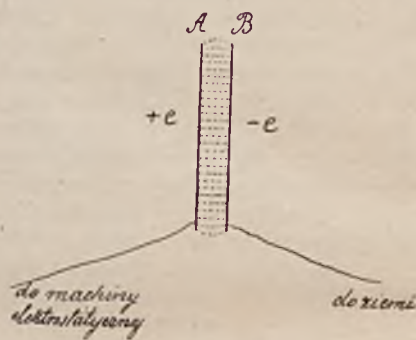
powietrza atmosferycznego	1,0006	siarki	ok. 4
ebonitu	ok. 2,5	szkła	ok. 6
łyszczku	ok. 6	terpentyny	ok. 2
parafiny	ok. 2	nafty	ok. 2

i t. d.

Faraday w swych słynnych badaniach nad własnościami dielektryków posługiwał się szczególną formą kondensatora kulistego, przedstawionego w przekroju na rys. 701. Jedną okładkę tworzy tu kula metalowa *A*, do której doprowadzamy nabój zapomocą zaopatrzonego w kulkę *a* pręta metalowego, osadzonego w izolującej osłonie *l*; kula *A*



Rys. 701.



Rys. 702.

mieści się koncentrycznie wewnątrz drugiej kuli metalowej, która gra rolę okładki uziemianej. Z przestrzeni między kulami można usunąć powietrze, ewentualnie przestrzeń ta daje się wypełnić jakąkolwiek substancją izolującą, której własności dielektryczne pragniemy poznać.

Spróbujmy znaleźć drogą rachunku pojemność płaskiego kondensatora w przypadku, gdy między jego okładkami mamy próżnię. Na schematycznym rysunku 702 okładka *A* łączy się ze źródłem nabojów np. dodatnich i otrzymuje, dajmy na to, ładunek $+e$. Na okładce uziemionej *B* powstaje indukcyjnie nabój znaku przeciwnego, t. j. w danym razie ujemny, a jeżeli założymy dla uproszczenia, że wytwarzające się między okładkami pole elektrostatyczne jest jednorodne (co jest słuszne tylko dla jego środkowej części) i że wszystkie linie oraz rurki sił, wybiegające z płyty *A*, podążają ku płycie *B* i na niej się kończą, co oczywiście nie jest zupełnie ściśle, ale tem bliższe prawdy,

*) Wszystkie wartości podajemy przybliżone, często bowiem różne próbki jednej i tej samej substancji, np. nafty, mają różne wartości stałej dielektrycznej. Stała dielektryczna różnych gatunków szkła waha się w granicach od 4 do 10.

im mniejsza jest odległość d między płytami w porównaniu z ich wymiarami, wówczas będziemy mogli powiedzieć, że nabój, mieszczący się na płycie B , jest — e (porów. rys. 673 i 688). W tem upraszczającym założeniu możemy oznaczyć ogólną liczbę rurek sił, wybiegających z płyty A i podążających ku B , przez $4\pi e$. Jeżeli przez S oznaczymy powierzchnię płyty A , na każdym centymetrze kwadratowym tej powierzchni przypada tych rurek pola $\frac{4\pi e}{S}$ i tyleż tych rurek przechodzi przez każdy cm^2 dowolnie pomyślanej płaszczyzny między A i B , równoległej do tych płyt. Zgodnie z tem, co zostało powiedziane w ust. 287, gęstość rurek pola daje nam tu miarę natężenia pola jednorodnego, które mamy między płytami, a więc:

$$F = \frac{4\pi e}{S} \dots \dots \dots (1)$$

Z drugiej jednak strony, jeżeli potencjał płyty A oznaczymy przez V , to natężenie pola między płytami (porów. wzór (5) na str. 67)

$$F = \frac{V}{d} \dots \dots \dots (2)$$

Porównanie (1) i (2) daje

$$\frac{4\pi e}{S} = \frac{V}{d}, \dots \dots \dots (3)$$

skąd

$$e = \frac{S}{4\pi d} \cdot V \dots \dots \dots (4)$$

Jeżeli szukaną pojemność kondensatora oznaczymy przez c , to między jej wartością, wartością naboju e , udzielonego kondensatorowi, oraz potencjałem V , do którego kondensator ładujemy, zachodzi znana zależność:

$$e = c \cdot V \dots \dots \dots (5)$$

Porównanie (4) i (5) daje szukaną wartość pojemności danego kondensatora próżniowego

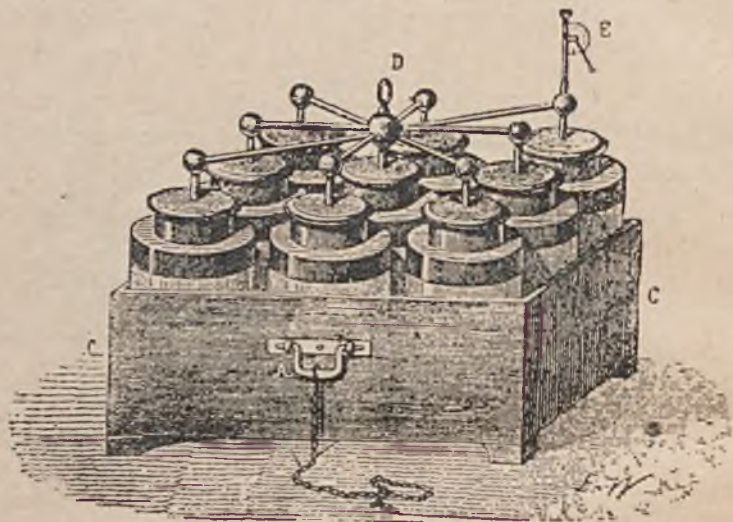
$$c = \frac{S}{4\pi d} \dots \dots \dots (6)$$

Przypuśćmy teraz, że między okładkami kondensatora mieści się dielektryk o stałej dielektrycznej D ; w takim razie, jak już wiemy, pojemność kondensatora staje się D razy większa, zatem na wartość po-

jemności kondensatora płaskiego o takim czy innym ośrodku między okładkami otrzymujemy ogólnie.

$$c = \frac{D \cdot S}{4\pi d} \dots \dots \dots (7)$$

Wynik ten odczytujemy, mówiąc, że pojemność kondensatora mierzy się iloczynem stałej dielektrycznej przez powierzchnię jednej jego okładki, podzielonym przez iloczyn z 4π przez grubość warstwy izolującej. Oczywiście, do mierzenia powierzchni jak grubości tej warstwy użyć należy tej samej jednostki długości, a więc powierzchnię zmierzyć w cm^2 , grubość w cm .



Rys. 703.

Nie będziemy wyprowadzali wzorów na pojemności kondensatorów innych kształtów. Zaznaczymy tylko, iż wzór (7) w przybliżeniu stosuje się do wszystkich kondensatorów, i będziemy się nim ogólnie posługiwali.

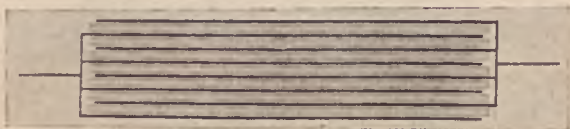
Dla przykładu znajdziemy pojemność butelki lejdejskiej, której ściany i dno mają 3 mm grubości ($d = 0.3 \text{ cm}$), średnica (zewnętrzna) 8 cm, okładka zaś cynfoljowa na ścianie bocznej sięga od spodu na wysokość 15 cm. Powierzchnia okładki, pokrywającej dno $= \pi 4^2 \text{ cm}^2 = 50,3 \text{ cm}^2$; powierzchnia jej na ścianie bocznej $= 8 \pi 15 \text{ cm}^2 = 377,1 \text{ cm}^2$; całkowita zatem powierzchnia $S = 50,3 \text{ cm}^2 + 377,1 \text{ cm}^2 = 427,4 \text{ cm}^2$. Przyjmując dla szkła $D = 6$, będziemy mieli według wzoru (7).

$$c = \frac{6 \cdot 427,4 \text{ cm}^2}{4 \cdot \pi \cdot 0,3 \text{ cm}} = 680 \text{ cm}.$$

Znajdujemy więc, że pojemność takiej butelki równa się pojemności kuli o promieniu 680 cm, t. j. o średnicy blisko 14 m. Z przykładu tego widzimy, jak wielką oszczędność miejsca zyskujemy, wprowadzając w użycie kondensatory dla gromadzenia na nich nabołów elektrycznych.

Powtarzamy raz jeszcze, że wzór (7) jest tylko przybliżony; poza tem, jeżeli chodzi o ścisłość, musimy uwzględnić okoliczność, że różne gatunki szkła mają różną wartość stałej dielektrycznej. Przyjmując w tem obliczeniu $D = 6$, czynimy tak jedynie dla uproszczenia sprawy. Dla ścisłego rozwiązania tego zadania należałoby wiedzieć, jaka jest wartość D danego gatunku szkła. W braku tych wiadomości uciec się musimy do doświadczalnego wyznaczania pojemności metodą wyżej wskazaną, używając zamiast kuli odpowiedniego dogodnego wzorca pojemności.

Używając w kondensatorze jako izolatora nie szkła, a np. łyszczku, albo jeszcze lepiej kwarcu, unikamy takiej nieokreśloności wartości D . Wobec jednak dostępności szkła znajduje ono w tej dziedzinie szerokie zastosowanie, chociaż w bardzo wielu wypadkach posługujemy się innymi izolatorami.



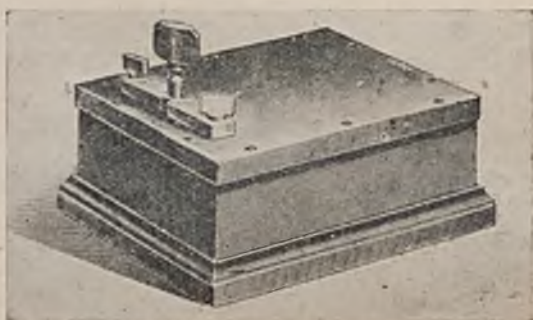
Rys. 704.

Pragnąc zbudować kondensator o możliwie wielkiej pojemności, musimy zwiększyć jak najbardziej S (powierzchnię), zmniejszyć natomiast d (grubość warstwy izolującej). Co do stałej dielektrycznej, wszystkie izolatory stałe, nadające się do budowy kondensatorów, posiadają mniej więcej takie wartości, jakie podaliśmy wyżej w tablicy; na tej więc drodze nie znajdujemy sposobu znaczniejszego powiększenia pojemności. Jeżeli chodzi o grubość warstwy izolującej, to również nie możemy się posuwać za daleko, gdyby bowiem okładki kondensatora były przedzielone zbyt cienką warstewką izolatora, mogłoby nastąpić iskrowe wyładowanie między okładkami poprzez tę warstwę, przez co zostałaby ona uszkodzona.

Z dwu butelek lejdejskich o jednakowej grubości szkła (jednakożego gatunku), większą pojemność ma butelka większa, jako mająca większą powierzchnię S . Zamiast budować wielkie butelki o dużej pojemności, łączymy mniejsze po kilka lub więcej w t. zw. *baterję*. Rys. 703 przedstawia taką baterję butelek, połączonych *równolegle*—wszystkie okładki zewnętrzne połączone są ze sobą, będąc ustawione na wspólnej podstawie, wysłanej cynfolją (połączony metalicznie z cynfolją łańcuszek służy do uziemiania); wszystkie okładki wewnętrzne są również połączone ze sobą przy pomocy prętów. Baterja z 9-ciu butelek,

wyobrażona na rys. 703, posiada pojemność 9-ciokrotną w stosunku do pojemności każdej poszczególnej butelki.

Na rys. 704 mamy przekrój płyt, zaś na rys. 705 wygląd zewnętrzny wzorcowego kondensatora mikowego. Arkusze cynfolji są tu poprzekładane warstewkami miki; jak widać na rys. 704, wszystkie nieparzyste arkusze cynfolji są połączone metalicznie ze sobą, tworząc jakgdyby jeden wielki arkusz cynfolji — jedną okładkę kondensatora; wszystkie parzyste arkusze są również w podobny sposób połączone ze sobą, tworząc drugą okładkę. Całość umieszczona jest w pudle, uwidocznionem na rys. 705; druty od obu okładek połączone są z zaciskami, z których jeden łączymy ze źródłem elektryczności, drugi uziemiamy. Podczas ładowania winna być wyjęta zatyczka metalowa, zaopatrzona w ebonitową główkę i mieszcząca się między płytkami metalowymi połączonymi z zaciskami; włożenie tej zatyczki służy do rozbrajania w razie po-



Rys. 705.

trzeby naładowanego kondensatora, — jak widać bowiem na rysunku, w ten sposób ustala się metaliczne połączenie między obu okładkami.

Kondensatory zbudowane w podobny sposób, jak na rys. 704 i 705, mają czasem zamiast miki jako izolator arkusze papieru parafinowanego. Osiąga się wówczas bardzo małe d (odległość między okładkami) oraz duże S (powierzchnia) przy niewielkich wymiarach całości; dzięki temu małe względnie skrzyneczki zawierają nieraz ogromne pojemności, wynoszące kilka, kilkanaście lub więcej mikrofaradów *).

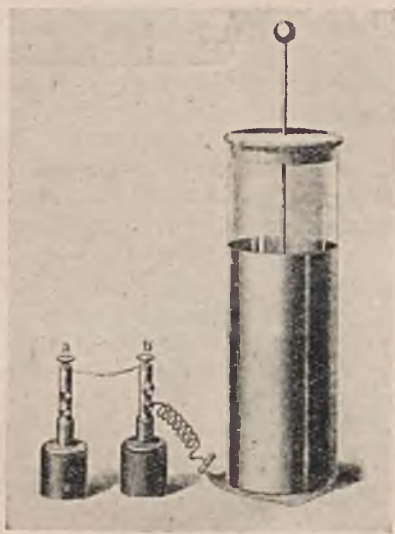
297. Energia naelektryzowanego ciała.

Jak już wyjaśniliśmy wyżej, z elektryzowaniem ciał wiąże się wykonywanie pewnej pracy. W ciele naelektryzowanym zawarty jest przeto pewien zasób tej pracy czyli, że użyjemy ustalonej już terminologii, każde ciało naelektryzowane posiada określonej wielkości energję.

*) Takie kondensatory mogą być ładowane do niewysokich potencjałów, gdyż w razie przeciwnym grozi przebiecie iskrą izolatora, o czem już wspominaliśmy.

Gdy rozbrajamy naładowaną butelkę albo baterję lejdejską, w po-
tężnem wyładowaniu iskrowem objawia się właśnie ta energia. Błysk
iskry, jej ciepło, trzask — oto przemiany energii elektrycznej, zawartej
w baterji, w energję promienistą, cieplną, mechaniczną.

Umocujmy w dwu zaciskach metalowych *a* i *b*, osadzonych na pod-
stawkach izolujących *) (rys. 706), cienki drucik żelazny; połączmy



Rys. 706.

zacisk *b* z zewnętrzną okładką naładowanej butelki (albo baterji) lej-
dejskiej i wyładowujemy butelkę przy pomocy wyładowywacza, łącząc
nim zacisk *a* z kuleczką butelki, a więc z okładką wewnętrzną. Oprócz
iskry, którą otrzymamy między kuleczką rozbijacza a przewodni-
kiem, prowadzącym czy to do okładki zewnętrznej czy wewnętrznej
(zależnie od tego, czy najpierw dotkniemy rozbijaczem kulki butelki



Rys. 707.

czy zacisku *a*), stwierdzimy jeszcze rozżarzenie się lub nawet sto-
pienie drucika, rozpiętego między *a* i *b*.

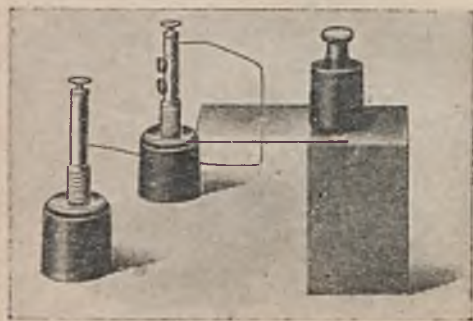
Jeżeli między zaciski *a* i *b* (rys. 706) włączmy zamiast drucika
wypełnioną szczelnie wodą rurkę szklaną (rys. 707), do której u dwu
jej końców wstawiono poprzez korki dwa druty, to przy rozbiciu

*) Te t. zw. zaciski Holtza są bardzo przydatne w wielu doświadczeniach
elektrycznych; polecamy je bardzo wykonawcom podawanych tu doświadczeń.

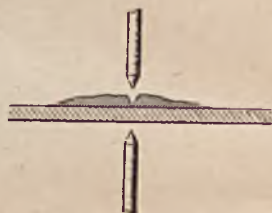
butelki przeskoczy iskra między końcami drutów w wodzię i rozsadzi rurkę na skutek ciśnienia pary wodnej, wytworzonej przez iskrę.

Połączmy (rys. 708) okładkę zewnętrzną baterji (nie przedstawionej na rysunku) z jednym, a wewnętrzną z drugim zaciskiem Holtza i wstawmy pomiędzy końce drutów, połączonych również z temi zaciskami tak, jak to widoczne jest na rysunku, płytkę szklaną grubości ok. 1 mm; uprzednio puśćmy kroplę stearyny na płytkę i zróbmy w stygnącej jeszcze kropli drucikiem zagłębienie, jak to przedstawia w powiększeniu rys. 709. Iskra, przeskakująca przy rozbiorzeniu baterji między końcami drutów, przedziurawi płytkę szklaną.

Bez wielkiego zachodu otrzymamy podobne przedziurawienie kawałka tektury; nie potrzeba do tego baterji — wystarczy poprostu ustawienie tektury między zbliżone do siebie na odległość kilku milimetrów bieguny działającej maszyny elektrostatycznej. Ciekawe jest, że z obu stron krawędzie dziurek są szarpnięte „nazewnątrz”.



Rys. 708.



Rys. 709.

Wsuwając na drucie w miejsce, gdzie bije iskra między biegunami maszyny elektrostatycznej, kawałek waty, zwilżonej benzyną lub etylem, zapalimy te łatwo palne substancje. Dotykając jedną ręką zewnętrznej okładki naładowanej niewielkiej butelki lejdejskiej, drugą zaś — kuleczki, łączącej się z okładką wewnętrzną, doznajemy charakterystycznego wstrząśnienia. Takiego wyładowania dokonać można poprzez cały łańcuch osób, trzymających się za ręce, gdy osoba, znajdująca się na jednym końcu łańcucha, ujmuje wolną ręką zewnętrzną okładkę naładowanej butelki, osoba zaś, znajdująca się na drugim końcu łańcucha, dotyka wolną ręką kuleczki lub pręta, połączonego z okładką wewnętrzną.

Doświadczenia powyższe wykazują nam właśnie w szczegółach te przemiany energii elektrycznej w promieniastą, cieplną, mechaniczną i t. d.

Spróbujmy teraz znaleźć w drodze prostego rachunku, jaka też jest wartość energii przewodnika naelektryzowanego. Jako podstawę rozumowania przyjmijmy znane już nam twierdzenie, że gdy nabój e

przenosimy z miejsca o potencjale = 0 do miejsca o potencjale V , praca, wykonana przytem, równa się eV . Uwzględnić wszakże musimy, że, gdy przewodnikowi o pewnej wartości potencjału dostarczamy nowego naboju, to potencjał jego nie zachowuje tej pierwotnej wartości, lecz staje się większy i wzrasta stopniowo, w miarę jak ten nabój przechodzi na przewodnik. Otóż tylko w przypadku, gdy udzielamy przewodnikowi naboju znikomo małego, przyjąć możemy, że podczas tego udzielania wartość potencjału się nie zmienia. Jeżeli więc przewodnikowi o potencjale początkowym = 0 udzielamy naboju e , przez co doprowadzamy go do potencjału V , założyć możemy, że doprowadzenie to zachodzi przez bardzo wiele (n) kolejno po sobie następujących dawek, z których każda $\frac{e}{n}$ jest tak właśnie znikomo mała, że można

zaniedbać zachodzącą przytem zmianę potencjału. Wyobrażamy więc sobie, że dopływ naboju całego składa się z n takich poszczególnych procesów, w których po każdym następuje przyrost potencjału nieznacznymi skokami. Oznaczamy te kolejne wartości potencjału przez zero, $V_1, V_2, \dots, V_{n-1}, V$. Po pierwszej dawce potencjał staje się = V_1 ; przyjmijmy, że przy tym właśnie potencjale został udzielony przewodnikowi nabój $\frac{e}{n}$; praca wykonana wtedy wynosi

$$q_1 = \frac{e}{n} \cdot V_1 \dots \dots \dots (1)$$

Jeżeli pojemność przewodnika jest c , to między nabojem $\frac{e}{n}$, pojemnością c i potencjałem V_1 , do którego nabój ten ładuje przewodnik, zachodzi znana zależność

$$\frac{e}{n} = c \cdot V_1,$$

skąd

$$V_1 = \frac{e}{cn} \dots \dots \dots (2)$$

Po podstawieniu (2) do (1) otrzymamy

$$q_1 = \frac{e}{n} \cdot \frac{e}{c \cdot n} = \frac{e^2}{n^2} \cdot \frac{1}{c} \dots \dots \dots (3)$$

Podczas drugiej dawki przyjmijmy wartość potencjału = V_2 ; praca wtedy wyniesie

$$q_2 = \frac{e}{n} \cdot V_2 \dots \dots \dots (4)$$

Lecz znowu między wartością potencjału V_2 , pojemnością przewodnika c a nabojem $\frac{2e}{n}$, który teraz posiada przewodnik (po dwu dawkach!), zachodzi zależność

$$\frac{2e}{n} = cV_2,$$

skąd

$$V_2 = \frac{2e}{n \cdot c} \dots \dots \dots (5)$$

Po podstawieniu (5) do (4) otrzymujemy.

$$q_2 = \frac{e}{n} \cdot \frac{2e}{n \cdot c} = \frac{e^2}{n^2} \cdot \frac{2}{c} \dots \dots \dots (6)$$

Podobnie praca podczas trzeciej, czwartej, ... n -ej dawki wyniesie (piszemy przez analogję):

$$q_3 = \frac{e^2}{n^2} \cdot \frac{3}{c}, \quad q_4 = \frac{e^2}{n^2} \cdot \frac{4}{c} \text{ i t. d. } \dots \quad q_n = \frac{e^2}{n^2} \cdot \frac{n}{c} \dots \dots (7)$$

Całkowita praca równa się sumie tych wszystkich prac elementarnych, czyli

$$\begin{aligned} q_1 + q_2 + \dots + q_n &= \frac{e^2}{n^2} \cdot \frac{1}{c} + \frac{e^2}{n^2} \cdot \frac{2}{c} + \dots + \frac{e^2}{n^2} \cdot \frac{n}{c} = \\ &= \frac{e^2}{cn^2} (1 + 2 + \dots + n) = \frac{e^2}{cn^2} \cdot \frac{n(n+1)}{2} = \frac{e^2}{2c} \cdot \frac{n^2 + n}{n^2} = \\ &= \frac{e^2}{2c} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

Pomyślany tu przez nas proces ładowania tem mniej się różni od rzeczywistego, im większą wybieramy liczbę n . W ostatniem wyrażeniu (8) możemy odrzucić ułamek $\frac{1}{n}$ jako dążący do zera w miarę wzrostu n i wtedy otrzymujemy na wartość szukanej pracy, a zatem i energii ciała naelektryzowanego (z tej bowiem pracy energia ta właśnie się tworzy):

$$E = \frac{e^2}{2c} \dots \dots \dots (9)$$

Uwzględniając, że po skończonem ładowaniu ciało posiada nabój e , zaś potencjał jego wynosi V , że zatem

$$e = c \cdot V \dots \dots \dots (10)$$

czyli
$$c = \frac{e}{V}, \dots \dots \dots (11)$$

i podstawiając wartość na c (11) do (9), otrzymujemy

$$E = \frac{eV}{2} \dots \dots \dots (12)$$

Albo wreszcie, podstawiając wartość c ze wzoru (10) do (9), mamy

$$E = \frac{c^2 V^2}{2c} = \frac{cV^2}{2} \dots \dots \dots (13)$$

Jak widzimy, wartość energii naelektryzowanego przewodnika daje się przedstawić przy pomocy trzech wzorów (9), (12) i (13), w które wchodzi albo wartości naboju i potencjału (12), albo wartości naboju i pojemności (9) albo wreszcie wartości pojemności i potencjału (13). Oczywiście używamy tego czy innego wzoru, zależnie od tego, które z tych wielkości są nam znane.

Znajdźmy energję kuli o średnicy 10 cm, na której mieści się nabój = 100 jednostkom elektrostatycznym = $100 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$. Mamy tu dane: nabój oraz pojemność, która wszak mierzy się wielkością promienia (5 cm). Bierzymy więc wzór (9).

$$E = \frac{e^2}{2c} = \frac{10000 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}^3}{\text{sek}^2}}{2.5 \text{ cm}} = 1000 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}^2}{\text{sek}^2} = 1000 \text{ ergów.}$$

Znajdźmy jeszcze energję niewielkiej butelki lejdejskiej, której pojemność obliczaliśmy wyżej (680 cm), gdy naładujemy ją do potencjału 10000 woltów, co jest osiągalne przy pomocy maszyny elektrostatycznej. Ponieważ wolt = $\frac{1}{300} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$, przeto, podstawiając znane tu wartości pojemności i potencjału (jedne i drugie w jednostkach elektrostatycznych) do wzoru (13), otrzymujemy:

$$E = \frac{680 \text{ cm} \cdot [33,3]^2 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{sek}^2}}{2} = 477740 \text{ ergów} = \text{ok. } \frac{1}{20} \text{ dżula.}$$

Na zakończenie wskażemy na jedno zastosowanie kondensatorów, ważne w technice pomiarowej. Im większa jest pojemność kondensatora, tem mniej zmienia się jego potencjał przy udzielaniu mu

względnie przy odbieraniu odeń określonego naboju. Jeżeli naładujemy butelkę (lub baterję) lejdejską o wielkiej pojemności, przytem mającą dobrą izolację*), i dotkniemy jej główki małą kuleczką, osadzoną na izolującej rękojeści, kulka naładuje się do potencjału, który posiada butelka lejdejska; właściwie nabój, który otrzyma kuleczka, zostanie przytem odebrany butelce (baterji), a więc potencjał butelki (baterji) cokolwiek się zmniejszy, będzie to jednak tak znikomo mała zmiana wobec różnicy pojemności kuleczki oraz butelki (baterji), że, praktycznie rzecz biorąc, można raz po raz ładować od butelki (baterji) kuleczkę po każdorazowem jej wyładowaniu i przyjmować, iż potencjał butelki (baterji) przytem nie ulega zmianie, t. j. że za każdym razem kuleczka ładuje się do tego samego potencjału; innemi słowy — wobec określonej wartości jej pojemności, że za każdym razem kuleczka otrzymuje ten sam nabój elektryczny.

Prznieśmy np. kuleczkę po każdorazowem takim naładowaniu do wnętrza puszkii Faradaya i dotykamy nią tej puszkii od wewnątrz. Udzielamy w ten sposób pokolei raz po raz puszcze tej samej wielkości naboje i możemy połączony z puszką elektroskop ze skalą wycechować, czyniąc urządzenie przydatnem do mierzenia innych nieznanych naboju. (Jak? Niech czytelnik sobie ułoży odpowiedni plan takiego pomiaru).

Później poznamy inne jeszcze sposoby, pozwalające z większą bezporównania dokładnością ładować jakikolwiek przewodnik do tego, czy innego pożądanego stałego potencjału. Tymczasem musi nam wystarczyć wyzyskanie w tym celu wielkiej pojemności elektrycznej.

298. Wiadomości uzupełniające o dielektrykach i polu elektrostatycznym. Ogólniejsza postać wzoru Coulomba.

Podaliśmy w ust. 278, że, jeżeli podczas zaobserwowanego działania elektrostatycznego między naelektryzowanym prętem a wahadełkiem elektrycznym umieszczamy między nimi grubą płytę szklaną, działanie słabnie w sposób bardzo widoczny, powraca jednak do rozmiarów pierwotnych po usunięciu płyty. Mówiąc o tem, podkreślaliśmy, iż we wzajemnem działaniu elektrostatycznym naboju elektrycznych gra rolę ośrodek, przedzielający te naboje. Wracamy teraz do tego ważnego faktu, nad którym wtedy nie zatrzymywaliśmy się dłużej.

Możemy wykonać doświadczenie z wagą skręceń Coulomba (rys. 636), wypełniając całe naczynie cylindryczne, w którym zjawisko się rozgrywa, olejem parafinowym albo naftą. Powtarzajmy raz po raz pomiary z tą wagą — wtedy, gdy zjawisko odbywa się w powietrzu, i wtedy, gdy zachodzi w nafcie lub oleju parafinowym, wprowadzając

*) Butelka lejdejska w tych miejscach, gdzie niema okładek cynfoljowych, pokrywa się szellakiem dla zapobieżenia niepożądanym skutkom higroskopijności szkła.

za każdym razem w grę te same naboje (kuleczkę m ładować w tym celu będziemy za każdym razem od źródła, mającego stałą wartość potencjału — w końcu poprzedniego ustępu wskazaliśmy na możliwość podobnej czynności, zastrzegając się, że później poznamy jeszcze lepsze sposoby). Przekonamy się, że te same naboje z tych samych odległości działają nawzajem na siebie mniejszą siłą w oleju parafinowym lub nafcie, aniżeli w powietrzu; jeżeli zaś pokonamy wielkie trudności, związane z tego rodzaju pomiarami, przekonamy się, że siła zaobserwowana staje się tyleż razy mniejsza, ile razy większą jest stała dielektryczna użytej cieczy w stosunku do stałej dielektrycznej powietrza.

W ust. 278 zaznaczyliśmy, że wzór Coulomba, tam podany,

$$f = \pm \frac{e_1 e_2}{r^2} \dots \dots \dots (1)$$

jest ściśły tylko dla próżni oraz *prawie* ściśły dla powietrza. Teraz już wiemy, że stała dielektryczna powietrza jest bardzo niewiele większa od stałej dielektrycznej próżni (patrz tabelkę na str. 82); można więc nieraz dla uproszczenia sprawy przyjmować, iż stała dielektryczna powietrza równa się jedynce. Ściśle jednak biorąc, jeżeli przez D oznaczmy stałą dielektryczną ośrodka, w którym zachodzi omawiane tu przez nas działanie, wzór ten, jak wynika z powiedzianego przed chwilą, należy napisać tak:

$$f = \pm \frac{e_1 e_2}{D \cdot r^2} \dots \dots \dots (2)$$

Będzie to ogólna postać wzoru Coulomba dla każdego dielektryku. W przypadku szczególnym mamy dla próżni $D = 1$ (prawie to samo mamy dla powietrza); wtedy otrzymujemy szczególną postać wzoru (1), od której poznania zaczęliśmy.

Do takiego samego rezultatu doprowadzą nas pomiary z elektrometrem bezwzględnym Thomsona (rys. 687, str. 65), gdy zmienimy nieco sposób jego użycia, a mianowicie po naładowaniu tarczy A do określonego potencjału i udzieleniu jej przez to pewnego naboju, podczas gdy A od C przedziela powietrze, odłączymy A od ładującego źródła i, mając dostateczną pewność co do dokładności izolowania tarczy A , między przyciągające się płyty wstawiać będziemy warstwy różnych izolatorów: parafiny, siarki, szkła i t. d., porównywając wyniki z tem, co się dzieje, gdy między płytami mieści się powietrze.

Fakty te, pogłębiając naszą znajomość działań elektrostatycznych, wskazują wyraźnie, że poprzez dielektryki zachodzą działania elektrostatyczne^{*)}, t. j. że w dielektrykach wytwarza się pole elektrostatyczne; inaczej jest z metalami, które, jak wiemy, tworzą *osłony elektryczne* i to właśnie dlatego, że w nich pole elektrostatyczne nie powstaje.

^{*)} Stąd właśnie nazwa „dielektryk” — po grecku διή (czyt. di-ā) oznacza przez „poprzez”.

Co więcej, to wszystko, czegośmy się dowiedzieli o polu elektrostatycznym, a zwłaszcza o kondensatorach, zwracać winno szczególną naszą uwagę na rolę dielektryku w powyższych zjawiskach, jako też rozumieć, dla czego i myśl Faraday'a w tym kierunku podążyła.

Rozpatrzmy jeszcze inne zjawisko, już nam zresztą znane, w celu dobitniejszego uzasadnienia konieczności takiego właśnie uogólnienia postaci wzoru Coulomba, jak to uczyniliśmy przed chwilą.

Weźmy dwa równoległe ze sobą połączone kondensatory płaskie zupełnie jednakowych wymiarów, a więc mające jednakowe powierzchnie płyt i jednakowe odległości między płytami, ale przypuśćmy, iż jeden z kondensatorów (I) zawiera między płytami powietrze, dla którego, w celu uproszczenia, założymy stałą dielektryczną równą jedności (zresztą dla ścisłości moglibyśmy użyć i próżniowego kondensatora), w drugim zaś mieści się między płytami dielektryk o stałej dielektrycznej D (nafta, parafina). Po naładowaniu obu połączonych w ten sposób kondensatorów mamy na jednej z płyt w każdym z nich pewien potencjał $= V$, dwie zaś drugie płyty (uziemione) pozostają przy potencjale $= 0$. Ewentualne przeniesienie jakiegokolwiek naboju od jednej płyty do drugiej w tym czy tamtym kondensatorze musi być związane z pracą tej samej wielkości; wyżej w ust. 288 (wzór 9) wyjaśniliśmy, iż praca ta zależy dla danego naboju tylko od różnicy potencjałów pomiędzy miejscem, od którego, i miejscem, do którego takie przeniesienie zostaje dokonane. Praca ta natomiast nie zależy od drogi, po której nabój się przynosi, a więc byłaby ta sama, gdybyśmy przeniesienie to uskuteczнили prostopadłe do płyt, poprzez dielektryk, znajdujący się między płytami. Lecz, jeżeli dokonamy takiego właśnie przeniesienia naboju ε między płytami kondensatorów, gdzie założymy odpowiednie wartości natężenia pola F_1 i F_2 , siły, działające na taki nabój w jednym i drugim, będą odpowiednio $F_1 \varepsilon$ i $F_2 \varepsilon$; ponieważ zaś drogi dla obu są jednakowe — oznaczymy przez d odległość między płytami w obu kondensatorach, przeło na wartość pracy otrzymamy w jednym $F_1 \cdot \varepsilon \cdot d$, w drugim $F_2 \cdot \varepsilon \cdot d$; łącząc zaś znakiem równości te dwie wielkości

$$F_1 \cdot \varepsilon \cdot d = F_2 \cdot \varepsilon \cdot d, \dots \dots \dots (3)$$

otrzymujemy

$$F_1 = F_2, \dots \dots \dots (4)$$

t. j. dochodzimy do wniosku, że w obu kondensatorach natężenie pola między płytami jest jednakowe.

Jednakże kondensator, mający dielektryk o stałej dielektrycznej D , posiada nabój D razy większy od naboju w kondensatorze powietrznym (ściślej w próżniowym). Skoro więc do wytworzenia tej samej wartości natężenia pola trzeba tu D -krotnego naboju, wnosimy, że, o ile nabój dany mieści się w ośrodku o stałej dielektrycznej D , to wytwarza w nim pole o natężeniu D razy mniejszem, niż w przypadku, gdy znajduje się w próżni. Innemi słowy, jeżeli wyżej w ust. 284 po-

dawaliśmy na wartość natężenia pola, wytworzonego przez biegun elektryczny e , w odległości r od bieguna

$$F = \frac{e}{r^2}, \dots \dots \dots (5)$$

było to słuszne dla próżni; natomiast w przypadku ogólnym, gdy biegun e znajduje się w ośrodku o stałej dielektrycznej D , na wartość natężenia pola w punkcie, którego odległość od bieguna wynosi r , napisać należy

$$F = \frac{e}{Dr^2} \dots \dots \dots (6)$$

Ze wzoru (6) otrzymujemy jako przypadek szczególny wzór (5), gdy $D = 1$.

Wszakże natężenie pola określamy jako stosunek siły, działającej na nabój próbny, umieszczony w pewnym punkcie pola, do wartości samego naboju próbnego (p. wzór (3) na str. 33) czyli

$$F = \frac{f}{\varepsilon} \dots \dots \dots (7)$$

Skoro w wyrażeniu na F wprowadzić należy w mianowniku czynnik D , to i w wyrażeniu na f , t. j. we wzorze Coulomba, również należy to samo uczynić, t. j. napisać ogólnie.

$$f = \pm \frac{e\varepsilon}{Dr^2} \dots \dots \dots (8)$$

A więc znajdujemy, opierając się na tem, co nam dają zjawiska w kondensatorze, nowe uzasadnienie do uogólnienia postaci wzoru Coulomba. Widzimy teraz, że, podając wyżej określenie jednostki naboju elektrycznego, nie dopowiedzieliśmy tego, co jest bardzo ważne, a mianowicie, że jest to taki nabój, który na taki sam drugi nabój, umieszczony w odległości 1 cm., działa w próżni siłą jednej dyny.

Oczywiście, należy również zmodyfikować w myśl powyższego i inne, podane wyżej, wzory. Tak więc na wartość potencjału, uwarunkowanego przez biegun e w dowolnym punkcie pola tego naboju w odległości r od bieguna, napisać należy

$$V = \frac{e}{Dr} \dots \dots \dots (8)$$

Podany przez nas wyżej wzór (p. wzór (8) na str. 51).

$$V = \frac{e}{r}$$

będzie tylko przypadkiem szczególnym wzoru (8), gdy $D = 1$.

Podobnie, gdy liczbą rurek sił, przecinających jednostkę powierzchni, mamy oznaczać natężenie pola i w ten sposób ustalamy, iż nabój e jest źródłem $4\pi e$ rurek, to znowu jest to słuszne tylko dla próżni. W ośrodku o stałej dielektrycznej D natężenie pola zmniejsza się D -krotnie, zatem ten sam nabój e w ośrodku o stałej dielektrycznej D jest źródłem nie $4\pi e$ rurek jednostkowych lecz

$$\frac{4\pi e}{D} \dots \dots \dots (9)$$

Zatem i w wyrażeniu na napięcie Faraday'owskie w rurkach pola wprowadzić należy pewną zmianę, jeżeli chodzi o wartość tego wzoru dla dowolnego dielektryku. W celu otrzymania tego uogólnionego wzoru, odwołajmy się znowu do przykładu z elektrometrem bezwzględnym (rys. 687 i 688) i powtórzmy w zmienionej nieco postaci przytoczone tam rozumowania. A więc przypuścimy, że na tarczy C mieści się nabój e , natężenie zaś pola między C i A wynosi F . Siła, której działaniu podlega tarcza C , jest, jak już tam wyjaśniliśmy,

$$f = \frac{eF}{2} \dots \dots \dots (10)$$

Tarcza C jest, zgodnie z (9), źródłem $\frac{4\pi e}{D}$ rurek sił; stosunek tej liczby do powierzchni S tarczy C daje liczbowo wartość natężenia pola, czyli

$$F = \frac{4\pi e}{D \cdot S}, \dots \dots \dots (11)$$

skąd

$$e = \frac{D \cdot F \cdot S}{4\pi} \dots \dots \dots (12)$$

Podstawiając tę wartość e do (10), otrzymujemy

$$f = \frac{D \cdot F^2 \cdot S}{8\pi}, \dots \dots \dots (13)$$

stąd zaś na wartość szukanego napięcia mamy

$$\frac{f}{S} = \frac{DF^2}{8\pi} \dots \dots \dots (14)$$

I z tego wzoru w przypadku szczególnym, gdy $D = 1$, t. j. dla próżni otrzymujemy znany już nam dawniej wzór:

$$\frac{F^2}{8\pi}$$

299. Wiadomości uzupełniające o dielektrykach i polu elektrostatycznym.

(Ciąg dalszy).

Gdy mamy kilka kondensatorów o jednakowej wielkości okładek, przypadających w jednakowej od siebie odległości, lecz przedzielonych różnemi dielektrykami, mają one różne pojemności i ładują się różnie w tem znaczeniu, że równe udzielone im naboje ładują je do różnych potencjałów, naładowane zaś do równych potencjałów posiadają różne naboje. Wszakże, jeżeli okładki kondensatorów zrobimy z różnych metali, nie zmieni to zasadniczo ich własności; czy będą to płyty miedziane, czy cynkowe, czy srebrne, pojemność kondensatorów będzie ta sama, byle rozmiary tych płyt i ich odległości były równe, byle przytem płyty przedzielone były tym samym dielektrykiem.

Wnosimy zatem, że istota zjawiska ładowania kondensatora rozgrywa się nie w płytach, ale właśnie w tym dielektryku; że on jest siedliskiem pewnych zmian, które stanowią ową istotę ładowania się kondensatora. I tu uważnemu czytelnikowi winno się przypomnieć to, co wyżej mówiliśmy o polaryzacji w dielektryku, jak również o tych Faraday'owskich napięciach, których wartość podaliśmy zarówno dla próżni, jak poszczególnych ośrodków materialnych. Naturalnie to, co mówimy teraz, nie powinno prowadzić czytelnika do zbyt pośpiesznego wniosku, że metale niegodne są uwagi w porównaniu z dielektrykami.

Nie zdziwi więc zapewne nikogo po tem, co zostało powiedziane, jeżeli, stawiając pytanie, gdzie mianowicie zawarta jest energja naładowanego kondensatora, odpowiemy: w dielektryku, mieszczącym się między płytami, a także, jeżeli posuniemy się jeszcze dalej i zaczniemy mówić o *rozमieszczeniu i gęstości tej energii*.

Przypuścimy więc, że mamy naładowany do potencjału V kondensator (druga okładka jego ma potencjał $= 0$), którego pojemność jest c . Na wartość energii tego kondensatora mamy (p. wzór 13 na str. 91).

$$\frac{V^2 c}{2} \dots \dots \dots (1)$$

Jeżeli powierzchnia okładki jest S , zaś grubość warstwy dielektryku $= d$, iloczyn Sd jest objętością tego dielektryku. Traktując rzecz tak, że w objętości tej mieści się dana energja, mówić możemy o jej gęstości, jako stosunku jej wartości do objętości, w której jest zawarta. Gęstość ta będzie

$$\frac{V^2 \cdot c}{2 \cdot S \cdot d} \dots \dots \dots (2)$$

Podstawiając na pojemność c kondensatora jego wartość $\frac{D \cdot S}{4\pi d}$, gdzie

D , jak zawsze, oznacza wartość stałej dielektrycznej izolatora, mieszczącego się między okładkami, otrzymamy na gęstość

$$\frac{V^2 \cdot S \cdot D}{2 S \cdot d \cdot 4\pi \cdot d} = \frac{V^2 \cdot D}{d^2 \cdot 8\pi} \dots \dots \dots (3)$$

Lecz, jak wiemy, natężenie pola między okładkami kondensatora jest bez względu na izolator (ust. 298)

$$F = \frac{V}{d} \dots \dots \dots (4)$$

Podstawiając (4) do (3), otrzymujemy na wartość gęstości energii

$$\frac{F^2 \cdot D}{8\pi} \dots \dots \dots (5)$$

wyrażenie identyczne z tem, które daje wartość napięcia Faraday'owskiego (wzór (14) ustępu poprzedniego). W przypadku kondensatora próżniowego mamy

$$\frac{F^2}{8\pi} \dots \dots \dots (6)$$

Ta zgodność wzorów na gęstość energii w dielektryku oraz na wartość napięć rurek pola, powstającego w tym dielektryku, jest bardzo ciekawa. Ciekawszą bodaj jeszcze jest myśl, uogólniająca rozpatrzony przypadek, a nasuwająca się natarczywie, a mianowicie, że nie tylko w kondensatorze, lecz wszędzie tam, gdzie jest pole elektrostatyczne, mówić możemy, że w polu tem rozlana jest jakgdyby energia, a gęstość jej w poszczególnych miejscach pola dana jest przez wartość natężenia pola w tem miejscu i wartość stałej dielektrycznej ośrodka zapomocą wzoru (5), wzgl. dla próżni wzoru (6).

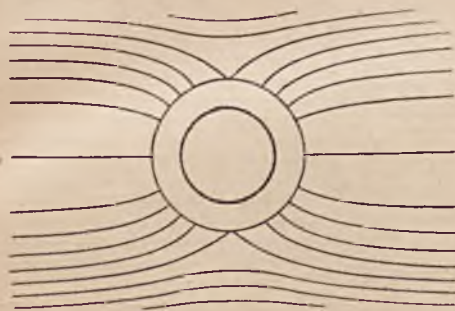
Wyobraźmy sobie, iż w nieograniczonym dielektryku (w przypadku szczególnym w próżni) mieści się kula metalowa, mająca pewien nabój elektryczny. Oczywiście, jej potencjał ma określoną wartość, zależnie od pojemności, t. j. od jej wymiarów, a także od wartości stałej dielektrycznej otaczającego ją ośrodka. Zwykliśmy mówić, że kula ta posiada pewną energję i umiemy podać wartość tej energji. Wszakże według tego, co teraz zostało powiedziane, siedliskiem właściwym tej energji nie jest kula — energia ta rozlana jest w nieograniczonej przestrzeni dokoła naelektryzowanej kuli, przytem tak, że w każdym punkcie pola gęstość tej energji dana jest przez wzór (5), wzgl. (6).

Niema tu, oczywiście, jednostajnego rozmieszczenia energji w tej przestrzeni, jak między okładkami kondensatora, gdzie możemy pole uważać za jednorodne. Wartość gęstości zmienia się tu naogół od punktu do punktu i rozumieć ją należy tak, jak się rozumie, np. wartość

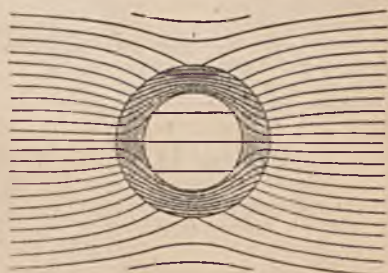
rzeczywistą prędkości w tym czy innym punkcie toru w ruchu zmiennym (t. I, ust. 31). Określić tę energję w poszczególnym punkcie należy jako stosunek jej wartości, zawartej w nieskończenie małej objętości, obejmującej ten punkt, do tej nieskończenie małej objętości. Ewent. można mówić o gęstości średniej w pewnej skończonej objętości.

Gdy znika nabój, gdy kula zostaje wyładowana, znika, zostaje jakgdyby wyspany cały ten zapas energii z przestrzeni, otaczającej kulę; objawia się ona wtedy w innej postaci i w innym miejscu, np. w postaci ciepła iskry, o ile zachodzi wyładowanie iskrowe.

Przypuśćmy teraz, co zresztą przeważnie się zdarza, że dokoła naelektryzowanego przewodnika znajdują się różne dielektryki. W szczególności przypuśćmy, że pewne linje pola, biegnące od powierzchni przewodnika w przylegającym doń dielektryku, dochodzą do granicy innego dielektryku. Co się wtedy dzieje? Czy w dalszym ciągu linje



Rys. 710.



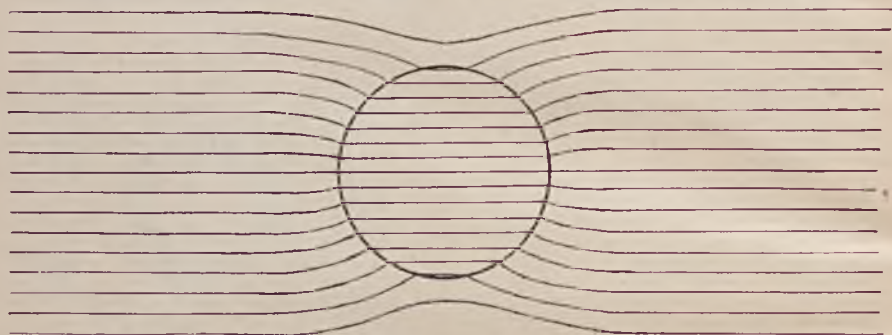
Rys. 711.

te idą w tym drugim dielektryku tak, jakby szły, gdyby miejsce tego drugiego dielektryku zajmował pierwszy? Mimowoli nasuwa się nam myśl, że nie, że jednak czemś ten przebieg w różnych dielektrykach musi się różnić.

Chcąc w tem zagadnieniu się zorientować, możemy się oprzeć na doświadczeniu, które łatwiej jest opisać, niż wykonać, zwłaszcza przy pomocy przeciętnych środków szkolnych, a które jest odmianą doświadczenia, podanego na rys. 668. Tam wstawialiśmy pierścień metalowy w pole jednorodne między płytki naelektryzowane; pole się przytem deformowało, zaś w środku pierścienia nie dawało się już ono stwierdzić — pierścień metalowy tworzył tam osłonę i to dlatego, że w metalach pole elektrostatyczne nie powstaje wcale. Przebieg linii pola dokoła pierścienia można przedstawić tak, jak to uczynione jest na rys. 710; kończą się one i zaczynają potem u powierzchni pierścienia; na skutek tego właśnie niema pola wewnątrz pierścienia. Otóż doświadczenie to można powtórzyć, używając pierścienia, zrobionego nie z metalu, lecz jakiegokolwiek dielektryku (np. szkła). Okazuje się wtedy, że w przestrzeni, otoczonej pierścieniem, jest wprawdzie pole elek-

trostatyczne, ale znacznie słabsze niż było w tem miejscu zanim pierścień został tam umieszczony. Z drugiej strony wiemy, że pole tworzy się wewnątrz każdego dielektryku. Chcąc zatem wytłumaczyć sobie to osłabienie pola, o którym powiedzieliśmy przed chwilą, musimy założyć, że w tym przypadku linje pola skierowały się głównie poprzez masę samego pierścienia, omijając przeważnie skutkiem tego przestrzeń, osłoniętą pierścieniem. Przebieg linii pola przedstawia w tym razie rys. 711.

Rzecz dzieje się tak, jakgdyby dielektryki o większej wartości stałej dielektrycznej były lepszymi przewodnikami dla tych linii, skutkiem czego linje te tam właśnie w zwiększonej liczbie podążają. Aby sprawę jeszcze dobitniej przedstawić, podajemy rysunki 712 i 713. Pierwszy z nich (712) wykazuje, co się dzieje, gdy w pole jednorodne, utworzone w jakimkolwiek ośrodku, wstawia się ciało o stałej dielektrycznej



Rys. 712.

większej — linje pola podążają ku temu ciału, mając w niem, jakgdyby łatwiejszy przebieg. Drugi rysunek (713) czyni to samo dla przypadku, gdy ciało o mniejszej wartości stałej dielektrycznej wstawione jest do ośrodka o stałej dielektrycznej większej — tu linje pola usiłują ominąć to ciało, stanowiące dla nich jakgdyby mniej korzystną drogę.

Widzimy tu na granicy dwu różnych dielektryków zmianę kierunku linii pola i to jest właśnie bardzo charakterystyczne. Nie mając możliwości zbyt wiele czasu tu tej kwestji poświęcać, powiemy krótko, iż zmiana ta zachodzi tak, jak to przedstawia rys. 714, gdzie linje pola przechodzą z ośrodka o stałej dielektrycznej D_1 do ośrodka o stałej dielektrycznej D_2 , przy czem $D_2 > D_1$. Przypomina to w pewnej mierze załamanie promieni przy przechodzeniu z jednego ośrodka do innego. Można dowieść, że załamanie to zachodzi według prawa, które się daje ująć we wzór:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{D_1}{D_2}, \quad \dots \dots \dots (7)$$

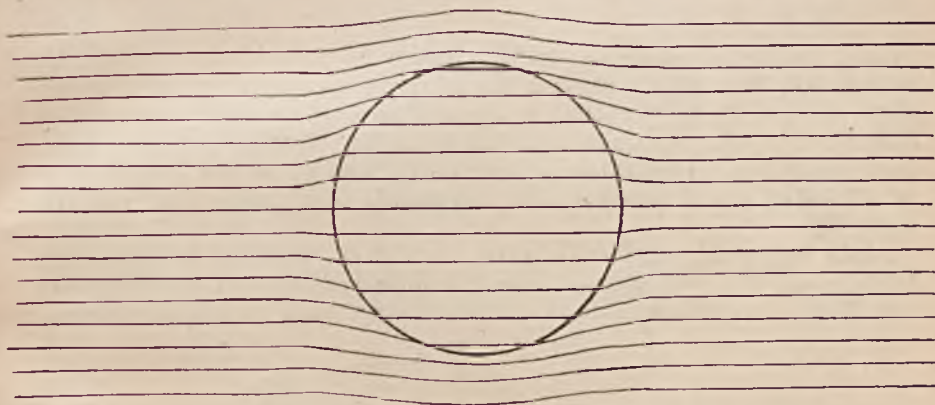
zbliżony do wzoru z dziedziny promieniowania

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2},$$

w obu wzorach α i β oznaczają kąty padania, wzgl. załamania.

Zgodnie z tem właśnie zachodzą zmiany kierunków linii, które podane są na rys. 711, 712 i 713. Metale można w pewnej mierze traktować, jako dielektryki o nieskończenie wielkiej wartości stałej dielektrycznej, ale tylko o ile chodzi o matematyczną stronę zjawiska, nie zaś o fizyczną — jakgdyby tu kąty załamania są zawsze proste, dzięki czemu linje skierowują się stycznie do powierzchni i wgłęb metalu dostać się nie mogą.

Z naciskiem podkreślamy znaczenie tej właśnie różnicy wartości stałej dielektrycznej. Umieszczenie np. pierścienia, wyrobionego z pew-



Rys. 713.

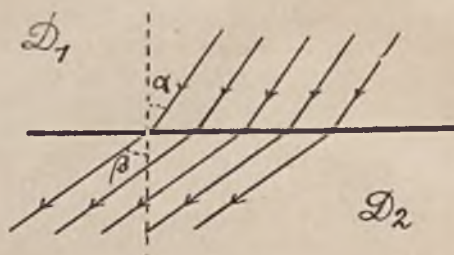
nego izolatora, w ośrodku izolującym tej samej wartości stałej dielektrycznej nie dałoby żadnej zmiany w przebiegu linii i rurek pola.

Naogół, jak już widziliśmy, stała dielektryczna wszelkich stałych izolatorów jest większa niż stała dielektryczna powietrza, wszelkie zaś obserwowane zjawiska elektrostatyczne zachodzą zazwyczaj w powietrzu. Ciekawe jest, co byłoby, gdybyśmy podobne zjawiska obserwowali w ośrodku o większej wartości stałej dielektrycznej niż stała dielektryczna ciał, między którymi zachodzą postrzegane działania. Okazuje się, że zjawiska te, że tak powiemy, odwracają się — zamiast t. zw. przyciągania następuje odpychanie i odwrotnie. Wysoce pouczające w tym względzie doświadczenie wyobraża rys. 715.

W naczyniu z naftą umieszczamy kulkę metalową, połączoną z biegunem maszyny elektrostatycznej; z umieszczonej zaś obok rurki zapomocą pompki (niewidocznej na rysunku) wypuszczamy pęcherzyki po-

wietrza, które się unoszą do góry. Otóż te pęcherzyki są *odpychane* od kuleczki naelektryzowanej.

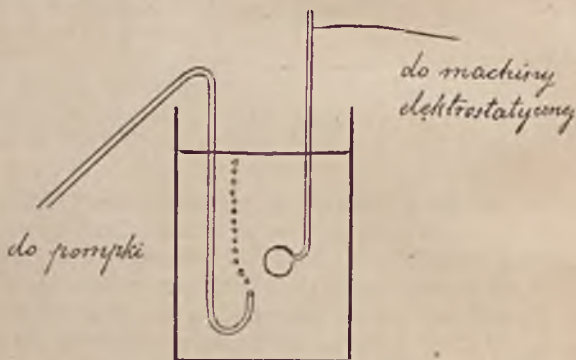
O ile w polu elektrostatycznym, wytworzonym przez ciało naelektryzowane dodatnio, mieści się izolowany przewodnik metaliczny (np. walec w polu kuli—rys. 638 i 667), wiemy, że się on elektryzuje induk-



Rys. 714.

cyjnie, przyczem w miejscu, gdzie u jego powierzchni kończą się dobiegające doń linje pola, pokrywa się nabojem ujemnym, w miejscu zaś, skąd dalej z tej powierzchni wybiegają linje (wewnątrz przewodnika linij niema), pokrywa się on nabojem dodatnim, równym tamtemu naboju ujemnemu. Powstanie w ten sposób naboju znaku przeciwnego w pobliskiej części przewodnika warunkuje owo znane nam przyciąganie się.

Gdy linje pola przebiegają przez dielektryk, zachodzi w nim t. zw. polaryzacja dielektryczna, o której wspominaliśmy w ust. 283 (patrz rys. 649) — owe niewielkie w granicach cząsteczek zachodzące przesu-



Rys. 715.

nięcia elektronów, skutkiem czego również, jak w przypadku przedstawionym na rys. 649, zachodzi obserwowane przyciąganie. Otóż po uwagach uzupełniających, któreśmy tu uczynili, widzimy, że tak się dzieje wtedy, gdy ciało, na które oddziaływa przewodnik naelektryzowany, ma stałą dielektryczną, większą od stałej dielektrycznej ośrod-

ka, w którym to wszystko się odbywa (linje pola podążają ku ciału w większej liczbie). Przeciwnie, jeżeli jak w przypadku przedstawionym na rys. 715, ciało (powietrze), na które działa przewodnik naelektryzowany, ma stałą dielektryczną mniejszą niż ośrodek (nafta), w którym się to dzieje, a więc linje pola, jakgdyby usiłują to ciało ominąć i wchodzi w nie w zmniejszonej liczbie, — wynik polaryzacji jest zgoła przeciwny — w pobliskiej części ciała zjawia się ładunek tegoż znaku, co wzbudzaający, i zachodzi odpychanie.

300. Wiadomości uzupełniające o dielektrykach i polu elektrostatycznym.

(Dokończenie).

Poświęciliśmy więcej czasu rozpatrzeniu własności dielektryków i ich roli w zjawiskach, dotychczas omówionych, kładąc nacisk na Faraday'owski sposób ujmowania tych rzeczy. Stając na swoim zupełnie oryginalnym punkcie widzenia, Faraday dokonał prawdziwego przewrotu w nauce o elektryczności, skierował ją na nowe tory, odsłonił przed nami nowe, a niesłychanie doniosłe dziedziny zjawisk. Śmiało rzec można, jak to zresztą i sam czytelnik z dalszego zobaczy, że, jeżeli dziś żyjemy w t. zw. wieku elektryczności, zawdzięczamy to w największej bodaj mierze Faraday'owi. Zasługi i wielkość dzieła Faraday'a jeszcze się wyolbrzymiają, jeżeli zważymy, że dzięki szczególnym warunkom kształtowania się geniuszu tego niezwykłego samouka, nie umiał on matematyki, był zatem pozbawiony tego potężnego środka w ujmowaniu faktów i wyciąganiu wniosków. Obdarzony niesłychaną intuicją i wyobraźnią, radził on sobie w ten sposób, iż myślał, że tak powiemy, obrazami zjawisk i w obrazach tych orjentował się, jak nikt inny; próbkę tego sposobu myślenia mieliśmy w Faraday'owskim obrazie pola elektrostatycznego. Wszakże ten wyłącznie sposób myślenia ma poważne słabe strony. To też ogromną zasługą innego znakomitego uczonego angielskiego J. Clerk Maxwella *), autora epokowego „Traktatu o elektryczności i magnetyzmie“, było ujęcie wyobrażeń Faraday'a w formy matematyczne i stworzenie w ten sposób potężnej teorii zjawisk elektromagnetycznych.

Jak wspominaliśmy w ust. 287, Faraday odrzuca wszelkie działania na odległość, jako fizycznie niezrozumiałe. Nie zwalcza on w ten sposób zależności, zawartych w zasadniczych wzorach w rodzaju wzoru Coulomba — wzór taki ujmuje doskonale ilościową stronę faktu, jak on się nam przedstawia; Faraday nie może jednak na tem poprzestać i, stawiając sobie pytanie, *jak* to się dzieć może, że jedno ciało naelektryzowane wywiera działanie na inne ciało naelektryzowane, mieszczące się w pewnej od niego odległości, odpowiada, że nieinaczej jak za pośrednictwem znajdującego się między temi ciałami ośrodka. Podobnie, trzy-

*) James Clerk Maxwell (1831—1879) profesor i kierownik pracowni fizycznej na Uniwersytecie w Cambridge.

mając w rękę koniec pręta, którego drugi koniec trzyma inna osoba, możemy tamtą osobę pociągnąć ku sobie lub odepchnąć od siebie; niepojętem byłoby jednak takie działanie bez udziału odpowiedniego pomostu, łączącego wchodzące w grę osoby. Ze zjawieniem się zatem naboju elektrycznego w tem czy innem miejscu wiąże się powstanie pewnych zmian w otaczającym go ośrodku, pewnych napięć i ciśnień według wyobrażeń Faraday'a lub, mówiąc ogólnie, pewnych ciśnień, gdyż napięcia rozważać możemy, jako ciśnienia ujemne (t. I, ust. 36); objawem tych ciśnień jest postrzegane działanie na inny nabój, mieszczący się w pewnej odległości. Ten drugi nabój, oczywiście, ze swej strony przyczynia się do ostatecznego ukształtowania się owych ciśnień, stanowiących według Faraday'a istotę pola elektrostatycznego; oba naboje poddane są ich działaniom, to też w obserwacji samego zjawiska stwierdzamy działanie obustronne. Gdy naboje znikają, gdy zachodzi rozbrojenie ciał naelektryzowanych, znika i owo charakterystyczne odkształcenie elektryczne ośrodka.

Na czem polega to odkształcenie elektryczne, jaki jest jego mechanizm, o tem nie możemy powiedzieć. Wszak działania elektrostatyczne zachodzą i w próżni, zatem i w próżni tworzą się te odkształcenia. Trudne to jest do wyobrażenia; to też, jak już wspominaliśmy, radzimy sobie, zakładając, że niema próżni, że cała przestrzeń wszechświata wypeniona jest tym eterem wszechświatowym, który jest, między innymi, nośnikiem fal energii promienistej; że właśnie w tym eterze, jako w pewnej, bądź co bądź, substancji, jakkolwiek dla nas tajemniczej, zachodzą te odkształcenia. Niewiele to jednak wszystko mówi poza tym ciekawym niezmiernie szczegółem, że, aby zdać sobie sprawę z szeregu postrzeganych zjawisk, musimy „próżni“ przypisywać jakieś własności fizyczne.

Zdawałoby się, rzecz się przedstawia łatwiej, gdy rozważamy jakiś ośrodek materialny, taki czy inny dielektryk. Istotnie, wtedy mamy dane co do pewnych szczegółów, zachodzących w takim ośrodku; w rzeczywistości jednak sprawa przedstawia się tu w sposób jeszcze bardziej skomplikowany. Tym charakterystycznym szczegółem, który zachodzi w dielektryku, gdy się w nim ustala pole elektrostatyczne, jest wymieniona już wyżej parokrotnie *polaryzacja dielektryczna*, wiążąca się bezpośrednio z *indukcją elektrostatyczną*.

W polu naelektryzowanego przewodnika gdziekolwiek znajdujący się i posiadający swobodę ruchów nabój tegoż znaku poruszałby się według linii pola, w tem miejscu przypadającej, oddalając się od tamtego przewodnika; w kierunku wręcz przeciwnym poruszałby się nabój znaku przeciwnego. Gdy pole tworzy się w dielektryku, znajdujące się w poszczególnych jego cząstkach elektrony przesuują się nieco pod takim właśnie działaniem w odpowiednim kierunku (a więc w stronę dodatnio naelektryzowanego przewodnika, ewent. we wręcz przeciwną, jeżeli przewodnik naelektryzowany jest ujemnie); w ten sposób tworzy się owa *polaryzacja dielektryczna*, z którą zawarliśmy pierwszą znajomość, omawiając przyciąganie skrawków papieru przez ciało naelektryzowane (rys. 649).

Jeżeli pomyślimy gdziekolwiek w dielektryku małą powierzchnię płaską, ustawioną prostopadle do kierunku natężenia pola w tym miejscu, poprzez tę powierzchnię przesunie się w chwili ustalania się pola pewna liczba elektronów, a więc określonej wielkości nabój; stosunek tego naboju do powierzchni pomyślanego elementu płaskiego, wyrażający liczbowo wartość przesuniętego naboju poprzez powierzchnię 1 cm^2 , naogół bywa różny; dostrzegamy w tym punkcie oparcia do ilościowego ujęcia zjawiska indukcji w dielektryku i wiążącej się z nią polaryzacji dielektrycznej.

Na tem jednak nie koniec. To, co dziś wiemy o budowie materji, składa się na obraz, w którym brak jest ciągłości i jednolitości; musimy sobie wyobrażać, że cząsteczki poszczególne tej czy innej substancji przypadają w pewnych od siebie odległościach, a więc pomiędzy cząsteczkami mamy ową próżnię albo eter wszechświatowy, jeżeli kto woli. Procesowi polaryzacji dielektrycznej musi więc i tu towarzyszyć pewien proces w tej przestrzeni międzycząsteczkowej, muszą się tam tworzyć takie właśnie odkształcenia elektryczne, napięcia i ciśnienia, o jakich mówiliśmy wyżej. Jak widzimy tedy to, co się dzieje w dielektryku, gdy w nim powstaje pole elektrostatyczne, jest bardziej skomplikowane aniżeli to, co cechuje pole elektrostatyczne w próżni.

A teraz jeszcze jedna ważna uwaga. Jeżeli powstawanie pola elektrostatycznego dokoła pewnego naboju jest powstawaniem takich odkształceń elektrycznych, musi to powstawanie wymagać pewnego czasu. Gdy gdziekolwiek zjawia się nabój elektryczny albo znika, powstaje dokoła pole albo znika, ale nie możemy sobie tego wyobrazić tak, że naraz pole to powstaje w całości w tym samym momencie, raczej w miejscach bliższych naboju zmiany te zachodzą wcześniej, w dalej położonych później; ustalający się stan rzeczy rozchodzi się z pewną prędkością. Tego rodzaju obraz nie nasuwałby się nam wcale, gdybyśmy chcieli stanąć na stanowisku zasady działania na odległość.

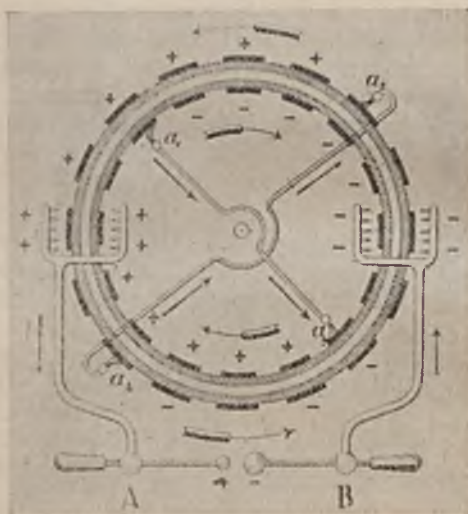
Otóż nie jest rzeczą rozumowania, ale doświadczenia rozstrzygnięcie, czy istotnie daje się stwierdzić i zmierzyć prędkość rozchodzenia się w dielektrykach i w próżni zmian, podobnych do tych, o których tutaj wzmiankowaliśmy. Jak się potem dowiemy, doświadczenie rozstrzyga to pytanie twierdząco, a co więcej wykazuje, że prędkość ta jest równa prędkości rozchodzenia się energii promienistej, prędkości światła. W ten sposób okazuje się usprawiedliwioną myśl, przytoczoną przed chwilą, że to nie w czem innym, jak właśnie w eterze wszechświatowym, który dla fizyka jest synonimem próżni, zachodzą owe odkształcenia elektryczne, które tworzą istotę pola elektrostatycznego (nie polaryzacji dielektrycznej! polaryzacja wiąże się z ruchem elektronów, elektrony zaś stanowią składową część materji; w próżni elektronów niema!).

To, cośmy tu powiedzieli, wskazuje, oczywiście, jeszcze i na to, że między zjawiskami promieniowania a zjawiskami elektrycznymi musi zachodzić jakiś związek.

Do tych rzeczy jeszcze z biegiem wykładu wrócimy.

301. Machiny elektrostatyczne.

Kilkakrotnie już odwoływaliśmy się do machin elektrostatycznych, które nam dostarczają nabożów elektrycznych w sposób bardziej dogodny i w większych ilościach, niż to czyni pocieranie pręta szklanego czy ebonitowego. Machiny z tarciami, w których naboże otrzymywały się tak samo, jak na tych prętach, wyszły już zupełnie z użycia; używane dziś są jedynie maszyny indukcyjne, w których naboże powstają przez indukcję elektrostatyczną. Istnieje cały szereg typów tych machin; nie będziemy ich opisywali, poprzestając na rozpatrzeniu budowy i działania najbardziej rozpowszechnionego typu maszyny Wimshursta. Rys. 697 daje wygląd tej maszyny, zaś rys. 716 przedstawia schematycznie jej budowę, ułatwiając zrozumienie działania.



Rys. 716.

Dwie tarcze kołowe (szklane lub ebonitowe), mieszczące się w odległości kilku milimetrów jedna od drugiej, wprawiane są w ruch obrotowy w przeciwne strony. Wpobliżu obwodów obu tarcz po ich stronach zewnętrznych (a więc nie tych, któremi zwrócone są ku sobie) znajdują się naklejone paski cynfolii. Z tych samych stron, gdzie są te paski, mieszczą się pod pewnym kątem względem siebie, ustawione pręty metalowe, t. zw. łączniki, zakończone miotłkami metalowymi, które zlekka dotykają pasków cynfolii. Z prawej i lewej strony na rys. 697 widzimy na końcach średnicy poziomej t. zw. grzebienie — łuki metalowe, zaopatrzone na stronie wewnętrznej w kolce i połączone jeden z wewnętrzną okładką jednej, drugi z wewnętrzną okładką drugiej butelki lejdejskiej, a jednocześnie z prętami metalowymi, mającymi na jednych końcach kulki na drugich rękojeści izo-

lujące (okładki zewnętrzne butelek są ze sobą połączone i uziemione). Pręty te dają się przy pomocy rękojeści tak pochyłać, by kulki przypadać mogły w różnych od siebie odległościach. Te pręty z kulkami tworzą właśnie t. zw. bieguny tej maszyny. Na rys. schematycznym 716 tarczy maszyny przedstawione są, jako cylindry współśrodkowe (wewnętrzny oznacza tarczę przednią, zewnętrzny tylną), łączniki odpowiednio przez a_1 , a_2 , a_3 , a_4 ; pręty z kulkami A i B (bieguny) połączone są z grzebieniami; butelki lejdejskie na schemacie zostały opuszczone. Przypuścimy, że na jednym ze skrawków cynfolji, np. na tarczy tylnej (cylindrze zewnętrznym), mieści się najmniejszy bodaj nabój dodatni (praktycznie biorąc, nigdy tak ściśle nie bywa, by skrawki te były wszystkie bezwzględnie obojętne elektrycznie). Przy takim obrocie tarcz, jaki jest zaznaczony na schemacie, w pewnym momencie ten skrawek z nabojem dodatnim znajdzie się naprzeciwko skrawka tarczy przedniej (cylindra wewnętrznego), dotykanej przez miotelkę a_1 łącznika; jednocześnie miotelka a_2 tego łącznika dotykać będzie skrawka, przypadającego symetrycznie na drugim końcu danej średnicy tarczy. Przez indukcję powstanie wtedy na skrawku cynfolji, dotykającym miotelki a_1 nabój ujemny, zaś na skrawku cynfolji, dotykającym miotelki a_2 — nabój dodatni. Ruch obrotowy tarczy przedniej (koła wewnętrznego na schemacie) uniesie we wskazanym kierunku skrawki z ich nabojami i w pewnym momencie skrawek z nabojem ujemnym znajdzie się naprzeciwko skrawka tarczy przeciwnej, dotykanej w tym momencie przez miotelkę a_3 drugiego łącznika, podczas gdy druga miotelka a_4 tegoż łącznika przytyka do skrawka, znajdującego się w miejscu średnicowo przeciwnym. Przez indukcję powstanie wtedy na skrawku, dotykającym miotelki a_3 , nabój dodatni, zaś na skrawku, dotykającym miotelki a_4 , nabój ujemny. Ruch obrotowy tarcz uniesie we wskazanych kierunkach oba te skrawki wraz z ich nabojami. Stopniowo w ten sposób zwiększać się będzie liczba skrawków, obdarzonych nabojami, każdy zaś z nich wytwarzać będzie przez indukcję na innych skrawkach naboje. Ustali się ostatecznie taki stan rzeczy, jaki jest przedstawiony na schemacie (rys. 716), że obie tarczy, poruszające się w przeciwne strony będą niosły do grzebienia, złączonego z prętem B , naboje ujemne, zaś do grzebienia, złączonego z prętem A , naboje dodatnie. Grzebienie, wywierając znane już nam działanie „ssaące“ na te naboje, będą ładowały do coraz wyższego potencjału pręty A i B oraz połączone z nimi okładki wewnętrzne butelek lejdejskich. W ten sposób będą czynne owe bieguny — dodatni A i ujemny B — maszyny elektrostatycznej, skąd można będzie czerpać naboje w miarę potrzeby.

Gdy różnica potencjałów na kulkach, któremi są zakończone pręty A i B , wzrośnie dostatecznie, między kulkami nastąpi wyładowanie iskrowe, poczem przy dalszym obrocie tarcz maszyny znowu różnica ta poczem wzrastać, aż do nowego wyładowania i t. d. Gdy chcemy uniknąć wyładowań, rozchylamy odpowiednio pręty, by kulki możliwie od siebie oddalić, jak bowiem wykazuje badanie, na którym się zatrzymywać nie będziemy, dalekość bicia iskry między naelektry-

zowanemi przewodnikami w powietrzu zależy od różnicy potencjałów na tych przewodnikach (poza tem zależy od kształtu przewodników ciśnienia atmosferycznego i innych czynników, o których teraz mówić nie będziemy). Dla przykładu przytoczymy, że np. na to, by między kuleczkami o średnicy 1 cm w powietrzu przy ciśnieniu normalnem przeskoczyła iskra długości 1 mm, trzeba różnicy potencjałów, albo t. zw. *napięcia elektrycznego* 4830 woltów; dla otrzymania iskry 5 mm między temi kuleczkami w tych samych warunkach trzeba napięcia 16890 woltów; odpowiednio dla długości iskry 1 cm — 25410 woltów, 2 cm — 31350 woltów, zaś iskry 2-metrowej — 3000000 woltów. Widzimy więc, że naogół zjawisko wyładowania iskrowego wiąże się z *wysokiem napięciem*, przyczem, jakkolwiek dalekość bicia iskry rośnie wraz z różnicą potencjałów, niema tu prostej proporcjonalności.

Ćwiczenia i zadania.

442. W doświadczeniach z puszką Faraday'a należy stać jak najdalej od niej i nie zbliżać zanadto do niej ręki; zanurzane w puszcze przewodniki winny przeto być albo umocowane na długich izolujących rękojeściach, albo zawieszono na długich nitkach jedwabnych. Dlaczego?

443. Kula metalowa izolowana o średnicy 15 cm, umieszczona zdala od innych przedmiotów, posiada nabój + 125 jedn. el. st. Jaki jest potencjał kuli w jednostkach elektrostatycznych? Jaki jest ten potencjał w woltach?

444. Posługując się pojęciem pojemności, uzasadnić słuszność twierdzenia, wypowiedzianego na samym początku naszego wykładu o elektryczności, że, gdy izolowaną kuleczką metalową naelektryzowaną dotykamy drugiej kuleczki metalowej izolowanej tej samej wielkości, nie mającej naboju elektrycznego, nabój pierwszej kuleczki dzieli się pomiędzy obie na równe części.

445. Na nitce jedwabnej zawieszona jest zdala od innych przewodników kuleczka metalowa średnicy 1 cm, mająca nabój elektryczny dodatni = $3 \cdot 10^{-8}$ kulomba. Jaka jest wartość potencjału kuleczki?

446. Kuleczkę naelektryzowaną z zadania 445 wpuszczamy do wnętrza nie-naelektryzowanej izolowanej kuli metalowej z otworem u góry, jak na rys. 641, tak, by znalazła się dokładnie w jej środku (oczywiście otwór ma średnicę nieco większą od średnicy kuleczki i możemy dokonać tego wpuszczenia bez zetknięcia kul). Średnica zewnętrzna tej większej kuli równa się 30 cm, grubość jej ściany = 1 cm. Jaka jest wartość potencjału kuleczki oraz większej kuli?

447. Kulę większą z poprzedniego zadania, gdy została w niej umieszczona kuleczka naelektryzowana, uziemiamy. Jaka jest wtedy wartość potencjału małej kulki?

448. Gęstość elektryczną na przewodniku doprowadzić można co najwyżej do wartości $10 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{sek}}$, przy dalszem bowiem elektryzowaniu zachodzi samorzutne wyładowanie w otaczające powietrze. Jakiej największej wartości naboju udzielić można metalowej kuli izolowanej o średnicy = 15 cm, znajdującej się

daleko od innych przewodników, by jeszcze to samorzutne wyładowanie nie zachodziło? Jaki będzie wtedy potencjał kuli?

449. Na nitce jedwabnej zawieszona jest kula metalowa o średnicy 5 cm, mająca nabój + 10 jedn. el. st. Druga tak samo zawieszona kula metalowa o średnicy 8 cm, dość daleko od pierwszej umieszczona, posiada nabój + 25 jedn. el. st. Na chwilę dotykamy jednej kuli drugą, poczem znowu oddalamy jedną od drugiej. Jakiej wartości potencjały (w jednostkach elektrostatycznych i woltach) posiadają kule przed dotknięciem i po dotknięciu?

450. Rozwiązać poprzednie zadanie, gdy nabój pierwszej kuli wynosi + 15 jedn. el. st., drugiej zaś — 25 jedn. el. st.

451. Izolowanej kuli metalowej z wydrążeniem, jak na rys. 641, mającej 20 cm średnicy zewnętrznej, udzielamy 20 razy z rzędu zapomocą kuleczki próbnej o średnicy = 1 cm równych naboju elektrycznych, dotykając za każdym razem kuleczką od wewnątrz. Kuleczkę próbną ładujemy raz po raz od przewodnika, którego potencjał utrzymywany jest stale przy wartości 10000 woltów. Do jakiego potencjału ładujemy ostatecznie tę kulę wydrążoną, jeżeli izolacja jej żadnych braków nie wykazuje?

452. Z dwu izolowanych kul metalowych jedna ma średnicę 20 cm, druga 8 cm. Większa jest naładowana do potencjału 10000 woltów; druga wcale nie ma ładunku elektrycznego. Jaki będzie potencjał obu kul po ich połączeniu cienkim drutem?

453. Dlaczego w poprzednim zadaniu używamy drutu *cienkiego*, przytem t. zw. nagiego, t. j. nie owiniętego izolacją?

454. Dwie kulki metalowe o średnicach 1 cm i 2 cm, zawieszone na jedwabnych nitkach, elektryzujemy jednocześnie od bieguna maszyny elektrostatycznej do potencjału 50000 woltów, poczem umieszczamy te kulki w odległości 50 cm jedną od drugiej (odległość tę liczymy od środka jednej kulki do środka drugiej). Jaką siłą działają tu na siebie naboje, mieszczące się na kulkach?

455. Izolowanej kuli metalowej naelektryzowanej o średnicy = 30 cm dotykamy nienaelektryzowaną kuleczką próbną o średnicy 1 cm. Jaką część naboju odbieramy przez to dużej kuli?

456. Kuleczki, tworzące bieguny maszyny elektrostatycznej, mają po 1 cm średnicy i są rozsunięte na odległość 1 cm. Przy pewnym jednostajnym ruchu obrotowym maszyny pomiędzy temi kuleczkami przeskakuje co 2 sekundy iskra. Jakiej wartości naboju dostarcza maszyna w każdej sekundzie? ($c = 1000$ cm).

457. Okładce wewnętrznej butelki lejdejskiej o pojemności 0.005 MF udzielamy naboju 0,05 kulomba (okładka zewnętrzna jest uziemiona). Do jakiego potencjału naładowana jest butelka?

458. Jaka jest energia naelektryzowanej butelki lejdejskiej, o której mowa w zad. 457?

459. Opisać, jak to uczyniliśmy w ust. 295 (rys. 696), mechanizm ładowania się kondensatora, gdy jedną z okładek uziemiamy, drugą zaś łączymy ze źródłem naboju dodatnich?

460. Butelkę lejdejską stawiamy na płytce parafinowej, wewnętrzną zaś jej okładkę łączymy z biegunem maszyny elektrostatycznej. Wytlumaczyć różnicę, jaka zachodzi między elektryzowaniem butelki lejdejskiej w tym przypadku w porównaniu z przypadkiem zwykłego sposobu jej ładowania?

461. Gdy ręką dotkniemy kuleczki naładowanej butelki lejdejskiej, stojącej na stole, doznamy charakterystycznego wstrząśnienia. Jeżeli jednak powtórzmy doświadczenie, podkładając pod butelkę płytkę z parafiny lub innego izolatora, wstrząśnienia nie doznamy. Wyłumaczyć te fakty?

462. Dwie izolowane płytki metalowe A i B jednakowej wielkości ustawione są pionowo równolegle jedna do drugiej w odległości paru centymetrów. Każda z nich jest połączona z oddzielnym elektroskopem. Co wskazują elektroskopy, gdy 1) udzielamy płytce A naboju dodatniego, następnie zaś 2) uziwiamy płytkę B ?

463. Elektryzujemy arkusz cynfolji, zawieszony na nitkach jedwabnych, jak tylko na to pozwala połączona z cynfolją machina elektrostatyczna. Zbliżając wtedy palec do arkusza, otrzymujemy iskrę. Gdy powtórzmy doświadczenie, umieszczając ten sam arkusz cynfolji na płytce szklanej, leżącej na stole, otrzymamy iskrę bezporównania jaśniejszą. Dlaczego?

464. Grubość szkła butelki lejdejskiej wynosi 0,3 cm; średnica jej zewnętrzna równa się 16 cm; okładki cynfoljowe sięgają na wysokość 30 cm od dna; stała dielektryczna danego szkła $D = 6$. 1) Jaka jest pojemność tej butelki lejdejskiej w cm i w MF ? 2) Z ilu takich butelek, połączonych równolegle, utworzyć można baterję o pojemności 1 MF ? 3) Jaka praca należy wykonać, ładując jedną taką butelkę do potencjału 10000 woltów? 4) Jakiego naboju udzielamy butelce w tym ostatnim przypadku?

465. Pragniemy zbudować płaski kondensator z wielu arkuszy cynfolji formatu prostokątnego o bokach 15 cm i 25 cm, używając jako izolatora papieru parafinowanego grubości 0,1 mm, którego stała dielektryczna jest $D = 1,9$. Ile arkuszy cynfolji trzeba użyć, aby sporządzić taki kondensator o pojemności 1 MF ? Jakich mniej więcej wymiarów skrzyneczka może taki kondensator pomieścić?

466. W kulistym kondensatorze powielrznym, jak na rys. 701, średnica kuli wewnętrznej wynosi 15 cm, zewnętrznej zaś 20 cm. Ładujemy ten kondensator do potencjału 50 jedn. el. st. Jaka praca zostaje wykonana przy tem ładowaniu?

467. W kondensatorze z zad. 466 przestrzeń między kulami wypełniona jest szellakiem, zamiast powietrza; stała dielektryczna szellaku $D = 3$. Ładujemy ten kondensator do potencjału 600 jedn. el. st. Zakładając, że przy wyładowaniu cała energia kondensatora zostaje zmieniona na ciepło, znaleźć, ile ciepła powstaje przy tem wyładowaniu?

468. Między dwie płyty kondensatora powietrznego (jak na rys. 693 i 694), z których jedna jest uziemiona, a druga naelektryzowana i połączona z elektroskopem, wsuwamy płytę ebonitową grubości 5 mm, ustawiając ją symetrycznie względem obu płyt kondensatora. Wypada wtedy przesunąć uziemioną płytę o 3 mm (w którą stronę?), aby elektroskop dał takie samo wskazanie, jakie zanotowaliśmy przed wsunięciem płyty. Jaka jest wartość stałej dielektrycznej ebonitu?

469. Szkło butelki lejdejskiej ma stałą dielektryczną $D = 5$; grubość tego szkła jest 2 mm; różnica potencjałów między okładkami wynosi 1000 woltów. Pod jakim ciśnieniem znajduje się wtedy szkło danej butelki?

470. Jeżeli okładkę wewnętrzną jednej butelki lejdejskiej połączymy z okładką zewnętrzną drugiej takiej samej butelki, następnie okładkę wewnętrzną tej drugiej butelki z okładką zewnętrzną takiej samej trzeciej i t. d., to będziemy mieli t. zw. szeregowe połączenie butelek. (Rys. 717 przedstawia schematycznie takie szeregowe połączenie kondensatorów). Baterję o połączeniu szeregowem ładujemy w ten sposób, że okładkę zewnętrzną 1-ej butelki uziwiamy, wewnętrzną zaś ostatniej ją

czyimy ze źródłem nabojuw elektrycznych. Znaleźć pojemność baterji, złożonej z dwu jednakowych butelek lejdejskich, połączonych szeregowo, z których każda ma pojemność c ? (Niech czytelnik uwzględni przy tem, że na okładce zewnętrznej tej butelki, której okładkę wewnętrzną łączymy ze źródłem nabojuw, oraz na okładce wewnętrznej drugiej butelki powstają naboje różnych znaków przez indukcję, przyczem wielkości tych nabojuw mogą być uważane za równą nabojuwi, udzielanemu ze źródła pierwszej okładce; niech czytelnik również pamięta, co jest cha-



Rys. 717.

rakterystycznego w wartości potencjałów 2 przewodników, połączonych ze sobą metalicznie).

471. Posługując się metodą, wskazaną w zad. 470, dowieść, że między wartością C pojemności baterji, złożonej z n połączonych szeregowo kondensatorów, a wartościami pojemności c_1, c_2, \dots, c_n tych poszczególnych kondensatorów istnieje następująca zależność:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n} \dots \dots \dots (1)$$

W szczególności, jeżeli baterja złożona jest z n jednakowych kondensatorów, z których pojemność każdego jest c , to, oznaczając przez C pojemność baterji, możemy napisać:

$$\frac{1}{C} = \frac{n}{c} \dots \dots \dots (2)$$

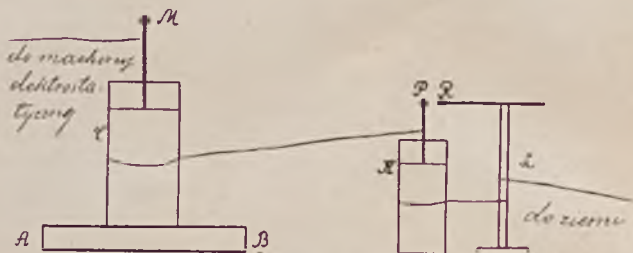
czyli

$$C = \frac{c}{n} \dots \dots \dots (3)$$

472. Kiedy korzystnie jest posługiwać się baterją kondensatorów o połączeniu równoległym, kiedy zaś o połączeniu szeregowym?

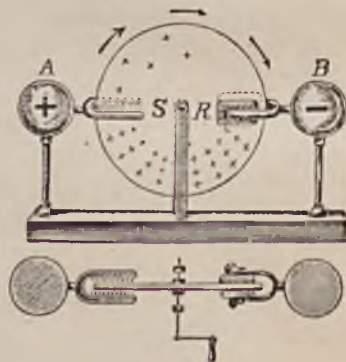
473. Na rys. 718, przedstawiona jest t. zw. butelka Lane'go, służąca do mierzenia przybliżonego nabojuw elektrycznych, udzielanych butelkom, wzgl. baterjom lejdejskim). Ładujemy butelkę C , stawiając ją na izolującej podstawce (np. płytce z parafiny); okładkę wewnętrzną łączymy z maszyną elektrostatyczną, zewnętrzną — z okładką wewnętrzną butelki Lane'go (K). Zewnętrzna okładka butelki mierniczej K , połączona jest metalicznie z kuleczką R iskiernika, a zarazem jest uziemiona. Gdy ładujemy butelkę C , np. dodatnio, okładka jej zewnętrzna ładuje się ujemnie, zaś wewnętrzna okładka butelki mierniczej dodatnio. W chwili, gdy różnica potencjałów na kuleczkach iskiernika wzrośnie do wartości, odpowiadającej dalekości bicia iskrą między P i R , następuje rozbrojenie butelki K , poczem proces się powtarza.

O wartości naboju, udzielonego butelce C za pośrednictwem pręta M , wnosić możemy z liczby iskiei, przeskakujących między P i R . Zakładając, że kuleczki P i R mają średnice = 1 cm i są rozsunięte na odległości 5 mm, znaleźć nabój butelki C , jeżeli podczas ładowania przeskoczyło między P i R dziesięć iskiei, zaś wiadomo, że pojemność butelki mierniczej wynosi 300 cm³



Rys. 718.

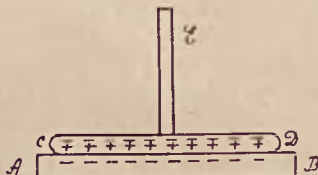
474. Na rys. 719, przedstawiona jest schematycznie budowa maszyny elektrostatycznej starego typu z tarcie. Obracaną przy pomocy korby tarczę szklaną pocierają przylegające do niej poduszki skórzane (R), pokryte amalgamatem cyny i cynku (czasem tylko cyny). Tarcza porusza się między kołcami, w które zaopatrzone jest wewnętrzna strona widelca S . Poduszki połączone są metalicznie z izolowaną kulą metalową B ; widelec S podobnie z izolowaną kulą metalową A . Wy tłumaczyć, w jaki sposób kule A i B elektryzują się tak, jak to wskazane jest na rysunku?



Rys. 719.

475. Prototypem maszyn elektrostatycznych indukcyjnych jest t. zw. *elektrofor* (rys. 720). Elektryzujemy krążek ze smoły AB przez pocieranie futrem lub sukniem (można użyć krążka ebonitowego lub z innego jeszcze izolatora). Na krążek ten kładziemy tarczę metalową CD , zrobioną zazwyczaj z blachy i zaopatrzonej w rękojeść izolującą E . Skutkiem nierówności powierzchni, krążki AB i CD nie przylegają do siebie szczelnie, lecz dotykają w niewielu zaledwie punktach. W ten spo-

sób płyta CD ładuje się indukcyjnie. Jeżeli dotkniemy jej palcem, nabój jednoimienny z nabojem płyty AB , jak to mówią, „spłynie do ziemi“, pozostanie zaś jedynie nabój znaku przeciwnego. O ile wtedy, ujmując ręką trzonek E , zdejmujemy krążek CD z AB i zbliżymy np. do główki elektroskopu, naładujemy elektroskop. Zbliżając palec do płyty CD , otrzymamy iskierkę. Jeżeli po wyładowaniu płyty CD położymy ją ponownie na AB i dotkniemy palcem, znowu ją naładujemy, jak poprzednio. Po



Rys. 720.

jednorazowym natarciu płyty AB można wielokrotnie ładować, jak to zostało opisane, krążek CD . Uwzględniając, że między różnoimiennymi nabojami zachodzi przyciąganie, wytłumaczyć, kosztem jakiej pracy otrzymujemy w opisanym procesie energię elektryczną?

476. Pamiętając o wzajemnym oddziaływaniu nabołów jednoimiennych i różnoimiennych, wytłumaczyć, kosztem jakiej pracy tworzy się energia elektryczna, której nam dostarcza machina Wimshursta?

ROZDZIAŁ IV.

OGÓLNE WIADOMOŚCI O PRĄDZIE ELEKTRYCZNYM. ELEKTROLIZA. OGNIWA.

302. Zjawisko prądu elektrycznego. Kierunek prądu.

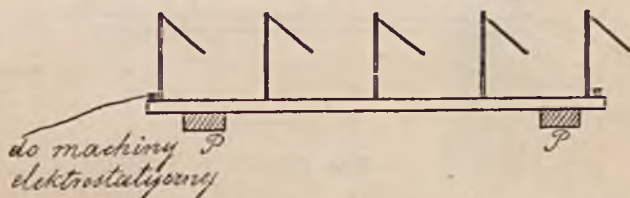
Gdy dwa przewodniki, naelektryzowane do różnych potencjałów, łączymy zapomocą przewodnika, potencjały się wyrównują. Zmieniają się przytem wartości naboju, mieszczących się początkowo na obu przewodnikach, i następuje nowe ich rozmieszczenie. Może się to dziać nieinaczej jak przez przeniesienie się poprzez łączący przewodnik pewnego naboju elektrycznego. Tego rodzaju ruch naboju elektrycznego tworzy, jak już wspominaliśmy w poprzednich rozdziałach, *prąd elektryczny*. Rozpatrując przypadek rozbicia butelki lejdejskiej, gdy tworzący się przytem prąd elektryczny przechodził przez drucik żelazny (rys. 706), stwierdzaliśmy żarzenie się tego drucika — objaw ten świadczył niewątpliwie, że coś szczególnego zachodziło w tym druciku.

Mówiąc o prądzie elektrycznym, przytaczaliśmy wyżej pewne obrazy porównawcze, a mianowicie: gdy łączymy rurą dwa naczynia, w których się mieści woda, sięgająca do różnych poziomów, zachodzi wyrównanie tych poziomów — różnica poziomów i wiążące się z nią ciśnienie jest tu warunkiem powstania ruchu wody, czyli prądu wodnego w kierunku od naczynia, w którym poziom jest wyższy, do naczynia, gdzie poziom przypada niżej; ten zaś prąd wody prowadzi z kolei rzeczy do wyrównania poziomów. Albo, gdy mamy połączenie termiczne dwu ciał o różnej temperaturze, powstaje prąd cieplny w kierunku od ciała cieplejszego do chłodniejszego, sprowadzający wyrównanie temperatur. Z tych analogij nasuwa się myśl, że różnica potencjałów musi w zjawisku tworzenia się prądu elektrycznego odgrywać rolę podobną jak różnica poziomów wody, względnie różnica temperatur w przypadkach prądu wodnego lub cieplnego. W związku też z temi analogjami przyjęto w czasach, gdy poczęły się kształtować zręby nauki o prądzie elektrycznym, uważać za kierunek prądu elektrycznego kierunek od miejsca, gdzie potencjał jest wyższy, do miejsca o potencjale niższym. Jak zobaczymy, trzymanie się formalne tej dawnej umowy nie prowadzi do żadnych nieporozumień. To też w dalszym ciągu, o ile nie zrobimy

jakiego specjalnego zastrzeżenia, w ten właśnie sposób rozumieć będziemy kierunek prądu, bez względu na to, jak się istotnie przedstawia mechanizm tego przenoszenia się z miejsca na miejsce naboju elektrycznych.

303. Spad potencjału wzdłuż drogi prądu.

Prąd elektryczny, powstający przy wyrównaniu potencjałów dwu przewodników, mających początkowo różne potencjały i połączonych przewodnikiem, jest zjawiskiem krótkotrwałym. Gdy np. główki dwu zupełnie jednakowych elektroskopów, naładowanych tak, że rozchylenie listków w obu są różne, łączymy drutem, w samej chwili ustalenia połączenia dostrzegamy zrównanie się rozchylenia — nie jesteśmy w stanie dostrzec czasu trwania tego zjawiska. Gdy do połączenia elektroskopów użyjemy zamiast drutu półprzewodników np. pręta drewnianego, nitki bawełnianej albo sznurka, jesteśmy już w możności zauważyć stopniowe zmiany w stanie listków, ale i w tym razie zjawisko odbywa się dość prędko. Na takich przykładach szybko przemijającego zjawiska trudno je poznać bliżej.



Rys. 721.

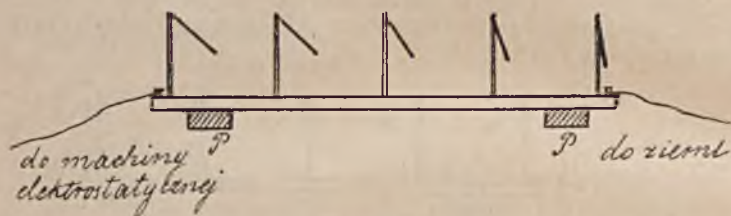
Gdybyśmy jednak potrafili różnice potencjałów dwu połączonych przewodników stale podtrzymywać, dostarczając im wciąż odpowiednich nowych naboju elektrycznych, stworzylibyśmy warunek istnienia w przewodniku stale płynącego prądu. Z chwilą zaprzestania podtrzymywania niezbędnej różnicy potencjałów ustałoby i zjawisko prądu.

Umieścimy poziomo pręt drewniany długości 1,5 m—2 m na dwu podstawkach (P , P) z parafiny i powstawiamy w specjalnie do tego porobione w pręcie otworki pionowe druczki, mające na górnych końcach zawieszono wąskie skrawki papieru; będą to bardzo prymitywnej budowy, ale wystarczające dla naszego celu elektroskopy. Połączmy (rys. 721) jeden koniec pręta z biegunem maszyny elektrostatycznej i puśćmy w ruch maszynę. Natychmiast wszystkie skrawki papieru odchyliły się tak, jak to przedstawione jest na rysunku, wskazując tem, że pręt pozostaje naelektryzowany do pewnego potencjału.

Połączmy teraz drugi koniec pręta, nie przerywając funkcjonowania maszyny, z ziemią (z rurą gazową lub wodociągową, lub poprostu do-

tykając tego końca ręką). Ustali się wtedy stan elektroskopów taki, jak to widać na rys. 722. Teraz koniec pręta, połączony z machiną elektrostatyczną, pozostaje przy potencjale pewnej określonej wartości, drugi zaś koniec, połączony z ziemią — przy potencjale równym zeru. Między obu końcami pręta podtrzymywana jest pewna różnica potencjałów, wytwarzająca stały prąd elektryczny w pręcie. Jak wskazują umieszczone na pręcie elektroskopy, wzdłuż pręta zachodzi przytem stopniowy *spad potencjału*.

Prąd w pręcie ustaje, gdy przerywamy połączenie z ziemią — wówczas na całym pręcie wytwarza się potencjał tej samej wartości i wszystkie elektroskopy dają jednakowe wskazania, jak na rys. 721; gdy zaś przerywamy połączenie pręta z machiną elektrostatyczną, wtedy wszystkie listki opadają, potencjał bowiem całego pręta uziemionego staje się $= 0$. Używamy w tem doświadczeniu pręta drewnianego, a więc t. zw. półprzewodnika, wyzyskując tę jego własność, że wszelkie przemieszczenia w nim nabożów elektrycznych zachodzą wolniej, niż w metalach.



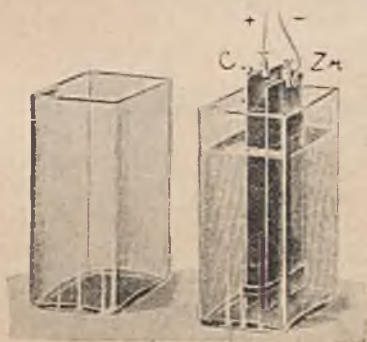
Rys. 722.

Gdy, wykonywając doświadczenie, podane na rys. 722, wprawiamy koło maszyny w prędszy, wzgl. wolniejszy ruch obrotowy, zjawisko zasadniczo się nie zmienia, tylko w przypadkach ruchu prędszego elektroskop, najbliższy maszynie położony, daje wychylenie większe, przy ruchu wolniejszym — mniejsze; dalsze elektroskopy dają odpowiednio coraz mniejsze wychylenia, różne za każdym razem co do absolutnej wielkości. W pierwszym przypadku (przy prędszym ruchu koła maszyny) wytwarzamy większą różnicę potencjałów między końcami pręta, dostarczając w prędszem tempie nabożów końcowi, połączonemu z maszyną; w drugim razie — mniejszą. Właściwie i na drucie, łączącym pręt z ziemią, zachodzi dalej spad potencjału, czyli na końcu pręta potencjał nie jest jeszcze ściśle równy zeru. Praktycznie jednak biorąc, jest to wobec różnicy przewodnictwa pręta i drutu oraz małej czułości użytych elektroskopów niedostrzegalne. Zresztą o to nam ściśle nie chodzi, zależy natomiast jedynie na wytworzeniu różnicy potencjałów na obu końcach pręta, co jest w zupełności osiągnane. Ustalenie faktu, że potencjał spada wzdłuż przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny, jest bardzo ważne. Niżej będziemy to mogli stwierdzić w sposób bardziej ściśły, a także wskazać ważne zastosowania tego faktu.

Zauważmy, że na każdym odcinku pręta płynący w nim prąd elektryczny można uważać za uwarunkowany różnicą potencjałów, istniejącą na początku i końcu odcinka.

304. Ogniwo voltaiczne.

Znakomity fizyk włoski Aleksander Volta (1745 — 1827), którego imię wymienialiśmy już wyżej, nauczył nas sporządzania znacznie bogatszych w naboje elektryczne źródeł, aniżeli są niemi maszyny elektrostatyczne. Źródła te zwiemy ogólnie *ogniwami*, a jeżeli dodajemy przymiotnik „voltaiczny“, pragniemy z jednej strony zaznaczyć, że mowa jest o źródłach energii elektrycznej, opartych przedewszystkiem na odkryciach Volty *), z drugiej strony uwiecznić w tej nazwie położone przez Voltę zasługi dla nauki.



Rys. 723.

Ogniw znamy dziś wiele; nie mamy potrzeby o wszystkich mówić, ani też rozpatrywać ich w historycznym porządku. Weźmy narazie dla przykładu t. zw. ogniwo Greneta.

Do szklanego naczynia, jakie widzimy na rys. 723 z lewej strony, wlewamy roztwór, zawierający na każde 100 gr wody 10 gr dwuchromianu potasowego i 10 cm³ stężonego kwasu siarkowego **). Do roztworu wkładamy dwie płyty, z których jedna jest węglowa (C), druga zaś cynkowa (Zn) — amalgamowana ***). Umieszczamy je tak, by się ze sobą nie stykały; w tym celu między płyty wstawiamy u góry

*) Odkrycia te zostały w znakomity sposób uzupełnione przez innych badaczy, co zaś do sposobu ujmowania faktów, poglądy nasze dzisiejsze nie odpowiadają już poglądom samego Volty.

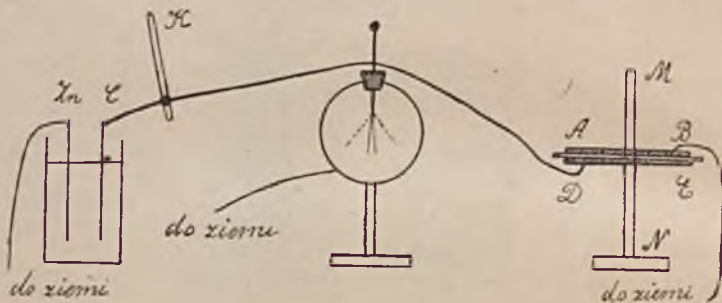
**) Najpierw sporządza się roztwór dwuchromianu potasowego, potem wlewa się doń trochę kwas siarkowy.

***) Amalgamowanie płyty cynkowej dokonywa się w ten sposób, że po oczyszczeniu jej przy pomocy rozcieńzonego kwasu siarkowego wciera się w jej powierzchnię trochę rtęci. Ostrożność nakazuje sporządzać roztwór kwasu siarkowego przez wlewanie kwasu do wody, a nie wody do kwasu; czytelnik powinien wiedzieć dlaczego.

i u dołu, albo u bocznych krawędzi, dwie jednakowej grubości płytki, albo rurki szklane, i obie płyty (C i Zn) ujmujemy u góry i u dołu w szczelnie opinające je taśmy gumowe. Do każdej z płyt przytwierdzamy u góry zaciski metalowe, z którymi łączymy druty miedziane, prowadzące dalej tam, gdzie to jest potrzebne.

Przy pomocy dostatecznie czułego elektrometru wykazać możemy, że na płytach C i Zn istnieje pewna różnica potencjałów, przyczem wyższą wartość potencjału ma płyta węglowa — mamy na niej t. zw. *biegun dodatni* (+) ogniwa, niższą — płyta cynkowa, gdzie przypada *biegun ujemny* (—). Tej różnicy potencjałów (wynosi ona około 1,8 woltów) nie można wykazać przy pomocy zwykłego elektroskopu listkowego; daje się to jednak uczynić, jeżeli połączymy elektroskop z kondensatorem w sposób, przedstawiony schematycznie na rys. 724.

Kondensator płaski składa się tu z dwu płytek mosiężnych AB i DE , z których pierwsza zaopatrzona jest w rękojeść izolującą M ,



Rys. 724.

druga spoczywa na podstawce izolującej N ; te okładki kondensatora przedzielone są papierem parafinowanym. Płytkę DE łączymy z główką elektroskopu; płytkę AB jest uziemiona. Płytkę węglową ogniwa łączymy z główką elektroskopu, a więc i z płytką DE kondensatora; płytę cynkową ogniwa uziemiamy. Potencjał, do którego jest teraz naładowany elektroskop, jest za mały, by listki dały dostrzegalne wychylenie. Odłączmy jednak ogniwo od elektroskopu (oczywiście, ujmując drut łączący nieinaczej jak za pośrednictwem odpowiedniego izolatora, np. rękojeści K) i zdejmijmy płytkę AB kondensatora, biorąc za rękojeść M . Wtedy listki elektroskopu rozchylają się i przekonanie się możemy w znany nam sposób, że mają one nabój dodatni. Wskazuje to, iż nabój, udzielony przez ogniwo płytce DE kondensatora, z chwilą, gdy zmniejsza się jej pojemność przy usunięciu płytki AB , ładuje ją do dostatecznie wysokiego potencjału, by mógł go wykazać elektroskop. Jeżeli elektroskop zaopatrzone jest w skalę i jest wycechowany, t. j. stanowi elektrometr, to, wymierzwszy pojemność pojedynczej płyty DE oraz całego kondensatora i wiedząc w ten sposób, ile razy zmniejsza się pojemność kondensatora przy zdjęciu płyty AB (musi być przytem uwzględniona i pojem-

ność elektrometru), możemy wyznaczyć różnicę potencjałów na biegunach ogniwa.

Gdybyśmy doświadczenie powtórzyli z tą różnicą, że płyta węglowa ogniwa byłaby uziemiona, cynkowa zaś połączona na chwilę z główką elektroskopu (elektrometru), ten ostatni okazałby się naelektryzowanym ujemnie. Po przerobieniu całego rachunku, jak to przed chwilą zostało wskazane, znaleźlibyśmy znowu tę samą wartość różnicy potencjałów na biegunach ogniwa.

Połączmy bieguny + i — rozpatrywanego teraz ogniwa z dwoma zaciskami Holtza, między którymi rozpięty jest cienki żelazny drucik, podobnie jak to mieliśmy w doświadczeniu, przedstawionem na rys. 706. Stwierdzamy, że drucik się grzeje, jeżeli zaś jest dość cienki i krótki, to nawet się żarzy i może się stopić. Ponieważ połączyliśmy tu przy jego pomocy bieguny ogniwa, na których uprzednio stwierdziliśmy istnienie różnicy potencjałów, mamy wszelkie podstawy do twierdzenia na zasadzie poprzedniego, iż przez drucik płynie prąd elektryczny i że właśnie owo grzanie się drucika jest znanym już nam objawem tego zjawiska.

Przerwijmy teraz połączenie i poddajmy ogniwo takiemu samemu badaniu przy pomocy elektrometru, jak to już czyniliśmy. Stwierdzamy, że na biegunach ogniwa w dalszym ciągu mamy taką, jak poprzednio, różnicę potencjałów. Mimo więc, że daliśmy możność zrównania się tych potencjałów, zrównanie to nie nastąpiło. Istnieje więc w ogniwie jakiś czynnik, podtrzymujący wciąż tę różnicę potencjałów na biegunach, mimo iż używamy ogniwa jako źródła stałego, przez dłuższy czas płynącego prądu elektrycznego. Czynnik ten nazywają ogólnie *siłą elektromotoryczną*. Zauważmy jeszcze, że podana wyżej wartość różnicy potencjałów na biegunach ogniwa Greneta (1,8 woltów), inaczej t. zw. *napięcie* na biegunach odpowiada przypadkowi, gdy ogniwo jest otwarte, t. j. gdy bieguny jego nie są połączone przewodnikiem, przez który płynie prąd elektryczny. Jeżeli mierzymy napięcie ogniwa wtedy, gdy jest czynne, dostarczając prądu, wynosi ono mniej, niż dla ogniwa otwartego, przyczem zmniejszanie się to jest różne w zależności od okoliczności, o których będziemy mówili niżej.

Jeżeli porównamy, choć pobieżnie narazie, ilość ciepła, tworzącego się w drucie, łączącym bieguny ogniwa, podczas dłuższego trwania tego prądu, z tą ilością, którą otrzymywaliśmy w przypadku wyładowania baterji lejdejskiej, nie możemy nie zauważyć, że ogniwo jest bezporównania bogatszem źródłem energii, aniżeli naładowana butelka lejdejska. Skąd się ta energia bierze? Musimy to rozważyć.

305. Zjawiska chemiczne w ogniwie. Przewodniki metaliczne i elektrolity.

Cynk amalgamowany w świeżo sporządzonem ogniwie Greneta jest połyskujący i wygląda jak posrebrzony, roztwór zaś, w którym płyty są zanurzone, posiada barwę czerwono-pomarańczową. Gdy jednak

ogniwo to pewien czas działa, dostarczając prądu, cynk matowieje i nabiera barwy szarej, płyn zaś ciemnieje, nabierając odcienia zielonkawego. Co więcej, w miarę, jak używamy tego ogniwa jako źródła prądu, cynku ubywa, o czym łatwo się przekonać, ważąc płytę cynkową. Prawda, nawet, gdy ogniwo pozostaje otwarte, cynku również potrochu ubywa, nie w tej jednak mierze, jak podczas działania ogniwa. Niewątpliwie zatem zachodzi w ogniwie nawet otwartem pewien proces chemiczny (dlatego lepiej jest wyjmować płyty z roztworu wtedy, gdy ogniwo ma być nieczynne), przemiany zaś te są bardzo wyraźne, gdy ogniwo dostarcza nam prądu. Nie wdając się narazie w zachodzące tu szczegóły chemiczne, znajdujemy w zaobserwowanych zmianach punkt oparcia dla odpowiedzi na pytanie, skąd się właściwie bierze otrzymywana z ogniwa energia elektryczna. Oto oczywiście z energii chemicznej, której dostarczają nam substancje, wchodzące w skład ogniwa.

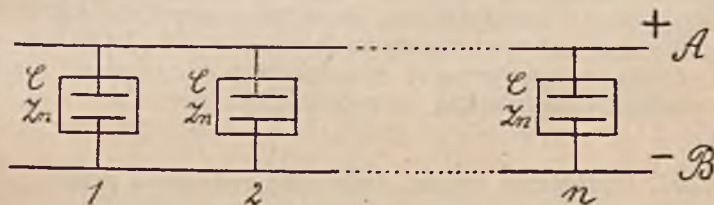
Aleksander Volta ustalił zapomocą bardzo subtelnych, jak na jego czasy, doświadczeń z elektroskopem i kondensatorem, później zaś inni badacze te spostrzeżenia jego rozszerzyli, że ilekroć zachodzi zetknięcie przewodników, różniących się czy to chemicznie, czy fizycznie, wówczas powstaje na jednym z nich w stosunku do drugiego pewna różnica potencjałów, t. j. jeden elektryzuje się dodatnio, drugi ujemnie. Gdy np. przykładamy do siebie dwie osadzone na izolujących rękojeściach płytki, z których jedna jest miedziana, druga cynkowa, ostatni ładuje się dodatnio, pierwsza — ujemnie. Wytwarzająca się przytem różnica potencjałów zależy od temperatury, nie zależy jednak od wielkości płytek, ani od wielkości powierzchni, na której zachodzi zetknięcie, ani od bezwzględnej wartości ich potencjałów (obie płytki mogą przed zetknięciem być naelektryzowane i posiadać jednakowy potencjał, różny od zera). Jeżeli użyjemy do takiego doświadczenia nie płytek, ale innego kształtu kawałków miedzi i cynku, nie będzie to również miało wpływu na otrzymany wynik.

Volta przypisywał tworzenie się różnicy potencjałów w tym razie właśnie samemu zetknięciu metali. Dziś mamy inny na to pogląd, uwzględniając, iż pozornie czyste powierzchnie płytek nie są takowymi istotnie. Gdy doświadczenia tego rodzaju powtarzać będziemy po bardzo dokładnem czyszczeniu i suszeniu płytek, ilościowa strona wyników okaże się bezporównania bardziej nikłą. Z drugiej strony w ogniwie zachodzi zetknięcie płytek z pewnym roztworem; Volta nie doceniał należyście roli cieczy w ogniwie, my dziś natomiast szczególną na to zwracamy uwagę. Jakkolwiek jednak posunęliśmy się w tej dziedzinie naprzód od czasów Volty (mamy tu zresztą jeszcze do dziś dnia wiele doświadczeń niezbadanego), podnieść musimy doniosłość podanej przez Voltę klasyfikacji różnych przewodników, a mianowicie podział ich na t. zw. *przewodniki pierwszej klasy* — nazywamy je dziś *ciałami przewodzącymi metalicznie* (oprócz metali należą tu węgiel, selen i niektóre inne); ciała te, podczas gdy stanowią drogę dla prądu, żadnym przemianom chemicznym nie ulegają, — oraz *przewodniki drugiej klasy*, zwane dziś

ogólnie *elektrolitami* (należą do nich roztwory soli, kwasów i zasad), w których proces przechodzenia przez nie prądu wiąże się z zachodzącymi w nich przemianami chemicznymi. Otóż, jak zobaczymy, niesposób jest zbudować ogniwa, posługując się jedynie przewodnikami 1-ej klasy: w skład ogniwa musi koniecznie wchodzić co najmniej jeden elektrolit, zatem zjawisko prądu elektrycznego, otrzymywanego z ogniwa, idzie nierozzerwalnie w parze z pewnymi procesami chemicznymi.

306. Łączenie ogniw w baterje.

Mając kilka jednakowych ogniw, możemy je łączyć w t. zw. baterje według dwu zasadniczych schematów. Połączenie *równoległe* widzimy na rys. 725. Wszystkie płyty węglowe są tu połączone ze sobą, podobnie połączone są wszystkie płyty cynkowe. Jeżeli końce drutów *A* i *B* połączymy z elektrometrem i wyznaczmy w sposób już nam znany napięcie takiej baterji, gdy jest otwarta, t. j., gdy nie czerpiemy z niej prądu, przekonamy się, że to napięcie równe jest napięciu pojedyn-

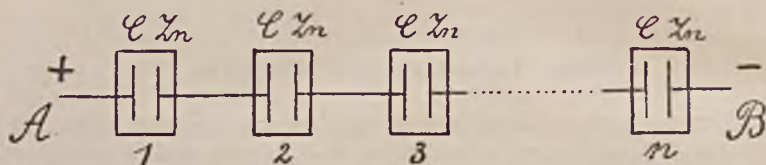


Rys. 725.

czego ogniwa. Jest to zrozumiałe — wszak wszystkie połączone ze sobą płyty węglowe mają jeden i ten sam potencjał, podobnie tę samą wartość potencjału posiadają wszystkie połączone ze sobą płyty cynkowe. Mamy tu jakgdyby jedno większe ogniwo, w którym powierzchnie płyt równają się sumie powierzchni płyt pojedynczych ogniw. Zdawałoby się mogło, że łączenie wielu ogniw w baterję o tem samym napięciu jest bezcelowe; zobaczymy niżej, że w pewnych razach takie połączenie bywa bardzo uzasadnione.

Przypadek połączenia *szeregowego* przedstawia rys. 726. Tu biegun dodatni jednego ogniwa połączony jest z biegunem ujemnym następnego i t. d. Gdy wyznaczamy różnicę potencjałów na biegunach takiej baterji (*A* i *B*), stwierdzamy, że w przypadku baterji otwartej równa się ona *sumie różnic potencjałów na biegunach poszczególnych ogniw*. Na płycie węglowej ostatniego (*n*-go) ogniwa mamy potencjał o 1,8 woltów wyższy, niż na płycie cynkowej; na płycie cynkowej (*n*—1) ogniwa, połączonej metalicznie z węglową *n*-go ogniwa, mamy zatem również potencjał wyższy, niż na cynkowej ogniwa *n*-go. Jak zaznaczyliśmy, różnica potencjałów, tworząca się w danym razie, nie zależy od wartości bezwzględnej potencjałów stykających się ze sobą ciał; prze-

to na płycie węglowej ($n-1$ -go ogniwa mamy potencjał o 1,8 woltów wyższy, niż na jego płycie cynkowej, t. j. o 2.1,8 woltów = 3,6 woltów wyższy, niż na płycie cynkowej ogniwa n -go i t. d. Napięcie zatem na biegunach baterji, złożonej np. z 10 ogniw Greneta, połączonych w szereg, wynosi 10.1,8 woltów = 18 woltów. Czytelnik musi słusznie zauważyć, że przecie tu wchodzi w grę zetknięcie różnorodnych ciał stałych —



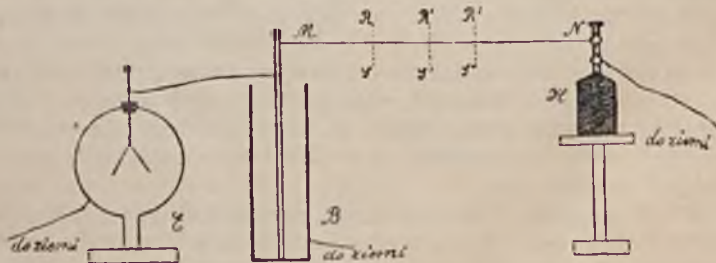
Rys. 726.

cynku i węgla zapomocą łączącego je drutu. Tej sprawy dotkniemy jeszcze niżej; tymczasem niech czytelnik pamięta o zrobionej w poprzednim ustępie uwadze: ten kontakt nie odgrywa tu istotnej roli, która całkowicie przypada na rzecz stykania się płytek ogniwa z elektrolitem.

Dalej poznamy zalety szeregowego łączenia ogniw. Tu odrazu widzimy, że pozwala ono otrzymywać dowolnie wysokie napięcie, jeżeli tylko rozporządzamy dostateczną do tego liczbą ogniw.

307. Natężenie prądu. Jednostka natężenia prądu.

Łączymy z elektroskopem i ładujemy do pewnego potencjału okładkę wewnętrzną butelki lejdejskiej, której okładka zewnętrzna jest uziemiona; łączymy główkę butelki B zapomocą nitki bawełnianej lub



Rys. 727.

sznurka MN z uziemionym prętem zacisku Holtza (rys. 727). Listki elektroskopu opadają stopniowo, butelka wyładowuje się; powiadamy, że przez nitkę MN , a dalej przez drut do ziemi płynie wtedy prąd elektryczny.

Powtórzmy doświadczenie z większą butelką, albo lepiej baterją, którą naładujemy do tej samej początkowej wartości potencjału. Wy-

ładowanie z pomocą takiego samego półprzewodnika będzie trwać wtedy nieco dłużej.

W pierwszym z tych przypadków nabój pewnej wartości przechodzi w pewnym czasie przez nitkę MN ; w drugim również po tej drodze przechodzi inny (większy) nabój w innym jakimś czasie.

Wystawmy sobie gdziekolwiek (linja kropkowana RS) przekrój nitki, która stanowi drogę dla prądu. Przez ten przekrój, jak przez każdy inny ($R'S'$, $R''S''$), przechodzą w pewnych czasach określonej wartości naboje elektryczne. Podobnie, gdy mamy prąd wody w rurze, możemy pomyśleć w tem, czy innym miejscu rury jej przekrój poprzeczny i mówić o określonych ilościach wody, przepływającej przez ten przekrój w określonym czasie. Im więcej w tym samym czasie przepływa przez taki przekrój wody w rurze, tem — powiadamy — prąd jest silniejszy, tem *natężenie* tego prądu jest większe. Coś podobnego dzieć się musi i w przypadku prądu elektrycznego — im większy nabój przepływa przez przekrój przewodnika w pewnym określonym czasie, tem silniejszy jest ten prąd, tem większe jest jego *natężenie*.

Wracając do doświadczeń, łączymy teraz bieguny znanego już nam ogniwa zapomocą cienkiego, odpowiedniej długości, drucika żelaznego, jak w przypadku niedawno rozpatrzonym, by drucik ten żarzył się na ciemno czerwono. Po pewnym czasie przerywamy doświadczenie i łączymy tym samym drucikiem bieguny baterji, utworzonej z dwu lub trzech szeregowo połączonych ze sobą ogniw. Stwierdzamy, że drucik ten żarzy się mocniej (na żółto albo na biało). Powiększenie napięcia użytego tu źródła prądu przez dołączenie jeszcze jednego lub paru ogniw groziłoby stopieniem się drucika.

W obu ostatnich doświadczeniach przez drucik płynie prąd elektryczny; z obserwowanego żarzenia się wnioskujemy, że zjawisko nie jest w obu razach jednakowe. Przeciwnie powiadamy, że w drugim razie prąd ma większe natężenie, skoro w tym samym czasie wytwarza się w druciku, przez który przepływa, więcej ciepła. Otóż i tu owo natężenie prądu rozumiemy nieinaczej, jak że poprzez gdziekolwiek pomyślany przekrój drutu przechodzi w pewnym czasie pewien nabój. Im większy jest ten nabój w tym samym czasie, tem większe jest natężenie prądu.

Dodajmy jeszcze, że mamy tu w obu przypadkach zjawisko o charakterze stałym, a więc w pierwszym przypadku w określonych warunkach żarzenie się drucika przez czas pewien zachodzi jednakowo; w drugim, przy zmienionych warunkach żarzenie się jest inne, niż w pierwszym, lecz zawsze jednakowe przez cały czas, dopóki te same warunki trwają. Mówimy w takich razach, iż prąd elektryczny jest *stały*, w odróżnieniu od przypadku t. zw. prądu *zmiennego*, przyczem zmienność ta dotyczyć może zarówno natężenia, jak kierunku.

Wyobraźmy sobie, iż przez przekrój przewodnika przepływa w czasie t nabój elektryczny e . Im większy jest ten nabój dla danego czasu, tem większe jest natężenie prądu (stosunek prostej proporcjonalności); im krótszy jest czas, w którym przepływa dany nabój, tem większe

również natężenie ma prąd (stosunek odwrotnej proporcjonalności). Jeżeli oznaczymy natężenie prądu przez i , będziemy mogli napisać

$$i = k \frac{e}{t}, \dots \dots \dots (1)$$

gdzie k jest pewnym współczynnikiem proporcjonalności.

Możemy umówić się, że uważać będziemy natężenie prądu w przewodniku za równe jednostce, jeżeli w jednostce czasu przepływa przez przekrój przewodnika nabój równy jednostce. W takim razie liczbowo

$$1 = k \frac{1}{1},$$

t. j. współczynnik $k = 1$

i wzór (1) staje się

$$i = \frac{e}{t} \dots \dots \dots (2)$$

Wzór (2) mówi, że natężenie prądu w przewodniku mierzy się stosunkiem naboju, przepływającego przez przekrój przewodnika, do czasu, w którym to zachodzi. Gdyby w równych dowolnych czasach te naboje przepływające były równe, mówilibyśmy, że prąd jest *stały*; gdyby warunek ten nie był spełniony, mowa byłaby o prądzie *zmiennym*. W tym ostatnim przypadku stosunek $\frac{e}{t}$ dla dowolnego czasu t dawałby średnią wartość natężenia prądu za ten czas; dla wyznaczenia wartości rzeczywistej natężenia prądu w pewnym momencie należałoby czynić tak jak się to czyni w przypadku szukania prędkości rzeczywistej w ruchu zmiennym. Gdy prąd w przewodniku jest stały, przez każdy przekrój poprzeczny przewodnika w dowolnym jego miejscu w tym samym czasie przepływa tej samej wartości nabój i dla każdego z tych przekrojów stosunek $\frac{e}{t}$ jest wielkością stałą.

Jak się wyznacza te wartości naboju, które przepływają w określonym czasie, jest to inna sprawa. O tem będziemy mówili niebawem. Narazie chodzi o ustalenie tego, jak możemy sobie pomyśleć teoretycznie pomiar natężenia prądu.

W podanem określeniu natężenia prądu zawiera się, jak już wspomnieliśmy, określenie *jednostki natężenia prądu*, a mianowicie: *natężenie prądu równa się jednostce, gdy na jednostkę czasu przypada przejście przez przekrój poprzeczny przewodnika jednostki naboju elektrycznego*. Zatem w jednostkach elektrostatycznych mamy

$$\begin{aligned} \text{jednostka elektrostatyczna natężenia prądu} &= \frac{\text{jedn. elektrostat. naboju}}{\text{jedn. czasu}} = \\ &= \frac{1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}}{1 \text{ sek}} = 1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

Ponieważ jednostka elektrostatyczna naboju jest dla celów praktycznych niedogodną, gdyż zbyt małą, przeto i ta t. zw. jednostka elektrostatyczna natężenia prądu jest dla celów praktycznych zbyt małą. To też posługujemy się jeszcze inną jednostką natężenia prądu — praktyczną, a mianowicie t. zw. *amperem* *). Określenie właściwe tej jednostki podamy później. Tymczasem wystarczy, jeżeli powiemy, że natężenie prądu uważamy za równe jednemu amperowi, jeżeli na sekundę przypada przepływ jednego kulomba przez przekrój poprzeczny przewodnika, a więc

$$1 \text{ amper} = \frac{1 \text{ kulomb}}{1 \text{ sek}} = \frac{3 \cdot 10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}}{1 \text{ sek}} = 3 \cdot 10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2} \dots (4)$$

Machiny elektrostatyczne, któremi posługiwaliśmy się dotychczas jako jedynymi źródłami naboju elektrycznych, dostarczają nam tych naboju w bardzo niewielkich względnie ilościach. Przy pomocy tedy machin elektrostatycznych otrzymywać możemy jedynie słabe prądy, inaczej prądy o małym natężeniu. Co innego ogniwa. Są one bezporównania bogatszymi źródłami naboju i przy ich pomocy otrzymywać możemy prądy o wielkiem natężeniu.

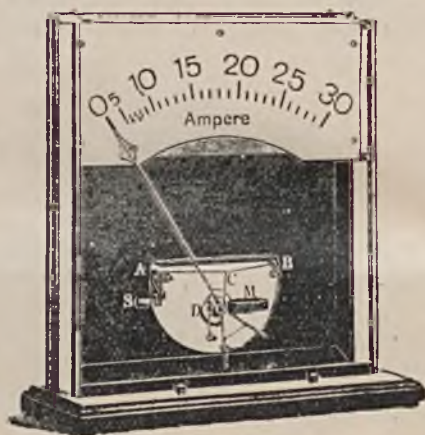
308. Galwanoskopy. Galwanometry. Amperometry.

O istnieniu prądu elektrycznego sądzić możemy nieinaczej, jak z tych czy innych jego objawów. Dotychczas poznaliśmy jeszcze z tej dziedziny zbyt mało; wiemy tylko, że na drodze stałego prądu zachodzi spadek potencjału oraz, że przewodniki, w których płynie prąd, grzeją się. Stopniowo będziemy zakres naszej wiedzy rozszerzali; tymczasem zaś wskazane jest, byśmy się już teraz zastanowili nad możliwością bliższego zorientowania w zjawisku prądu elektrycznego. Zapamiętajmy więc sobie najpierw, że przyrządy, przy których pomocy stwierdzamy tylko samo istnienie prądu, nazywamy ogólnie *galwanoskopami*, takie zaś, które służą do mierzenia natężenia prądu — *galwanometrami*.

*) Ku uczczeniu nazwiska A. M. Ampère'a (1775—1836), fizyka francuskiego, który położył wielkie zasługi dla nauki o prądzie elektrycznym.

W nazwach tych uwiecznimy nazwisko badacza włoskiego, Aloizego Galvani'ego (1737—1798), który pierwszy dostrzegł zjawisko, tworzące podstawę do budowy ogniów, jakkolwiek nie on, ale współczesny mu Volta zjawisko to ujął we właściwy sposób. Galwanometry, wycechowane w ten sposób, że odrazu pozwalają odczytać wartość natężenia prądu w amperach, noszą nazwę *ampermetrów*. Oczywiście, galwanometry czy galwanoskopy winny być włączone do drogi prądu — przez te przyrządy winien przechodzić prąd, który podlega naszej obserwacji.

Zjawisko grzania się przewodników, gdy przez nie przechodzi prąd elektryczny, może być zużytkowane do budowy wyżej wymienionych przyrządów. Np., gdy prąd przechodzi przez drucik, długość jego przy grzaniu się ulega zmianie — należy odpowiednio wyzyskać te zmiany dla nadania ruchu odpowiednio złączonej z drucikiem wskazówce.



Rys. 728.

Rys. 728 daje nam wygląd takiego termicznego ampermetru (o cechowaniu będzie mowa niżej). Prąd przechodzi przez drucik *AB*; w punkcie *C* przyczepiona jest do drucika nitka, nawinięta na oś, z którą połączona jest wskazówka. Na takie czy inne położenie osi wpływa złączona z nią odpowiednio sprężyna, której działaniem nitka, przyczepiona do drucika w *C*, pozostaje cały czas napięta. Pomijamy inne szczegóły budowy, poprzestając na wskazaniu zasadniczej części. Zmiany długości drucika *AB* powodują ruchy wskazówki, przesuwającej się wtedy przed skalą, którą w odpowiedni sposób się cechuje.

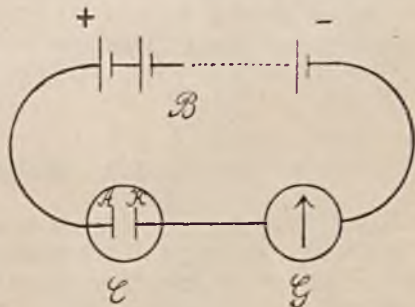
Budowa galwanoskopów i galwanometrów może być oparta również na innych zasadach, które poznamy potem. Wiedząc jednak, do czego służą te przyrządy, możemy narazie posługiwać się jakimkolwiek galwanometrem lub ampermetrem, odkładając na później omówienie jego budowy.

309. Zjawisko elektrolizy.

Zanurzamy w naczyniu, zawierającym wodę destylowaną, dwie płytki platynowe (rys. 729), z których jedna połączona jest z biegunem dodatnim, druga — z ujemnym baterji voltaicznej. W obwód włączamy jeszcze galwanometr, tak że całość połączeń daje się przedstawić zapomocą schematu, który widzimy na rys. 730, gdzie *B* oznacza baterję, utworzoną z kilku połączonych w szereg ogniw, *C* naczynie, wyobrażone na rys. 729, *A* i *K* płytki platynowe, zanurzone w cieczy, zaś *G* galwanometr. Galwanometr nie daje żadnego wychylenia, woda zatem destylowana, mieszcząca się między płytkami *A* i *K*, nie jest przewodnikiem. Podobnie, gdybyśmy naczynie *C* wypełnili nie wodą destylowaną, lecz naftą lub olejem parafinowym, galwanometr również nie dałby żadnego wychylenia.



Rys. 729.



Rys. 730.

Wpuśćmy jednak do wody, znajdującej się w *C*, trochę kwasu siarkowego, a natychmiast galwanometr wychyleniem swej wskazówki świadczy, że przez naczynie *C* płynie teraz prąd elektryczny. Jeżeli zwiększamy stężenie roztworu, mieszczącego się w *C*, przez dodanie większej ilości kwasu siarkowego, galwanometr wykazuje zwiększenie natężenia prądu. Jednocześnie przy zjawieniu się prądu dostrzegamy, że na blaszkach ukazują się pęcherzyki gazu, a, jak zobaczymy za chwilę, przy jednej z płytek takim jest wodór, przy drugiej — tlen. Im większe obserwujemy wychylenie wskazówki galwanometru, im większe przeto jest natężenie prądu, tem obfitsze zarazem dostrzegamy tworzenie się tych pęcherzyków gazu.

Powtórzmy to samo doświadczenie, wkrapając do wody destylowanej zamiast kwasu siarkowego stężony roztwór saletry. Przed tem wkrapaniem zabarwmy wodę lakmusem. Otrzymamy wynik analogiczny do poprzedniego, urozmaicony nieco tem, że początkowo fioletowa barwa roztworu stanie się czerwoną przy blaszce złączonej z bie-

gunem dodatnim baterji, niebieską zaś przy blaszce, złączonej z biegunem ujemnym.

Nie ulega wątpliwości, że nie woda, lecz dodany do niej kwas siarkowy, względnie roztwór saletry stanowi o możliwości powstania tutaj prądu elektrycznego. Razem widoczne jest, że przechodzenie prądu przez ten czy tamten roztwór oraz dostrzegane przemiany chemiczne wiążą się jakoś zasadniczo ze sobą.

Ogólnie biorąc, zjawisko tego samego rodzaju, t. j. przewodzenie prądu elektrycznego wraz z towarzyszącymi nieodłącznie temu przewodzeniu przemianami chemicznymi stwierdzamy w całym szeregu substancyj. Należą do nich wodne roztwory kwasów, zasad i soli. Ten rodzaj przewodzenia prądu w odróżnieniu od przewodzenia metalicznego, przy którym żadne przemiany chemiczne nie zachodzą, jedynie przewodniki się grzeją — nosi nazwę przewodzenia *elektrolitycznego*. Substancje, w ten sposób przewodzące prąd elektryczny, nazywają się *elektrolitami*, a samo zjawisko *elektrolizą*. Przewodniki, zanurzone w elektrolicie i połączone z biegunami źródła prądu (baterji) — w naszym doświadczeniu blaszki platynowe — noszą nazwę *elektrod*; elektroda, połączona z biegunem dodatnim źródła, inaczej *elektroda dodatnia* nazywa się *anodą*, druga *elektroda ujemna* nosi nazwę *katody* *).

310. Woltametry.

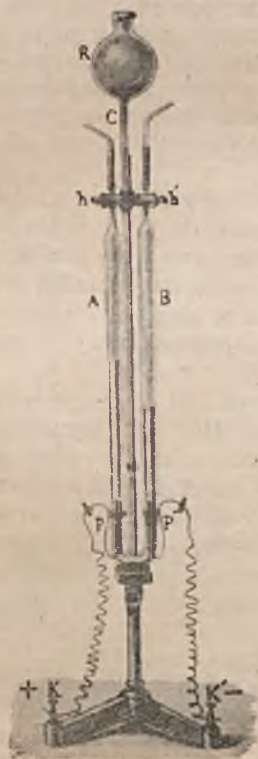
W celu bliższego, a przedewszystkiem ilościowego zbadania zjawiska elektrolizy, posługiwać się musimy odpowiednimi naczyniami, zaopatrzonemi w elektrody; naczynia takie noszą ogólną nazwę *woltametrów* **).

Rys. 731 przedstawia woltametr tleno-wodorowy, w którym używamy jako elektrolitu rozcieńczonego wodą kwasu siarkowego (5^o/₁₀). Mamy tu trzy pionowo ustawione rurki szklane, złączone ze sobą u dołu; dwie z nich (*A* i *B*) mają u góry kurki szklane (*h* i *h'*); trzecia rurka (*C*) posiada u góry rozszerzenie w postaci zbiornika kulistego (*R*). Rurki *A* i *B* mają u dołu wtopione druciki platynowe, zakończone wewnątrz rurek blaszkami platynowymi (*p* i *p'*). Są to właśnie elektrody danego woltametr. Otworzywszy oba kurki, wlewamy przez rurkę *C* roztwór kwasu, dopóki poziom cieczy nie podniesie się w rurkach *A* i *B* do samych kurków *h* i *h'*. Wtedy zakręcamy kurki i mamy obie rurki, zawierające w swych dolnych częściach elektrody, wypełnione całkowicie badanym elektrolitem. Teraz łączymy jedną elektrodę z biegunem dodatnim źródła prądu (np. baterji złożonej z 4—6 ogniw Greneta, połączonych w szereg), drugą z biegunem ujemnym; służą do tego zaciski

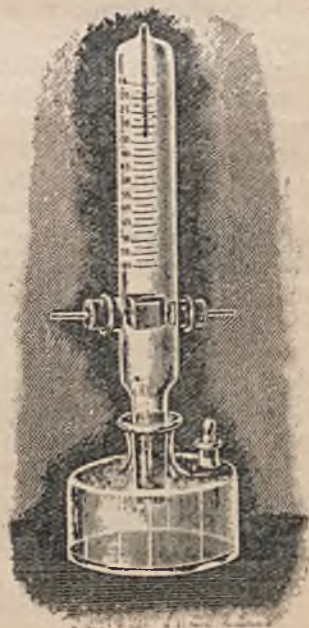
*) Słowa pochodzenia greckiego, wprowadzone przez Faradaya i oznaczające „wprowadzanie” i „wyprowadzanie” albo „wejście” i „wyjście” (ὄδος — czyt. hódos — po grecku droga).

**) Należy tę nazwę odróżniać od innej podobnej, a mianowicie *woltmetrów*; tak się nazywają przyrządy, służące do wyznaczania napięć w woltach.

K i K' , izolowane od podstawy przyrządu i połączone przy pomocy drutów z elektrodami p i p' . U obu elektrod poczynają się tworzyć pęcherzyki gazów i, wznosząc się w cieczy, wypełniają górne części rurek. Pod ciśnieniem zbierających się tam gazów poziom cieczy w rurekach A i B obniża się, podnosi się natomiast w rurce C — na to właśnie rura ta jest zaopatrzona w zbiornik R , by było dość miejsca dla podnoszącej się cieczy i w ten sposób dało się zapobiec wylewaniu się jej z woltametru. Po krótkim już czasie dostrzegamy, że w jednej z rurek zbiera



Rys. 731.



Rys. 732.

się gazu mniej więcej 2 razy mniej, niż w drugiej. Mając już dość tych gazów zebranych, możemy je wypuścić stamtąd przez otwarcie kurków *) i poddać badaniu. Okazuje się, że przy katodzie (—) wydziela

*) Przy zamykaniu kurków, gdy woltametr napełniamy, może się przedostać trochę cieczy do kanałów, znajdujących się w rurekach ponad kurkami; zapomocą wąskich skrawków bibulki łatwo tę ciecz stamtąd usunąć, by następnie przy wypuszczaniu gazów nam nie przeszkadzała. Należy to, oczywiście, zrobić przed nałożeniem widocznych na rysunku rurek kauczukowych, w które wstawione są odgięte i zwężone na końcach rurki szklane.

się w tym voltametrze *wodór*, przy anodzie (+) *tlen*. Otwierając kurek nad katodą, można zapalić wypływający stamtąd wodór; zapala się on z lekkim wybuchem i płonie charakterystycznym nikłym płomieniem. Umieściwszy u wylotu drugiej rurki koniec zgaszonej, ale żarzącej się jeszcze zapalki, spostrzegamy, jak się rozżarza ona w chwili otworzenia kurka, zdradzając tem, że z rurki wypływa *tlen*. Jeżeli rurki *A* i *B* zaopatrzone są w podziałki, możemy poddać zjawisko ilościowemu badaniu; wykazuje ono, że gazy te wydzielają się w tym samym ściśle stosunku, w jakim są zawarte w wodzie; dokładne ustalenie tej proporcji nie daje się wprost odczytać na podziałkach rurek, należy tu bowiem wprowadzić jeszcze pewne poprawki (uwzględniając np., że oba gazy nie pozostają pod jednakowem ciśnieniem w rurkach, że niejednakowo są rozpuszczalne w wodzie, że w rurce z tlenem tworzy się przy tym procesie trochę ozonu; w te wszystkie szczegóły wdawać się nie będziemy).

Używa się również voltametrów tleno-wodorowych postaci takiej, jaką mamy na rys. 732. Obie elektrody mieszczą się tu w jednym cylindrze z podziałką, w którym zbiera się mieszanina obu gazów, t. j. mieszanina piorunująca. W górnej części cylindra z podziałką widzimy wtopiony termometr (objętość gazu zależna wszak jest od temperatury; zmierzenie więc objętości mieszaniny piorunującej wymaga uwzględnienia temperatury).

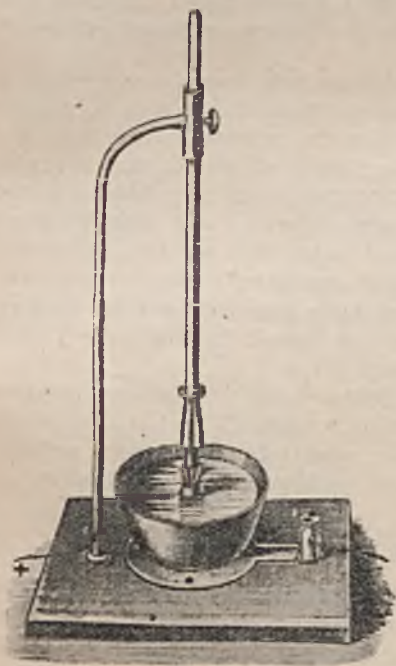
Wypełniając voltametr, przedstawiony na rys. 731, kwasem solnym, a zatem wodnym roztworem chlorowodoru (HCl)*, stwierdzamy przy elektrolizie, że u katody wydziela się *wodór*, u anody *chlor*, przytem oba gazy zbierają się w górnych częściach rurek *A* i *B* w równych objętościach. Jeżeli ciecz przed wlaniem jej do voltametru zabarwimy na niebiesko roztworem indyga, z chwilą puszczenia prądu i rozpoczęcia wydzielania się gazów u elektrod, ciecz odbarwia się natychmiast przy anodzie, co jest dobrem wskazaniem wydzielania się tam właśnie chloru.

Na rys. 733 mamy jedną z postaci voltametru srebrowego, bardzo używanego w precyzyjnej technice pomiarowej, jak się o tem niebawem dowiemy. Anodę stanowi tu pręcik srebrny, osadzony na końcu pionowo ustawionej rurki mosiężnej i zanurzony w tygielku platynowym, stanowiącym katodę i zawierającym roztwór (10⁰/o) azotanu srebrowego. Podczas przechodzenia prądu przez voltametr osiada na katodzie — tygielku platynowym — wydzielające się z roztworu srebro, a przez ważenie tygielka (oczywiście nie zawierającego roztworu i wysuszonego, t. j. przed rozpoczęciem i po skończeniu doświadczenia) zbadać możemy ilość wydzielonej na katodzie substancji. Ważenie pręcika srebrnego, tworzącego anodę, wykazuje zmniejszenie się jego masy, a więc przechodzenie z niego pewnej ilości w skład roztworu. Ponieważ przy tem jakgdyby rozpuszczaniu się srebra w roztworze zdarza się,

* Dla uniknięcia komplikacyj, w których szczegóły wchodzić nie będziemy, wskazane jest używać kwasu solnego o gęstości $1,10 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ do $1,15 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$.

iz mechanicznie oddzielają się okruchy srebra od anody i opadają na dno, dla uniknięcia mogących stąd wyniknąć niedokładności przy ważeniu katody, które tu jest miarodajne, umieszcza się pręt srebrny w woreczku z gazy, który nie wpływa na przebieg zjawiska, natomiast zatrzymuje owe mechanicznie oddzielające się okruchy.

W podobny sposób jak woltametr srebrowy zbudować można woltametr miedziowy. Widzimy go na rys. 734. Katodę tworzy tu tygiel miedziany; anodę pręt miedziany; jako elektrolitu używa się roztworu siarczanu miedziowego. W celu uniknięcia kompli-



Rys. 733.



Rys. 734.

kacyj, uwarunkowanych różną wartościowością miedzi, co nie jest bez znaczenia, wskazane jest posługiwanie się roztworem o składzie następującym: na litr wody 125 gr siarczanu miedziowego, 50 gr kwasu siarkowego i 50 gr alkoholu. Gdy chodzi tylko o przybliżone wyniki, można używać woltamtru o dostępniejszej konstrukcji, np. umieścić poprostu dwie płytki miedziane (na wzór tego, co mamy na rys. 729), w wodnym roztworze stężonym siarczanu miedziowego. Podczas elektrolizy osiada na katodzie miedź, miedzianej zaś anody stopniowo ubywa.

Pragnąc zapoznać się narazie z jakościową stroną zjawiska, zachodzącego w woltametrze miedziowym, wykonać można doświadczenie

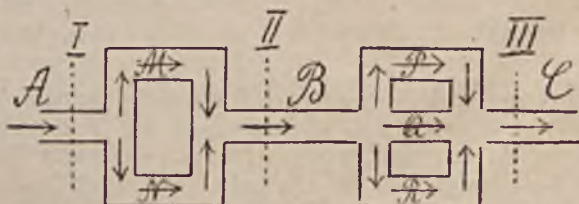
według ostatniego schematu (rys. 729), jak następuje. Mianowicie, używamy jako anody płytki miedzianej, jako katody płytki platynowej. Po upływie jakiejś minuty od chwili puszczenia prądu przez woltametr przerywamy prąd i wyjmujemy platynową katodę — część jej, która była zanurzona w roztworze, okazuje się czerwona od osiadłej na niej miedzi. Kontynuując teraz doświadczenie, zanurzamy znowu platynową płytkę, pokrytą miedzią, czyniąc ją tym razem anodą, t. j. łącząc ją z dodatnim biegunem źródła prądu, podczas gdy płytkę miedzianą, która przedtem była anodą, łączymy teraz z biegunem ujemnym źródła, t. j. czynimy katodą. Wówczas miedź z katody znika i blaszka platynowa, wyjęta po pewnym czasie z cieczy, okazuje się w swej pierwotnej normalnej barwie.

Doświadczenie ostatnie, w którym platyna pokrywa się elektrolitycznie miedzią, wskazuje na możliwość zastosowania elektrolizy do pokrywania zanurzonych w odpowiednim roztworze przewodników temi czy innymi metalami. Istotnie daje się w ten sposób niklować, srebrzyć, złocić i t. p., robić odbitki metalowe na przyrządzonych specjalnie do tego płaskorzeźbach. Zastosowania te stanowią zadanie t. zw. *galwanostegji* i *galwanoplastyki*. Bliżej temi rzeczami zajmować się nie będziemy. Zauważmy tylko, że elektroliza znajduje ogromne zastosowanie techniczne, gdy chodzi o produkcję w większych ilościach czy to wodoru i tlenu, czy zwłaszcza chemicznie czystych metali. Szczególnie wielkie znaczenie posiada elektroliza w produkcji glinu.

Zestawiając wyniki różnorodnych doświadczeń z dziedziny elektrolizy, musimy sobie zanotować, że u elektrody ujemnej (katody) zjawiają się podczas tego procesu: wodór, metale, wodorotlenki metali i zasady; natomiast u elektrody dodatniej (anody) — tlen, chlor oraz kwasy.

311. Faraday'a pierwsze prawo elektrolizy.

Zjawisko elektrolizy zostało po raz pierwszy gruntownie zbadane przez M. Faraday'a — jest to jedno z pomnikowych dzieł tego wielkiego mistrza fizyki. Ustalone przez Faraday'a dwa zasadnicze prawa sta-

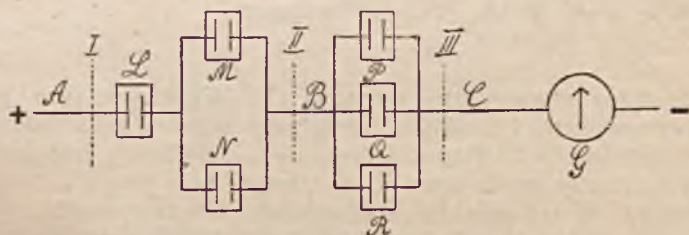


Rys. 735.

nowią podstawę całokształtu naszej znajomości tego zjawiska. Pierwsze z tych praw mówi: *Masa substancji, wydzielonej w pewnym czasie podczas elektrolizy przy którejkolwiek elektrodzie, jest proporcjonalna do wartości naboju, przeniesionego w tym czasie poprzez elektrolit.*

Dla zrozumienia doświadczenia, które uzasadnia to prawo, rozważmy przykład następujący. Przypuśćmy, że mamy prąd wody w rurach z rozgałęzieniami, jak np. na rysunku 735. Woda, wypływając z rury *A*, rozchodzi się, dzieląc się na dwie części, w kanałach *M* i *N*; następnie oba te prądy łączą się znowu w rurze *B*, poczem ten jeden prąd dzieli się na trzy części w rurach *P*, *Q* i *R* i dalej płynie już jedną rurą *C*. Przez pomyślane gdziekolwiek przekroje *I*, *II*, *III* rur *A*, *B*, *C* musi w tym samym czasie przepływać ta sama ilość wody; w tym samym więc czasie zarówno przez dwie rury *M* i *N*, jak przez trzy rury *P*, *Q*, *R* winna przepływać ta sama ilość wody—inaczej nie byłoby ciągłości prądu.

W analogiczny sposób możemy ukształtować doświadczenie z woltametrami, co przedstawia schematycznie rys. 736. Prąd elektryczny przechodzi najpierw przez jeden woltametr *L*, następnie rozgałęzia się i idzie przez dwa woltometry (*M* i *N*), przechodzi następnie jednym przewodnikiem *B*, znów się rozgałęzia i idzie przez trzy woltometry *P*, *Q*, *R*, poczem dąży dalej jednym przewodnikiem *C*. Umieszczony na drodze prądu galvanometr *G* wskazaniem swym świadczy o stałości prądu. Jak już rozmawialiśmy na ten temat wyżej, jeżeli



Rys. 736.

w którymkolwiek przekroju drutu *A* (linja kropkowana) przepływa w pewnym czasie pewien nabój elektryczny, taki sam nabój w tym samym czasie przepływa przez dowolny przekrój drutu *B*, jak drutu *C*, a w takim razie w tym samym czasie naboje równej wielkości przechodzą przez woltametr *L* jak przez dwa woltometry *M* i *N*, jak przez trzy woltometry *P*, *Q*, *R*. Przypuśćmy, że wszystkie woltometry są tlenowodorowe typu, przedstawionego na rys. 731. Słuszność pierwszego prawa Faradaya może być jedynie stwierdzona następującym wynikiem pomiaru: oto ilość np. wodoru, wydzielonego na katodzie woltametrów *L*, równa się sumie ilości wodoru, wydzielonego w tym samym czasie na katodach woltametrów *M* i *N* *), jak również sumie ilości wodoru, wy-

*) Nie jest koniecznem, aby woltometry *M* i *N* były jednakowe co do rozmiarów i niekoniecznie mają w obu wydzielać się równe ilości wodoru, co od tych rozmiarów zależy; chodzi tu o sumę nabożów, przepływających jednocześnie przez oba te woltometry. To samo należy powiedzieć o woltametrach *P*, *Q*, *R* (porówn. analogję wodną z rys. 735; mniejsza, czy rury *M* i *N* są jednakowych przekrojów i czy w nich prąd dzieli się na równe części — chodzi tylko o ogólną ilość wody, przepływającą przez obie).

dzielonego w tym samym czasie na katodach woltametrów P, Q, R . Najściślejsze pomiary tego rodzaju wykazują, że tak jest istotnie, a zatem pierwsze prawo Faraday'a zostaje doświadczalnie udowodnione.

Przypuśćmy więc, że w pewnym czasie t nabój elektryczny, przechodzący przez jakikolwiek woltametr, jest e , zaś masa substancji, wydzielonej na którejkolwiek jego elektrodzie jest m ; w takim razie

$$m = k \cdot e \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

gdzie k jest pewnym współczynnikiem proporcjonalności. Wzór ten wyraża właśnie pierwsze prawo Faraday'a.

Jeżeli podczas doświadczenia włączony w obwód galwanometr daje niezmiennie wychylenie, co świadczy o stałości prądu, wówczas natężenie prądu, płynącego przez woltametr w tym czasie, jest

$$i = \frac{e}{t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

czyli

$$e = i \cdot t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Podstawiając wzór (3) do (1), otrzymujemy

$$m = k \cdot i \cdot t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Jest to wzór równoważny wzorowi (1). Wyrażając przy jego pomocy pierwsze prawo Faraday'a, odczytamy je tak: *ilość substancji wydzielonej podczas elektrolizy u którejkolwiek elektrody jest proporcjonalna do natężenia prądu oraz czasu trwania tego prądu.*

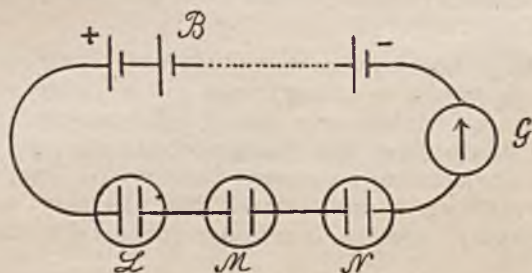
Co oznacza w takim razie współczynnik k ? Oczywiście, liczbowo oznacza on masę substancji, wydzielonej u elektrody woltametru w ciągu jednej sekundy, gdy przez woltametr w tym czasie płynie prąd o natężeniu, równem jedności, jeżeli bowiem we wzorze (4) $i=1$ oraz $t=1$, w takim razie (liczbowo!) $k=m$.

Jednostką natężenia prądu jest *amper*. Właściwe określenie tej jednostki zapowiedzieliśmy napotem, narazie bowiem nie mamy jeszcze do tego należytego przygotowania. Poznamy wtedy sposób mierzenia natężenia prądów, niezależny od zjawiska elektrolizy, i cechowania przy jego pomocy ampermetrów.

Skoro jednak jest to możliwe i jesteśmy w stanie rozporządzać wycechowanym ampermetrem, możliwe jest również przeprowadzenie następującego pomiaru. Oto puszczamy prąd stały przez woltametr srebrowy, wyznaczamy wartość natężenia prądu w amperach, a po pewnym czasie, który dokładnie notujemy, przerywamy prąd i wyznaczamy, ile w tym czasie na katodzie wydzielilo się srebra. Takie pomiary były istotnie robione i w drodze współpracy międzynarodowej zostało ustalone, że *prąd o natężeniu 1 ampera wydziela w ciągu sekundy 1,118 mg srebra* *). Jest to jeden z zasadniczych pomiarów elektrycznych i dla-

*) Innymi słowy przejściu przez roztwór soli srebra 1 kulomba towarzyszy wydzielenie się na katodzie 1,118 mg srebra.

tego podkreślaliśmy już wyżej znaczenie woltametry srebrowego. Po ustaleniu tego t. zw. *równoważnika elektrochemicznego* srebra możemy już przy jego pomocy z mniejszym zachodem, niż to się dzieje przy pomiarze bezwzględnym, o którym potem, ustalać wartość równoważników elektrochemicznych innych substancyj metodą względną. W rzeczy samej wykonajmy pomiar według następującego schematu (rys. 737). Włączmy w obwód kilka woltametrów szeregowo i przypuśćmy, że *L* jest woltametrem srebrowym, *M* — miedziowym, *N* — tlenowodorowym. W obwodzie umieścimy jeszcze jakikolwiek galwanometr wskazówkowy (*G*), któryby mógł nam świadczyć, że przez cały czas mamy prąd istotnie stały. Przypuśćmy, że prąd idzie *t* sekund i znajdujemy, iż w tym czasie wydzielilo się m_{Ag} srebra w woltametrze *L*, m_{Cu} miedzi w woltametrze *M*. m_H wodoru w woltametrze *N* (zmierzone w miligramach).



Rys. 737.

Znając równoważnik elektrochemiczny srebra (1,118 mg.), powiemy, iż w tym razie natężenie prądu wynosiło

$$\frac{m_{Ag}}{t \cdot 1,118} \text{ amperów.}$$

Ponieważ ten prąd wydzielił w ciągu czasu *t* m_{Cu} (w miligramach) miedzi, przeto prąd 1 Amp. w ciągu 1 sek. wydziela miedzi

$$\frac{m_{Cu} \cdot t \cdot 1,118}{m_{Ag} \cdot t} = \frac{m_{Cu} \cdot 1,118}{m_{Ag}} \dots \dots \dots (5)$$

co stanowi właśnie równoważnik elektrochemiczny miedzi.

Podobnie na równoważnik elektrochemiczny wodoru znajdujemy

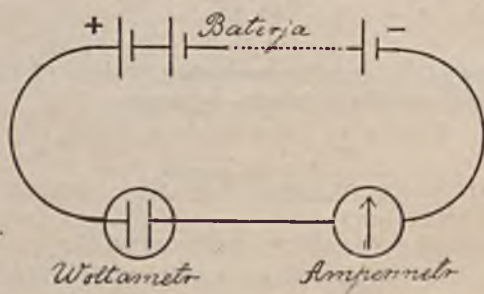
$$\frac{m_H \cdot 1,118}{m_{Ag}} \dots \text{ i t. d. } \dots \dots \dots (6)$$

Oto tabelka równoważników elektrochemicznych niektórych substancyj:

Prąd 1 ampera wydziela w 1-ej sekundzie:

Chloru	0,367 mg
Cynku	0,339 „
Miedzi (w przypadku 2-wartościow.)	0,329 „
Srebra	1,118 „
Złota	0,681 „
Platyny	0,505 „
Tlenu	0,083 „
	(0,058 cm ³ w 0° i 760 mm ciśnienia)
Wodoru	0,010 „
	(0,116 cm ³ w 0° i 760 mm ciśnienia)
Mieszaniny piorunującej (0°, 760 mm)	0,174 cm ³ .

Mając te liczby, zdobywamy w woltametrze przyrząd, pozwalający mierzyć natężenie prądu, w szczególności zaś cechować lub sprawdzać ampermetry. W tym właśnie celu należy tylko włączyć na czas określony w obwód prądu dany ampermetr i woltametr (rys. 738), zanotować wskazanie ampermetru i zmierzyć ilość wydzielonej w tym czasie tej czy innej substancji w woltametrze. Np. bierzemy woltametr miedzioży i zamykamy prąd na 3 minuty; przez cały czas ampermetr



Rys. 738.

wskazuje 2,7 amperów; jak się przekonamy z ważenia katody przed i po dokonanej procesie elektrolizy, w tym czasie w woltametrze miedziożym wydziela się 49,5 mg miedzi. Otrzymujemy z tego, że w sekundzie wydziela się tu 0,817 mg miedzi, dzieląc zaś tę liczbę przez 0,329 mg, t. j. wartość tej masy miedzi, którą wydziela w sekundzie prąd o natężeniu jednego ampera, znajdujemy, że prąd w tym razie wynosił 2,5 amperów. Wynika z tego, że ampermetr w tym miejscu jego skali wymaga poprawki — 0,2, gdyż wskazuje o 0,2 amperów za wiele.

312. Faraday'a drugie prawo elektrolizy. Mechanizm elektrolizy.

Dokonywając pomiaru według schematu przedstawionego na rys. 737, porównajmy ilości wydzielanych na elektrodach przez ten sam prąd w tym samym czasie substancyj, lub też, co na jedno wychodzi, otrzymane już i podane wyżej wartości równoważników elektrochemicznych. Weźmy np. stosunek równoważników elektrochemicznych wodoru i tlenu

$$0,010 : 0,083,$$

z łatwością widzimy, że stosunek ten daje się przedstawić inaczej, a mianowicie:

$$1 : 8,$$

gdybyśmy zaś użyli liczb dokładniejszych niż te, które przytoczyliśmy w tablicy na str. 136, gdzie ograniczyliśmy się tylko do 3 znaków dziesiętnych, i wykonali rachunek ściśle, stosunek ten wypadłby

$$1,008 : 8 \dots \dots \dots (1)$$

Porównanie ścisłych danych, dotyczących wodoru i srebra, dałoby nam

$$1,008 : 107,88 \text{ i t. d.}$$

Otóż liczba 1,008 przedstawia ciężar atomowy wodoru; 8 oznacza połowę ciężaru atomowego tlenu; 107,88 — ciężar atomowy srebra i t. d.

Z drugiej strony wiemy z nauki chemji, że srebro jest pierwiastkiem jednowartościowym (atom srebra w związkach chemicznych równoważny jest atomowi wodoru); tlen jest pierwiastkiem dwuwartościowym (w typowym związku H_2O na jeden atom tlenu przypada dwa atomy wodoru). Liczba, będąca ilorazem ciężaru atomowego danego pierwiastka przez jego wartościowość, wyraża jego t. zw. równoważnik chemiczny. Dla pierwiastków jednowartościowych liczby te są zgodne z ciężarami atomowymi. A więc dla wodoru liczba ta jest 1,008, dla chloru 35,45 — na każde 1,008 gr wodoru trzeba 35,45 gr chloru, jeżeli te dwa pierwiastki razem tworzyć mają chlorowódz (masa tego chlorowodoru będzie $1,008 \text{ gr} + 35,45 \text{ gr} = 36,458 \text{ gr}$). Dla tlenu natomiast, jako pierwiastka dwuwartościowego, liczba ta jest $\frac{16}{2} = 8$

(ciężar atomowy tlenu jest 16) — na każde 1,008 gr wodoru trzeba 8 gr (nie 16 gr) tlenu, jeżeli te dwa pierwiastki razem tworzyć mają wodę (masa tej wody będzie $1,008 \text{ gr} + 8 \text{ gr} = 9,008 \text{ gr}$). Dla cynku, pierwiastka dwuwartościowego, równoważnik chemiczny dany jest przez liczbę $\frac{65,4}{2} = 32,7$ (ciężar atomowy cynku jest 65,4). Jeżeli w znanej

reakcji kwasu siarkowego (H_2SO_4) na cynk tworzy się siarczan cynkowy ($ZnSO_4$), wyzwala się zaś wodór, to na każdy 1,008 gr wyzwolonego wodoru. wchodzi w połączenie z SO_4 32,7 gr (nie 65,4 gr!)

cynku. Podobnie dla miedzi w przypadku jej dwuwartościowości (jak wiadomo, niektóre pierwiastki bywają różnowartościowe) jej równoważnik chemiczny dany jest liczbą $\frac{63,6}{2} = 31,8$ (63,6 stanowi ciężar atomowy miedzi). Wogóle, jeżeli A oznacza ciężar atomowy pierwiastka, zaś n jego wartościowość, to jego równoważnik chemiczny dany jest przez liczbę $\frac{A}{n}$. Pojęcie równoważnika chemicznego rozszerzyć można i na

grupy różnych atomów; tylko w tym razie zamiast ciężaru atomowego brać należy sumę, odpowiadającą strukturze atomowej danej grupy. Tak np. dla grupy kwasowej SO_4 , która jest dwuwartościowa (w kwasie siarkowym H_2SO_4 mamy ją w połączeniu z dwoma atomami wodoru) liczbą, wyrażającą równoważnik chemiczny, jest $\frac{32,06 + 4 \cdot 16}{2} =$

48,03 — tu 32,06 oznacza ciężar atomowy siarki, 16 — ciężar atomowy tlenu. Tak samo dla grupy jednowartościowej NO_3 (mamy ją np. w azotanie srebrnym AgNO_3) znajdziemy na równoważnik chemiczny (ciężar atomowy azotu jest 14,04), $14,04 + 3 \cdot 16 = 62,04$ i t. d. Uwzględniając to wszystko i kontynuując wskazane na początku ustępu porównanie, dochodzimy do stwierdzenia słuszności ustalonego przez M. Faraday'a drugiego prawa elektrolizy, które wyrazić możemy w sposób następujący:

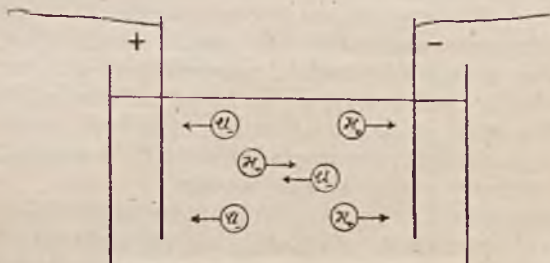
Ilości substancyj, wydzielonych na elektrodach woltametrów w równych czasach przez prądy równego natężenia, pozostają w tym samym stosunku, co równoważniki chemiczne tych substancyj.

Zarówno pierwsze jak drugie prawo Faraday'a jest ściśłem ujęciem faktów doświadczalnych. Musimy jednak koniecznie stworzyć sobie obraz mechanizmu elektrolizy, by lepiej się w tem zjawisku orjentować, a jednocześnie móc te prawa uzasadnić.

Po szeregu prób i udoskonaień, które zapoczątkował jeszcze w r. 1805 Grothus, a których historii kreślić tu nie zamierzamy, obraz ten przedstawia się nam jak następuje:

Według hipotezy, którą stworzył głównie zmarły przed paru miesiącami słynny uczony szwedzki Swante August Arrhenius (ur. w r. 1859), a która wytrzymała dotychczas tyle prób, że może być uważana za odpowiadającą najzupełniej rzeczywistości, w roztworze kwasów lub soli mamy pewną liczbę oddzielnych cząsteczek rozpuszczonej substancji, błakających się w rozpuszczalniku, poza tem pewną ich liczbę w stanie t. zw. *dysocjacji* albo rozpadu na części, obdarzone nabojami elektrycznymi, czyli na t. zw. *jony*. W roztworze wodnym np. kwasu solnego mamy pewną liczbę całkowitych cząsteczek chlorowodoru (HCl), poza tem część podległych dysocjacji, t. j. w stanie rozpadu na ujemne jony chloru i dodatnie jony wodoru. W roztworze wodnym kwasu siarkowego mamy część cząsteczek o składzie H_2SO_4 w stanie rozpadu na dodatnie jony wodoru oraz ujemne jony o składzie grupy kwasowej SO_4 . W roztworze siarczanu miedziowego (CuSO_4) mamy w wyniku dysocjacji dodatnie jony miedzi oraz ujemne jony SO_4 , t. j. takie, jak w przy-

padku dysocjacji kwasu siarkowego. Jony, utworzone z podziału cząsteczki, mają naboje równe, lecz znaków przeciwnych. Gdy zatem tworzą razem cząsteczkę, jest ona obojętna elektrycznie. Rozpad np. cząsteczki HCl na atom chloru (Cl) i atom wodoru (H) zachodzi tak, że pierwszy z tych atomów odbiera drugiemu jeden elektron, skutkiem czego pierwszy z nich okazuje się naładowany ujemnie (Cl_-), drugi dodatnio (H_+). Gdy zachodzi rozpad cząsteczki H_2SO_4 , tworzy się dwa jony wodoru (H_+), dwa atomy wodoru tracą tu po jednym elektronie, zaś grupa kwasowa SO_4 , zdobywając te dwa elektrony, tworzy jon ujemny o naboju, równym dwu nabojom elementarnym (SO_4^{--}). Dysocjacja siarczynu miedziowego ($CuSO_4$) daje taki sam jon ujemny SO_4^{--} o naboju, równym dwu elektronom; jon dodatni tworzy tu atom miedzi, który traci dwa elektrony, a więc ma nabój dodatni, równy dwu nabojom elementarnym (Cu^{++}) i t. d. Im bardziej roztwór jest rozcieńczony, tem większa procentowo część cząsteczek jest w stanie dysocjacji. Należy przytem stan ten rozumieć tak, że np. w roztworze chlorowodo-



Rys. 739.

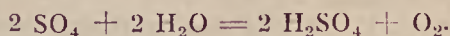
ru niektóre cząsteczki rozpadają się tak, jak powiedzieliśmy, atomy zaś wodoru i chloru, powstałe z rozpadu innych cząsteczek, łączą się ze sobą, tworząc ponownie cząsteczki chlorowodoru tak, że jeden i ten sam atom chloru czy wodoru może stanowić część składową coraz to innej cząsteczki chlorowodoru. Tylko, jak powiedzieliśmy, w zależności od stopnia rozcieńczenia roztworu przeciętnie pewien procent ogólnej liczby cząsteczek pozostaje w stanie dysocjacji.

Jak wspomnieliśmy już wyżej, według poglądów dzisiejszych zagadnienie materji sprowadza się do zagadnienia elektryczności. Dowiemy się później, jak sobie wyobrażamy budowę atomów poszczególnych pierwiastków; narazie możemy powiedzieć tyle, że każdy atom utworzony jest z pewnego naboju dodatniego, nierozdzielnie z nim związanego oraz pewnej liczby elektronów. Atom jest elektrycznie obojętny, gdy całkowity nabój wszystkich elektronów równa się naboju dodatniemu atomu; jeżeli jednak atom utraci jeden lub parę elektronów, wówczas staje się elektrycznie naładowanym dodatnio i posiada nabój równy naboju elementarnemu lub wielokrotności tego naboju elementarnego; przeciwnie, gdyby do atomu obojętnego przyłączył się w ja-

kiś sposób jeden elektron lub parę, wówczas ilościowo rzecz przedstawiałaby się tak samo, tylko wtedy byłby atom naładowany ujemnie. Wyobraźmy więc sobie, jak już powiedzieliśmy, że podczas dysocjacji, np. chlorowodoru nie tylko zachodzi rozpad cząsteczki na atom chloru i atom wodoru, ale przytem atom chloru odbiera atomowi wodoru jeden elektron, skutkiem czego otrzymuje się wyżej wskazany stan elektryczny składowych części rozpadającej się cząsteczki. Otóż takie właśnie atomy lub grupy atomów, obdarzone nabojami elektrycznymi, a stanowiące części, na które się rozpada cząsteczka pewnej substancji, ulegającej dysocjacji, nazywają się *jonami*.

Teraz wystawmy sobie, że w roztworze kwasu solnego, gdzie się znajdują te jony (H_+ i Cl_-), zanurzone są elektrody, połączone z biegunami baterji (rys. 739). Między elektrodami istnieje wtedy pole elektryczne, a w tem polu znajdujące się jony podlegają działaniu sił, odpowiednio skierowanych i zmuszających je do poruszania się, do wędrowki *). Jony ujemne (Cl_-) skierowują się ku elektrodzie dodatniej, t. j. ku anodzie, której każdy z nich oddaje posiadany w nadmiarze elektron, poczem obojętne już atomy chloru tworzą cząsteczki chloru (Cl_2), wydzielające się i dające w masie zbierany ponad anodą chlor. Takie właśnie jony ujemne, dążące ku anodzie, nazywają się *anjonami*. Jony dodatnie natomiast (H_+) skierowują się ku katodzie, skąd nazwa *katjonów*; tu każdy z nich dostaje po brakującym mu elektronie, przycem obojętne już atomy wodoru łączą się w cząsteczki (H_2) i wydzielają się, tworząc w masie zbierany ponad katodą wodór.

Nie zawsze się jednak tak dzieje, że jony, na które dzieli się cząsteczka rozpuszczonej substancji, wydzielają się na elektrodach. Bywa, że zachodzą przytem działania wtórne, które zjawisko komplikują. Tak np. w przypadku wodnego roztworu kwasu siarkowego tworzą się jony (H_+) oraz (SO_4^-), jak to wyżej już powiedzieliśmy. Jony wodorowe podążają tak, jak w przypadku, przed chwilą rozpatrzonym, ku katodzie i tam wydzielają się wodór; natomiast jony (SO_4^-), podążając ku anodzie, nie wydzielają się tam (połączenie takie jako odrębna substancja nie istnieje), lecz, odbierając u anody od cząsteczek wody wodór, tworzą nowe cząsteczki kwasu siarkowego (H_2SO_4), uwalniając zaś z tych cząsteczek tlen, który wydzielą się jako produkt wtórny. Dzieje się to według wzoru



Jakkolwiek tedy u elektrod zbierają się tu ostatecznie składowe części wody, jest to wynikiem zachodzącego złożonego procesu; nie można tu zatem mówić o elektrolizie wody, jak to czasem bywa błędnie podawane. Podkreślamy, że woda elektrolitem nie jest, na co zresztą wskazywaliśmy na początku ust. 309, przystępując do doświadczeń z elektrolizą.

*) Jon — słowo pochodzące z greckiego; oznacza wogóle to, co wędruje. Słowo to, jak również pochodne od niego, wprowadził Faraday.

W przypadku roztworu wodnego siarczanu miedziowego, który mamy w woltametrze miedziowym, zachodzi dysocjacja $Cu SO_4$ na jony dodatnie Cu_{++} i ujemne SO_4^- ; katjon (miedź) osiada na katodzie, anjon SO_4 daje początek, jak w przypadku poprzednim, procesowi wtórnemu ($2SO_4 + 2H_2O = 2H_2 SO_4 + O_2$), którego wynikiem jest tworzenie się kwasu siarkowego i wydzielanie się tlenu.

W woltametrze srebrowym katjonem jest srebro (Ag_+), tworzące się z dysocjacji azotanu srebrowego ($Ag NO_3$) i t. d.

W świetle nakreślonego obrazu z uwzględnieniem wyżej podanej bardzo ważnej okoliczności, że jony, tworzone przez atomy lub grupy atomów, posiadają naboje równe tylu nabojom elementarnym, ile wynosi ich wartościowość — a więc jednowartościowe jony H_+ , Cl^- , Ag_+ i t. d. mają pojedyncze naboje elementarne, dwuwartościowe jony SO_4^{--} , Cu^{++} , i t. d. mają naboje dwukrotne w stosunku do elementarnego, — w świetle tem Faraday'a drugie prawo elektrolizy staje się zupełnie zrozumiałe. I odwrotnie, prawo Faraday'a do takiego właśnie obrazu prowadzi.

Podczas gdy anjony dostarczają w pewnym czasie anodzie pewną liczbę, dajmy na to $2n$ elektronów, tyleż elektronów odbierają w tym czasie katjony od katody — równa się to przeniesieniu poprzez elektrolit za pośrednictwem jonów w tym czasie naboju, wynoszącego $2n$ naboju elementarnych. W ten właśnie sposób zachodzi prąd elektryczny w elektrolicie. W tym samym czasie w przypadku np., gdy elektrolitem jest kwas solny, u anody wydziela się n cząsteczek chloru (cząsteczka chloru Cl_2 składa się z dwu atomów chloru), u katody n cząsteczek wodoru (cząsteczka wodoru H_2 składa się z dwu atomów wodoru). Masy zatem substancyj (chloru i wodoru), wydzielonych u elektrod, muszą tu pozostawać w tym samym stosunku, co ciężary atomowe, albo — ponieważ tu mamy do czynienia z pierwiastkami jednowartościowymi — w tym samym stosunku, co ich równoważniki chemiczne (1,008 : 35,45). W przypadku elektrolizy kwasu siarkowego na katodzie wydziela się wodór, na anodzie na skutek wyjaśnionego już procesu włórnego — równoważna chemicznie ilość tlenu; ilości tych substancyj pozostawać muszą zatem w stosunku 1,008 : 8. Jeżeli jeden i ten sam prąd przechodzi przez dwa w szereg połączone woltometry, z których jeden jest srebrowy, drugi miedziowy, to w pewnych równych czasach przez oba woltometry przechodzą równe naboje, wynoszące np. $2n$ naboju elementarnych. Towarzyszy temu wydzielenie się na katodzie srebrowego woltametru $2n$ atomów srebra (srebro jest jednowartościowe), na katodzie zaś woltametru miedziowego tylko n atomów miedzi (miedź jest tu dwuwartościowa); masy zatem wydzielonych w tym samym czasie przez prąd tego samego natężenia srebra i miedzi mają się nie jak ciężary atomowe, ale jak ciężar atomowy srebra do połowy ciężaru atomowego miedzi, t. j. jak równoważniki chemiczne tych substancyj. To wszystko właśnie ujmuje w jedną formułę drugie prawo Faraday'a.

313. Prądy elektryczne przewodzone i konwekcyjne. Wyznaczanie wartości naboju elementarnego na podstawie zjawiska elektrolizy.

W ust. 180 tomu 1-go, gdzie mowa była o ruchu ciepła, rozróżniliśmy przypadki przewodzenia ciepła i unoszenia go czyli t. zw. *konwekcji*. Przez pręt metalowy, jednym końcem zanurzony we wrzącej wodzie, drugim w naczyniu z lodem, przenosi się energja cieplna — mamy tu do czynienia ze zjawiskiem przewodnictwa. Inaczej rzecz się ma, gdy powietrze ogrzane przy piecu unosi się w górę i tworzy prąd, albo gdy podobny prąd tworzy się w cieczy, podgrzewanej od dołu w mieszczącym ją naczyniu. Tu ciecz lub gaz się porusza, a wraz z niemi unosi się zawarte w nich ciepło. Podobnie rozróżniamy prądy elektryczne przewodzone i konwekcyjne. Gdy drutem łączymy dwa przewodniki o różnym potencjale, tworzy się prąd elektryczny, polegający na przenoszeniu się w tym drucie nabojuw elektrycznych. Jak już mówiliśmy, według naszych dzisiejszych wyobrażeń, elektrony posiadają swobodę ruchów w metalach i mogą w nich przenosić się z miejsca na miejsce; po połączeniu drutem dodatnio naelektryzowanego przewodnika z ujemnie naelektryzowanym, elektrony podążają przez drut z przewodnika drugiego na pierwszy — ten ruch elektronów tworzy właśnie prąd przewodzony w drucie. Inaczej rzecz się ma, gdy porusza się jakiegokolwiek ciało, mające na sobie nabój elektryczny; wtenczas wraz z ruchem tego ciała mamy ruch mieszczącego się na niem naboju; mamy więc w tym razie prąd elektryczny konwekcyjny. Gdy w elektrolicie poruszają się jony — dodatnie ku katodzie, ujemne ku anodzie, mamy tu w dwu kierunkach naraz zachodzące prądy konwekcyjne. U elektrod prądy te konwekcyjne zmieniają się na prąd przewodzony: anodzie jony oddają elektrony, które dalej się poruszają w drucie w kierunku przeciwnym temu, który przyjęto uważać za kierunek prądu; z katody znowu spływają elektrony, czyniąc obojętnemi dochodzące dodatnie katjony.

Niżej wrócimy jeszcze do tej kwestji. Tymczasem zobaczymy, jak można, opierając się na danych zjawiska elektrolizy, wyrobiwszy sobie pojęcie o elementarnym naboju elektrycznym, o atomie elektrycznym, jako tej najmniejszej ilości elektryczności, której wielokrotnościami są wszelkie większe naboje, — jak można wyznaczyć jego wartość. Przedewszystkiem zauważmy rzecz następującą. Prąd jednego ampera wydziela w sekundzie $1,118 \text{ mg} = 0,001118 \text{ gr}$ srebra. Wydzielenie się zatem podanej ilości srebra odpowiada przejściu przez elektrolit jednego kulomba. Przypomnijmy sobie z nauki chemji, że atomem gramowym jakiegokolwiek pierwiastka nazywa się taka jego masa, która się wyraża liczbą gramów, równą ciężarowi atomowemu; zatem atom gramowy srebra stanowi $107,88 \text{ gr}$ srebra. Jaki nabój winien przejść przez roztwór azotanu srebrowego, by się wydzieliło na katodzie $107,88 \text{ gr}$ srebra? Oczywiście, trzeba tyle kulombów, ile razy mieści się $0,001118$ w $107,88$, t. j.:

$$\frac{107,88}{0,001118} = 96494 \dots \dots \dots (1)$$

Ponieważ równego natężenia prądu w równych czasach, a więc te same ilości elektryczności, przepływając przez różne woltometry, wydzielają na elektrodach poszczególne substancje w ilościach proporcjonalnych do ich równoważników chemicznych, przeto wydzielenie się na elektrodzie takiej liczby gramów jakiegokolwiek substancji, ile wynosi jej równoważnik chemiczny, a więc 1.008 gr wodoru, 8 gr tlenu, 35,45 gr chloru, 31,8 gr miedzi i t. d. wiąże się z przejściem przez odpowiedni elektrolit naboju, wynoszącego 96494 kulombów. Liczba ta (96494 kulombów) posiada doniosłe znaczenie i nosi nazwę *stałej Faraday'a*.

Idźmy teraz dalej. Objętość (w 0° i 760 mm ciśnienia) atomu gramowego wodoru znajdziemy, dzieląc 1,008 gr przez gęstość wodoru, która w tych normalnych warunkach wynosi $8,995 \cdot 10^{-5} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$; objętość ta jest zatem:

$$\frac{1,008 \text{ gr}}{8,995 \cdot 10^{-5} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 1,121 \cdot 10^4 \text{ cm}^3 \dots \dots \dots (2)$$

Na podstawie szeregu danych zdołano obliczyć, że 1 cm³ każdego gazu w 0° i 760 mm ciśnienia zawiera cząsteczek

$$N = 27,1 \cdot 10^{18} \dots \dots \dots (3)$$

Atom gramowy wodoru w objętości 1,121 · 10⁴ cm³ zawiera zatem cząsteczek wodoru

$$27,1 \cdot 10^{18} \cdot 1,121 \cdot 10^4 = 3,03 \cdot 10^{23} \dots \dots \dots (4)$$

a ponieważ cząsteczka wodoru składa się z dwu atomów, więc atom gramowy wodoru zawiera atomów

$$6,06 \cdot 10^{23} \dots \dots \dots (5)$$

Ta liczba atomów jest zatem nośnikiem 96494 kulombów =

$$96494 \cdot 3 \cdot 10^9 \text{ jedn. el. st.} = 28,95 \cdot 10^{13} \text{ jedn. el. st.}$$

A więc nabój elementarny, który posiada każdy atom wodoru, gdy pozostaje jonem, jest

$$\frac{28,95 \cdot 10^{13} \text{ jedn. el. st.}}{6,06 \cdot 10^{23}} = 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ jedn. el. st.}$$

Jest to właśnie ta wielkość, którą podaliśmy wyżej, na str. 15.

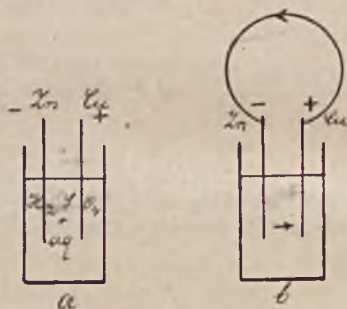
Z drugiej strony, gdyby się udało na innej drodze, niezależnej od elektrolizy, znaleźć wartość naboju elementarnego, a, jak zobaczymy,

jest to możliwe, to na podstawie zjawiska elektrolizy znaleźlibyśmy wartość tej liczby N cząsteczek gazu, które się zawierają w 1 cm^3 w warunkach normalnych (0° i 760 mm ciśnienia).

314. Budowa ogniw.

Poznaliśmy dotychczas ogólnikowo jeden typ ogniwa (Greneta), którym posługiwaliśmy się w doświadczeniach, nie zastanawiając się nad szczegółami jego budowy. Wystarczyło nam narazie stwierdzenie faktu, iż prąd elektryczny powstaje tu kosztem pewnych procesów chemicznych. Wracamy teraz do kwestji ogniwa w celu bliższego jej omówienia na podstawie zdobytych tymczasem nowych wiadomości.

Najstarszym typem ogniwa jest ogniwo Volty, nie znajdujące wprawdzie zastosowania praktycznego, niemniej ciekawe tak ze względów historycznych, jak dydaktycznych. Ogniwo takie tworzymy, zanurza-



Rys. 740.

jąc w rozcieńczonym (5%) kwasie siarkowym jedną płytkę miedzianą i jedną cynkową (amalgamowaną dla uniknięcia zwykłej reakcji kwasu na cynk oraz komplikacyj, wynikających z zanieczyszczeń cynku) (rys. 740a).

Na płycie miedzianej otrzymujemy potencjał wyższy, niż na cynkowej; płyta miedziana tworzy więc biegun dodatni ogniwa, płyta cynkowa — biegun ujemny. Gdy łączymy płyty drutem (rys. 740b), stwierdzamy, iż przez drut płynie prąd elektryczny — świadczy o tem grzanie się drutu albo odchylenie wskazówki, włączonego w obwód galwanoskopu lub galwanometru. Jednocześnie stwierdzamy, że w ogniwie zachodzą poważne przemiany. Mianowicie: płytki cynkowej wciąż ubywa*), zaś na miedzianej tworzą się pęcherzyki gazu, który po zbadaniu okazuje się wodorem. Gdy po pewnym czasie trwania prądu badamy roztwór, w którym płytki są zanurzone, stwierdzamy obecność

*) Używając w doświadczeniu wąskiego, cienkiego skrawka blaszki cynkowej, widzimy, jak on, że tak powiemy, znika w oczach, jakgdyby rozpuszczając się w cieczy.

w nim substancji, której przedtem nie zawierał, a mianowicie siarczynu cynku.

Opierając się na tem, co jest już nam znane, tłumaczymy sobie rzecz w następujący sposób. Oto przedewszystkiem zjawisko prądu elektrycznego nie zachodzi wyłącznie w drucie, łączącym płytki, lecz również w cieczy ogniwa; mamy więc tu całkowicie zamknięty obwód prądu — według ustalonej umowy technicznej kierunek prądu nazwanątrż ogniwa przypada od miedzi do cynku, natomiast w ogniwie od cynku do miedzi. Na rysunku wskazane jest to strzałkami. Wszakże, jak wiemy, prąd w elektrolicie polega na ruchu jonów; w roztworze kwasu siarkowego w kierunku, przyjmowanym za kierunek prądu — w kierunku strzałki na rysunku, a zatem w stronę płyty miedzianej — poruszają się jony wodorowe (porówn. rys. 739 na str. 139); to też miedź pokrywa się tu pęcherzykami wodoru. Jednocześnie cynku wciąż ubywa, tworzy się bowiem siarczan cynku, przyczem wyzwała się energja, która się właśnie przekształca w energję prądu elektrycznego.

Jeżeli w obwód prądu, otrzymywanego z ogniwa Volty, włączony jest galwanometr, wskazuje on — i to względnie prędko — zmniejszenie się natężenia prądu. Przeprowadzone odpowiednie pomiary różnicy potencjałów na biegunach ogniwa wskazują, że podczas funkcjonowania ogniwa ta różnica potencjałów się zmniejsza. Wszakże, gdy z powierzchni płytki miedzianej usuwamy nagromadzone tam pęcherzyki wodoru, różnica potencjałów na biegunach, a jednocześnie natężenie prądu znowu wzrasta. Elektroda, którą tworzy w ogniwie płytka miedziana, ulega tu, jak mówimy, *polaryzacji*; wydzielający się na niej wodór wpływa oczywiście jakoś na przebieg zjawiska — co innego zetknięcie czystej płytki miedzianej z elektrolitem, a co innego to jej zetknięcie, gdy się pokrywa wodorem. Cokolwiek przytem zachodzi, jest to zjawisko niepożądane w ogniwie, gdyż wpływa na zmniejszenie się różnicy potencjałów na biegunach, a zarazem powoduje zmniejszenie się natężenia prądu, który to ogniwo daje. Ogniwo Volty jest z tego powodu ogniwem, nie nadającym się do dłuższego użycia i nie znajduje zastosowania.

Jeżelibyśmy jednak urządzili ogniwo tak, aby zapobiegać wydzielaniu się wodoru, a przez to i polaryzacji elektrody, udoskonalilibyśmy je. Można to uczynić, wprowadzając do roztworu silnie utleniającą substancję, której działaniu podlegałby wodór; byłby on przez to usuwany, a więc przestałby być szkodliwym. Właśnie domieszanie do roztworu kwasu siarkowego dwuchromianu potasowego osiąga ten cel. Mamy to mianowicie w ogniwie Greneta (rys. 723), gdzie jeszcze w dodatku zastąpiono płytkę miedzianą przez płytkę węglową, gdyż miedź przy działaniu nań używanego w ogniwie elektrolitu przechodzi stopniowo w skład roztworu i tem komplikuje proces.

Ogniwo Greneta nadaje się często postać, wyobrażoną na rys. 741. Mamy tam dwie połączone ze sobą płytki węglowe (*K*), stale zanurzone w elektrolicie, którego działaniu nie podlegają; mieszcząca się między niemi płytka cynkowa daje się podnosić do góry i w ten sposób przerywa się zetknięcie cynku z elektrolitem, gdy ogniwo jest nieczynne.

Istnieje mnóstwo typów ogniw, których historii, zarówno jak budowy, omawiać nie potrzebujemy, zwłaszcza, że wiele z nich nie znajduje już dziś zastosowania. Ograniczymy się do podania krótkiego opisu paru ważniejszych.

Doskonałem dla celów laboratoryjnych, gdyż mającym bardzo małe zmienną różnicę potencjałów na biegunach, jest ogniwo Daniella, w którym używa się nie jednego elektrolitu, lecz dwu, przedzielonych ścianą porowatą i tak dobranych, że zjawisko polaryzacji nie zachodzi. Ogniwo to widzimy na rys. 742. Mamy tu elektrodę cynkową (Z), zanurzoną w rozcieńczonym kwasie siarkowym lub też w roztworze siarczanu cynkowego, który to roztwór mieści się w cylindrze z glinki niepolewanej. Drugą elektrodę stanowi blacha miedziana K, zanurzona



Rys. 741.



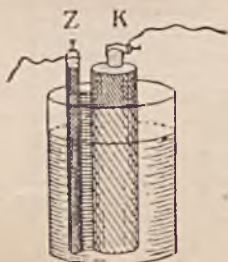
Rys. 742.

w stężonym roztworze siarczanu miedziowego, znajdującego się nawewnątrz cylindra z glinki. Glinka porowata nie przeszkadza wędrówce jonów (co stanowi istotę prądu w elektrolicie), znacznie wszakże utrudnia mieszanie się obu cieczy. Miedź w ogniwie Daniella tworzy biegun dodatni, cynk (jak zawsze zresztą) — biegun ujemny. Zacisk *s*, połączony z blachą miedzianą, i wcięcie na blaszce *m*, złączonej z cynkiem, są zrobione tak, że biegun ujemny jednego ogniwa daje się spinać z dodatnim biegunem drugiego, gdy zachodzi potrzeba tworzenia z tych ogniw baterji.

Gdy łączymy bieguny ogniwa Daniella, prąd nazewnątrz ogniwa skierowany jest (powtórzmy raz jeszcze, według dawniej jeszcze przyjętej umowy) od miedzi do cynku; natomiast wewnątrz ogniwa od cynku do miedzi. W kierunku zatem miedzi wędruje tu poprzez ścianę porowatą wodór, który jednak na miedzi nie osiada — tworzy on z grupą SO_4 kwas siarkowy, osiada zaś na płycie miedzianej z roztworu siar-

czanu miedziowego miedź, skutkiem czego elektroda ta się nie zmienia, czyli nie ulega polaryzacji.

Bardzo rozpowszechnionem jest ogniwo Leclanché'go, wyobrażone schematycznie na rys. 743. Biegun ujemny tworzy tu pręt cynkowy (Z), biegun dodatni — pręt węglowy (K), złączony w jedną całość z walcem, zrobionym z prasowanej mieszaniny węgla i braunsztynu. Jako elektrolit użyty tu jest roztwór nasycony salmjaku. Braunsztyln odgrywa rolę *depolaryzatora*; dostarcza on tlenu, niezbędnego do utleniania wodoru, którego jony podążają tu w stronę pręta węglowego. Działanie tego depolaryzatora jest powolne, skutkiem czego po zamknięciu prądu, branego z tego ogniwa, natężenie prądu spada; jednak po przerwaniu prądu działanie depolaryzacyjne trwa i różnica potencjałów na biegunach osiąga pierwotną wartość. Ogniwo to nadaje się więc doskonale wtedy, gdy chodzi o krótkotrwałe prądy (np. do dzwonek elektrycznych).



Rys. 743.



Rys. 744.

Bardzo rozpowszechnione w handlu są ogniwa t. zw. *suche* (rys. 744). Są to właściwie te same ogniwa Leclanché'go, tylko zawierają one elektrolit (roztwór salmjaku), zmieszany z trocinami, piaskiem lub innymi substancjami, co nadaje mu konsystencję, zapobiegającą łatwemu wylewaniu się. Stąd nazwa „suchy“; ma ona więc tylko względne znaczenie, gdyż w rzeczywistości, ogniwo działać przestaje, gdy naprawdę wysycha.

Wreszcie słów parę o t. zw. ogniwach normalnych. Mianem tem oznaczamy te, które zachowują bardzo trwale różnicę potencjałów na biegunach i mogą skutkiem tego służyć za wzorce tych różnic. Najlepszym z nich jest ogniwo Westona. Z rys. 745 poznajemy jego wygląd zewnętrzny, rys. 746 daje w stosunkowym powiększeniu przekrój samego naczynia ze wskazaniem zawartości. Naczynie kształtu litery *H* zawiera roztwór wodny siarczanu kadmowego. Na dole jednego z ramion naczynia mamy trochę rtęci, przykrytej warstwą siarczanu rtęciowego, na której leżą kryształki siarczanu kadmowego. Na dole drugiego ramienia mieści się amalgamat kadmowy, na nim zaś warstwa siarczanu kadmowego. Druciki, wtopione w szkło, łączą się w jednym ra-

mieniu z rtęcią, w drugim z amalgamatem kadmowym; na pierwszym z nich mamy potencjał wyższy niż na drugim — tam jest biegun dodatni ogniwa. Ogniwa normalnych nie używa się jako źródeł prądu; służą one tylko jako wzorce różnic potencjałów.

Użyliśmy wyżej terminu „napięcie“ dla oznaczenia wogóle różnicy potencjałów; baterję np. wysokiego napięcia nazywamy taką, na której biegunach istnieje wielka różnica potencjałów. Podaliśmy zarazem wyżej inny jeszcze termin, a mianowicie „siła elektromotoryczna“, oznaczając wtedy ogólnikowo czynnik, podtrzymujący różnicę potencjałów na biegunach ogniwa. Czynnikiem ten jest nam jeszcze nie dość znany. Czemukolwiek on jednak jest, jego wyrazem ilościowym jest różnica potencjałów na biegunach ogniwa otwartego, t. j. ogniwa, między którego



Rys. 745.



Rys. 746.

biegunami niema połączenia przewodzącego. Różnica ta zależy tylko od własności chemicznych i stanu fizycznego (temperatury) ciał, wchodzących w skład ogniwa, niezależna natomiast od rozmiarów ogniwa. I oto tę właśnie różnicę potencjałów na biegunach ogniwa otwartego przyjęto nazywać jego *siłą elektromotoryczną* *).

Oto tabelka sił elektromotorycznych opisanych ogniw.

Weston	1,019	woltów
Daniell	1,12	„
Leclanché	1,42	„
Grenet	ok. 2	„
„Suche“	„ 1,5	„

*) Termin ten jest powszechnie przyjęty, ale bardzo niefortunny: słowo „siła“ ma zupełnie określone znaczenie i niezręcznym jest używanie go w sensie różnicy potencjałów.

Siły elektromotoryczne ogniw zależne są między innymi od temperatury. W ogniwie Westona jest ona niemal zupełnie od temperatury niezależna — nieznaczną jedynie poprawkę wprowadza się przy bardzo ścisłych pomiarach.

315. Wiadomości uzupełniające o budowie ogniw.

Stwierdzenie faktu, że przy zetknięciu dwu różnych przewodników metalicznych wytwarza się na jednym z nich w stosunku do drugiego pewna różnica potencjałów, jest rzeczą skomplikowaną i za czasów Volty nie mogło być dokonywane z uwzględnieniem tych wszystkich okoliczności, które uwzględniamy dzisiaj. Zresztą i dziś jeszcze zagadnienie to nie jest w zupełności zbadane i przedstawia wiele trudności przy eksperymentowaniu. Bądź co bądź faktem jest, że, gdy stykają się ze sobą dwa kawałki różnych metali, oba nie pozostają przy tym samym potencjale. Jeżeli potencjał pierwszej bryły oznaczymy przez V_I (wartość ta będzie wspólną dla wszystkich jej punktów), zaś przez V_{II} wartość potencjału bryły drugiej, która to wartość będzie wspólną wszystkim jej punktom, to albo $V_I > V_{II}$ albo $V_I < V_{II}$, czyli przy przejściu z pierwszego z tych ciał na drugie istnieje pewien skok potencjału, którego wartość zależy od różnych okoliczności, jak np. od stopnia czystości stykających się powierzchni, od temperatury, od tego, czy oba ciała znajdują się w powietrzu, w innym gazie, czy w próżni i t. d. Gdy oba te stykające się ciała naelektryzujemy, zmieniając przez to ich potencjały o wartość V , skok ten w dalszym ciągu pozostanie, t. j. teraz, dajmy na to, potencjał pierwszego z nich będzie $V_I + V$, drugiego $V_{II} + V$, a zatem, o ile nie zmieniła się reszta warunków doświadczenia, znowu będziemy mieli tę samą różnicę $V_I - V_{II}$.

Ten skok potencjału, wytwarzający się przy zetknięciu różnorodnych ciał, przyjęto oznaczać symbolem I/II , jeżeli I oznacza pierwsze ciało, a II drugie, lub A/B , jeżeli przez A oznaczymy jedno, a przez B drugie.

Oczywiście przytem

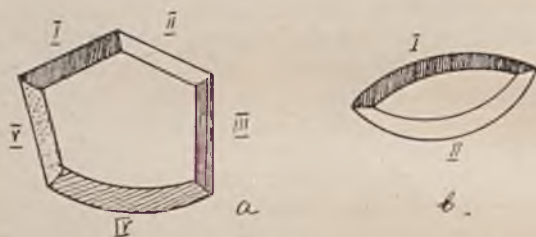
$$I/II = - II/I \text{ albo } A/B = - B/A \quad , \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

symbole bowiem I/II i II/I oznaczają te same skoki potencjału, rozważane jedynie w przeciwnych sobie kierunkach.

Zróbmy obwód z kilku różnych metali, jak to przedstawia rys. 747. Możemy np. te kawałki zlutować; lutowie będzie tu jeszcze jednym dodatkowym metalem w obwodzie. Tego rodzaju pierścień lata całe możemy przechowywać, przyczem ulegać on będzie co najwyżej utlenianiu na powierzchni lub wogóle zanieczyszczeniom z zewnątrz, nie zmieniając się jednakowoż w całej swej masie. W obwodzie takim, gdy miejsca wszystkich spojeń pozostają w jednej i tej samej temperaturze, niema i nie może być prądu elektrycznego. Gdyby bowiem prąd powstał i trwał, czemu towarzyszyłoby grzanie się prętów, a zarazem nieustan-

ne oddawanie ciepła nazewnątrz, musiałyby w ciałach tych zachodzić jakaś zmiana, której kosztem powstawałby właśnie ten prąd. To też żadne znane sposoby wykrywania istnienia prądu nie zdradzają, by w takim pierścieniu istniał prąd — np. nie wykazuje tego najczulszy galwanometr włączony w ten obwód (przewodnik galwanometru tworzy tu jedno z ogniw pierścienia).

W szczególności pierścień taki możemy utworzyć tylko z dwu przewodników metalicznych, jak na rys. 747b. O ile miejsca zetknięcia obu przewodników pozostają w tej samej temperaturze, skoki potencjałów w nich przy przejściu z jednego na drugi są jednakowe. Posuwając się więc wzdłuż obwodu w jakimkolwiek kierunku, np. w kierunku wskazówki zegara, będziemy mieli pewnej wartości stały potencjał V_I na całej długości przewodnika pierwszego, następnie przy przejściu na II skok na wartość V_{II} (zależnie od tego, jakie to są ciała, może być $V_{II} > V_I$, albo $V_{II} < V_I$), tę samą stałą wartość V_{II} na całej długości przewodnika II i potem przy przejściu z II na I znowu skok na V_I , t. j.



Rys. 747.

skok w kierunku przeciwnym. W kierunku zatem przyjętym (w kierunku wskazówki zegara) mamy dwa skoki I/II i II/I; ponieważ jednak (p. wzór 1) $I/II = - II/I$, przeto

$$I/II + II/I = 0 \quad (2)$$

czyli w całym obwodzie suma istniejących w nich skoków potencjałów równa się zero. Ten sam wynik otrzymalibyśmy, biorąc pod uwagę kierunek przeciwny kierunkowi wskazówek zegara.

Zupełnie podobnie rzecz się ma w przypadku większej liczby przewodników metalicznych, tworzących zamknięty obwód. Dla przypadku, przedstawionego na rys. 747a, napiszemy, trzymając się przyjętego znakowania

$$I/II + II/III + III/IV + IV/V + V/I = 0 \quad (3)$$

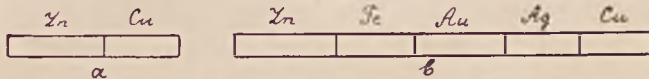
Wyrażenia (2) i (3) oznaczają właśnie to, że w rozpatrywanych obwodach nie może być prądu elektrycznego. Na to, by prąd taki istniał, trzeba, by istniała pewna siła elektromotoryczna, pod której działaniem

naboje poruszałyby się wzdłuż obwodu. Wszakże w przypadku, przedstawionym na rys. 747b, istnieniu skoku I/II, który należy uważać jako siłę elektromotoryczną w tem miejscu, przeciwstawia się istnienie skoku II/I, czyli siły elektromotorycznej, skierowanej w stronę wręcz przeciwną. Wobec dwu takich równych, lecz w przeciwne strony działających czynników w obwodzie niema siły elektromotorycznej, która mogłaby pędzić w określonym kierunku naboje, a tem tworzyć prąd elektryczny.

Co innego, gdyby w przypadku rys. 747b miejsca zetknięcia miały różne temperatury; wtedy skoki potencjału I/II i II/I nie byłyby równe i byłaby różną od zera suma I/II + II/I, co byśmy wyrazili tak:

$$I/II + II/I \neq 0 \dots \dots \dots (4)$$

Wtedy istotnie, jak wykazuje doświadczenie, tworzy się w obwodzie prąd, zwany termoelektrycznym. Do tej kwestji wrócimy później. Zauważmy jednak tymczasem, że w tym razie prąd się tworzy kosztem jakiegoś działania z zewnątrz — wszak należy jedno miejsce zetknięcia utrzymywać w wyższej temperaturze, niż drugie. Z zewnątrz zatem dostarczana tu jest niezbędna energia, której kosztem tworzy się prąd.



Rys. 748.

Wyrażenie (3) przedstawia to samo, co (2), tylko dla ogólniejszego przypadku — o ile wszystkie miejsca spojeń są w tej samej temperaturze, niema w obwodzie siły elektromotorycznej, któraby mogła pędzić naboje w określonym kierunku, a przez to tworzyć prąd.

Wzór (3) można napisać inaczej, a mianowicie, zważywszy, że $V/I = -I/V$

$$I/II + II/III + III/IV + IV/V - I/V = 0 \dots \dots (5)$$

czyli

$$I/II + II/III + III/IV + IV/V = I/V, \dots \dots (6)$$

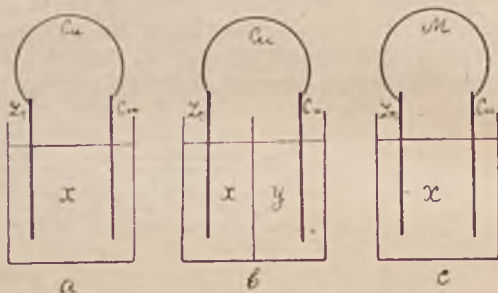
co odczytujemy w ten sposób: skok potencjału przy zetknięciu dwu różnorodnych przewodników metalicznych, nie ulega zmianie, jeżeli zamiast bezpośredniego ich zetknięcia ustalamy między nimi połączenie zapomocą dowolnej liczby jakichkolwiek przewodników metalicznych. Jeżeli więc przy zetknięciu cynku z miedzią (rys. 748a) stwierdzamy, że na cynku potencjał jest wyższy niż na miedzi, to tę samą nadwyżkę potencjału na cynku w stosunku do potencjału na miedzi będziemy mieli, jeżeli cynk i miedź będą stanowiły końce pręta, utworzonego kolejno w szeregu stykających się ze sobą innych metali (rys.

748b). Wobec tego winno być zrozumiałem, że wprowadzenie lutowia przy sporządzaniu obwodu z różnych metali, jak np. na rys. 747, nie gra żadnej roli.

Inaczej rzecz się przedstawia, gdy tworzymy obwód, zawierający oprócz przewodników metalicznych jeszcze elektrolity. Weźmy np. obwód, wyobrażający schematycznie zamknięte ogniwo Volty (rys. 749a), zakładając, że drut, łączący bieguny ogniwa, jest miedziany. Elektrolit oznaczamy tu przez X .

Mamy tu również kontakty różnych ciał, co możemy przy użyciu wskazanej symboliki oznaczać tak: $Cu|Zn$, $Zn|X$, $X|Cu$. W tym razie jednak w obwodzie płynie prąd, istnieje zatem niezbędna siła elektromotoryczna, a więc

$$E = Cu|Zn + Zn|X + X|Cu \neq 0 \quad (7)$$



Rys. 749.

Z tego, cośmy już poznali, wyczuć możemy, że tworzenie się w danym razie siły elektromotorycznej jest zjawiskiem natury chemicznej. Też same natury według dzisiejszych zapatrywań jest wogóle tworzenie się skoków potencjału przy zetknięciu ciał różnorodnych.

W przypadku ogniwa z dwoma elektrolitami (X , Y) np. ogniwa Daniella (rys. 749b — elektrolity przedziela ścianka porowata) możemy napisać

$$E = Cu|Zn + Zn|X + X|Y + Y|Cu \neq 0 \quad (8)$$

Rozpatrzmy jeszcze przypadek, gdy ogniwo zamknięte jest jakimkolwiek innym przewodnikiem metalicznym, niż te, które tworzą elektrody. Na rys. 749c zaznaczony jest właśnie taki przewodnik przez M . Napiszemy więc na wartość siły elektromotorycznej

$$E = M|Zn + Zn|X + X|Cu + Cu|M ; \quad (9)$$

lecz według tego, co mamy dla przewodników metalicznych (wzór 6), możemy napisać

$$M|Zn = M|Cu + Cu|Zn = - Cu|M + Cu|Zn \dots \dots (10)$$

Podstawiając (10) do (9), znajdziemy

$$\begin{aligned} E &= - Cu|M + Cu|Zn + Zn|X + X|Cu + Cu|M = \\ &= Cu|Zn + Zn|X + X|Cu \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

co jest identyczne z (7).

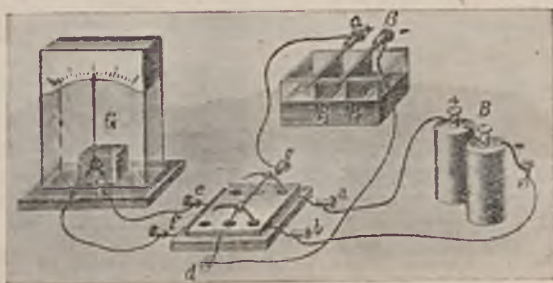
Obojętną zatem jest rzeczą, z jakiego metalu zrobiony jest drut, którym łączymy bieguny ogniwa. Z tego powodu też obojętne jest i nie wpływa na wartość różnicy potencjałów na biegunach baterji to, jakimi drutami spinamy poszczególne ogniwa, tworzące baterję — przy szeregowem połączeniu mamy na biegunach baterji różnicę potencjałów równą prosto sumie różnic potencjałów na biegunach poszczególnych spiętych ze sobą ogniw.

Musimy tu uczynić jedną uwagę, do której wrócimy jeszcze później. Jeżeli w ten sposób, jak to podane zostało wyżej, albo z pomocą specjalnych przyrządów, zwanych *woltmetrami* (nie woltametrami!), których budowę poznamy potem, mierzyć będziemy różnicę potencjałów na biegunach ogniwa, gdy jest otwarte, a następnie zamknięte, przekonamy się, że różnica ta w przypadku zamkniętego ogniwa jest mniejsza, niż w przypadku otwartego, przytem zmniejszenie się to zależy od rodzaju i od wymiarów przewodników, któremi są połączone bieguny ogniwa. Omówienie tego faktu wymaga uprzedniego zapoznania się z innemi jeszcze pojęciami, które tymczasem są nam obce. Dlatego poprzestajemy narazie na jego podkreśleniu.

316. Akumulatory.

Zróbmy doświadczenie, którego układ widzimy na rys. 750. W doświadczeniu tem mamy do czynienia między innemi z przyrządem, którego jeszcze nie używaliśmy. Jest nim t. zw. *przełącznik*, który służy do zmiany kierunku prądu lub wogóle do zmiany połączeń w obwodach z prądem. Na rysunku przełącznik wysunięty jest na front; tworzy go płytką z materiału izolującego, w której zrobione jest 6 wgłębień, zawierających rtęć. Do każdego z tych wgłębień sięgają końce sześciu drucików, przetkniętych przez izolator i mających na drugich końcach umocowane zaciski *a, b, c, d, e, f*. Temiż literami nazywać będziemy odpowiednie wgłębienia. Dwa łukowato zgięte grube druty, przedzielone izolującym (szklanym, ebonitowym) prętem, prostopadłym do płaszczyzny tych łuków, spojone są z pręcikami metalowemi, wstawionemi do wgłębień *c* i *d*. W urządzeniu tem mamy ruchomy mostek,

który można przetrzucać w prawą czy lewą stronę (mówimy o tych stronach na rysunku); wspiera się on cały czas na pręcikach, wstawionych w zagłębienia *c* i *d*; gdy go przechylimy na prawo, tak właśnie, jak to mamy na rysunku, wówczas prawe końce łuków metalowych są zagłębione w otworach *a* i *b*; gdy go natomiast przechylimy w lewo, prawe końce łuków metalowych wynurzą się z rtęci, która się mieści w zagłębieniach *a* i *b*, zaś lewe końce wpadną do zagłębień *e* i *f*. Prześledźmy drogę prądu, którego źródłem jest baterja *B*, złożona z 2—3 ogniw suchych, połączonych w szereg. Biegun dodatni baterji łączy się z zaciskiem *a*; stąd prąd ma dalej drogę przez połączenie metaliczne między *a* i *c*, potem do zacisku α , połączonego z płytką ołowianą P_1 , dalej przez rozcieńczony (20⁰/₀) kwas siarkowy, umieszczony w naczyniu, do drugiej płytki ołowianej P_2 ; stamtąd po druciku między zaciskami β i *d* i metalicznemu połączeniu między *d* i *b* do zacisku *b* i wreszcie do ujemnego bieguna baterji. Gdybyśmy przetrzucili mostek na lewo, wówczas przerwalibyśmy połączenie metaliczne między *a* i *c* oraz między



Rys. 750.

b i *d*, ustalilibyśmy je natomiast między *c* i *e* oraz *d* i *f*. Wtedy elektrody P_1 i P_2 zostałyby odłączone od baterji, natomiast, jak widać odrazu z rysunku, połączone z galwanometrem (ampermetrem wykładowym) *G*. Jak widzimy, przełącznik w tej jego postaci, jaką mamy tutaj (bywają też inne) pozwala łączyć płytki ołowiane P_1 i P_2 , zanurzone w rozcieńczonym kwasie siarkowym, albo z galwanometrem przy włączeniu baterji, albo przeciwnie z baterją przy wyłączeniu galwanometru.

Zaczynamy od połączenia płytek ołowianych P_1 i P_2 , gdy świeżo zostały założone, z galwanometrem (mostek przełącznika przetrzucony jest na lewo, w przeciwną zatem stronę, niż to mamy na rysunku). Galwanometr nie daje żadnego wychylenia. Jest to zupełnie zrozumiałe; dwie zupełnie jednakowe płytki ołowiane zanurzone są w tym samym elektrolicie — niema żadnego powodu, by potencjał na jednej z nich był inny niż na drugiej. Teraz przetrzucamy ruchomy mostek przełącznika na prawo (jak na rysunku). Ustalamy przez to połączenie płytek P_1 i P_2 z biegunami baterji *B*, co rozpoczyna proces elektrolizy w woltametrze,

którego elektrodami są płytki P_1 i P_2 . U katody P_2 zaczyna się wydzie-
lać wodór, u anody P_1 — tlen; ołowiana płytka P_1 utlenia się przytem,
pokrywając się brunatną warstwą dwutlenku ołowiu — widzimy ten
nałot, wyjmując na chwilę płytkę P_1 z cieczy. Po paru lub kilku minu-
tach przerzucamy znowu mostek na lewo, t. j. odłączamy od woltame-
tru baterję i włączamy galwanometr. Otrzymujemy bardzo wyraźne
odchylenie galwanometru, co świadczy, iż nasz woltametr stał się źró-
dłem prądu — ogniwem. Stopniowo jednak wychylenie igły galwano-
metru zmniejsza się i wkońcu prąd ustaje. Gdy wyjmemy wtedy płytkę
 P_1 z cieczy, przekonamy się, iż brunatnej warstewki na niej już nie ma.

Po pewnym czasie trwania elektrolizy w woltametrze, gdy anoda
się utleniła, nie mamy już dwu jednakowych płytek metalowych,
zanurzonych w elektrolicie; tworzy się więc na nich pewna różnica po-
tencjałów, która czyni woltametr ogniwem. Przytem biegunem dodat-
nim tego ogniwa staje się płyta, która była połączona uprzednio z do-
datnim biegunem baterji, t. j. płyta P_1 , ujemny zaś biegun tworzy się
na płycie P_2 , połączonej uprzednio z biegunem ujemnym baterji B .
Prąd przez galwanometr płynie więc w kierunku od P_1 do P_2 , wewnątrz
zaś ogniwa od P_2 do P_1 , t. j. w kierunku wręcz przeciwnym niż prąd,
który puszczaaliśmy przez woltametr z baterji B . Teraz płyta P_1 się od-
tlenia i stopniowo wytworzona na płytach różnica potencjałów maleje.

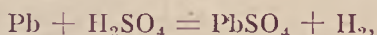
Doświadczenie to możemy powtórzyć, używając zamiast ołowianych
elektrod P_1 i P_2 blaszek platynowych. Wtedy blaszki te podczas prze-
puszczania prądu przez roztwór kwasu siarkowego z baterji B pozornie
nie ulegają zmianom; a jednak, gdy przerzucamy mostek przełącznika
po pewnym czasie trwania tego prądu, galwanometr również daje wy-
chylenie, stopniowo zanikające, przyczem znowu ta elektroda platy-
nowa, która była połączona z biegunem dodatnim baterji, staje się bie-
gunem dodatnim utworzonego w ten sposób, a czas tylko pewien funk-
cjonującego ogniwa. I tu podczas funkcjonowania tego ogniwa zachodzi
w niem proces jakgdyby odwrotny w stosunku do tego, co się dzieje, gdy
puszczamy przez nie prąd z baterji — na tej elektrodzie, na której wy-
dzielał się wodór, teraz wydziela się tlen; stopniowo elektrody wracają
do pierwotnego stanu i wychylenie galwanometru staje się równe zeru.
Nie wdając się w roztrząsanie tego, co się tu dzieje z elektrodami platyno-
wemi, powiemy krótko, że się one *polaryzują*, co daje możność otrzy-
mania potem stwierdzonego przez nas doświadczalnie *prądu polary-
zacyjnego*. Podkreślamy, iż w elektrolicie ten prąd polaryzacyjny ma
zawsze kierunek przeciwny względem kierunku prądu, wywołującego
tę polaryzację. Gdy wyżej mówiliśmy o polaryzowaniu się elektrod
w ogniwach, jako o czynniku szkodliwym, możemy to teraz uzasadnić
tem, że tworzą się wtedy siły elektromotoryczne, działające w kierunku
przeciwnym, niż siły elektromotoryczne polaryzujących się ogniw.

Możność otrzymywania prądów polaryzacyjnych prowadzi do bu-
dowy bardzo ważnych źródeł prądu, zwanych *akumulatorami*. Są to
ogniwa, wymagające t. zw. *ładowania*. Przez akumulator puszczaemy
przez czas pewien prąd ze źródła stałego prądu i w sposób podobny,

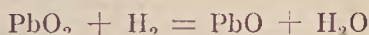
jak w powyższych doświadczeniach, *ładujemy* go albo, jak się inaczej też mówi, *nabijamy* *). Naładowany akumulator służyć wtedy może za ogniwo, z którego czerpiemy prąd, dopóki się nie *wyładowuje*. Przy ładowaniu zatem akumulatora udzielamy mu pewnego zapasu energii, (dostarczana energia elektryczna przekształca się na chemiczną), z której potem korzystamy, dopóki ten zapas się nie wyczerpie, przyczem tu odwrotnie znowu tworzy się energia prądu elektrycznego z energii chemicznej. W akumulatorach ołowiowych**), których prototypem jest ta postać, jaką mamy na rys. 747, płytę dodatnią tworzy krata ołowiana, pokryta skorupą dwutlenku ołowiu (PbO_2) i posiadająca w zagłębieniach porowatą masę PbO_2 , płytę zaś ujemną krata czystego ołowiu (Pb), posiadająca w zagłębieniach ołów gąbczasty. Budowa porowata obu płyt służy do wprowadzenia w grę możliwie wielkiej ich powierzchni.

Proces chemiczny, zachodzący w akumulatorach, jest w głównych zarysach następujący:

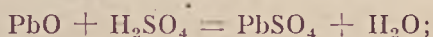
I. przy *wyładowywaniu* na płycie ujemnej



tworzy się zatem siarczan ołowiu i wyzwala się wodór, który wchodzi w grę przy płycie dodatniej według schematu

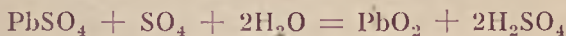


i dalej

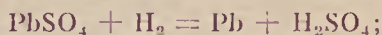


przy *wyładowywaniu* więc akumulatora tworzy się na obu jego płytach siarczan ołowiu ($PbSO_4$), a jednocześnie powstaje woda — roztwór kwasu siarkowego staje się mniej stężony;

II. przy *ładowaniu*, t. j. podczas zachodzącej wtedy elektrolizy, proces chemiczny na płycie dodatniej wyraża się wzorem



na płycie zaś ujemnej



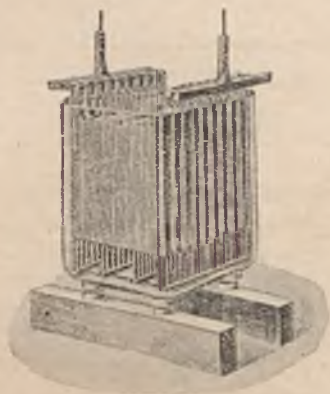
przy ładowaniu więc akumulatora płyta jego dodatnia utlenia się — tworzy się na niej dwutlenek ołowiu (PbO_2), na płycie zaś ujemnej otrzymuje się czysty ołów (Pb); jednocześnie tworzy się kwas siarkowy t. j. stężenie roztworu wzrasta.

Rys. 751 przedstawia taki akumulator, zawierający kilka płyt dodatnich, złączonych wspólnym prętem, i kilka płyt ujemnych, złą-

*) Nazwa akumulatora pochodzi od łacińskiego *accumulare* = gromadzić, zbierać.

**) Są jeszcze inne.

czonych ze sobą też wspólnym prętem. Płyty te są tak rozmieszczone w naczyniu, że każda ujemna przypada między sąsiednimi płytami dodatnimi. Między płyty wstawione są pręty lub rurki szklane, by zapobiec bezpośrednio ich stykaniu się (dlaczego to stykanie się jest szkodliwe?). Roztwór kwasu siarkowego, w którym płyty są zanurzone, winien mieć przepisaną gęstość ($1.2 \frac{gr}{cm^3}$). Przy umiejętnem posługiwaniu się akumulatorem można go bardzo długo używać. Niema w nim tego zużycia się płyt, które jest konieczne w zwykłych ogniwach; poza tem jego siła elektromotoryczna jest względnie wysoka. Zaraz po naładowaniu wynosi ona 2,7 woltów; przy użyciu jednak prędko spada do 2 woltów, poczem już spadek ten jest bardzo powolny, t. j. akumulator dostarcza niesłabnącego, jak w polaryzującym się ogniwie, prądu. Nie należy dopuszczać, by różnica potencjałów na biegunach akumulatora spadała poniżej 1,8 woltów.



Rys. 751.

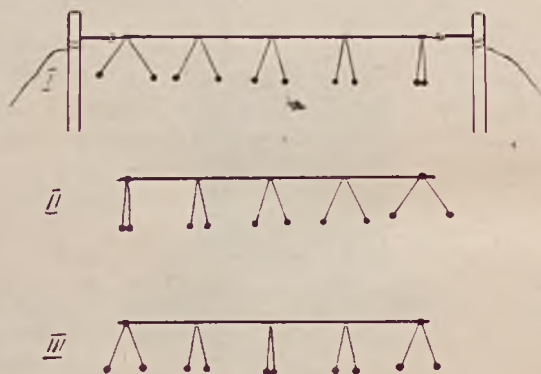
Używając akumulatorów różnych wymiarów, rozróżniamy ich t. zw. *pojemności*. Przez pojemność akumulatora rozumiemy ten nabój elektryczny, którego może on nam dostarczyć od chwili, gdy zaczynamy go używać świeżo po naładowaniu do chwili, gdy jego siła elektromotoryczna spada do 1,8 woltów. Wielkość tego naboju mierzymy nie w kulombach, lecz w t. zw. *amperogodzinach*. Akumulator np. o pojemności 6 amperogodzin dać nam może prąd o natężeniu 1 ampera w ciągu 6 godzin ($1 \text{ amper} \times 6 \text{ godzin} = 6 \text{ amperogodzin}$), albo prąd o natężeniu $\frac{1}{2}$ ampera w ciągu 12 godzin ($\frac{1}{2} \text{ ampera} \times 12 \text{ godzin} = 6 \text{ amperogodzin}$); ściśle mówiąc, pojemność akumulatora jest nieco różna dla różnych natężeń prądu. Łatwo zrozumieć, że skoro prąd 1 ampera dostarcza naboju 1 kulomba w sekundzie, przeto tego natężenia prąd w ciągu godziny daje 3600 kulombów. Pojemność 6 amperogodzin ma taki akumulator, który dostarczyć nam może w okresie jego normalnego funkcjonowania naboju $6 \times 3600 \text{ kulombów} = 21600 \text{ kulombów}$.

Dodać należy, że natężenie prądu, dostarczanego przez akumulator, nie powinno przekraczać pewnej granicznej wartości, jeżeli nie chcemy narazić akumulatora na uszkodzenie. Mianowicie stosunek wartości natężenia prądu do powierzchni płyt akumulatora, czyli t. zw. *gęstość prądu* nie powinna przekraczać 0,5 amperów na 1 cm².

Ćwiczenia i zadania.

477. Jeżeli w doświadczeniu, przedstawionem na rys. 722, biegun maszyny, dostarczającej nabożów elektrycznych, połączony jest z butelką lejdejską, wychylenia listków elektroskopów ulegają znacznie mniejszym zmianom przy zmianach prędkości obrotu maszyny, niż to się dzieje bez butelki. Dlaczego?

478. Na rys. 752 (I, II, III) podane są odmiany doświadczenia przedstawionego na rys. 722 (zamiast drewnianego pręta, mamy sznur). Jakie winny być połączenia



Rys. 752.

z machiną końców sznura, na którym są zawieszona wahadeczka elektryczna, w każdym z 3-ch przypadków, które mamy na rysunku?

479. Prąd określonego natężenia wydziela na katodzie woltamtru srebrowego w ciągu 1 min. 40 sek. 0,112 gr. srebra. Jakie jest natężenie tego prądu? Ile kulombów przepływa tu w całym czasie przez elektrolit?

480. Wodór, wydzielający się w woltamtrze tleno-wodorowym, podlega osuszaniu i zbierany jest nad powierzchnią rtęci (jak to można uczynić?). Po upływie 45 minut zbiera się tego gazu 430 cm³ w temperaturze 15° oraz w ciśnieniu 680 mm. Włączony w obwód ampermetr wykazuje przez cały czas doświadczenia natężenie prądu 1,2 ampera. Czy wskazanie ampermetru wymaga poprawki, ewent. jakiej?

481. Bieguny baterji, złożonej z 200 ogniw Volty, spiętych szeregowo, połączone są z główkami dwu jednakowych elektroskopów listkowych. Jakie są wskazania tych elektroskopów? Jakie będą te wskazania, gdy główki jednego z elektroskopów dotkniemy palcem albo w inny jaki sposób połączymy z ziemią?

482. Jakiego natężenia prąd mógłby wydzielić w woltametrze tlenowodorowym 1 gr. mieszaniny piorunującej w ciągu jednej minuty?

483. Chcemy pozłocić elektrolitycznie przedmiot (np. figurkę) o powierzchni 160 cm², wytwarzając na nim warstwę złota grubości 0,05 mm. Ile czasu trwać będzie złocenie, jeżeli użyjemy do tego prądu o natężeniu 0,2 amperów?

484. Ile się zużywa cynku w baterji, z której bierzemy prąd do woltametrze srebrowego, w tym czasie, gdy się wydziela w woltametrze 4,5 gr. srebra?

485. Baterję lejdejską o pojemności 0,1 MF ładuje się zapomocą maszyny elektrostacyjnej do potencjału 100000 woltów, a następnie wyładowuje się przez woltametr tlenowodorowy. Ile się wytwarza przytem w woltametrze mieszaniny piorunującej?

486. Usiłując dokonać procesu elektrolizy przy pomocy prądu, dostarczanego przez maszynę elektrostacyjną, otrzymujemy w stosunku do czasu trwania doświadczenia bardzo nikłe wyniki. Czego to dowodzi?

487. W woltametrze tleno-wodorowym typu, przedstawionego na rys. 732, wydziela się w ciągu 2 minut 50 cm³ mieszaniny piorunującej. Słup cieczy w rurce wznosi się na 20 cm powyżej poziomu jej w naczyniu. Wysokość słupa barometrycznego = 752 mm; temperatura = 16° C; gęstość roztworu kwasu siarkowego $1,1 \frac{gr}{cm^3}$ prężność pary nad cieczą w woltametrze 14 mm. Jakiego natężenia prąd przechodzi przez woltametr? Dać odpowiedź właściwą, uwzględniając przypadek, gdy natężenie prądu żadnym wahaniami nie ulega, oraz przypadek, gdy zmiany w natężeniu zachodzą.

488. Chcemy naładować baterję, składającą się z 10 połączonych w szereg akumulatorów, z których pojemność każdego wynosi 20 amperogodzin (zakłada się, że baterja jest całkowicie — w granicach dopuszczalnych — wyładowana). Jaka siła elektromotoryczną winno mieć źródło prądu? Ile czasu ładować będziemy, używając do ładowania prądu 1,5 ampera?

489. Czy czas ładowania w poprzednim zadaniu zależy od liczby akumulatorów, tworzących baterję, jeśli założymy tę samą wartość natężenia prądu ładującego oraz dostateczną za każdym razem wartość siły elektromotorycznej źródła?

490. Czy natężenie prądu takie, jak w zadaniu poprzednim, byłoby wskazane do ładowania baterji z tyluż i takich samych akumulatorów, spiętych równolegle?

ROZDZIAŁ V.

MAGNESY. POLE MAGNETYCZNE.

317. Magnesy naturalne i sztuczne.

Pewien gatunek rudy żelaznej posiada tę właściwość, że jego poszczególne okazy przyciągają żelazo (gwoździe, opiłki). Każdy taki okaz nazywamy *magnezem naturalnym*. Gdy zanurzamy go w opiłki żelazne, przylegają doń, ale nie wszędzie jednakowo (rys. 753); widoczne są na nim miejsca silniejszego działania i inne, tak zw. obojętne.



Rys. 753.



Rys. 754.

Gdy magnes naturalny zawieszamy na nitce nieskręconej (rys. 754), zwraca się on zawsze temi właśnie czynnymi miejscami w dwie przeciwne strony — jedną mniej więcej na północ, drugą w przybliżeniu na południe.

Niektóre próbki tego gatunku rudy nie wykazują wspomnianych właściwości, ale nabierają ich wówczas, gdy je pocieramy miejscami czynnymi magnesu naturalnego. Przez także pocieranie udzielać możemy tych własności kawałkom hartowanej stali. Tworzymy w ten sposób t. zw. *magnes sztuczny* *). Pręt stalowy, będący magnesem sztucznym, zanurzony w opiłkach żelaznych, daje po wyjęciu z nich obraz taki, jak na rys. 755, wykazujący, że działanie przyciągające występuje tu na końcach pręta i że te miejsca czynne przedzielone są *pasem obo-*

*) Niedługo dowiemy się o innych sposobach sporządzania magnesów sztucznych.

jętym. Taki sztuczny magnes, umieszczony w strzemiączku, wiszącym na nitce nieskręconej (przedstawia to właśnie rys. 755), zwraca się jednym końcem mniej więcej na północ, drugim na południe.

Mówimy tedy, że każdy magnes posiada dwa *bieguny*; z tych jednym zwraca się na północ i ten nazywamy *biegunem północnym*, drugim — na południe i ten nazywamy — *biegunem południowym*. To zwracanie się na północ i na południe magnesów naturalnych lub sztucznych, zarówno jak samą nazwę „biegunów“ zaznaczamy tymczasem ogólnikowo, niewiadomo bowiem narazie, co określa taki czy inny zwrot magnesu; pozostawiamy to jednak na później.

Te wiadomości elementarne o magnesach były już w posiadaniu starożytnych Greków i Rzymian, a jeszcze wcześniej Chińczyków i Japończyków. W Chinach też bodaj najdawniej wyzyskano magnesy dla orientacji w podróżach na olbrzymich obszarach lądu. Rys. 756 przed-



Rys. 755.



Rys. 756.

stawia starożytną figurkę chińską, osadzoną na pionowej ośce i zawierającą magnes w wyciągniętym przed siebie ramieniu — w ten sposób figurka wskazuje ręką na południe (ten kierunek więcej interesował Chińczyków niż kierunek północny).

Później zaczęto się posługiwać wskazaniem magnesu przy podróżach morskich i stopniowo doskonalono budowę nieodzownej w tych podróżach busoli (kompasu). Rys. 757 przedstawia bardzo prymitywną busolę: na deseczce, umieszczonej na wodzie, spoczywa magnes naturalny; deseczka wobec małego tarcia posiada znaczną swobodę ruchów i dokonywa obrotu dopóty, dopóki magnes biegunami swemi, które tu są zaznaczone gwiazdkami, nie zwróci się we właściwe strony. Podkreślamy, że przytem daje się zauważyć jedynie ruch obrotowy deseczki, na której spoczywa magnes, natomiast niema tu takiego działania, któreby wywoływało ruch postępowy magnesu w tym czy innym kierunku.

Bardzo często są używane magnesy stalowe w postaci t. zw. *igielek magnesowych* (rys. 758). Igielka taka jest cienką płytką kształtu bardzo wydłużonego rombu; w środku jest ona zaopatrzona w małe n.

parstek, wyłożony szkłem lub jeszcze lepiej agatem; tem miejscem igła wspiera się na ostrzu stalowem, na którym wobec bardzo małego tarcia może się swobodnie obracać.



Rys. 757.



Rys. 758.

Mimo że początek znajomości zjawisk magnetycznych sięga tak dawnych czasów, właściwą naukę o magnetyzmie zapoczątkował wspomniany już przez nas badacz angielski W. Gilbert w swem znakomitem dziele, cytowanem na str. 26.

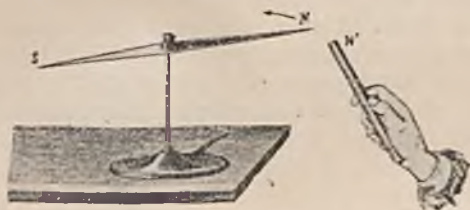
318. Działanie wzajemne biegunów magnetycznych.

Zawieśmy magnes w postaci pręta, tak jak to przedstawia rys. 755, na nieskręconem włóknie lub nitce, dość mocnej, by mogła dany ciężar utrzymać. Nitka lub włókno winny być nieskręcone, gdyż w razie przeciwnym nie pozwalałyby magnesowi swobodnie się ustawić we właściwym kierunku; rozkręcamy je w ten sposób, iż na strzemiączku umieszczamy najpierw pręt, nie posiadający własności magnetycznych, np. mosiężny lub miedziany o takiej samej masie, a więc o takim samym w danem miejscu ciężarze, co magnes, który potem ma być zawieszony. O ile nitka jest skręcona, zawieszony pręt obraca się pod działaniem sił sprężystych; po szeregu obrotów a następnie wahań w płaszczyźnie poziomej pręt ten wreszcie przestaje się kręcić i pozostaje w określonym położeniu. Mamy wtedy nitkę rozkręconą.

A więc zawieśmy dany magnes i zauważmy, względnie sprawdzmy, który z jego końców jest północny, który zaś południowy. Wtedy zbliżajmy pokolei to jeden, to drugi koniec tego magnesu do końców osadzonej na ostrzu igielki magnesowej, które uprzednio również poznaliśmy, zaznaczając, gdzie mieści się tam biegun północny (N), a gdzie południowy (S) *). Stwierdzamy wtedy (rys. 759), że biegun północny jednego magnesu odpycha biegun północny, przyciąga zaś biegun południowy drugiego; natomiast biegun południowy pierwszego magnesu

*) Północ = *North* po angielsku, *Nord* po francusku; stąd litera N. Południe = *South* po angielsku, *Sud* po francusku; stąd litera S.

przyciąga biegun północny drugiego, odpycha zaś jego biegun południowy. Można wziąć dwa jednakowe magnesy w postaci prętów i, zawieszając to jeden, to drugi na strzemiączku, jak dawniej to czyniliśmy z prętami naelektryzowanymi (rys. 627, 628, 629), zbliżać do każdego końca magnesu zawieszzonego to jeden, to drugi koniec drugiego magnesu. Przez szereg takich badań działania wzajemnego biegunów magnetycz-



Rys. 759.

nych ustaliśmy fakt analogiczny do tego, który ustaliliśmy w dziedzinie zjawisk elektrycznych, a mianowicie, że *bieguny jednoimienne odpychają się, natomiast różnoimienne przyciągają się.*

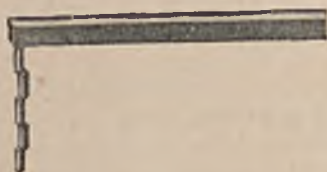
319. Magnesowanie indukcyjne.

Weźmy kilka niewielkich gwoździ żelaznych i przekonajmy się, że żaden z nich drugiego nie przyciąga, co świadczy, że nie są one magnesami. Przytknijmy jeden z tych gwoździ do któregośkolwiek końca namagnesowanego pręta stalowego. Gwóźdź zawisnie, uczepony do magnesu. Gdy teraz zbliżymy do tego gwoździa drugi gwóźdź, uczepią się one jeden drugiego, jakgdyby ten pierwszy był magnesem. Do drugiego gwoździa można przyczepić trzeci i t. d. Utworzy się jakgdyby grono z tych przyczepionych do magnesu gwoździ. Na rys. 760 mamy takie doświadczenie z tą różnicą, że zamiast gwoździ użyte są lepiej do tego nadające się walce z miękkiego, wyżarzzonego żelaza.

Teraz, ujmując w palec pierwszy walec (gwóźdź), przytykający do magnesu, ostrożnie, możliwie bez wstrząśnień, odrywamy od niego magnes. W tej chwili wszystkie niżej uczeponie do pierwszego walca (gwoździe) odpadają, a gdy znowu dokonamy próby, czy jeden z nich przyciąga drugi, przekonamy się, że żaden z nich nie zdradza wyraźnych przed chwilą własności magnetycznych. Niewątpliwie zatem pod działaniem magnesu walce (gwoździe) stały się przemijająco magnesami. Gdy działanie to ustało, wzbudzone własności magnetyczne znikły. Powiadamy, żeśmy tu *magnesowali indukcyjnie* żelazne walce czy też gwoździe.

Ażeby namagnesować indukcyjnie żelazo, nie trzeba go koniecz-
nie przytykać do magnesu. Na rys. 761 mamy wyobrażone doświadczenie

następujące. Zaciskamy w statywie drewnianym*) pręt z miękkiego żelaza w pozycji pionowej. Zbliżając od dołu opilki żelazne, trzymane czy to na dłoni, czy w jakimkolwiek naczynku otwartym, i dotykając niemi końca pręta, przekonywamy się, że opilki wcale do pręta się nie przyczepiają, czyli że nie jest on magnesem. Wtedy do górnego końca pręta zbliżamy którykolwiek koniec umocowanego w innym statywie magnesu (na rys. 761 widzimy tylko jeden koniec tego magnesu) — nie dotykamy jednak magnesem pręta. Powtarzamy teraz próbę z opilkami. Okazuje się, że teraz przyczepiają się one do pręta tak, jak do magnesu, tworząc coś w rodzaju pędzelka. Zbliżając igłę magnesową na ostrzu do końca magnesu oraz końców pręta, przekonywamy się ze znanych już nam oddziaływań między biegunami, że pręt żelazny



Rys. 760.



Rys. 761.

stał się magnesem, którego biegun, bliżej położony bieguna magnesu, jest w stosunku do ostatniego różnoimiennym (w przedstawionym na rys. przypadku jest to biegun południowy, gdyż zbliżyliśmy biegun północny magnesu do pręta), natomiast biegun dalej położony (dolny) jest względem czynnego w tym razie bieguna magnesu jednoimienny (północny). Wreszcie usuwamy magnes z ponad pręta. W tej chwili opilki odpadają od pręta; widoczne jest, iż teraz pręt traci nabyte przed chwilą własności magnetyczne.

Zatem przez zbliżenie magnesu do pręta żelaznego magnesujemy go *indukcyjnie*, przytem tak, że w części pręta, przypadającej bliżej magnesu, powstaje biegun — możemy się tak wyrazić — znaku przeciwnego, w części dolnej — znaku tego samego. Przypomina nam to elektryzo-

*) Żelazny statyw nie jest wskazany, gdyż, magnesując się sam indukcyjnie, komplikowałby niepotrzebnie przebieg zjawiska.

wanie indukcyjne; nie należy jednak wyciągać dalszych pośpiesznych wniosków co do podobieństwa lub różnicy obu tych zjawisk.

Powtarzając to samo doświadczenie z prętem stalowym zamiast żelaznego, stwierdzamy, że i on się magnesuje indukcyjnie, tylko nie odrazu jak żelazny, lecz stopniowo — im dłużej nad nim trzymamy magnes, tem silniejsze objawia się działanie pręta na opiłki, przyczem wzrost ten zachodzi tylko do pewnej granicy. Po usunięciu magnesu w pręcie stalowym pozostają nadal wyraźne ślady magnetyzmu — opiłki przyczepione nie odpadają wszystkie tak jak od żelaznego.

Łatwo stąd wnioskujemy, że tworzenie się całych gron opiłek lub gwoździ na magnesie, gdy go zanurzamy w pudełku z opiłkami żelaznymi lub gwoździami, poprzedzane jest tem właśnie magnesowaniem indukcyjnem. Każda z tych bryłek żelaza staje się magnesem, zwróconym do bieguna magnesu swoim biegunem przeciwnego znaku; w stosunku do siebie są te małe, czasowe magnesy zwrócone swemi biegunami różnoimiennymi. Stąd obserwowane przyciąganie ich do magnesu, a także jednych do drugich.

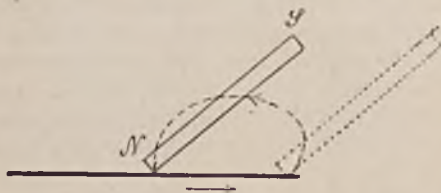


Rys. 762.

Zróbmy jeszcze doświadczenie następujące, używając do tego dwu możliwie jednakowych magnesów kształtu prętów. Nie wdając się narazie w bliższe dochodzenie, rozumiemy, że jeżeli np. każdy z tych prętów z tej samej odległości wywołuje takie samo wychylenie igielki magnesowej, osadzonej na ostrzu, t. j. jeżeli każdy z tych prętów w tych samych warunkach wywiera działanie jednakowe, to można mówić ogólnie, że te magnesy są jednakowe. A więc (rys. 762) pozwalamy kawałkowi żelaza przyczepić się do końca jednego z tych magnesów, kładąc zaś drugi magnes, zwrócony biegunami w przeciwne strony, na pierwszy, posuwamy go wzdłuż tego pierwszego jak to pokazuje rysunek, by biegun N drugiego magnesu nasunął się na biegun S magnesu pierwszego (może być, oczywiście, i odwrotnie). Wtedy uciepiony kawałek żelaza odpada. Czytelnik odpowie sam niewątpliwie na pytanie, dlaczego tak się dzieje. Mamy tu przykład znoszenia działania jednego z biegunów magnesu działaniem bieguna innego znaku. A więc można dla zaznaczenia tego jakgdyby przeciwieństwa, zamiast nazywać bieguny północnym i południowym, oznaczać je mianem dodatniego i ujemnego. Tak się też istotnie czyni, przyczem znak + przypisuje się biegunowi północnemu.

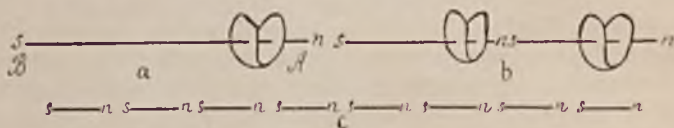
320. Niemożność otrzymania magnesu o jednym tylko biegunie.

Weźmy cienki drut stalowy (taki, jakich się używa do różnych robot ręcznych) i namagnesujmy go przez pocieranie posiadany już magnesem w sposób następujący. Trzymając drut w jego miejscu środkowym w dwu palcach lewej ręki, przesuwać po drucie jednym końcem (np. N) magnesu, trzymanego w prawej ręce, przyczem rozpoczynamy posuwanie od środka drutu ku jednemu jego końcowi. Po dojściu do końca drutu oddalmy magnes od igły, zakreślając pocierającą



Rys. 763.

cym końcem magnesu w powietrzu linję krzywą tak, by znowu dotknąć środka drutu i znowu przesunąć, jak poprzednio, tym samym końcem magnesu w tym samym kierunku do końca igły. Rys. 763 wyjaśnia tę czynność schematycznie. Powtórzywszy ją jakie 10 razy z rzędu, drugim końcem magnesu pocieramy tak samo i tyleż razy z rzędu drugą połowę igły. Igła magnesuje się tak, że ten jej koniec, który był pocierany biegunem N magnesu, staje się biegunem południowym, ten zaś, który był pocierany biegunem S magnesu — biegunem północnym. Jest to w zgodzie z poznaniem już przez nas działaniem indukcyjnym magnesu na żelazo lub stal. Dodajmy, że są też inne sposoby magnesowania przez pocieranie, ale omawiać ich nie mamy potrzeby.



Rys. 764.

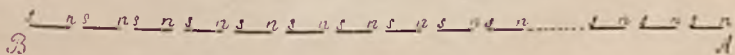
Możemy odróżnić bieguny sporządzonej w ten sposób igły magnetycznej przez zbliżanie jej końców do igielki magnetycznej, opartej na ostrzu (rys. 758 i 759). Zaznaczamy przytem przez nadziany na igłę skrawek papieru ten jej koniec, gdzie przypada biegun północny (rys. 764a). Przetnijmy teraz igłę w jej środku ostrzami cęgami i zbadaćmy za pomocą tejże igielki na ostrzu otrzymane w ten sposób dwie krótkie igły (rys. 764b). Jak się okazuje, każda z nich jest magnesem o dwu biegunach, przytem w jednej z nich (prawej) biegun północny pozostał na tym samym końcu, gdzie był poprzednio na całej igle AB,

zaś biegun południowy wytworzył się na drugim końcu. Na drugiej części (lewej) biegun południowy pozostał tam, gdzie był poprzednio, gdy igła jeszcze nie była rozcięta, na drugim zaś końcu powstał biegun północny. Znowu zaznaczamy bieguny północne igieł skrawkami papieru. Przełnijmy dalej jeszcze raz na dwie części (niekoniecznie równe) każdą z tych dwu igieł i zbadajmy każdą z nowych otrzymanych igiełek. Okazuje się, że możemy igłę ciąć na kawałki, otrzymując coraz mniejsze jej skrawki, ale każdy z nich jest zawsze pełnym magnesem o dwu biegunach, przytem zawsze na końcach przecinanego skrawka zachowują się bieguny tych znaków, które już tam były. Jeżeli więc, tnąc igłę AB , układają będziemy kawałki tak jeden obok drugiego, jak one z igły całej powstały, to w stosunku do biegunowości tych skrawków otrzymamy obraz taki, jak na rys. 764c.

Niesposób zatem odciąć lub w inny sposób oddzielić od magnesu jeden z jego biegunów; niesposób jest otrzymać magnesu o jednym tylko biegunie. Nie mając możliwości prowadzenia podziału mechanicznego bez końca, wnioskujeśmy z tego doświadczenia, że gdybyśmy to mogli uczynić, doszlibyśmy wreszcie do oddzielnych cząsteczek stali, wszakże i każda z nich byłaby pełnym magnesem o dwu biegunach. Zupełnie inaczej dzieje się w dziedzinie zjawisk elektrycznych — tam możemy wszak otrzymać przewodnik, posiadający nabój jednego tylko znaku.

321. Wyobrażenie przybliżone o budowie magnesu. Wpływ wstrząśnień i wysokich temperatur na magnesy.

Z tego, czegośmy się ostatnio dowiedzieli, wynika, że budowę magnesów musimy sobie wyobrażać tak, jakgdyby one były utworzone z niezliczonych magnesów elementarnych, magnesów cząsteczkowych. Nie stawiajmy już sobie dalej idących pytań co do samych tych elementów. Załóżmy tylko ich istnienie i wyobraźmy, że, rozporządzając nimi, układamy z nich np. szereg linjowy taki, jak zgruba tu mamy na



Rys. 765.

rys. 765, przyczem wszystkie one zwrócone są w jedną stronę jednakowymi biegunami. Taki szereg magnesów tworzy t. zw. *solenoid*. Pytanie, jak całość taka będzie działała nazewnątrz? W miejscach, gdzie przypadają obok siebie bieguny przeciwnych znaków (n i s), działanie jednego z nich będzie znoszone przez działanie drugiego. Pozostanie więc tylko działanie końcowych biegunów: n na końcu A i s na końcu B . Będziemy mieli w tej całości magnes linjowy długości AB z biegunami, ściśle przypadającymi w punktach końcowych linii AB . Oczywiście tego rodzaju magnes jest jedynie tworem pomyslanym. W jakim-

kolwiek magnesie nieposób jest zaniedbać dwu wymiarów, pozostawiając tylko jeden (długość). To też wyobrażamy sobie rzecz tak, że jakakolwiek bryła, dająca się namagnesować, np. pręt stalowy, składa się z takich właśnie elementarnych magnesów, bezładnie w najrozmaitsze strony skierowanych swemi biegunami. Magnesowanie polega na uporządkowaniu tych kierunków, na zmuszeniu tych magnesów cząsteczkowych do ustawienia się tak, aby zgodnemi co do znaku biegunami zwrócone były ściśle lub przeważnie w jedną stronę. Rzecz



Rys. 766 a.

tę ilustruje następujący model (rys. 766). Na podstawie umocowane są pionowe ostrza, a na każdym z nich osadzony jest niewielki magnes, którego bieguny zaznaczone są różną barwą. Są to niby te elementarne magnesy. Jeżeli rozmieszczone są one bezładnie tak, jak na rys. 766b, odpowiada to bryle nienamagnesowanej. Przesuńmy jednak ponad tą bezładną gromadą którykolwiek biegun magnesu w którymkolwiek kierunku (np. od prawej ręki ku lewej, o ile patrzymy na rysunek); jeżeli nie odrazu, to po paru takich przesunięciach magnesy uszykują się tak, jak to mamy na rys. 766a — będzie to odpowiadało bryle namagnesowanej. Modelu tego nie należy brać dosłownie, lecz coś podob-



Rys. 766 b.

nego dzieć się musi przy magnesowaniu. Niekoniecznie temu uszeregowaniu mają ulec wszystkie elementarne magnesy; niekoniecznie też mają się one ułożyć w szeregi prostoliniowe. W doświadczeniu jednak bywa, że, stosując te, czy inne sposoby magnesowania, otrzymujemy taki stan rzeczy, iż przy dalszem magnesowaniu nie możemy już zwiększyć osiągniętych wyników namagnesowania — powiadamy, iż doprowadziliśmy magnesowanie do *nasycenia*.

Należy dalej założyć, że ruchliwość tych elementarnych magnesów i ich podatność do tego czy innego ustławiania się jest niejednakowa

w stali i w żelazie miękkim — podatniejsze są one w żelazie. Gdy na bryłę żelaza działamy magnesem indukcyjnie, staje się ono niemal natychmiast magnesem, podczas gdy w stali, jak już wzmiankowaliśmy, taki stan rzeczy osiąga się stopniowo w dłuższym czasie. Zato, gdy usuniemy ten czynnik porządkujący, w żelazie znowu wraca wszystko do początkowego bezład, podczas gdy w stali namagnesowanie trwa dalej. Wyrażamy to, mówiąc, iż w żelazie magnetyzm pozostały jest nikły, w stali — znaczny; stal posiada specjalną zdolność zatrzymywania wywołanego w niej namagnesowania. Co może być powodem zakłóceń w osiągnięciu uporządkowaniu cząsteczek, gdy znika czynnik porządkujący? Niewątpliwie przede wszystkim ten ruch cząsteczkowy, którego stroną ilościową wiąże się ze zmianami temperatury. To też można przypuszczać, że zmiany temperatury magnesu powinny wpływać na ilościową stronę jego własności. Tak też jest istotnie. Gdy np. po namagnesowaniu igły tak, jak to podaliśmy na początku ust. 320, i sprawdzeniu, że istotnie stała się ona magnesem, rozżarzemy ją do białości w płomieniu palnika gazowego, przekonamy się, że traci ona przytem całkowicie nabyte przed chwilą własności magnetyczne. Przy wahaniach temperatury w niewielkich granicach zachodzą również zmiany, o których będziemy jeszcze potem mówili. O ile te zmiany następują w krótkim czasie po sobie, własności magnesu w ich stronie ilościowej stają się jednakowymi w jednakowych temperaturach.

Godzi się również z takim właśnie zapatrywaniem na budowę magnesów fakt, że wstrząśnienia mechaniczne mają również wpływ na magnesy. Gdy chcemy namagnesować kawałek stali, wstrząśnienia sprzyjają temu i stal magnesuje się prędzej. Natomiast, gdy gotowy już magnes poddajemy wstrząśnieniom, gdy np. wypada z ręki na podłogę, własności jego magnetyczne słabną. Namagnesujemy np. igłę stalową, jak wyżej, i zauważmy, jaką ilość opiłków żelaznych unosi ona, gdy zanurzamy jej koniec w tych opiłkach. Następnie, trzymając ją za jeden koniec, uderzmy nią mocno szereg razy po stole i dokonajmy znowu próby z opiłkami. Działanie magnesu okazuje się teraz bardziej nikłe, jakgdybyśmy wytrzęśli częściowo z igły nabyty przez nią magnetyzm.

Z ostatniego doświadczenia wypływa poważna wskazówka, iż z magnesami należy obchodzić się ostrożnie, chroniąc je od wstrząśnień. Nie znaczy to jednak, iż procesów, samorzutnie zachodzących w strukturze magnesu, da się uniknąć. Jakkolwiek dokładnie byłby magnes przechowywany, zawsze on z biegiem czasu traci stopniowo swe własności magnetyczne.

Spójrzmy teraz na rzecz z innej jeszcze strony. Możemy uważać, że każde działanie, które osiągnąć możemy przy pomocy jakiegokolwiek magnesu, jest właściwie wypadkiem działania niezliczonego mnóstwa elementarnych magnesów, z których on się składa. Należy to mieć na uwadze, pragnąc ściślej określić pojęcie biegunów magnesu, jako pewnych charakterystycznych punktów, odpowiadających znaczeniu, jakie te punkty mają w przypadku magnesu linowego (rys. 765). Sprawę tę stopniowo opanujemy, tymczasem odwołajmy się do porów-

nania. Każdy magnes zastąpić można w rozważaniu przez teoretyczny magnes linjowy, składający się z dwu biegunów magnetycznych (jako punktów), przypadających w pewnej od siebie odległości. Możemy sobie wyobrazić, że te punkty przypadają gdzieś w bryle magnesu — jeden w pobliżu jednego końca magnesu, drugi w pobliżu drugiego. Podobnie w przypadku działań grawitacyjnych rozważmy nieraz zamiast całego ciała jeden punkt charakterystyczny, t. zw. środek masy lub środek ciężkości. Analogiczne jest znaczenie biegunów magnetycznych. Mając dostateczne przygotowanie, możemy wyznaczyć miejsca tych punktów na magnesie, jak umiemy wyznaczać położenie środka ciężkości. Nie mówiąc o tem, jak się to robi, możemy wskazać, że np. w przypadku bardzo cienkiej igły magnesowej, praktycznie rzecz biorąc, możemy przyjmować, że bieguny przypadają na samych jej końcach. Natomiast w magnesach kształtu prętów, jakie zazwyczaj są używane, mieszczą się one w odległości ok. $\frac{1}{12}$ długości całego pręta od każdego jego końca. Na zakończenie jeszcze jedna uwaga. Ten obraz struktury magnesów, który przed chwilą nakreśliliśmy, to szeregowanie się przy magnesowaniu cząsteczek, obdarzonych biegunowością, nie może nam nie przypomnieć obrazu, dotyczącego dielektryków przy ich polaryzowaniu się — tam mówiliśmy wszak również o szeregowaniu się cząsteczek spolaryzowanych, a więc obdarzonych biegunowością, zwróconych końcami dodatnimi w jedną, ujemnymi — w przeciwną stronę. To też opisany proces magnesowania się możemy ujmować i istotnie ujmujemy nazwą *polaryzacji magnetycznej*.

322. Prawo Coulomba. Jednostka masy magnetycznej.

Gdy kilka magnesów zbliżamy pokolei któremikolwiek biegunami do igielki magnesowej, obracającej się swobodnie na ostrzu, stwierdzamy, że z tej samej odległości wywołują one różne naogół wychylenia. Jeżeli zaś jednym i tym samym biegunem usiłujemy wywołać odchylenie tej igielki od jej zwykłego, że tak powiemy, położenia, w którym skierowana jest mniej więcej z północy na południe, przekonywamy się, że działanie zależy od odległości: zbliższe działanie to jest silniejsze, niż zdaleka.

Jakkolwiek jest budowa wewnętrzna magnesu, możemy dla obrazowego ujęcia sprawy, chcąc rozróżnić poszczególne bieguny magnetyczne pod względem działania ich na inne bieguny, mówić, że posiadają one różne *masy magnetyczne* albo *naboje magnetyczne*. Rzecz prosta, wprowadzając ten termin i mówiąc np., że masa magnetyczna jednego bieguna jest n razy większa od masy magnetycznej bieguna innego, nie możemy tego rozumieć inaczej, jak że pierwszy biegun w porównaniu z drugim wywiera w tych samych warunkach działanie n razy większe, np. przyciąga lub odpycha jakiś trzeci biegun siłą n razy większą, niż drugi. W tym razie więc rozumiemy zupełnie tak samo, jak rozumowaliśmy przy rozważaniu ilościowym nabojuw elektrycznych. Jeżeli, z drugiej strony, chodzi o ustalenie zależności działania jed-

nej i tej samej masy magnetycznej na inną z różnych odległości. musimy się oprzeć na danych doświadczenia.

Coulomb rozwiązywał to zagadnienie w taki sam sposób, jak w stosunku do nabołów elektrycznych, t. j. przy pomocy swojej wagi skręceń. Rys. 767 wyobraża właśnie tę wagę w przypadku pomiarów magnetycznych.

Widzimy tu zawieszony na włóknie rozkręconem magnes; przez otwór w przykrywie wstawiony jest inny magnes. Zmieniając odległości między zbliżonemi do siebie biegunami i równoważąc ich wzajemne działanie przy pomocy skręcenia włókna, ustalamy szukaną zależność (porów. ust. 278, gdzie mowa o takich samych pomiarach w stosunku do działania wzajemnego nabołów elektrycznych).



Rys. 767.

Z pomiarów takich Coulomb wywnioskował, że podobnie jak w przypadku działań elektrostatycznych *siły, działające między biegunami magnetycznemi, są odwrotnie proporcjonalne względem kwadratów ich odległości.*

Ostatecznie więc wartość siły, działającej między dwiema masami magnetycznemi m_1 i m_2 , przypadającemi w punktach, które się mieszczą w odległości r jeden od drugiego, przedstawić możemy przy pomocy wzoru, analogicznego do wzoru (1) na str. 13, a mianowicie

$$f = \pm k \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \dots \dots \dots (1)$$

gdzie k jest współczynnikiem proporcjonalności, zależnym od wyboru jednostki, której używać będziemy do mierzenia mas magnetycznych. Znak *plus* odpowiada tu działaniu wzajemnemu mas jednoimiennych, a więc odpychaniu, znak *minus* — działaniu mas różnoimiennych, czyli przyciąganiu.

Umówmy się uważać za równą jedności taką masę magnetyczną, która na taką samą masę, umieszczoną w odległości jednego centymetra, działa siłą jednej dyny.

W takim razie wzór (1) przekształca się liczbowo w następujący:

$$1 = k \frac{1 \cdot 1}{1} \dots \dots \dots (2)$$

t. j. przy takim obiorze jednostki masy magnetycznej $k = 1$ i wzór (1) staje się prostszy:

$$f = \pm \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \dots \dots \dots (3)$$

Przy ustalaniu tej podstawowej zależności, która stanowi t. zw. prawo Coulomba, zauważyć musimy, że, podobnie jak w dziedzinie elektrostatyki, tak tu, w dziedzinie magnetostatyki, pomiarów z wagą skręceń, ani innych podobnych, z których miałyby bezpośrednio wpływać taka mianowicie zależność od odległości biegunów magnetycznych, nie można uważać za ściśle uzasadnienie tego prawa. Pomiaru z wagą skręceń podsuwały raczej myśl o takiej, a nie innej zależności; zbyt poważne jednak są nieuniknione przy podobnych pomiarach błędy doświadczenia, aby można było osiągnąć pożądaną ścisłość. Z drugiej strony, z prawa Coulomba wypływa takie mnóstwo wniosków, znakomicie poddających się bardzo ścisłej kontroli i potwierdzających się w doświadczeniu, że właśnie tą pośrednią drogą ustala się niezbytnie słuszność prawa Coulomba.

Jaki więc jest wymiar jednostki masy magnetycznej?

Według określenia, zgodnie ze wzorem (3), mamy

$$1 \text{ dyna} = \frac{(\text{jedn. masy magn.}) (\text{jedn. masy magn.})}{1 \text{ cm}^2}$$

czyli

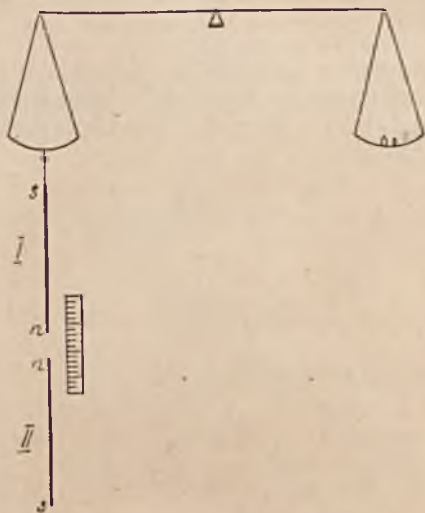
$$1 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{sek}^2} = \frac{(\text{jedn. masy magn.})^2}{1 \text{ cm}^2},$$

skąd

$$\text{jednostka masy magn.} = 1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}} \dots \dots \dots (4)$$

Wymiar ten zatem jest identyczny z wymiarem jednostki elektrostatycznej naboju elektrycznego. Może to wywołać pewne zakłopotanie czytelnika — czyżby masy elektryczne i masy magnetyczne były jednym i tem samym, że mierzą się w tych samych jednostkach? Bynajmniej. Rzecz ta wyjaśni się całkowicie z biegiem czasu; narazie powiemy tylko tyle, że zjawiska elektryczne i magnetyczne wiążą się tak ściśle ze sobą, że tworzą naprawdę jedną dziedzinę zjawisk. Wszel-

kie wielkości i odpowiadające im jednostki, które tu spotykamy, tworzą spoiłą całość, wiążącą się w logiczny łańcuch. Za początek wszakże tego łańcucha obrać można tę, czy inną wielkość lub tę, czy inną jednostkę. Otóż, poznaliśmy dotychczas część łańcucha, rozpoczynającego się od elektrostatycznej jednostki naboju elektrycznego i stanowiącego t. zw. układ elektrostatyczny jednostek. Z biegiem wykładu poznamy inny układ jednostek, t. zw. *elektromagnetyczny*. W tym układzie elektromagnetycznym punktem wyjścia jest właśnie określona przed chwilą jednostka masy magnetycznej. Jak zobaczymy, masę magnetyczną można też wyrazić w jednostkach elektrostatycznych, ale wtedy wymiar jej będzie inny, niż wyrażony wzorem (4). Podobnie naboje elektryczne mierzą się w układzie elektromagnetycznym w jednostkach



Rys. 768.

innego wymiaru, niż ten, któregośmy dotychczas używali. Wszystko to ułoży nam się w wyraźną całość stopniowo; do czasu musimy być cierpliwi.

Zobaczmy teraz, jak można byłoby w prosty względnie sposób wyznaczyć w poszczególnym przypadku wartość masy magnetycznej. Jak była już o tem mowa, w bardzo cienkich igłach magnesowych bieguny przypadają, praktycznie rzecz biorąc, na samych końcach igieł. Weźmy więc dwie zupełnie jednakowe długie, cienkie igły stalowe (*I* i *II*), złożmy je razem, by przylegały do siebie na całej długości i namagnesujsmy je obie razem przez pocieranie tak, jak to już było wyjaśnione. Możemy wtedy przyjąć z dostatecznem przybliżeniem, że otrzymujemy w ten sposób dwa jednakowe magnesy linjowe z biegunami, mieszczącymi się na samych końcach. Masy magnetyczne biegunów północnych

tych magnesów muszą być jednakowe, zarówno jak masy ich biegunów południowych. Zawieśmy jedną z tych igieł (*I*) u spodu szalki wagi (rys. 768) (porów. rys. 637 na str. 14), i zrównoważmy odważnikami. Przypuśćmy, że ku dołowi skierowany jest biegun północny tej igły. Następnie zbliżmy do tego bieguna północny biegun drugiego magnesu (*II*) tak, jak to widzimy na rysunku. Dzięki zachodzącemu odpychaniu się jednoimiennych biegunów równowaga wagi będzie zakłócona, dla doprowadzenia zaś belki wagi do jej pierwotnego położenia trzeba będzie na tej szalce, u której spodu zawieszony jest magnes, położyć odpowiedni odważnik, albo ująć nieco odważników z szalki drugiej. Przypuśćmy, że m jest masą tych odważników dodanych, względnie odjętych; wówczas ciężar ich mg jest siłą, równoważącą działanie pomiędzy biegunami. Z drugiej strony, wartość tego działania wyraża się, zgodnie z prawem Coulomba, wzorem $\frac{x}{r^2}$, gdzie x oznacza niewiadomą masę magnetyczną każdego bieguna, zaś r odległość między biegunami, odczytaną na ustawionej obok, równoległe do magnesów, drewnianej (w żadnym razie żelaznej albo stalowej) szalki. Możemy więc napisać

$$mg = \frac{x^2}{r^2}, \dots \dots \dots (5)$$

skąd znajdujemy

$$x = \sqrt{mgr^2} \dots \dots \dots (6)$$

Weźmy przykład liczbowy: $m = 0,02 \text{ gr}$, $r = 5 \text{ cm}$, $g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$.

Mamy więc

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{0,02 \text{ gr} \cdot 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} \cdot 25 \text{ cm}^2} = \sqrt{490,5 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}^3}{\text{sek}^2}} = \\ &= 22,1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}. \end{aligned}$$

Powtórzmy teraz doświadczenie, odwracając dolny magnes (*II*) biegunem *S* do góry. Między biegunami różnoimiennymi zachodzieć będzie przyciąganie; w celu zrównoważenia go trzeba będzie położyć jakiś dodatkowy odważnik na prawą szalkę (m_1). Teraz jednak masę bieguna *n* magnesu *I* już znamy; oznaczmy ją przez m , nieznaną zaś masę bieguna *s* magnesu *II* oznaczmy przez x . Będziemy mieli

$$m_1 g = \frac{m x^*}{r_1^2} \dots \dots \dots (7)$$

*) Na znaki + i — wzoru Coulomba nie zwracamy tu uwagi, gdyż wzory, zarówno (5) jak (7), dotyczą tylko wartości obserwowanej siły.

Przekonamy się po podstawieniu znalezionych w doświadczeniu liczb, że masa bieguna s magnesu II wyraża się niemal tą samą liczbą, co masa bieguna n (jeżeli r pozostawimy bez zmiany, to okaże się po prostu, że ten sam odważnik m , co poprzednio, równoważy obserwowane działanie). Powtarzając podobne doświadczenie z temi, czy innymi zmianami, np. używając jednej ze zbadanych tu igieł jako wzorca, z którym będziemy porównywali inne jakiegokolwiek igły, zawsze będziemy mieli w wyniku doświadczenia to, że na masy biegunów północnego i południowego wypadają zawsze tak bliskie liczby, iż różnice można uważać za uwarunkowane nieuniknionymi błędami doświadczalnymi, a zatem przyjmować można, że masy magnetyczne obu biegunów każdego magnesu, różne co do znaków, są równe co do wielkości. Niebawem podamy inny, przytem zupełnie ścisły dowód faktu.

Do powyższego dodać musimy jeszcze uwagę wielkiego znaczenia, a mianowicie, że nie myśleliśmy wcale o tem, czy ośrodek, przedzielający działające na siebie bieguny, ma jaki wpływ na zjawisko, czy też nie. Moglibyśmy się domyślać, że odgrywa on pewną rolę, podobnie jak to stwierdziliśmy w przypadku działań elektrostatycznych. Tak też jest istotnie, jak się niedługo dowiemy. Wzór Coulomba w podanej dotychczas postaci (wzór 4) ścisły jest tylko dla próżni i prawie ścisły dla powietrza. Niżej poznamy bardziej ogólną postać tego wzoru, uwzględniającą własności szczególne tych czy owych ośrodków, w których zachodzą omawiane działania magnetyczne.

323. Pole magnetyczne.

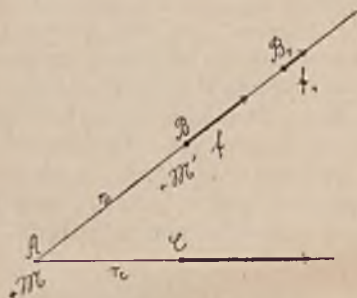
Umieszczony gdziekolwiek w przestrzeni dookoła magnesu inny magnes podlega omówionym przez nas działaniom. Powiadamy, że znajduje się on w polu magnetycznym, wytworzonym przez tamten magnes. Zgodnie z trzecią zasadą Newtona, działanie magnesów jest wzajemne; możemy więc powiedzieć, że pierwszy magnes wytwarza dookoła siebie pole magnetyczne, w którym znajduje się magnes drugi, jak również, że magnes pierwszy znajduje się w polu drugiego, albo wreszcie, że oba się znajdują w polu wypadkowym, wytworzonym przez jeden i drugi. Pojęcie pola nie jest nam obce: przedewszystkiem zetknęliśmy się ze zjawiskami, zachodzącymi w polu grawitacyjnym, niedawno zaś omawialiśmy szczegółowo pole elektrostatyczne. Jesteśmy więc dość przygotowani do tego, by, nie powtarzając wszystkiego od początku, ująć w pewną całość to, co się daje powiedzieć o polu magnetycznym.

Polem elektrostatycznym nazwaliśmy pole elektryczne stałe, t. j. takie, którego poszczególne punkty posiadają niezmiennie własności w czasie, w którym je rozważamy. Podobnie, pole magnetyczne, którego poszczególne punkty zachowują własności stałe, nazywamy polem magnetycznym stałym albo polem magnetycznym.

Jak wiemy, nie jesteśmy w stanie otrzymać oddzielnie bieguna magnetycznego północnego albo południowego — zawsze biegunowi północnemu towarzyszy południowy. Inaczej rzecz się ma w dziedzinie

elektryczności: tam możemy mieć oddzielnie nabój elektryczny dodatni albo ujemny. W rozumowaniach uciekamy się często do pewnych założeń, które je upraszczają, odbiegając nieraz przytem od danych doświadczenia. Nie prowadzi to nas bynajmniej na manowce, gdyż w odpowiedniej chwili przerzucamy most ze świata, przez nas urojonego, do rzeczywistego i znów jesteśmy w zgodzie z doświadczeniem. To też założmy, że jest rzeczą możliwą otrzymanie bieguna oddzielnego północnego, który uważać będziemy za dodatni (+) albo oddzielnego południowego, który uważać będziemy za ujemny (—). Bieguny te pomysłimy sobie jako punkty, w których mieszczą się pewnej wielkości masy magnetyczne.

Przypuścmy więc, że rozpatrujemy pole magnetyczne pojedynczego bieguna o masie magnetycznej $+ m$, mieszczącego się w punkcie A ,



Rys. 769.

przytem w próżni (rys. 769). Badajmy to pole przy pomocy bieguna próbnego $+ m'$, co do którego założymy dla uproszczenia, że obecnością swoją nie zmienia w niczem pola bieguna $+ m$. Na biegun m' , umieszczony w punkcie B , którego odległość od A jest r_B , działa siła

$$f = \frac{m \cdot m'}{r_B^2}, \dots \dots \dots (1)$$

skierowana według prostej AB . O ileby biegun $+ m'$ posiadał zupełną swobodę ruchów, oddalałby się od A według prostej AB , przyczem wielkość działającej nań siły stopniowoby malała.

Podobnie jak w przypadku pola elektrycznego, wprowadzamy i tu pojęcie natężenia pola magnetycznego jako stosunku wartości siły, działającej na masę magnetyczną bieguna próbnego, do wartości tej masy magnetycznej. W danym więc punkcie pola wartość natężenia jest przy uwzględnieniu (1)

$$F = \frac{f}{m'} = \frac{m}{r_B^2} \dots \dots \dots (2)$$

Oczywiście w innym punkcie pola, np. w C, wartość natężenia pola jest inna

$$F_1 = \frac{m}{r_c^2} \dots \dots \dots (3)$$

i t. d.

Mając wartość natężenia pola w jakimkolwiek punkcie, znajdziemy natychmiast wartość siły, działającej na dowolną masę magnetyczną, umieszczoną w tym punkcie, według wzoru, który jest tylko odmianną wzoru (2), a mianowicie

$$f = F \cdot m' \dots \dots \dots (4)$$

Natężenie pola, jak już o tem była mowa w ust. 284, jest wielkością kierunkową; za kierunek natężenia w pewnym punkcie pola przyjmujemy kierunek siły, działającej na biegun próbny dodatni, mieszczący się w tym punkcie. *Natężenie pola w jakimkolwiek punkcie uważamy za jednostkę, jeżeli na biegun o masie magnetycznej równej jednostce, umieszczonej w tym punkcie, działa siła, równa jednej dynie. Określoną w ten sposób jednostkę natężenia pola magnetycznego nazywamy gausem *).*

Zatem zgodnie z (2)

$$1 \text{ gaus} = \frac{1 \text{ dyna}}{1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}} = \frac{1 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{sek}^2}}{1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}} = 1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{sek}} \dots (5)$$

Jeżeli więc na biegun magnetyczny o masie $3 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$, mieszczący się w pewnym punkcie pola magnetycznego, działa siła 15 dyn, to wartość natężenia pola w tym punkcie wynosi

$$F = \frac{15 \text{ dyn}}{3 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}} = \frac{15 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{sek}^2}}{3 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}} = 5 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{sek}} = 5 \text{ gausów.}$$

W jaki sposób w rzeczywistości dokonywa się takich pomiarów, dowiemy się o tem potem na poszczególnych przykładach.

Jak widzimy, wystarcza zmienić słowo „elektryczny“ na „magnetyczny“, a to, cośmy mówili o natężeniu pola elektrycznego, daje się powtórzyć w stosunku do pola magnetycznego. Podobnie rzecz się ma

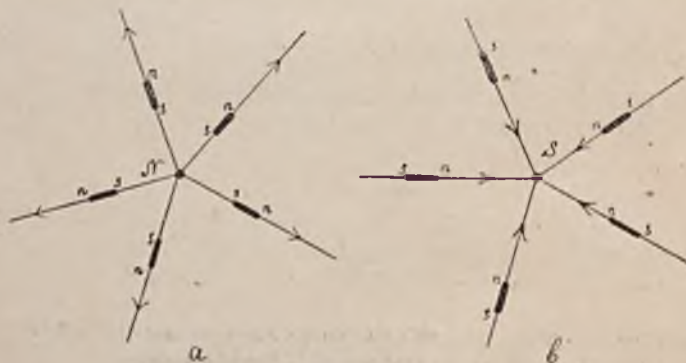
*) Ku uczeniu nazwiska Karola Fryderyka Gaussa (1777—1855), znakomitego fizyka niemieckiego, niezmiernie zasłużonego w pracach, poświęconych magnetyzmowi.

z innymi pojęciami i terminami. A więc *linją pola magnetycznego* nazywać będziemy każdą przebiegającą w tem polu krzywą, która kolejno po sobie następującymi elementami swojemi wskazuje kierunek natężenia pola w tych punktach, gdzie te elementy przypadają. Po linii takiej posuwałby się ewentualnie niczem nie skrepowany w swych ruchach



Rys. 770.

biegun magnetyczny, gdyby się w jakiś sposób znalazł w którymkolwiek punkcie tej linii. Za kierunek linii pola będziemy i tu, jak w polu elektrycznym, uważać kierunek ruchu bieguna próbnego dodatniego. Taką wędrówkę swobodnego bieguna można zrealizować w przybliżeniu doświadczalnie w sposób, uwidoczniiony na rys. 770. U krawędzi naczynia z wodą umieszczony jest magnes NS. Długą igłę magnesową AB osadzamy w korku tak, by mogła pływać, utrzymując się pionowo, przytem, by jej biegun N przypadał cokolwiek wyżej krawędzi naczynia, a więc



Rys. 771.

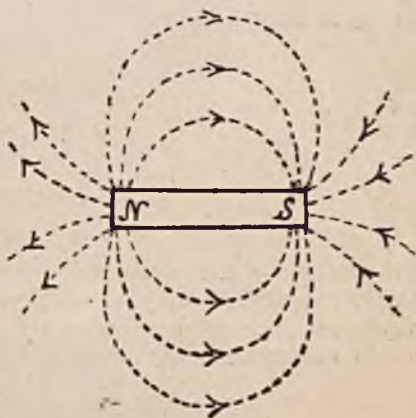
na wysokości tej samej, co bieguny magnesu NS. Zbliżamy ręką magnesu AB do magnesu NS, by jego biegun N przypadł tuż przy biegunie N magnesu NS, i puszczamy; wtedy magnes AB oddala się, przyczem jego biegun N zakreśla zaznaczoną kreskami krzywą w kierunku strzałki, dążąc do bieguna S magnesu NS. Oczywiście, nie do uniknięcia jest

oddziaływanie wzajemne obu biegunów magnesu NS na biegun S magnesu AB , jednak wobec znacznie większej odległości bieguna S droga bieguna N jest w przybliżeniu drogą jakgdyby swobodnego bieguna, kreślącego linię pola.

W przypadku pola, wytworzonego przez pojedynczy biegun dodatni, linie pola tworzyłyby pęk rozbieżnych prostych. W którejkolwiek płaszczyźnie, poprowadzonej przez biegun, tworzący pole, linie te przedstawiałyby się tak, jak to widzimy na rys. 771a. Pytanie, jakby się zachowała swobodnie zawieszona igielka magnesowa, gdyby się znalazła np. w którymkolwiek punkcie tego pola? Jej biegun północny miałby tendencję poruszania się po jednej z linii pola w kierunku, zaznaczonym strzałką; przeciwnie jej biegun południowy poruszałby się, gdyby mógł, po tej samej linii, tylko w kierunku wręcz przeciwnym



Rys. 772.



Rys. 773.

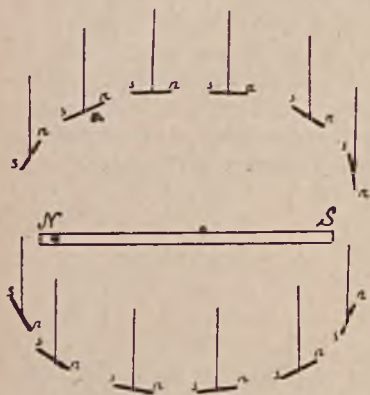
ku N . Zatem igielka zajęłaby położenie, wskazane na rys., t. j. ustawiłaby się swoją *osią* (nazywamy tak prostą, która łączy bieguny igielki) według tej czy innej linii pola. W przypadku pola, wytworzonego przez pojedynczy biegun południowy, położenia igielki byłyby w poszczególnych punktach pola takie, jak na rys. 771b.

Weźmy długi na kilkadziesiąt cm namagnesowany pręt stalowy, ustawmy go pionowo, na górnym zaś jego końcu umieścimy poziomo tekturkę, posypaną opiłkami żelaznymi. Potrzásając zlekka palcem tekturkę, zobaczymy, że opiłki układają się w linie, przypominające układ linii pola z rys. 771. Rys. 772 przedstawia właśnie rozmieszczenie opiłków, zaznaczających linie pola w płaszczyźnie tekturki. Umyślnie bierzemy długi cienki magnes, aby, rozpatrując stan rzeczy w pobliżu jednego z jego biegunów, możliwie uniezależnić się od działania drugiego bieguna, a więc w przybliżeniu zrealizować pole pojedynczego bieguna.

W jaki sposób tworzy się przedstawiona na rys. 772 figura? Oto każda okruszyna żelaza magnesuje się w danym polu indukcyjnie i za-

chowuje się jak igielka magnesowa. Igielki, przypadające na jednej którejkolwiek linii pola, układają się przy wstrząsaniu, umożliwiając im pokonanie hamującego ich ruchu tarcia o tekturę, w ten sposób, że osie ich tworzą jednolity ciąg, zgodny z przebiegiem tej linii.

Gdybyśmy mieli pole dwu biegunów magnetycznych różnych znaków, lecz mających równe masy magnetyczne, odpowiadałoby to przy-



Rys. 774.



Rys. 775.

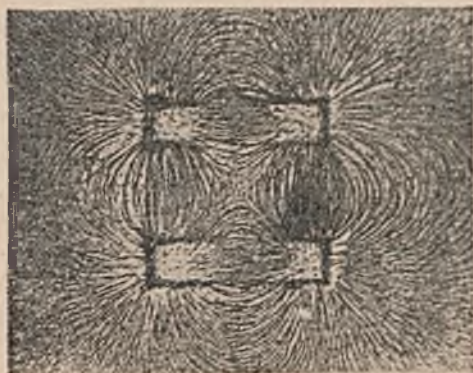
padkowi pola elektrostatycznego, wytworzonego przez dwa naboje elektryczne równe, lecz mające znaki przeciwne (rys. 659 na str. 36). Każdy magnes jest takim zespołem dwu biegunów o znakach przeciwnych; w polu zatem każdego magnesu linje pola winny mieć podobny prze-



Rys. 776.

bieg; wszystkie one, będąc linjami krzywymi, winny kierować się od jednego końca magnesu ku drugiemu (rys. 773). Zbadać to można np. przy pomocy swobodnie zawieszonej w jej środku ciężkości igielki magnesowej, którą obnosić możemy dokoła magnesu i notować w każdym miejscu kierunek jej osi, będącej styczną do linii pola w danym miejscu (rys. 775); odpowiadać to będzie doświadczeniu z elektrostatyki, wyo-

brażonemu na rys. 662 (str. 39). Można również ustawić w pobliżu magnesu małe kompasy tak, jak to widać na rys. 775; igielki kompasów ustawiają się tak, że osiami znaczą kierunki natężenia pola w poszczególnych punktach.



Rys. 777.

Można wreszcie użyć opiłków żelaznych, jak wyżej, i uwidocznić linie pola przy pomocy t. zw. *widma magnetycznego*. Położymy na stole magnes, na nim zaś umieścimy tekturę i posypmy ją opiłkami żelaznymi, uderzając zlekka palcem po tekturze. Opiłki



Rys. 778.

ułożą się tak, jak to widzimy na rys. 776; oczywiście, znaczą tu one jedynie niektóre z tych linii pola, które przypadają w płaszczyźnie tektury, lecz daje to wyobrażenie o całokształcie pola dookoła magnesu. Rys. 777 daje widmo magnetyczne w przypadku dwu magnesów, umieszczonych równolegle i zwróconych biegunami znaków przeciwnych

w różne strony. Natomiast na rys. 778 mamy przypadek pola dwu magnesów równoległych, zwróconych w jedną stronę biegunami zgodnymi. Na pierwszym rysunku (777) widzimy linje pola, łączące różnoimienne zbliżone do siebie bieguny; na drugim linje te odchylają się, jakgdyby unikając się nawzajem. Są to przypadki zupełnie analogiczne do tych, które mieliśmy przy rozważaniu pola elektrostatycznego (porów-rys. 662 i 663 na str. 39).

Na rys. 779 widzimy końce różnoimienne dwu magnesów z przystawionemi do tych końców poprzecznie prętami z żelaza miękkiego, namagnesowanemi indukcyjnie. W polu, utworzonym między temi prętami, w pobliżu granic prętów, linje pola mają kształt krzywy; w części jednak środkowej linje te są proste i przebiegają względem siebie równoległe, prostopadle zaś do powierzchni prętów. Pole magnetyczne o równoległych linjach sił nazywamy, jak wyżej, polem *jednorodnem* (porów. rys. 665 na str. 40).



Rys. 779.

Przypominając sobie to, co mówiliśmy wyżej o polu elektrostatycznym, możemy bez bliższych uzasadnień wypowiedzieć twierdzenie, że *linje pola magnetycznego nie mogą się przecinać*. Możemy dalej tak samo jak tam, wprowadzić pojęcie *rurek pola*, ustalając, iż liczba takich rurek, przypadających na jednostkę powierzchni, gdy rurki te przebiegają prostopadle do tej powierzchni, daje liczbowo natężenie pola w tem miejscu; że zatem w miejscu pola, gdzie takie rurki jednostkowe są bardziej stłoczone, natężenie pola jest większe niż tam, gdzie ich przekroje są większe. Wiąże się z tem również ustalenie, że biegun o magnetycznej masie m jest źródłem $4\pi m$ takich rurek jednostkowych (w próżni).

Następnie możemy o tych rurkach powziąć, jak to uczynił Faraday, podobne wyobrażenie, jak o rurkach pola elektrostatycznego, a mianowicie: przypisać im napięcia podłużne i ciśnienia boczne i w ten sposób uzmysłwić sobie mechanizm zachodzącego przyciągania się biegunów różnoimiennych i odpychania się jednoimiennych.

Dalej związać możemy przez analogiczny wzór (por. str. 48) wartość tych napięć z wartością natężenia pola, jak również wprowadzić

pojęcie gęstości energii w polu magnetycznym i związać ilościową stronę rozmieszczenia w polu tej energii z rozmieszczenia wartości natężenia. Wszystkiego tego teraz powtarzać, ani na nowo uzasadniać nie potrzebujemy.

Podobnie wprowadzamy pojęcie *potencjału magnetycznego*, jak to wyżej uczyniliśmy z potencjałem elektrycznym (por. ust. 288 i 289). Zakładając, że mamy pole, utworzone przez pojedynczy biegun magnetyczny o masie m , napiszemy odrazu, że wartość potencjału w punkcie, którego odległość od bieguna wynosi r , jest (porówn. wzór 8 na str. 51)

$$V_m = \frac{m}{r} \dots \dots \dots (6)$$

Przyjmując na jednostkę masy magnetycznej $1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$, otrzymujemy na jednostkę potencjału magnetycznego w tym układzie jednostek

$$1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} \dots \dots \dots (7)$$

W przypadku ogólnym, gdy pole magnetyczne utworzone jest przez układ wielu biegunów magnetycznych, potencjał w którymkolwiek punkcie pola równa się sumie potencjałów, uwarunkowanych przez poszczególne bieguny.

Powierzchnią stałego potencjału albo powierzchnią *ekwipotencjalną* i tu nazywać będziemy powierzchnię, dla której wszystkich punktów wartość potencjału jest ta sama. I tego więc nie potrzebujemy szczegółowo powtarzać, odwołując się do rozumowań, przytoczonych wyżej w stosunku do pola elektrycznego.

Nie wynika wszakże z tego, że dziedziina, którą teraz rozpatrujemy, nie różni się niczem od tamtej. Już jedną wielką różnicę podkreśliliśmy — oto nie istnieją oddzielne masy magnetyczne jednego tylko znaku, jak to się dzieje z nabojami elektrycznymi. Musimy teraz na inny jeszcze ważny szczegół zwrócić uwagę.

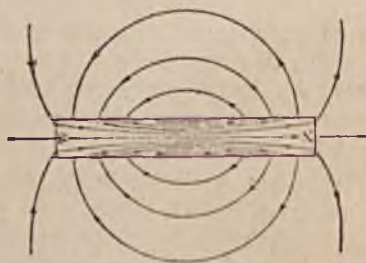
Przypuśćmy, że rozpatrujemy pole dokoła cienkiej długiej namagnesowanej igły stalowej; przebieg linii pola jest tu taki, jak na rys. 780a. Zginamy igłę tak, iż otrzymujemy prawie zamknięty pierścień (rys. 780b); linie pola skupiają się prawie wszystkie w przestrzeni między biegunami, nieliczne zaledwie przebiegają dalej — w niewielkiej odległości od tej przestrzeni natężenie pola jest już znikomo małe. Zamykamy wreszcie pierścień całkowicie, stykając ze sobą w k bieguny igły (780c); wtedy pole znika zupełnie. Wszakże, gdy rozsunie my końce magnesu, znowu to pole się utworzy; gdy zaś z zamkniętego

pierścienia (rys. 780c) wytniemy jakiegokolwiek skrawki np. ab lub cd , okażą się one magnesami, przyczem w b , wzgl. d przypadną w nich bieguny s , w a zaś wzgl. c bieguny n . Zgodnie z tem, cośmy już wyżej podawali o strukturze magnesu, opiszemy rzecz tak, że w igle namagnesowanej mamy uszeregowane w określony sposób magnesy elementarne; te łańcuchy w przypadku zamkniętego pierścienia są zamknię-



Rys. 780.

te, w przypadku zaś, gdy bieguny są rozsunięte (rys. 780a i 780b) z ich końców jako dalszy ich ciąg bieżą linje pola zewnętrznego. Podczas więc gdy w przypadku linij pola dokoła przewodnika namagnetyzowanego linje te zaczynają się, wzgl. kończą na tym przewodniku, wewnątrz zaś przewodnika ich niema, tu linje pola, istniejące nazewnątrz magnesu, znajdują swój dalszy ciąg wewnątrz niego, gdzie mamy zjawisko *polaryzacji magnetycznej* (odpowiadającej polaryzacji dielektrycznej w dziedzinie pola elektrycznego — porówn. ust. 300).



Rys. 781.

W ten sposób linje pola magnetycznego przedstawiają się łącznie z ich przedłużeniami w magnesie jako krzywe zamknięte (rys. 781), przyczem kierunek ich przebiegu wewnątrz magnesu jest odwrotny niż nazewnątrz: nazewnątrz od bieguna N do bieguna S , wewnątrz od bieguna S do N .

Do tych rzeczy wrócimy jeszcze w dalszym ciągu naszego wykładu.

Ćwiczenia i zadania.

491. Dane są dwie igły stalowe, z których jedna jest namagnesowana. W jaki sposób odróżnimy, która z nich mianowicie jest magnesem?

492. Czy można i w jaki sposób wykonać z dwiema namagnesowanymi igłami stalowymi doświadczenie, analogiczne do tego, które jest podane w zadaniu 415?

493. Dane są dwie igiełki stalowe, osadzone na ostrzach, jak na rys. 758; jedna z nich jest magnesem, druga nie. Czem będzie się różniło ich zachowanie się względem zbliżanego do nich magnesu?

494. Rys. 782 wyobraża magnes z uczezionymi doń kilku igłami stalowymi, wzgl. drucikami żelaznymi. Czy większa odległość między dolnymi końcami igieł (drucików) w porównaniu z odległością wzajemną końców górnych jest czemś przypadkowym, czy też daje się to uzasadnić, jako jedynie możliwe?

495. Dwa cienkie pręty z żelaza miękkiego zawieszono są na nitkach w pozycji pionowej i dotykają jeden drugiego. Czy położenie względne tych prętów po-



Rys. 782.

zostanie bez zmiany, gdy zbliżymy do nich z pod spodu którykolwiek biegun de-
stacycznie silnego magnesu?

496. Dane są dwa pręty jednakowych wymiarów: jeden z żelaza miękkiego, drugi ze stali; oba pręty żadnych śladów magnetyzmu nie posiadają. Czy, posługując się osadzoną na ostrzu igiełką magnesową, możemy rozróżnić, który z tych prętów jest żelazny, który zaś stalowy?

497. Dany magnes z określonego miejsca wywołuje określone odchylenie igiełki magnesowej, osadzonej na ostrzu. Na igiełkę kładziemy tegoż kształtu i tychże wymiarów co igiełka płytkę z żelaza miękkiego. Czy dany magnes z tego samego miejsca powoduje teraz także wychylenia igiełki, co poprzednio?

498. Z obu stron — wschodniej i zachodniej — igiełki magnesowej, osadzonej na ostrzu, umieszczone są symetrycznie dwa jednakowe pręty z żelaza miękkiego; nie wywołuje to, oczywiście, wychylenia igiełki z jej właściwego położenia. Czy położenie to pozostanie niezmienione, gdy jeden z prętów żelaznych zostanie zasłonięty przez pręt stalowy tychże wymiarów?

499. Pręt żelazny po namagnesowaniu indukcyjnym zachował w słabym stopniu własności magnetyczne. Zawieszamy go w pozycji poziomej na strzemiączku

(jak na rys. 755). Gdy zbliżamy do jednego z jego końców biegun magnesu, obserwujemy przy pewnej odległości magnesu od pręta odpychanie; wszakże przy większym zbliżeniu magnesu do pręta obserwujemy przyciąganie tegoż końca pręta. Wytłumaczyć to zjawisko?

500. Jeden z dwu zupełnie jednakowych magnesów położony jest poziomo na szalce wagi i zrównoważony odważnikami; po dokonaniu tego zrównoważenia umieszczamy drugi magnes pod szalką tak, by był równoległy do pierwszego, zwrócony biegunami w strony przeciwne niż tamten, oraz, by każdy biegun jego leżał na jednej pionowej linii z przypadającym ponad nim biegunem pierwszego magnesu. Wtedy równowaga wagi zostaje zakłócona i dla ponownego osiągnięcia tej równowagi należy dołożyć na drugą szalkę 6 gr, gdy bieguny obu magnesów przypadają jeden od drugiego w odległości 4 cm, oraz 11 gr, gdy odległość ta wynosi 3 cm. Czy wynik doświadczenia zgodny jest z prawem Coulomba? Jaka jest masa magnetyczna każdego bieguna użytych w doświadczeniu magnesów?

501. W doświadczeniu z zadania poprzedniego masy magnetyczne biegunów jednego magnesu (I) są inne niż drugiego (II) o takich samych wymiarach. Poza tem rozporządzamy jeszcze trzecim magnesem (III) tychże wymiarów, ale o innej jeszcze masie magnetycznej biegunów. Po zrównoważeniu na szalce magnesu I, umieszczamy, jak wyżej, pod szalką magnes II tak, by bieguny obu magnesów przypadły w odległości 4 cm; trzeba przytem do ponownego zrównoważenia dołożyć na drugą szalkę 6 gr. Gdy na miejscu magnesu II ustawiamy magnes III, obciążenie dodatkowe drugiej szalki wynosi nie 6 gr, lecz tylko 5,33 gr. Kładziemy wtedy magnesy II na szalce zamiast I, pod szalką zaś umieszczamy w tej samej odległości co poprzednio magnes III; obciążenie dodatkowe drugiej szalki wynosi wtedy 5,83 gr. Jakie są masy magnetyczne biegunów obu magnesów I i II?

502. Trzy jednakowych wymiarów i jednakowo namagnesowane pręty stalowe umieszczone są pionowo na stole w pewnej odległości jeden od drugiego. Dwa z tych magnesów mają zwrócone do góry bieguny północne, jeden — południowy. Opieramy o górne końce magnesów tekturę (lub szybę szklaną), trzymaną poziomo, i posypujemy ją opiłkami żelaznymi. Zakładając dowolne odległości między użytemi w doświadczeniu magnesami, wykreślić dla poszczególnych przypadków przebieg linii pola?

503. Kładziemy na stole dwa magnesy tak, by oś magnetyczna jednego z nich była prostopadła do osi drugiego i przedłużenie jej przechodziło przez środek tamtej. Przykrywamy magnesy tekturą i otrzymujemy na niech w znany sposób widno magnetyczne. Wykreślić przebieg linii danego pola, zakładając, że masy magnetyczne jednego magnesu są: 1) równe masom magnetycznym drugiego, 2) są 3 razy od tamtych większe?

504. Na stole leży kilka magnesów. Przykrywamy je tekturą, posypujemy tekturę opiłkami żelaznymi i badamy pole przy pomocy powstającego przytem widma magnetycznego. Czy można tą drogą wskazać miejsce na stole między magnesami, gdzie należy umieścić gwóźdź żelazny, by uległ działaniu indukcyjnemu: 1) możliwie najsilniejszemu, 2) możliwie najslabszemu?

505. Dany jest magnes linjowy, którego bieguny przypadają w odległości 10 cm jeden od drugiego; masy magnetyczne biegunów wynoszą po 12 $\frac{\text{gr}}{\text{cm}^2}$. Wyznaczyć natężenie pola (wartość bezwzględna i kierunek): 1) w punktach, le-

żących na prostej, przecinającej prostopadle oś magnesu, w odległościach 2 cm, 5 cm, 10 cm, od tej osi, 2) w punktach, leżących na obwodzie kola, opisanego na osi magnesu, jako średnicy i przypadających na końcach promieni, poprowadzonych pod kątem 60° względem tej osi?

506. Wyznaczyć dla pola magnesu z poprzedniego zadania wartości potencjału w wyszczególnionych tam punktach?

507. Cztery magnesy linjowe, takie jak w zad. 505, leżą na czterech bokach kwadratu, mających długość 20 cm, w częściach środkowych tych boków. Sporządzić wykres linii pola w płaszczyźnie magnesów, a także wyznaczyć wartości natężenia pola i potencjału w czterech rogach kwadratu oraz jego środku w przypadku, gdy: 1) najbliżej siebie położone bieguny magnesów są różnoimienne, 2) najbliżej siebie położone bieguny magnesów są jednoimienne?

508. Dwa namagnesowane pręty stalowe leżą w ten sposób, że ich osi przypadają na jednej linii prostej, bieguny zaś pozostają w odległości 10 cm. Masy magnetyczne biegunów jednego magnesu wynoszą po $100 \frac{\text{gr} \frac{1}{2} \text{cm} \frac{3}{2}}{\text{sek}}$, drugiego po

$63 \frac{\text{gr} \frac{1}{2} \text{cm} \frac{3}{2}}{\text{sek}}$. Znaleźć wartość natężenia pola oraz potencjału w punkcie, leżącym w środku na prostej, łączącej bieguny obu magnesów w przypadku, gdy zwrócone są do siebie: 1) bieguny różnoimienne obu magnesów, 2) bieguny jednoimienne?

509. Natężenie jednorodnego pola magnetycznego wynosi 15 gausów. Ile jednostkowych rurek pola przechodzi przez kontur o powierzchni 3 cm^2 , ustawiony prostopadle do przebiegu rurek?

510. W polu jednorodnym, jak w zad. 509, mieści się igła magnesowa, której bieguny mają masy magnetyczne, wynoszące $25 \frac{\text{gr} \frac{1}{2} \text{cm} \frac{3}{2}}{\text{sek}}$. Jakiej wartości siły działają tam na te bieguny?

ROZDZIAŁ VI.

MAGNETYZM ZIEMSKI.

324. Elementy magnetyzmu ziemskiego.

Igła magesowa, posiadająca zupełną swobodę ruchów, mieszcząca się zdala od wszelkich przedmiotów magnetycznych, a przedewszystkiem nieotoczona ze wszęch stron osłoną żelazną lub stalową, ustawia się zawsze w określonym kierunku w przestrzeni. Jeżeli może się ona swobodnie poruszać tylko w płaszczyźnie poziomej, jak to czynią igieł-



Rys. 783.

ki, osadzone na ostrzach (rys. 758), oś jej ustawia się, jak już wiemy, mniej więcej z północy na południe. Jeżeli posiada swobodę ruchów i w płaszczyźnie pionowej, wówczas nachyla się ona swym końcem północnym na naszej półkuli ku dołowi. Aby otrzymać igłę, mogącą się możliwie swobodnie ustawiać, należy ją sporządzić tak, jak to np. wskazuje rys. 783. Igła może się tu obracać w płaszczyźnie pionowej na osi, przechodzącej przez jej środek ciężkości i osadzonej poziomo w pierścieniu, który mieści się w drugim pierścieniu, mając możność swobodnie obracać się w nim dokoła osi pionowej.

Takie charakterystyczne zachowywanie się igły magesowej wskazuje, że znajduje się ona w polu magnetycznem, przyczem oś jej

w przypadku zupełnej swobody jej ruchów ustawia się w kierunku linii tego pola. Pole to nazywamy *polem magnetycznym ziemskim*. O ile nie jest ono zakłócone obecnością jakiego przedmiotu magnetycznego, może być uważane na niewielkiej przestrzeni (kilku, kilkunastu, a nawet paru dziesiątków metrów we wszystkie strony) za pole jednorodne — przy przenoszeniu takiej igielki, jak np. na rys. 783 z jednego miejsca do drugiego, położonego w tej niewielkiej odległości, kierunek osi igły może być uważany za równoległy do początkowego. Podobnie dwa blisko siebie przypadające piony mogą być uważane, praktycznie rzecz biorąc, za równoległe, jakkolwiek zupełnie ściśle to nie jest.

Pole magnetyczne uważamy za znane, jeżeli możemy podać dla każdego jego punktu wartość oraz kierunek natężenia; to też do tego właśnie sprowadza się badanie pola magnetycznego ziemskiego.

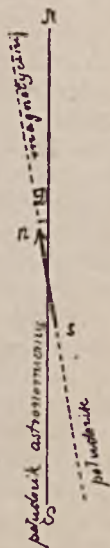
Plaszczyzna pionowa, w której ustawia się ós nieskrępowanej w swych ruchach igły magnesowej, nosi nazwę *południka magnetycznego*. Naogół biorąc, kierunek południka magnetycznego nie zgadza się z kierunkiem południka astronomicznego (geograficznego): ós magnetyczna igielki swoim końcem północnym nie zwraca się naogół dokładnie ku północy, lecz zbacza albo na zachód, albo na wschód. Kąt pomiędzy południkiem magnetycznym a południkiem astronomicznym nosi nazwę *zbowoczenia magnetycznego* i oznacza się zazwyczaj przez D^*) (rys. 784); jeżeli przytem biegun północny igły, magnesowej zbacza na zachód, zbowoczenie nosi nazwę *zachodniego* i uważa się za *ujemne* ($-$), jeżeli zaś na wschód, nazywa się *wschodniem* i uważa się za *dodatnie* ($+$). Wartość zbowoczenia magnetycznego jest naogół różna w różnych miejscowościach, o czym jeszcze mowa będzie niżej; przytem nawet w jednym i tem samym miejscu nie pozostaje ona stałą, lecz ulega pewnym wahaniom w ciągu doby (*zmiany dzienne*) oraz w ciągu roku (*zmiany roczne*), a także zmienia się z roku na rok (*zmiany wiekowe*). Czasem zdarzają się wyjątkowo prędko po sobie następujące i wielkie zmiany zbowoczenia, znacznie przewyższające notowane zazwyczaj zmiany dzienne; mówimy, że zachodzi wtedy *burza magnetyczna*.

Jeżeli zatem podajemy dla danego miejsca wartość zbowoczenia magnetycznego, może to albo dotyczyć pewnego określonego momentu, albo być pewną wartością przeciętną np. średnią roczną, lub też średnią miesięczną. Dla przykładu przytaczamy, że wartość średnia roczna zbowoczenia magnetycznego na r. 1927 wynosiła w Warszawie $-2^{\circ}26'$, w Poznaniu $-4^{\circ}3'$, w Wilnie $+0^{\circ}7'$. Na większości obszaru naszej Rzeczypospolitej zbowoczenie jest zachodnie, rosnące naogół liczbowo od wschodu ku zachodowi, i jedynie na kresach wschodnich znajdują się miejscowości o zbowoczeniu wschodniem.

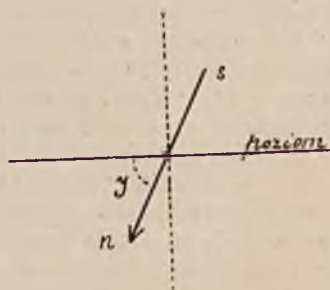
Kąt, który tworzą linie pola magnetycznego ziemskiego z poziomem, nosi nazwę *nachylenia magnetycznego* i oznacza się zazwyczaj

*) Po łac. declinatio; po franc. déclinaison.

przez I *) (rys. 785). Na naszej półkuli, jak już wspomnieliśmy, pochylony jest ku dołowi prawie wszędzie biegun północny igły i kierunku linii pola przypada tak, jak to wskazuje strzałka na rys. 785. Tego rodzaju nachylenie jak u nas przyjęto nazywać *dodatniem*. Jeżeli ku dołowi pochyla się biegun południowy nieskrępowanej w swych ruchach igły magnesowej, a tak dzieje się, ogólnie rzecz biorąc (nie wszędzie jednak), na półkuli południowej, mówimy, że nachylenie jest *ujemne*. Podobnie jak zboczenie, nachylenie posiada różne wartości w różnych miejscowościach, na naszej półkuli przeważnie



Rys. 784.



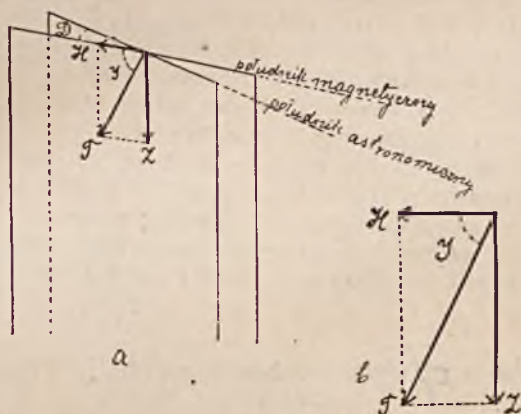
Rys. 785.

tem większe, im bardziej miejscowość ta jest położona na północ (na półkuli południowej tem większe, im bardziej się posuwamy na południe). Wartość nachylenia w jednym i tem samym miejscu ulega również, jak zboczenia, zmianom dziennym, rocznym i wiekowym, a także większym zakłóceniom podczas burz magnetycznych. Dla przykładu przytaczamy, że wartość średnia roczna nachylenia wynosiła w r. 1927: w Warszawie $66^{\circ}45'$, w Kołomyi $63^{\circ}25'$, w Suwałkach $68^{\circ}20'$.

Zboczenie i nachylenie razem wyznaczają całkowicie kierunek natężenia pola magnetycznego ziemskiego. W rzeczy samej wartość zboczenia wyznacza kierunek południka magnetycznego (w stosunku do płaszczyzny południka astronomicznego, która jest dla danego miejsca czemś zupełnie określonym); nachylenie zaś daje kierunek linii pola,

*) Po łac. inclinatio; po franc. inclinaison.

leżących w płaszczyźnie południka magnetycznego w stosunku do poziomu. Wszakże nie jest to wszystko: potrzebna jest jeszcze znajomość wartości bezwzględnej natężenia. To natężenie możemy brać albo w jego całości, albo rozłożyć, jak każdy wektor, na składowe części, np. na składową poziomą i pionową. Całkowita wartość natężenia oznacza się zazwyczaj przez T , jej *składową poziomą* przez H , a *składową pionową* przez Z . Znając całkowite natężenie oraz nachylenie, znaleźć możemy, oczywiście, obie wymienione składowe; podobnie, mając składową poziomą H oraz nachylenie I , znaleźć możemy zarówno całkowite natężenie T , jak składową pionową Z . Wyjaśnia to wszystko rys. 786, którego część *a* ujęta jest perspektywicznie z uwzględnieniem ustosunkowania położenia płaszczyzny południka



Rys. 786.

magnetycznego do płaszczyzny południka astronomicznego, *b* zaś pokazuje, jak przypadają względem siebie T , H i Z w samej płaszczyźnie południka magnetycznego. Z rysunku tego widać odrazu, że

$$H = T \cos I \quad \dots \quad (1)$$

$$Z = T \sin I \quad \dots \quad (2)$$

$$T = \frac{H}{\cos I} \quad \dots \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} I = \frac{Z}{H} \quad \text{czyli} \quad I = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{Z}{H} \quad \dots \quad (4)$$

$$Z = H \operatorname{tg} I \quad \dots \quad (5)$$

$$T = \sqrt{H^2 + Z^2} \quad \dots \quad (6)$$

Zboczenie, nachylenie, całkowite natężenie, składowa pozioma, składowa pionowa, a także inne składowe, które przy badaniach bywają uwzględniane—wszystko to są t. zw. *elementy magnetyzmu ziemskiego*. Wiążą się one ze sobą wzorami takimi, jak przytoczone (1—6) i wystarczy wyznaczyć drogą doświadczalną którekolwiek 3 z pośród nich, by resztę znaleźć drogą rachunku przy pomocy odpowiednich wzorów. Takimi elementami, które wyznacza się drogą doświadczalną są przede wszystkim w naszych szerokościach *zboczenie* i *nachylenie*, poza tem zaś *składowa pozioma*, którą możemy wyznaczać dogodniej i z większą dokładnością aniżeli natężenie całkowite oraz inne jego składowe. Zresztą bywają przypadki, że i tamte elementy albo ich zmiany podlegają wyznaczaniu doświadczałnemu.

O składowej poziomej, jak o wszystkich elementach, można powiedzieć to, cośmy już powiedzieli o zboczeniu i o nachyleniu, że są zmienne w przestrzeni i w czasie. Ogólnie biorąc, składowa pozioma w poszczególnych miejscowościach jest tem mniejsza, im dalej te miejscowości przypadają od równika; u nas zatem wartość składowej poziomej jest większa w okolicach południowych, mniejsza w północnych. Dla przykładu przytaczamy, że wartość średnia roczna składowej poziomej wynosiła w r. 1927: w Warszawie 0,186 Γ (gausów), w Kołomyi 0,208 Γ , w Suwałkach 0,178 Γ . Według wzoru (3) możemy, znając H i I , znaleźć wartości całkowitego natężenia, a więc: na r. 1927: w Warszawie 0,471 Γ , w Kołomyi 0,465 Γ , w Suwałkach 0,448 Γ .

325. Wyznaczanie zboczenia magnetycznego (D) i jego znaczenie praktyczne.

Zboczeniem magnetycznym nazywa się, jak już wiemy, kąt, utworzony przez płaszczyznę południka magnetycznego z płaszczyzną południka astronomicznego (geograficznego). Wyznaczenie kierunku południka astronomicznego dokonywa się przy pomocy przyrządu, zwanego *teodolitem*. Na rys. 787 widzimy teodolit typu szkolnego; łatwo tam poznajemy zasadnicze części przyrządu. Jedną z tych części stanowi koło z podziałką, które przy pomocy utrzymujących je 3 śruby oraz libeli ustawia się dokładnie poziomo. Dokoła osi pionowej, przechodzącej przez środek tego koła poziomego, daje się obracać koło pionowe, zaopatrzone również w podziałkę. Przez środek koła pionowego przechodzi oś obrotu lunety. Luneta zatem może wykonywać ruch w dowolnej płaszczyźnie pionowej i może być ustawiana pod dowolnym kątem względem poziomemu. W lunecie, w tem jej miejscu, gdzie się tworzy obraz obserwowanego przedmiotu, mieści się krzyż z dwu do siebie prostopadłych cienkich rys albo nici pajęczych.

Oto jeden ze sposobów wyznaczania kierunku południka astronomicznego. Celujemy lunetą na którąkolwiek gwiazdę, gdy jest po stronie wschodniej nieba i wznosi się coraz wyżej nad poziomem. W pewnym momencie nastawiamy lunetę tak, by obraz gwiazdy przypadł

w punkcie przecięcia nitek krzyża *). Odczytujemy wtedy na kole poziomem kierunek tej płaszczyzny pionowej, w której przypada wtedy oś lunety. Nie zmieniając nachylenia lunety względem poziomu, czekamy, aż gwiazda po swoim górowaniu, t. j. po przejściu przez południk danego miejsca, opuści się do tej samej wysokości; obracamy koło pionowe wraz z umocowaną w stosunku do niego lunetą tak, by gwiazda przypadała w tej samej płaszczyźnie pionowej co luneta, i w momencie, gdy obraz gwiazdy znajdzie się znowu w punkcie przecięcia nitek krzyża, unieruchomiamy w tem położeniu koło pionowe i robimy ponownie odczytanie na kole poziomem. Oczywiście, dwa dokonane odczytania na kole poziomem przed górowaniem gwiazdy i po



Rys. 787.



Rys. 788.

górowaniu, przy jednej i tej samej wysokości gwiazdy, odpowiadają dwu symetrycznym położeniom gwiazdy względem płaszczyzny południka. Przypuśćmy, że na rys. 788, który przedstawia schematycznie widziane zgóry koło poziome, AB oznacza kierunek płaszczyzny, w której przypada oś lunety przy nastawianiu jej na gwiazdę przed górowaniem, $A'B''$ zaś — odpowiedni kierunek dla nastawienia po górowaniu. W takim razie kierunek płaszczyzny południka daje nam dwusieczną kąta AOA' ($\angle NOA = \angle NOA'$). Dodać trzeba, że przed początkiem i po ukończeniu nastawień na gwiazdę celujemy lunetę na t. zw. *mirę*, t. j. na jakiś dobrze zaznaczający się odległy punkt, np. na czubek piorunochronu, na krzyż daleko położonego kościoła. Zgodność tych odczytań na początku i końcu pomiaru świadczy, że podczas pomiaru

*) Podczas takiej obserwacji w noey krzyż oświetla się w specjalny sposób.

przyrząd nie uległ przypadkowemu potrąceniu, a jest to do pomiaru nieodzowne. Z odczytań tych poza tem wyznaczamy *azymut* danej miry, t. j. kąt, który tworzy z płaszczyzną południka astronomicznego płaszczyzna pionowa, w której oś lunety jest na mirę wycelowana. Na rys. 788 prosta OM wskazuje kierunek, w którym widać mirę; kąt $\angle NOM$ jest azymutem miry.

Opisana metoda nosi nazwę metody sprzężonych wysokości; daje się ona zastosować i do słońca; są też inne metody; znacznie dogodniejsze, ale nie dające się tak łatwo spopularyzować.

Gdy mamy już wyznaczony kierunek południka astronomicznego, albo, co na jedno wychodzi, azymut określonej miry, należy jeszcze znaleźć kierunek południka magnetycznego. Jeżeli na poziomem kole



Rys. 789.

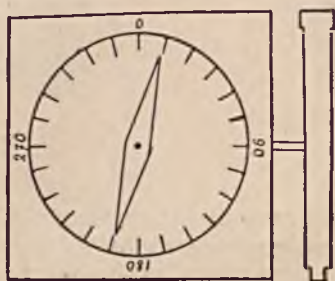


Rys. 790.

z podziałką (rys. 789) kierunek NS daje kierunek południka astronomicznego, ns zaś kierunek osi zawieszonoego nad kołem magnesu, a zatem kierunek południka magnetycznego, mamy wszystkie dane do odczytania na kole wartości zboczenia (D), które w przypadku, przedstawionym na rysunku, jest zachodnie. Aby w rzeczywistości wyznaczenia tego dokonać, użyć można np. przyrządu, zwanego *deklinatorem* (rys. 790). Mamy tu osadzony na osi pionowej stolik poziomy, dający się obracać dokoła tej osi pionowej. W środku stolika mieści się koło z podziałką, a w środku tego koła ostrze, na którym osadzona jest igielka magnesowa. U jednej krawędzi stolika widzimy lunetę, którą można pochylać dowolnie względem poziomu, gdyż daje się obracać dokoła osi poziomej, przecinającej pod kątem prostym oś pionową stolika. Przez obracanie stolika dokoła jego osi ustawiać można lunetę w dowolnej płaszczyźnie pionowej. Podziałka na kole zrobiona jest

tak, że, gdy igła magnesowa wskazuje kreskę zerową, oś igły jest równoległa do płaszczyzny, w której obraca się oś lunety, t. j. wtedy oś lunety przypada w płaszczyźnie południka magnetycznego. Obracamy stolik dokoła osi pionowej dopóty, dopóki oś lunety nie przypadnie w płaszczyźnie, w której leży zaobserwowana mira; celujemy wtedy lunetą na mirę. Po osiągnięciu nastawienia odczytujemy, którą podziałkę wskazuje teraz koniec igły magnesowej i w ten sposób znajdujemy kąt między płaszczyzną pionową, w której leży mira, a płaszczyzną południka magnetycznego. Znając azymut miry, znajdujemy zaraz zboczenie.

Przykład: azymut miry wynosi 18° , licząc od północy na zachód: północny koniec igły, gdy nastawiliśmy lunetę na mirę, przypada nad podziałką 14° (rys. 791). Zboczenie zatem jest zachodnie i wynosi -4° .



Rys. 791.

Istnieją specjalne *teodolity magnetyczne*, urządzone tak, że przy ich pomocy dokonać można zarówno wyznaczenia kierunku południka astronomicznego, jak magnetycznego. Magnesy w nich albo są osadzone na ostrzu, albo — lepiej, żeby uniknąć tarcia — zawieszono są na nieskręconych włóknach kokonowych. Uwzględnia się przytem, że oś magnetyczna zawieszono, czy osadzonego na ostrzu magnesu może się nie zgadzać z jego osią geometryczną (p. niżej zad. 516). Bliższe szczegóły tych wyznaczeń pomijamy, ograniczając się do wskazania ich zasady. Oczywiście, pomiar zboczenia magnetycznego, jak każdy zresztą pomiar z dziedziny magnetyzmu ziemskiego, musi być dokonywany na otwartym miejscu, zdaleka od wszelkich przedmiotów, zwłaszcza żelaza i stali, które mogłyby zakłócać przebieg linii pola magnetycznego ziemskiego.

Jedynie mając wartość zboczenia w danym miejscu, można się posługiwać *busolą*. Na rys. 792 widzimy busolę kieszonkową, którą, oczywiście, podczas używania trzymać należy poziomo, by igła magnesowa mogła się swobodnie obracać na ostrzu. Na rys. 793 mamy busolę morską na specjalnem zawieszeniu, pozwalającym jej igłę pozostawiać

stale w płaszczyźnie poziomej bez względu na kołysanie się okrętu. Na tarczy busoli zaznaczone są strony świata. Gdyby igła magnesowa dokładnie wskazywała kierunek północno-południowy, co zachodzi jedynie w miejscach, gdzie zboczenie = 0, mielibyśmy od razu wskazane przez nią strony świata i według tego moglibyśmy się np. kierować w podróży. Jeżeli jednak w tem miejscu, gdzie się znajdujemy, zboczenie wynosi np. — 10° , to oczywiście należy to uwzględnić przy odczytywaniu busoli, inaczej bowiem skierujemy się zupełnie nie tam, dokąd podążamy. Wiele katastrof morskich zdarzyło się właśnie dlatego, że okręt kierował się błędnie wskazaniami busoli, dopóki dana



Rys. 792.



Rys. 793.

okłica nie została zbadana i nie sporządzono dla niej *mapy zboczeń magnetycznych*. Poza marynarzami istnieje wielu innych fachowców, którzy orjentują się w przestrzeni zapomocą busoli — są to lotnicy, górnicy, artylerzyści, miernicy; wszystkim tym ludziom potrzebne są zatem mapy zboczeń magnetycznych, sporządzone tak, by dały się przytem uwzględnić zachodzące w czasie zmiany zboczenia *).

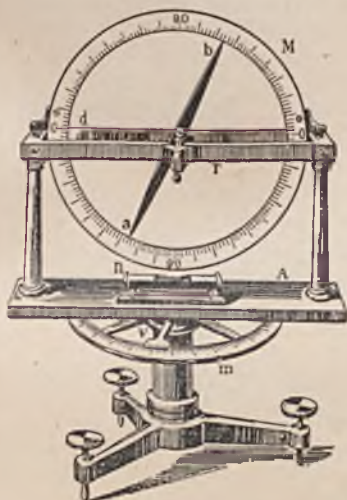
326. Wyznaczanie nachylenia magnetycznego (I).

Na rys. 794 widzimy *inklinator*, który służy do wyznaczania nachylenia magnetycznego. Mamy tam, podobnie jak w teodolicie, koło poziome z podziałką, przez jego zaś środek przechodzi oś pionowa, dokoła której obracać się daje koło pionowe, również zaopatrzone w podziałkę. W środku koła pionowego przypada oś igły magnesowej, spoczywająca na ostrych krawędziach z agatu (dla możliwego zmniejszenia tarcia); ruchy igły zachodzą w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny koła pionowego. Gdy ustawiamy koło pionowe w płaszczyźnie południka magnetycznego, nachylenie osi igły względem

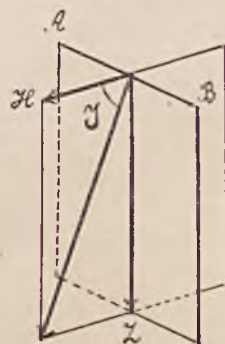
*) Istnieją busole, w których budowie wyzyskane są pewne własności bąka wirującego i które zapomocą osi takiego bąka, a więc bez magnesów, wskazują kierunek północno-południowy. Wskazania takich busoli nie wymagają poprawek takich, jak busoli z magnesami; są tu jednak tymczasem inne trudności do pokonania, wobec czego przeważnie jeszcze posługujemy się busolami magnetycznymi.

poziomu daje nam szukane nachylenie magnetyczne. Uwzględnia się przytem różne poprawki, jak np., że oś magnetyczna igły nie zgadza się naogół z kierunkiem jej osi geometrycznej; że oś igły może nie leżeć ściśle w środku koła pionowego; że oś igły może nie przechodzić ściśle przez jej środek ciężkości, co warunkuje, że na ustawienie się igły wpływa również siła ciężkości, komplikując tem zjawisko. Omówienie tych poprawek pomijamy, ograniczając się do wskazania, jak się ustawia koło pionowe w płaszczyźnie południka magnetycznego.

Gdy obracamy pionowe koło inklinatora, dostrzegamy, że nachylenie igły w różnych płaszczyznach jest różne. W jednej tylko z nich jest



Rys. 794.



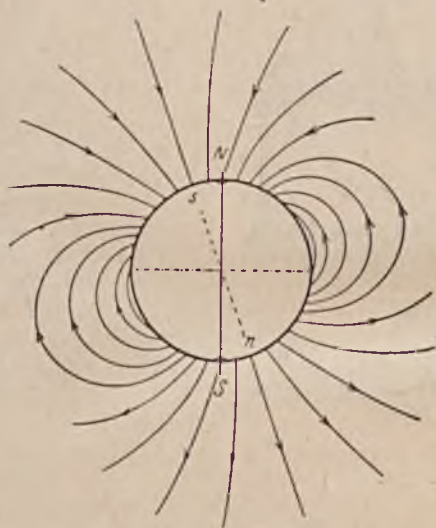
Rys. 795.

ono najmniejsze i to jest właśnie płaszczyzna południka magnetycznego; w innych jest większe, a w płaszczyźnie, prostopadłej do południka magnetycznego, igła ustawia się pionowo, t. j. pochyla się względem poziomu o 90° . Łatwo to zrozumieć. Mając swobodę ruchów w płaszczyźnie południka magnetycznego, igła znajduje się pod działaniem zarówno składowej poziomej H , jak składowej pionowej Z (rys. 795), natężenia pola ziemskiego i ustawia się pod kątem I względem poziomu,

przytem $\operatorname{tg} I = \frac{Z}{H}$. Natomiast, o ile igła posiada swobodę ruchów w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny południka magnetycznego (w płaszczyźnie AB na rys. 795), istnieje w tej płaszczyźnie działanie składowej pionowej Z , niema natomiast działania składowej poziomej, a skutkiem tego igła ustawia się pionowo. Sposób zatem ustawienia koła pionowego inklinatora w płaszczyźnie południka magnetycznego jest następujący: obracamy koło pionowe dopóty, dopóki igła nie usta-

wi się dokładnie pionowo; zanotowawszy wtedy na kole poziomem kierunku koła pionowego, obracamy je względem tego położenia o 90° ; wtedy leży ono w płaszczyźnie południka magnetycznego i igła wskazuje szukane nachylenie magnetyczne w danym miejscu (przy uwzględnieniu wspomnianych poprawek).

Jak już powiedzieliśmy wyżej, im dalej od równika na północ lub południe, tem naogół nachylenie jest większe, przyczem na półkuli północnej pochylony jest ku dołowi biegun północny igły, na południowej południowy. Linja zamknięta, przebiegająca w pobliżu równika i przecinająca równik (zatem znajdująca się częściowo na półkuli północnej, częściowo na południowej) oraz łącząca wszystkie punkty powierzchni ziemi, gdzie nachylenie magnetyczne równa się zeru, nosi nazwę *rów-*



Rys. 796.

nika magnetycznego. Punkty w okolicach podbiegunowych północnej i południowej, w których nachylenie magnetyczne wynosi 90° , nazywają się *biegunami magnetycznymi ziemi*. Punkty te nie schodzą się bynajmniej z biegunami geograficznymi; położenie biegunów magnetycznych nie jest przytem stałe. Obecnie przypadają one w punktach, których współrzędne geograficzne są w zaokrąglonych liczbach następujące: 72° szer. półn. i 96° dług. zach. na północy oraz 73° szer. połudn. i 156° dług. wschodn. na południu. Nie leżą więc one na przeciwległych końcach średnicy ziemskiej, pochylonej o pewien kąt względem osi ziemskiej, a na końcach w pewien sposób położonej cięciwy.

Można zatem uważać ziemię za magnes, dokoła którego przebieg linii pola jest mniej więcej taki, jak na rys. 796, co zupełnie tłumaczy

różnicę nachyleń magnetycznych w różnych miejscach; przytem na północy przypada biegun południowy (lepiej powiedzieć — biegun ujemny) tego magnesu (ku dołowi wszak pochyla się tam, a więc przyciąga się biegun północny igły), na południu — biegun północny (dodatni). Podkreślić jednak trzeba, że to, co nazywamy biegunami magnetycznymi ziemi, nie odpowiada pojęciu bieguna magnesu — bieguny w magnesach przypadają zawsze wewnątrz nich; magnetycznymi biegunami ziemi nazywają się punkty na jej powierzchni, posiadające wskazaną wyżej własność.

Poza biegunami magnetycznymi ziemi są na niej inne miejsca, gdzie nachylenie wynosi również 90° , mimo iż naogół wszędzie wartość ta jest zawarta między 0° a 90° . O miejscach takich, jak wogóle o miejscach, gdzie wartość elementów magnetyzmu ziemskiego jest zgoła inna, niż należałoby oczekiwać, sądząc z ich wartości w miejscach sąsiednich, mówimy, że przypadają tam *anomalje lokalne*. Zdarza się, że takie anomalje wywołane są obecnością rud żelaznych; zawsze jednak powodem ich jest szczególna jakaś budowa geologiczna. Badanie zatem magnetyzmu ziemskiego prowadzić nas może do głębszego poznania budowy skorupy ziemskiej, w szczególności do wykrycia ważnych dla nas pokładów. Rozwój wielkiego przemysłu żelaznego w Szwecji pozostawał w ścisłym związku z badaniami magnetyzmu ziemskiego w tym kraju.

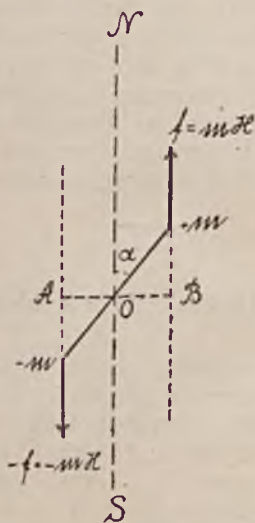
327. Mierzenie składowej poziomej (H) magnetyzmu ziemskiego.

Igiełka magnesowa na ostrzu, mająca swobodę ruchów w płaszczyźnie poziomej, znajduje się w polu jednorodnym o natężeniu H (składowa pozioma magnetyzmu ziemskiego) i pod działaniem tego pola ustawia się swą osią magnetyczną w kierunku tego natężenia. Traktujmy igielkę dla uproszczenia sprawy jako magnes linjowy ns (rys. 797). Jeżeli wychylamy ją z zajętego położenia, przypadającego w płaszczyźnie południka magnetycznego, jak to właśnie mamy na rysunku, na bieguny jej działają siły mH i $-mH$, równe i w przeciwne strony skierowane, t. j. tworzące t. zw. *parę sił*; przez m i $-m$ oznaczamy tu masy magnetyczne biegunów (patrz wzór 4 na str. 177). Pod działaniem tej pary sił igielka po wychyleniu, puszczonej swobodnie, po szeregu wahań powraca do pierwotnego położenia w płaszczyźnie południka magnetycznego. Siły pola nadają tu igielce jedynie ruch obrotowy; na brak ruchu postępowego zwracaliśmy uwagę w doświadczeniu, przedstawionem na rys. 757. Otóż właśnie stwierdzany doświadczeniem fakt braku w tym razie ruchu postępowego, a więc fakt istnienia tu (w polu jednorodnym) jedynie pary sił jest najlepszym uzasadnieniem twierdzenia, że masy magnetyczne biegunów magnesu są *równe* o znakach jedynie różnych, t. j., że możemy te masy oznaczyć tak, jak to uczyniliśmy, przez m i $-m$. Mówiąc wyżej o tej równości (na str. 175), zapowiedzieliśmy to uzasadnienie, na które teraz przyszedł czas.

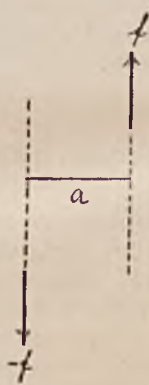
Znajdźmy moment tej pary sił, której działaniu ulega tu igiełka. Przypominając sobie, że momentem pary sił (t. I, ust. 79) nazywamy iloczyn z wartości jednej z sił, tworzących parę, przez t. zw. ramię (a) pary (rys. 798), i oznaczając przez l odległość między biegunami igiełki, przez α zaś kąt jej wychylenia względem południka magnetycznego, znajdujemy na szukaną wartość momentu (na rys. 797 $OB = \frac{l}{2} \sin \alpha$, zatem $AB = l \sin \alpha$)

$$mHl \sin \alpha \dots \dots \dots (1)$$

Iloczyn ml masy magnetycznej bieguna magnesu przez odległość między biegunami nazywa się *momentem magnetycznym* magnesu. Wiel-



Rys. 797.



Rys. 798.

kość ta jest charakterystyczna dla danej igiełki, jak wogóle dla każdego magnesu. Będziemy ją oznaczali przez M ; zatem

$$M = ml \dots \dots \dots (2)$$

Wartość (1) szukanego momentu pary sił przedstawia się wobec tego zapomocą wzoru

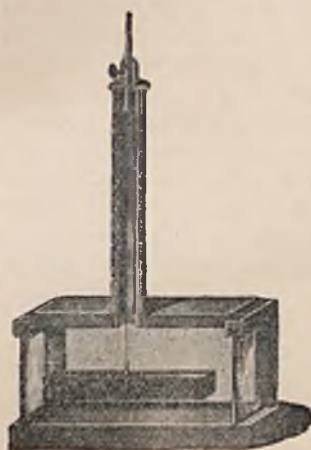
$$MH \sin \alpha \dots \dots \dots (3)$$

i jest zależna od kąta wychylenia; maximum tej wartości odpowiada oczywiście kątowi 90° — wtedy $\sin \alpha = 1$ i moment pary sił, działa-

jący na igielkę (wogóle na każdy magnes w takim położeniu) dany jest przez iloczyn MH , w którym M cechuje daną igielkę (magnes), H zaś cechuje pole, w którym igła (magnes) się znajduje. Moment magnetyczny magnesu nie jest wielkością stałą; zmniejsza się on zawsze z czasem, przytem ulega zmianom wraz ze zmianami temperatury (zmniejsza się ze wzrostem temperatury).

Pod działaniem tej pary sił poziomo zawieszony na włóknie lub osadzony na ostrzu magnesu (igła) wykonywa wahania, zanikające pod wpływem nieuniknionego tarcia. Tu do ruchu wahadłowego magnesu zastosować można, jak już o tem wspominaliśmy dawniej (t. I, ust. 182), ogólny wzór na czas wahań

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}} \dots \dots \dots (4)$$



Rys. 799.

I oznacza tu, jak zawsze, moment bezwładności wahadła — w tym razie magnesu względem pionowej osi obrotu, D zaś moment kierujący, który w przypadku wahadła grawitacyjnego wyraża się zapomocą iloczynu Mga i oznacza wartość największą momentu siły ciężkości przy wychyleniu wahadła o kąt 90° z położenia równowagi, tutaj zaś przedstawia się analogicznie przez maksymalną wartość momentu pary sił, poruszającej magnes, t. j. przez MH . Zatem na okres wahań magnesu otrzymujemy wzór

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH}} \dots \dots \dots (5)$$

Na rysunku 799 widzimy zawieszony na włóknie magnes; mieści się on w widzianem w przekroju pudle drewnianem, oszklonem, by z jednej

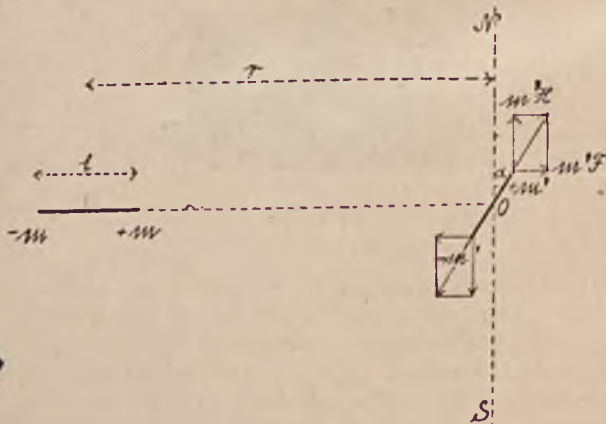
strony można było z zewnątrz obserwować jego ruch wahadłowy, z drugiej strony, aby osłona chroniła magnes od zakłócającego wpływu przypadkowych prądów powietrza i zmian temperatury; okres wahań T magnesu wyznaczyć możemy w podobny sposób, jak wyznaczamy okres wahań wahadła grawitacyjnego. Moment bezwładności magnesu



Rys. 800.

daje się wyznaczyć drogą rachunkową albo doświadczalną raz na zawsze dla danego magnesu, o ile sposób jego zawieszenia nie ulega zmianom. Gdybyśmy mieli wartość momentu magnetycznego M wahającego się magnesu, moglibyśmy znaleźć według tych wszystkich danych H , t. j. składową poziomą magnetyzmu ziemskiego w tem miejscu, gdzie zachodzą wahania magnesu.

Wszakże M naogół nie jest znane, a zresztą ulega z biegiem czasu zmianom — wyznaczone raz wymaga czasami ponownych wyznaczeń; należy brać na M wartość, odpowiadającą temu czasowi, gdy się wyznacza H , innymi słowy wyznaczać należy jednocześnie M i H . To też obserwacja wahań nie jest do tego wystarczająca i zastosować należy inną jeszcze obserwację, do której użyć można najprostszej konstrukcji



Rys. 801.

cji *magnetometru*, jak na rys. 800. Widzimy tam poziomo ustawioną długą deskę, w której środku mieści się busola. Deskę ustawiamy, tak, aby kierunek jej długości był prostopadły do południka magnetycznego, wskazywanego przez igielkę busoli (igielka wskazuje wtedy zerową kreskę podziałki kołowej, nad którą może się poruszać). Kładziemy w wy-

żłobieniu na desce w pewnej określonej odległości od igielki busoli ten magnes, którego wahania obserwowaliśmy, skutkiem czego igielka busoli wychyla się z pierwotnego położenia i na kole z podziałką odczytać możemy kąt wychylenia α . Na schemacie (rys. 801) widzimy magnes odchylający, jako magnes linjowy, w którego punktach końcowych mieszczą się masy magnetyczne $+m$ i $-m$ w odległości l jedna od drugiej, dla którego zatem moment magnetyczny $M = ml$. NS oznacza kierunek południka, w którym początkowo przypada oś igielki busoli; w biegunach odchylonej o kąt α igielki busoli mieszczą się masy magnetyczne $+m'$ i $-m'$. Ostateczne położenie igielki busoli zależy od ustosunkowania się dwu par sił, działających na jej bieguny; jedna z tych par dana jest przez pole ziemskie i skierowana według południka magnetycznego ($m'H$ i $-m'H$); drugą daje magnes odchylający, którego pole dodaje się do pola ziemskiego; na rysunku oznacza się ona przez $m'F$ i $-m'F$, gdzie F jest natężeniem pola, wytworzonego przez magnes odchylający w miejscu, gdzie przypada igielka busoli. Robimy tu pewne uproszczenie, a mianowicie zakładamy, iż wymiary igielki są tak nieznaczne w porównaniu z jej odległością od magnesu odchylającego, że można przyjąć tę samą wartość natężenia dla wszystkich punktów, leżących w obrębie igielki, a zatem i to pole traktować jako jednorodne. Oczywiście jest w tem nieścisłość, ale możemy sobie na nią gwoili ułatwienia zadania, które rozwiązujemy w pierwszym przybliżeniu, pozwolić. Znajdźmy tedy to natężenie F dla punktu O , położonego w odległości r od środka magnesu odchylającego, i przyjmijmy tę samą wartość natężenia dla punktów, gdzie przypadają bieguny igły busoli. Odległość bieguna $+m$ magnesu odchylającego od O jest $r - \frac{l}{2}$; zatem natężenie pola w O , uwarunkowane tym biegunem, (patrz wzór (2) na str. 176)

$$+ \frac{m}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} \dots \dots \dots (6)$$

Odległość bieguna $-m$ magnesu odchylającego od O jest $r + \frac{l}{2}$; czyli natężenie pola, uwarunkowane przez biegun $-m$ w O , jest

$$- \frac{m}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \dots \dots \dots (7)$$

Cała wartość natężenia pola w O , uwarunkowana przez magnes odchylający, jest zatem (uwzględniając, że $ml = M$)

$$F = \frac{m}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{m}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} = \frac{2rlm}{\left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)^2} = \frac{2rlm}{r^4 \left(1 - \frac{l^2}{4r^2}\right)^2} =$$

$$= \frac{2M}{r^3 \left(1 - \frac{l^2}{4r^2}\right)^2} \dots \dots \dots (8)$$

Ponieważ l jest małe w porównaniu z r , możemy w pierwszym przybliżeniu zaniedbać ułamek $\frac{l^2}{4r^2}$ jako mały w porównaniu z 1 i wtedy otrzymujemy

$$F = \frac{2M}{r^3} \dots \dots \dots (9)$$

Z prostokąta sił, zbudowanego na rys. 801, przy biegunie igielki busoli mamy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{m'F}{m'H} = \frac{F}{H} = \frac{2}{r^3} \cdot \frac{M}{H} \dots \dots \dots (10)$$

Jak widzimy, wzór (10) wiąże wartość momentu magnetycznego M i składowej poziomej H , które tu tworzą pewien iloraz (we wzorze 5 one tworzą iloczyn) z kątem α , który się daje wyznaczyć z doświadczenia, i odpowiadającą jemu odległością r . Dla ściślejszego wyznaczenia kąta α odczytuje się go przy czterech nastawieniach: 1) w tem położeniu, co na rysunku, 2) po odwróceniu magnesu odchylającego biegunami w przeciwnie strony (r nie ulega zmianie), co powoduje wychylenie igielki busoli w przeciwną stronę względem południka magnetycznego; 3 i 4) przy umieszczeniu magnesu odchylającego po drugiej stronie busoli w tej samej od niej odległości r , przyczem raz biegun północny magnesu odchylającego zwrócony jest na wschód, południowy zaś na zachód, a drugi raz odwrotnie. Wyklucza się w ten sposób wpływ asymetrycznego ewentualnie położenia osi magnetycznej magnesu odchylającego oraz możliwej nieściśłości w odczytaniu położenia igielki busoli.

Serja wahań pozwala nam znaleźć ze wzoru (5) iloczyn MH , mianowicie:

$$MH = \frac{4\pi^2 I}{T^2} \dots \dots \dots (11)$$

Z serji odchyleń znajdujemy według wzoru (10)

$$\frac{M}{H} = \frac{r^3}{2} \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots (12)$$

Dzieląc lewą stronę przez lewą, prawą przez prawą wzorów (11) (12), otrzymujemy

$$H^2 = \frac{8\pi^2 I}{T^2 r^3 \operatorname{tg} \alpha}, \text{ skąd } H = \frac{\pi}{T} \sqrt{\frac{8I}{r^3 \operatorname{tg} \alpha}} \quad \dots \quad (13)$$

Mnożąc lewą stronę przez lewą i prawą przez prawą wzorów (11) i (12), otrzymujemy

$$M^2 = \frac{2\pi^2 I r^3 \operatorname{tg} \alpha}{T^2}, \text{ skąd } M = \frac{\pi}{T} \sqrt{2I r^3 \operatorname{tg} \alpha} \quad \dots \quad (14)$$

W ten sposób przez skombinowanie obserwacji wahań i odchyień wyznaczamy zarówno H jak M . Metodę tę podał nam cytowany wyżej uczony niemiecki Gauss.

Magnetometrami nazywają się wogóle przyrządy, służące do pomiarów natężenia magnetycznego. Magnetometry, przeznaczone do pomiaru składowej poziomej, budowane są tak, że możliwe jest przeprowadzanie obserwacji zarówno serji wahań, jak serji odchyień. Szczegółów, jak i poprawek, niezbędnych przy pomiarach (zwłaszcza poprawek na wpływ temperatury) podawać tu nie będziemy.

Jak już wiemy, wartość składowej poziomej w poszczególnych punktach ziemi jest różna, podobnie jak wartość innych elementów magnetyzmu ziemskiego; zmienia się ona przytem, jak i tamte, w czasie. Z tego, co zostało wyżej powiedziane, wynika, że w okolicach, bliżej biegunów ziemskich położonych, gdzie nachylenie magnetyczne naogół jest większe, niż w pasie równikowym, składowa pozioma jest naodwrot mniejsza; na biegunach magnetycznych, oczywiście, wartość składowej poziomej równa się zeru.

328. Zmiany elementów magnetyzmu ziemskiego.

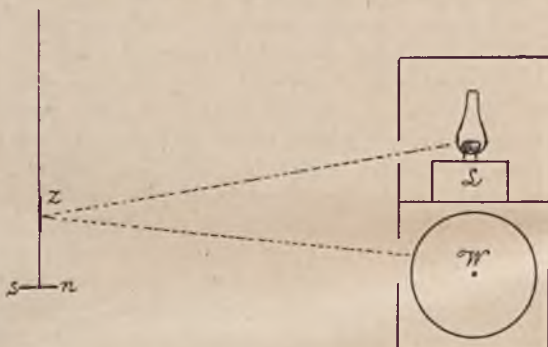
Mówiliśmy już wyżej, że natężenie pola magnetycznego ziemskiego w jednym i tem samym miejscu nie pozostaje stałe, lecz wciąż ulega zmianom; wszystkie zatem elementy magnetyzmu ziemskiego ustawicznie się zmieniają. Zmiany te można obserwować, dokonywając systematycznie powtarzanych w odpowiednich odstępach czasu pomiarów, albo lepiej — i tak się zwykle czyni — notując te zmiany przy pomocy t. zw. *warjometrów* i przyrządów samopiszących. Zasada budowy warjometrów jest prosta. Chcemy np. notować zmiany zбочenia; zawieszamy w tym celu na cienkiem włóknie kwarcowym nieskręconem magnes poziomy, zaopatrzony w lustro m , jak na rys. 802; magnes zmienia nieustannie kierunek swej osi, objawiając tem właśnie zmiany zбочenia magnetycznego. Snop światła z latarni L (schemat na rys. 803) pada na zwierciadło Z i odbija się w kierunku wału W , obracającego się na osi pod działaniem mechanizmu zegarowego i owiniętego

papierem fotograficznym (niezbędne soczewki i inne części szczegółowe na schemacie są opuszczone); snop światła kreśli w ten sposób na papierze swój ślad; gdyby lusterko Z było nieruchome (gdyby zatem zmiana zboczenia nie zachodziła), ślad ten byłby linią prostą; natomiast przy lusterku ruchomem ślad jest linią krzywą, z której przebiegu wnosić można o zachodzących zmianach zboczenia. Na podobnej zasadzie oparte jest notowanie niestannych zmian innych elementów magnetyzmu ziemskiego.

Rozróżniamy zmiany dzienne, roczne i wiekowe; zmianami dziennymi nazywają się takie, które się poniekąd powtarzają w okresie jednej doby; zaznaczają się one wyraźniej podczas dnia, niż podczas nocy. Tak np. naogół zboczenie zachodnie u nas wzrasta, w miarę jak słońce wznosi się ponad poziomem, osiągając maximum około godz. 2 po południu, i zmniejsza się ku wieczorowi. Zmiany te jednak nie zachodzą codziennie jednakowo i są większe w lecie, niż w zimie. Zmiany o okresie rocznym



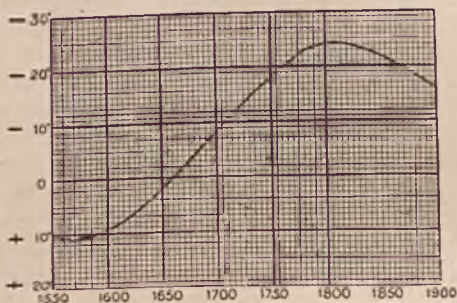
Rys. 802.



Rys. 803.

noszą nazwę rocznych; zaznacza się tu również związek między nimi a położeniem słońca względem ziemi. Notując wszystkie kolejne wartości któregośkolwiek elementu z danych przyrządów samopiszących, w które są zaopatrzone obserwatoria magnetyczne, obliczamy wartości średnie tych elementów dla każdej godziny poszczególnej doby, dla każdej doby, dla każdego miesiąca, wreszcie dla całego roku. Okazuje się, że nie tylko w ciągu całego roku każdy element ulega wymienionym już zmianom, ale i średnie wartości roczne również z roku na rok się zmieniają. Są to t. zw. zmiany wiekowe. Czy te zmiany wiekowe są również okresowe, nie możemy tego z całą stanowczością powiedzieć, jakkolwiek dane dotychczasowe pozwalają w pewnej mierze tak przypuszczać. Obserwacje zjawisk magnetyzmu ziemskiego trwają jednak zbyt krótko, by się dało taki okres wykryć; tak np. składową poziomą uniemy mierzyć dopiero od niespełna stu lat, że zaś dla dania odpowiedzi na pytanie, dotyczące okresowości, potrzeba znacznie dłuższego trwania obserwacji, świadczyć może wykres (rys. 804), który wyobraża zmiany zboczenia w Londynie, poczynając od r. 1550 do r. 1900.

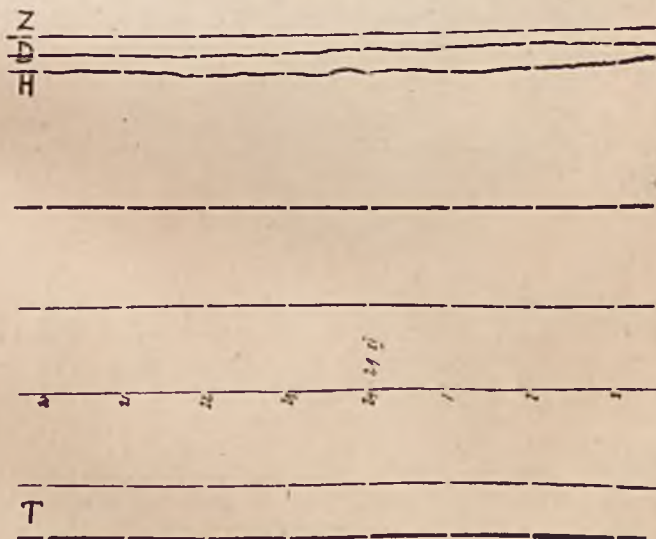
Wprawdzie liczby podane nie są tam równej wartości, obserwacje bowiem dawniejsze nie dorównywały dokładnością dzisiejszym, przytem dawniejsze oznaczają wyniki poszczególnych obserwacji, gdy



Rys. 804.

najnowsze przedstawiają już wartości średnie roczne; niemniej możemy z wykresu powyżać ogólne wyobrażenie o przebiegu tych zmian wiekowych zboczenia.

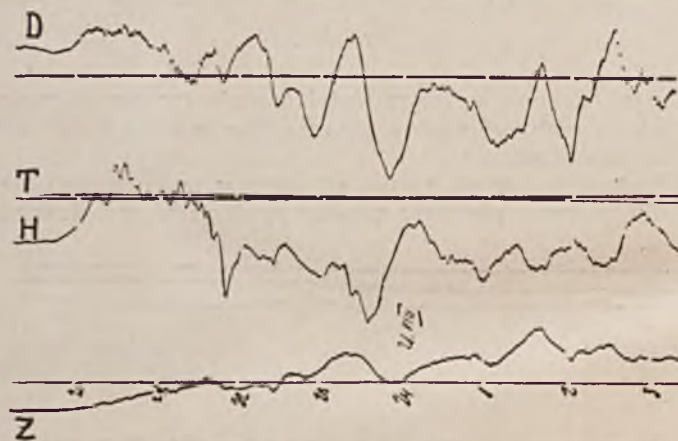
Poza przytoczonymi zmianami elementów magnetyzmu ziemskiego dają się obserwować niekiedy wielkie zakłócenia w ich wartościach,



Rys. 805.

wyrażające się w prędko następujących po sobie wyjątkowo znacznych zmianach tych wartości. Mówimy wtedy o *burzy magnetycznej*. Tak np. gdy wahania dzienne wartości zboczenia zachodzą naogół w grani-

cach kilku do kilkunastu minut, podczas burzy magnetycznej wahania te osiągają, a czasem nawet przekraczają cały stopień, w wyjątkowych zaś wypadkach nawet dwa stopnie. O zmianach elementów magnetyzmu ziemskiego podczas dni „spokojnych“ i „zakłóconych“ dają wyobrażenie rys. 805 i 806 *), wyobrażające odpowiednie krzywe przyrządów samopiszących. Burze magnetyczne nie idą w parze z burzami atmosferycznymi; bywa, że podczas najsilniejszych burz atmosferycznych daje się obserwować bardzo spokojny przebieg zmian magnetycznych; natomiast zdarza się, że podczas najpiękniejszej pogody szaleje burza magnetyczna. Są jednak inne zjawiska, z którymi w parze idą zawsze burze magnetyczne. Mianowicie jednocześnie z nimi stwierdzamy zawsze zwiększanie się zjawiska plam na słońcu, w okolicach zaś podbiegunowych daje się obserwować przepiękne zjawisko zorzy biegunowej, o której będziemy mieli sposobność mówić później. Staty-



Rys. 806.

tyka wykazuje, że plamy słoneczne nie zjawiają się co roku w jednakowej mniej więcej ilości; są lata o tak zw. zmniejszonej działalności słonecznej, inne zaś o zwiększonej. Co 11-cie mniej więcej lat (właściwie trochę więcej, niż 11) obserwujemy maximum tworzenia się tych plam, poczem działalność słoneczna słabnie, również liczba plam zmniejsza się do pewnego minimum i t. d. Okazuj się, że właśnie w latach o wzmożonej działalności słonecznej liczba burz magnetycznych oraz zórz biegunowych jest również największa. Zważywszy tę okoliczność, jak również wskazany fakt zależności zmian elementów magnetyzmu ziemskie-

*) Na krzywych widzimy przerwy godzinne. Linje proste, t. zw. podstawy, otrzymane są przez odbicie światła od specjalnie umieszczonych w warjometrach zwierciadełek nieruchomych; w stosunku do tych podstaw ocenia się zachodzące zmiany, zaznaczane przez lusterka ruchome. Krzywa *T* przedstawia zmiany temperatury (ma to znaczenie dla *H* i *Z*), krzywe te kreśli mieszczący się w warjometrach termograf.

go od położenia słońca nad poziomem podczas zmian dnia i nocy, a także położenia słońca względem ziemi podczas zmian pór roku, musimy stwierdzić, że istnieje jakiś głęboki związek między pewnymi procesami, rozgrywającymi się na słońcu, a zjawiskiem magnetyzmu ziemskiego.

329. Mapy magnetyczne. Międzynarodowy charakter badań magnetyzmu ziemskiego.

Mówiliśmy wyżej o znaczeniu praktycznym wartości zбочenia magnetycznego i sporządzaniu map zбочenia magnetycznego. Sporządza-



Rys. 807.

ją się również mapy innych elementów magnetyzmu ziemskiego, w ten sposób bowiem uzyskuje się przejrzysty obraz zjawiska i ułatwia się w niem orientację. Oczywiście, podane na tej czy innej mapie wartości odpowiadają jakiemuś określonemu i jednemu dla wszystkich czasowi, np. są to średnie wartości roczne na ten czy inny rok. Ponieważ jednocześnie niesposób jest we wszystkich możliwych miejscach na ziemi dokonać pomiaru jakiegokolwiek elementu, rzecz wykonywa się inaczej. Mianowicie pomiary są robione kolejno w różnych punktach, poza tem w specjalnie zbudowanych i urządzonych do tego obserwatoriach magnetycznych notowane są przy pomocy przyrządów samopiszących nieustanne zmiany elementów. Na podstawie tych danych obserwatoriów magnetycznych dokonywa się t. zw. *redukcji* rezultatów pomiarów, t. j

sprowadzenia otrzymanych w różnych czasach wartości do jednego jakiegoś czasu.

Na mapach magnetycznych wykreślają się zazwyczaj pewne charakterystyczne krzywe. Np. na mapie zboczeń prowadzone są krzywe, łączące wszystkie punkty, dla których zboczenie ma jedną i tę samą wartość — krzywe takie nazywają się *izogonami*. Izogona, przechodząca przez punkty, gdzie zboczenie równa się zeru, nosi nazwę *agony*.

Na rys. 807 i 808 widzimy izogony półkuli północnej i południowej. Przecinają się one w dwu punktach na północy i dwu na południu, a mianowicie: na biegunach geograficznych i na biegunach magnetycznych. Jest to zrozumiałe. Wprawdzie na biegunach geograficz-



Rys. 808.

nych igła magnesowa ustawia się w określonym kierunku, wskazując swą osią ku biegunowi magnetycznemu, ale wszak przecinają się tam wszystkie południki astronomiczne (geograficzne) — pojęcie zboczenia staje się zatem nieokreślone; na biegunach magnetycznych znowu składowa pozioma równa się zeru, zatem magnes, posiadający swobodę ruchów w płaszczyźnie poziomej, ustawiony osią w jakimkolwiek kierunku, pozostaje w równowadze obojętnej, a więc, mimo że dla tego miejsca kierunek południka geograficznego jest zupełnie określony, zboczenie jest wielkością nieokreśloną — może ono mieć wszelkie możliwe wartości. Przebiegiem swym izogony w pewnej mierze (ale tylko w pewnej!) przypominają przebieg południków geograficznych. Jak widzimy na rys. 807 i 808, są obszary, gdzie izogony tworzą krzywe zamknięte (np. we wschodniej części Azji — objawiają się w tem właśnie anomalje magnetyczne, o których wspominaliśmy wyżej).

Rys. 809 i 810 pokazują nam przebieg innych linii, które kreśliły na mapach nachylenia magnetycznego; linje te przechodzą przez punk-



Rys. 809.

ty, w których nachylenia mają jednakowe wartości, i nazywają się *izoklinami*. Przebiegają one na podobieństwo równoleżników względem

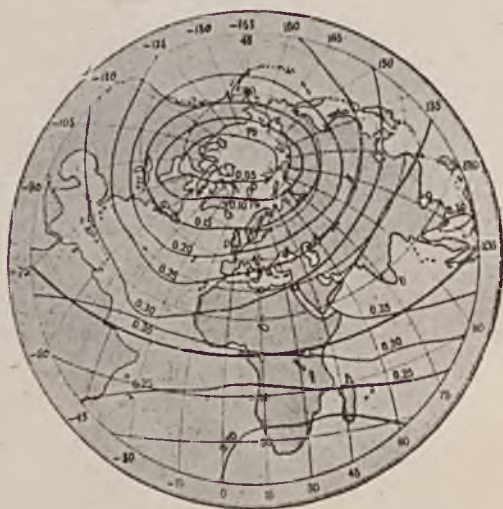


Rys. 810.

kierunku osi magnetycznej ziemskiej. Widzimy tam, jak izoklina 0° , t. j. *równik magnetyczny* położony jest względem równika geograficznego.

Krzywe, łączące na mapie punkty, w których wartości natężenia pola magnetycznego są równe, nazywają się *izodynamami*. Można kreślić izodynamy dla całkowitego natężenia albo dla tej czy innej składowej. Na rys. 811 i 812 mamy izodynamy H dla obu półkul; widzimy tam miejsca w okolicach podbiegunowych o małych wartościach H , jak również względnie wysoką wartość (0,37) na krzywej zamkniętej w okolicach równikowych.

Powyższe mapy, rzecz prosta, przedstawiają zgruba tylko przebieg *linij izomagnetycznych* (tak się wszystkie podane wyżej linje ogólnie nazywają). Kreśląc je szczegółowiej dla mniejszych obszarów, otrzymujemy bezporównania bardziej zawiły ich przebieg z wyraźnie uwidocznionymi anomaljami miejscowymi. Na takich szczegółowych ma-



Rys. 811.

pach zawsze się zaznacza czas, dla którego wszystkie podane wartości są ważne, a więc np. podaje się, że są to wartości średnie roczne dla tego, czy innego roku, albo, że wartości te są obliczone dla momentu, stanowiącego początek tego a tego roku. Powtarzamy, że wobec niestannych zmian, którym podlega pole magnetyczne ziemskie, zestawianie danych, dotyczących wartości któregośkolwiek z jego elementów w różnych miejscach z różnych czasów, byłoby zgoła nieracjonalne. Obraz poprawny stanu rzeczy osiągnąmy wtedy jedynie, gdy podajemy te wszystkie wartości dla różnych miejsc po *zredukowaniu* ich we wspomniany już sposób do jakiegoś określonego czasu.

Podaliśmy wyżej pewne względy praktyczne, dla których badanie magnetyzmu ziemskiego jest pożądane. Bezporównania większe znaczenie ma to badanie ze stanowiska naukowego. Istnieje związek, jak już wspominaliśmy, między zjawiskiem magnetyzmu ziemskiego a zja-

wiskiem zorzy biegunowej, plamami na słońcu oraz promieniowaniem słonecznym. To, co nazywamy magnetyzmem ziemskim, jest zjawiskiem, obserwowanem na ziemi. Wszakże mamy wszelkie dane do twierdzenia, że analogiczne pole magnetyczne istnieje na słońcu, a zatem i na gwiazdach wogóle, jak również na planetach; że bodaj to zjawisko wiąże się w jakiś nieznanym nam jeszcze dokładnie sposób z ruchem obrotowym tych ciał. Mamy więc tu do czynienia ze zjawiskiem *kosmicznem* w pełnym znaczeniu tego słowa i nic dziwnego, że poznanie tego zjawiska naukę nęci. Z drugiej strony rzecz jest bardzo niełatwa i dotychczas nie udało się nam jej opanować. Nie mamy dotychczas jeszcze wykończonej teorii tego zjawiska; usiłując zaś stworzyć taką, musimy ją oprzeć na danych, wynikających z obserwacji, których terenem jest cały glob



Rys. 812.

ziemski. To też badania magnetyzmu ziemskiego przybrały charakter zagadnienia międzynarodowego. Wszystkie kraje cywilizowane pobiudowały u siebie obserwatoria magnetyczne, które energicznie posuwają pracę w tej dziedzinie, bogatsze zaś narody organizują poza tem ekspedycje do krajów mniej ucywilizowanych i mniej dostępnych i tam prowadzą badania. Najczynniejsi są Amerykanie; w Stanach Zjednoczonych powstał z fundacji Carnegie'go *) wielki instytut badawczy, który między innymi działaniami posiada dział magnetyzmu ziemskiego i organizuje najwspanialsze wyprawy magnetyczne. Polska, która w czasie, gdy poczęła się kształtować współpraca międzynarodowa w danej dziedzinie, znajdowała się pod trzema zaborami, zdobyła się na przyłączenie się do tej pracy, dając dowód przed całym światem, iż mimo

*) Czyt. Carnegiego.

niewolę polityczną potrafi kroczyć w jednym szeregu z innymi narodami kulturalnymi. Podczas gdy we wszystkich państwach powstawały obserwatoria magnetyczne ze specjalnie na to przeznaczonych zasiłków rządowych, w Polsce, która swego rządu nie miała, powstało ze składek i ofiar publicznych, a więc drogą wysiłku społecznego, Obserwatorium Magnetyczne w Świdrze pod Warszawą, zaopatrzone we wszystkie niezbędne środki obserwacyjne. Obserwatorium nasze tworzy jedno z ogniw sieci międzynarodowej, która ogółem obejmuje narazie około 60-ciu obserwatoriów.

Ćwiczenia i zadania.

511. Ustawiamy pionowo zdala od wszelkich przedmiotów żelaznych i stalowych wyżarzony uprzednio pręt z żelaza miękkiego i uderzamy go kilkakrotnie drewnianym młotkiem. Przez zbliżenie do pręta busoli kieszonkowej przekonywamy się, że pręt działa jak magnes, przyczem na dolnym jego końcu mamy biegun północny. Wytlumaczyć zaobserwowane zjawisko?

512. Mamy na stole inklinator, ustawiony w płaszczyźnie południka magnetycznego. Notujemy położenie igły inklinatora. Co się stanie z tą igłą, gdy na stole w tej samej płaszczyźnie pionowej, w której znajduje się igła, położymy w niewielkiej (lecz niezbyt małej!) odległości od inklinatora pręt z żelaza miękkiego: 1) na północ od inklinatora, 2) na południe od inklinatora? Dlaczego czynimy zastrzeżenie, by odległość między prętem a igłą inklinatora nie była zbyt mała?

513. Statek drewniany kierowany jest według busoli. Pomiędzy busolą a przednim końcem statku mieści się wysoki maszt żelazny. Jakiego rodzaju zakłócenia wywołuje ten maszt we wskazaniach busoli, gdy statek płynie w kierunku tej czy innej strony świata: 1) na półkuli północnej, 2) na półkuli południowej.

514. Pręt żelazny, zbliżony do igły busoli, przyciąga jednym swym końcem biegun północny igły, odpycha zaś południowy. Chcemy zdecydować, czy pręt namagnesowany jest jedynie indukcyjnie w polu ziemskim, czy też posiada trwałe ślady magnetyzmu. Jak to możemy uczynić?

515. W jakim położeniu winien pozostawać pręt z żelaza miękkiego, by indukcyjne działanie nań pola ziemskiego było 1) najsłabsze, 2) najsilniejsze?

516. Magnesy, które służą do wskazywania kierunku południka magnetycznego, zaopatrzone są w urządzenie, pozwalające zawieszać je lub osadzać na ostrzu w dwu położeniach, z których jedno osiąga się z drugiego przez obrót o 180° dookoła osi podłużnej magnesu. Na rys. 813 widzimy ponad kołem z podziałką igiełkę busoli w dwu takich położeniach — drugie różni się od pierwszego tem, że dolna powierzchnia igły staje się górną i odwrotnie. W tych dwu położeniach wskazania igły są naogół niejednakowe, co świadczy, że oś magnetyczna igły nie schodzi się z jej osią geometryczną. Wytlumaczyć, że średnie z obu wskazań igły daje prawdziwy kierunek jej osi magnetycznej, a zatem wskazuje kierunek południka magnetycznego.

517. Wytlumaczyć, jak można uniknąć błędu, wynikającego przy wyznaczeniu nachylenia z niezgodności osi magnetycznej i geometrycznej igły? (por. zad. 516).

518. Wyznaczamy czas wahań magnesu, zawieszono go tak jak na rys. 799, w zacienionym miejscu w ogrodzie zdala od wszelkich zabudowań; znajdujemy na czas wahań wartość 4,67 sek. Powtarzamy tę samą obserwację z tym samym magnesem i w tej samej temperaturze w budynku i znajdujemy na czas wahań wartość 4,71 sek. Zakładając, że nie popełniliśmy błędu przy obserwacji, czym możemy sobie wytłumaczyć daną różnicę wyników?

519. Pomiar bezwzględny składowej poziomej w danym miejscu daje na określony czas 0,198 I'; jak można, posługując się jedynie metodą wahań, wyznaczyć wartość składowej poziomej w innym miejscu?

520. Jak można rozwiązać poprzednie zadanie (519), posługując się jedynie metodą odchylenia?

521. Czy przy rozwiązywaniu zadań 519 i 520 potrzebna jest znajomość zmian H , zachodzących nieustannie w czasie?

522. W magnetometrze prostej konstrukcji, jak na rys. 800, magnes odchylający ma bieguny, odległe o 10 cm jeden od drugiego; odległość środka magnesu odchylającego od środka igielki busoli wynosi 80 cm. Igielka busoli zostaje wychylona



Rys. 813.

o 8° . Jaka jest masa magnetyczna każdego bieguna magnesu odchylającego, jeżeli w danym miejscu $H = 0,201$ gausów?

523. Czy igielka busoli może być osadzona na ostrzu dokładnie tem miejscem, gdzie przypada jej środek ciężkości (uwzględnić zjawisko nachylenia magnetycznego)? Czy przy sporządzaniu busoli należy brać pod uwagę, w jakich szerokościach geograficznych będzie ona używana?

524. Pomiar składowej poziomej w pewnym miejscu dał wartość $H = 0,186$ I', pomiar zaś nachylenia, dokonany tam jednocześnie, dał wartość $I = 66^\circ 52'$. Jaka była w tym czasie wartość całkowitego natężenia magnetyzmu ziemskiego w danym miejscu?

525. Magnesujemy przez pocieranie pręt stalowy i po każdym 3-ch potarciach kładziemy go w charakterze magnesu odchylającego na desce magnetometru (rys. 800) zawsze w tem samym miejscu. Otrzymujemy przytem kolejne odchylenia igły busoli: 12° , 16° , $17^\circ 5'$, 18° , $18^\circ 2'$. Czem sobie tłumaczymy takie wyniki obserwacji? Dlaczego względny wzrost tych wychyleń jest coraz mniejszy? Zrobić wykres wartości masy magnetycznej poszczególnego bieguna tworzono go przez nas magnesu, w miarę jak dokonywamy namagnesowania?

526. Jak można w prosty sposób, posługując się igielką magnesową, osadzoną na ostrzu, wykazać różne wartości natężenia w różnych miejscach pola, wytworzonego przez jakikolwiek magnes?

527. Jak należy postępować, by zadanie 526 rozwiązać w sposób bardziej ścisły, podając dokładniejsze wyniki liczbowe?

528. W pewnej okolicy dokonywane są pomiary nachylenia magnetycznego w punktach, odległych o 5 km. jeden od drugiego; znaleziono szereg następujących liczb: $66^{\circ}42'$, $66^{\circ}40'$, $66^{\circ}40'$, $66^{\circ}43'$, $67^{\circ}52'$, $66^{\circ}41'$. Czem może być wytłumaczona niezwykle wielka wartość $67^{\circ}52'$ w porównaniu z resztą?

529. Pragniemy drogą porównawczą, stosując metodę wahań, znaleźć wartość H w pewnym miejscu, podczas gdy w drugim miejscu wartość ta jest nam znana. Podczas przejazdu z jednego z tych miejsc do drugiego upuściliśmy przez nieostrożność magnes, przez co uległ on poważnemu wstrząśnieniu. Czy pomiar może dać wynik zadowalający? Dlaczego nie?

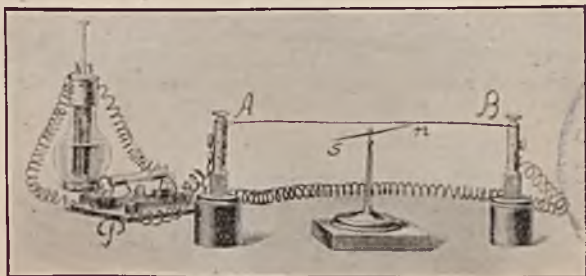
530. Pomiaru składowej poziomej dokonywa się zawsze w cieniu (na otwartym miejscu pod parasolem, nie zawierającym części żelaznych). Pomiar zboczenia lub nachylenia nie wymaga tej ostrożności. Dlaczego?

ROZDZIAŁ VII.

POLE MAGNETYCZNE PRĄDU ELEKTRYCZNEGO.

330. Pole magnetyczne dokoła prostoliniowego przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny.

W roku 1820 fizyk duński, Hans Christian Oersted, dokonał jednego z epokowych odkryć; stwierdził mianowicie, że dokoła przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny, istnieje pole magnetyczne, powstające, zmieniające się oraz znikające wraz z tym prądem. W ten sposób został przerzucony pierwszy most pomiędzy dziedziną zjawisk magnetycznych a dziedziną zjawisk elektrycznych i wyraźnie zarysował się fakt, że obie te dziedziny tworzą właściwie jedną wielką dziedzinę zjawisk elektro-magnetycznych.



Rys. 814.

Aby powtórzyć doświadczenie Oersteda, posługiwać się można urządzeniem, przedstawionem na rys. 814.

Puszczamy prąd (np. z ogniwa Greneta) przez rozpięty poziomo w płaszczyźnie południka magnetycznego drut, pod którym mieści się wsparta na ostrzu igielka magnesowa. Z chwilą, gdy to czynimy, igielka wychyla się ze swego pierwotnego położenia i po kilku wahanich ustawia się pod pewnym kątem względem tego położenia; po przerwaniu prądu igielka staje znowu równoległe do rozpiętego nad nią drutu,

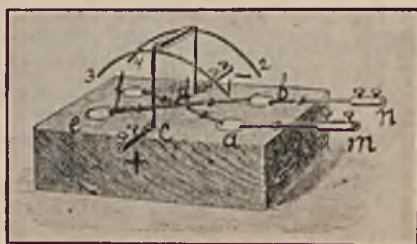
t. j. wraca do płaszczyzny południka magnetycznego. Gdy kierunek prądu w drucie przypada od *A* do *B*, igielka odchyła się tak, jak to widzimy na rysunku: biegun *n* odchyła się w stronę, przeciwną tej, z której patrzymy na rysunek; jeżeli zapomocą przełącznika *P* zmieniamy kierunek prądu w drucie ^{*)}, czyniąc w *B* potencjał wyższym niż w *A*, igielka wychyla się w stronę przeciwną tej, którą mamy na rysunku.

Bardzo obrazowo ujmuje to zjawisko t. zw. reguła Ampère'a, ustalająca związek między kierunkiem prądu w przewodniku a kierunkiem wychylenia igielki magnesowej. Reguła ta brzmi: w o b r a z i m y s o b i e p ł y w a k a, p ł y n ą c e g o w z d ł u ż p r z e w o d n i k a w r a z z p r ą d e m i z w r ó c e n e g o t w a r z ą w s t r o n ę i g i e ł k i; biegun północny igielki odchyła się względem pływaka na lewo. Słuszność tej bardzo praktycznej reguły łatwo jest sprawdzić w doświadczeniu, przedstawionem na rys. 814.

Rozporządzając odpowiednimi środkami i zwiększając natężenie prądu w przewodniku *AB* (rys. 814), o czym poinformować nas może włączony w obwód ampermetr (wystarczy np. wziąć zamiast jednego ogniwa baterję z dwu lub więcej ogniw), stwierdzamy, że się zwiększa przytem wychylenie igielki.

Dokoła więc przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny, istnieje pole magnetyczne; działają tu na igielkę siły, zmuszające ją jak-

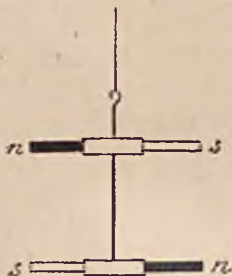
^{*)} Z przełącznikiem podobnego typu poznaliśmy się w doświadczeniu, wyobrażonem na rys. 750. Tutaj posiada on dodatkowe urządzenie, wyjaśnione na rys. 815; mieszczące się w rogach podstawki naczynka z rtęcią są naukos połączone ze sobą drucikami, nie dotykającymi jeden drugiego. Przypuścimy, że biegun dodatni źródła prądu połączony jest z zaciskiem *c*, ujemny zaś z zaciskiem *d*. Jeżeli mostek przerzucimy tak, że koniec *1* metalowego łuku zanurzy się w rtęci naporstka *a*, zaś koniec *2* drugiego łuku metalowego — w naporstku *b*, prąd będzie szedł od *c* do *a*, stamtąd przez zacisk *m* do połączonego z przełącznikiem przyrządu (np. do końca *A* drutu poziomego *AB* na rys. 814), następnie od tego przyrządu (np. od końca *B* drutu *AB*) przez zacisk *n* i rtęć w *b* do zacisku *d*, połączonego z ujemnym biegunem źródła



Rys. 815.

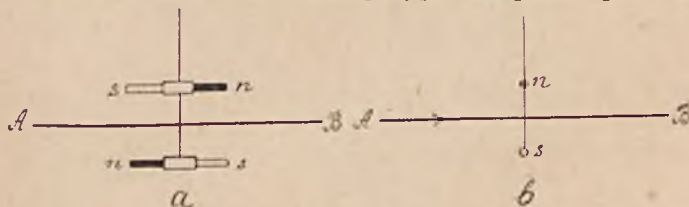
prądu. Nie zmieniając połączeń, przerzucimy mostek, by końce *1* i *2* łuków metalowych wynurzyły się z naporstków *a* i *b*, natomiast końce *3* i *4* zanurzyły się w naporstkach *e* i *f*. Wtedy prąd pójdzie z *c* do *e*, stamtąd przez drucik do *b*, później z *n* (nie z *m*) do przyrządu, potem znów od *m* (nie od *n*) przez *a* drucikiem do *f*, stamtąd zaś do *d*, t. j. do ujemnego bieguna źródła. Słowem, w ten sposób przez przerzucanie mostka osiąga się zmianę kierunku prądu w przyrządzie, złączonym z zaciskami *m* i *n*.

gdyby do ustawienia się prostopadle względem drutu, w którym płynie prąd; przeciwdziałają temu siły pola magnetycznego ziemskiego, usiłujące utrzymać igielkę w płaszczyźnie południka magnetycznego. Większe lub mniejsze wychylenie igielki jest wynikiem działania wypadkowego jednych i drugich sił.



Rys. 816.

Aby się uniezależnić od wpływu pola magnetycznego ziemskiego można użyć t. zw. *astatycznej* igielki magnesowej, przedstawionej na rys. 816; składa się ona z dwu magnesów, mających równe momenty magnetyczne iłączonych w ten sposób, że są one ustawione osiami magnetycznymi równoległe, biegunami zaś zwrócone w przeciwne strony. Taki układ, zawieszony na włóknie rozkręconem, pozostaje w polu magnetycznym ziemskim w każdym położeniu w równowadze obojętnej i nie ma dążenia do ustawienia się w płaszczyźnie południka magnetycznego (chyba, że momenty magnetyczne magnesów nie są równe; dlaczego? — patrz wzór (3) na str. 200). Jeżeli powtórzymy doświadczenie, przedstawione na rys. 814, używając astatycznego układu igieł, przytem tak, by jedna z igieł przypadała ponad przewodnikiem



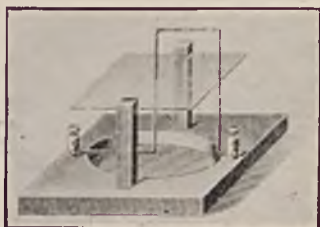
Rys. 817.

AB, druga zaś pod nim (rys. 817a), to po puszczeniu prądu w kierunku, wskazanym strzałką, układ igieł wykręci się tak, że prawe końce obu magnesów zbliżą się do patrzącego na rysunek, lewe zaś oddalą się (zgodnie z regułą Ampère'a), igły zaś ustawią się prostopadle do płaszczyzny rysunku (rys. 817b)*). Wskazuje to wyraźnie, że linje pola

*) Przy ruchach igły ma tu oczywiście wpływ skręcanie się przytem włókna; dobierając odpowiednio włókno, można uczynić ten wpływ niedostrzegalnym. Układ astatyczny igieł daje się również osadzić na ostrzu — niema wtedy tamtego wpływu, natomiast jest wpływ tarcia.

magnetycznego dokoła przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny, leżą w płaszczyznach, prostopadłych do przewodnika.

Posuniemy się dalej jeszcze w poznaniu tego zjawiska, uciekając się do wytwarzania widma magnetycznego w rozpatrywanem teraz polu.



Rys. 818.



Rys. 819.

W tym celu używamy przyrządu (rys. 818), który pozwala rzucić obraz otrzymany na tablicę i uwidocznić zjawisko większej naraz liczbie osób. Przyrząd składa się z poziomej płyty szklanej, mającej otwór, przez który przechodzi pionowy pręt metalowy, stanowiący część przewodnika, przez który płynie prąd. Płytę posypujemy przed puszczeniem prądu opilkami żelaznymi, które się rozmieszczają bezładnie; po puszczeniu prądu stukamy zlekką palcem po płycie i wtedy opilki układają się w wyraźne linje kołowe, których wspólny środek przypada w miejscu, gdzie przez płytę przetknięty jest pręt metalowy (rys. 819) *).



Rys. 820.



Rys. 821.

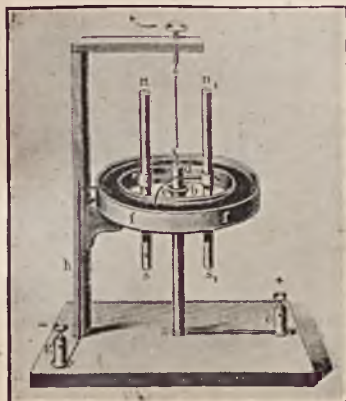
Prościej można osiągnąć to samo, przetykając przez otwór w poziomie trzymanym kawałku tektury pionowy pręt, przez który następnie puszczaemy prąd.

Jeżeli prąd skierowany jest w pręcie z góry na dół, jak na schematycznym rys. 820, kierunek linii pola (zgodnie z regułą Ampère'a) jest

*) Do doświadczenia użyć należy prądu znacznego natężenia (10—15 amperów).

taki, jak to również widzimy na rys.; po każdej z tych linii w stronę strzałki poruszały się swobodny pojedynczy biegun północny, o ileby się dał otrzymać i w danem polu umieścić; w stronę wręcz przeciwną poruszały się swobodny pojedynczy biegun południowy. Swobodnie obracające się na ostrzach, przypadających na którejkolwiek z tych linii, igielki magnesowe, zwracały się zatem swemi biegunami północnymi w stronę strzałek, południowymi — w stronę przeciwną (rys. 821). W podobny właśnie sposób układają się w zamknięte łańcuchy opilki żelazne, których poszczególne okruszyny magnesują się indukcyjnie w polu prądu i zachowują się jak małe magnesy.

Ruch kołowy biegunów magnetycznych dokoła przewodników z prądem daje się urzeczywistnić doświadczalnie przy pomocy następującego przyrządu (rys. 822). Pionowy pręt metalowy *ab* zakończony jest u góry niewielkiem naczynkiem, wypełnionem rtęcią; pręt *ab* połączo-



Rys. 822.

ny jest z zaciskiem *c*. Na włóknie jedwabnym wisi ponad prętem walec mosiężny *d*, mający u spodu drucik, zanurzony w rtęci, lecz nie dotykający dna naczynka z rtęcią. Do walca *d* przylutowany jest poza tem drucik *e*, wygięty tak na końcu ku dołowi, że się zanurza w rtęci wypełniającej rynienkę kołową *f*, nie dotykając wszakże ścian rynienki. Do rtęci, mieszczącej się w rynience, zanurzony też jest koniec drutu *h*, którego drugi koniec połączony jest z zaciskiem *g*. Podstawa przyrządu, rynienka *f*, jako też słup, podtrzymujący rynienkę, nie są, oczywiście, metalowe — zrobione są z ebonitu lub drzewa, tak że prąd elektryczny przy połączeniu zacisków *c* i *g* z biegunami źródła ma drogę poprzez przewodniki metaliczne (*cabdehg*). Walec *d* połączony jest jeszcze z zaciskami, w których umocowane są 2 symetrycznie względem *ab* położone magnesy pionowe, zwrócone jednoimiennymi biegunami ku górze i ku dołowi. Jak widać z opisu i rysunku, magnesy są zawieszane tak, że mają swobodę ruchów i mogą się obracać dokoła osi, któ-

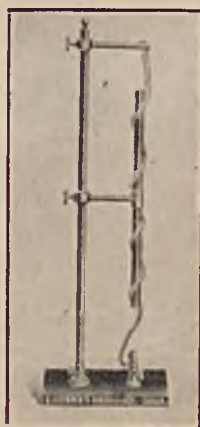
rej kierunku wyznacza włókno jedwabne, utrzymujące całą część przyrządu, na nim zawieszoną. Z chwilą, gdy puszczaemy przez pręt *ab* prąd, tworzą się dokoła niego kołowe linje pola magnetycznego, bieguny zaś *s* i *s*₁ podlegające zgodnemu co do kierunku działaniu sił tego pola, zaczynają się poruszać — przy wskazanym na rysunku kierunku prądu — w stronę uwidoczną strzałką (co do biegunów *n* i *n*₁ przyjąć można, że, ze względu na odległość, leżą one poza granicą dostrzegalnego działania prądu. Jeżeli zmienimy połączenie lub przy pomocy przełącznika skierujemy prąd w pręcie *ab* w stronę przeciwną (z góry na dół) magnesy poczną się obracać również w stronę przeciwną (przeciwną kierunkowi wskazówek zegara, o ile na przyrząd patrzeć będziemy z góry).

Zatem pole magnetyczne dokoła przewodnika, przez który przepływa prąd elektryczny, jest tego rodzaju, iż znajdujące się w tem polu i posiadające swobodę ruchów magnesy zajmą określone względem przewodnika położenie. Podkreślić należy, iż chodzi tu o wzajemne ustosunkowanie się kierunków osi tych magnesów oraz kierunku prądu *i*, gdyby układ doświadczenia był taki, że magnes, względnie magnesy były unieruchomione, zaś przewodnik z prądem ruchomy, należy oczekiwać, iż przewodnik ten zmieniać będzie w taki sposób swoje położenie, by zadość uczynić wymaganemu ustosunkowaniu się wspomnianych kierunków.

Następujące doświadczenie pomysłu M. Faraday'a w najprostszy bodaj sposób wykazuje ruch obrotowy przewodnika z prądem dokoła



Rys. 823.



Rys. 824.

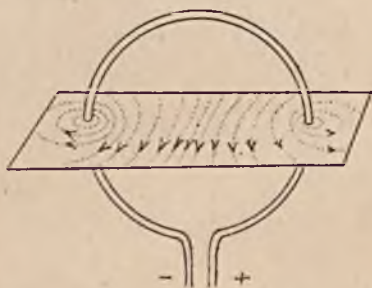
nieruchomego bieguna magnetycznego (rys. 823). Pionowo ustawiona rurka szklana zamknięta jest u dołu i góry korkami. Przez dolny korek przetknięty jest magnes, którego jeden biegun przypada wewnątrz rurki; poza tem przez korek przechodzi drucik, sięgający w głąb rtęci, pokrywającej powierzchnię korka. Przez górny korek przetknięty jest

drucik z uszkiem, na którym zawieszony jest inny drucik, spoczywający ukośnie w rurce i zagłębiony swym dolnym końcem w rtęci. Gdy druty, przetknięte przez korki, łączymy z biegunami baterji, a w ten sposób puszczamy przez drucik, zawieszony wewnątrz rurki i mogący się tam poruszać, prąd elektryczny, drucik ten poczyna swym dolnym końcem obiegać dokoła znajdującego się w rurce bieguna magnesu. Proponujemy czytelnikowi uzasadnić, opierając się na regule Ampère'a, dlaczego przy tem, co na rysunku, położeniu biegunów $+$ i $-$ źródła prądu, ruch drucika dokoła bieguna s magnesu zachodzi w kierunku, przeciwnym ruchowi wskazówek zegara, o ile patrzymy na przyrząd z góry.

Bardzo efektowne jest inne doświadczenie, wykazujące zachowanie się ruchomego przewodnika z prądem względem nieruchomego magnesu (rys. 824). Przez zaciski, widoczne u dołu przyrządu, doprowadzamy prąd do wiotkiej taśmy metalowej, zwisającej obok pionowo ustawionego magnesu. Z chwilą puszczenia prądu taśma nawija się na magnes; gdy zaś zapomocą przełącznika (rys. 815) zmieniamy kierunek prądu w taśmie, odwija się ona i nawija na magnes w kierunku przeciwnym względem poprzedniego.

331. Pole magnetyczne dokoła kołowego przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny. Solenoid.

Zginamy drut, nadając mu kształt koła i przetykając go jednocześnie przez 2 otwory w płycie szklanej lub tekturze, jak to wyobrażone jest schematycznie na rys. 825.

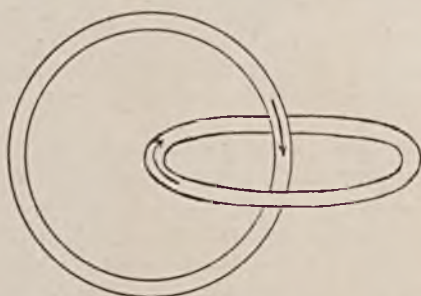


Rys. 825.

Posypujemy szkło (tekturę) opiłkami żelaznymi i puszczamy przez drut prąd elektryczny. Opiłki układają się tak, jak to widzimy na rysunku. Linje pola nie są tu kołami, niemniej jednak krzywymi zamkniętymi, otaczającymi przewodnik. Zwroty tych linii są przeciwne przy jednym i drugim otworze w szkłe (tekturze), przez które przechodzi drut — w jednym z tych miejsc prąd idzie z pod płytki ponad nią, w dru-

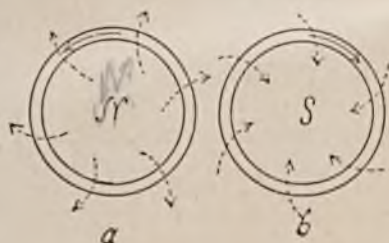
giem z ponad płytki pod nią. Krzywizna tych linii pola jest tem mniejsza, im bliżej je bierzemy środka przewodnika kołowego; w samym środku i najbliższych jemu punktach uważać możemy to pole za jednorodne (linje pola są niemal równoległe).

Jeżeli więc ująć zechcemy cechy charakterystyczne wzajemnego ustosunkowania się linii prądu elektrycznego oraz linii otaczającego



Rys. 826.

je pola magnetycznego, to przedewszystkiem daje się zauważyć, że wiążą się one ze sobą na wzór ogniw łańcucha, jak to wyobrażone jest na rys. 826. Następnie, przewodnik kołowy z prądem tworzy pole magnetyczne, którego linje, o ile patrzymy z jednej strony na płaszczyznę tego przewodnika, *wychodzą* z tej płaszczyzny (rys. 827a), z przeciwnej zaś strony do niej *wchodzą* (rys. 827b), zupełnie

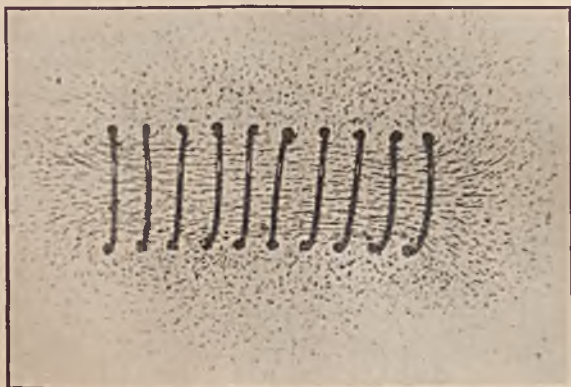


Rys. 827.

jakgdyby jedna strona takiego przewodnika kołowego, w którym płynie prąd elektryczny, tworzyła koniec północny jakiegoś magnesu, bardzo krótkiego, o przekroju przewodnika, druga zaś — koniec południowy. Zauważmy przytem, iż koniec północny przypada z tej strony, z której patrząc, widzimy kierunek prądu, jako przeciwny kierunkowi ruchu wskazówek zegara, południowy zaś z tej strony, z której patrząc, widzimy kierunek prądu zgodny z kierunkiem ruchu wskazówek zegara.

Zróbmy z drutu zwój, złożony z szeregu skrętlów, t. zw. solenoid, przetykając te skręty przez otwórki w tekturze lub płytce szklanej, i po-

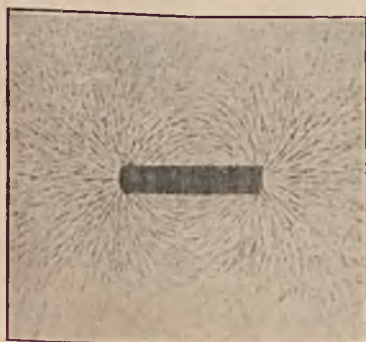
wtórny doświadczenie z opiłkami żelaznymi, jak w przypadku pojedynczego skrętu, wyobrażonego na rys. 825. Rys. 828 przedstawia układ otrzymanych w tym przypadku linii pola; wewnątrz skrętów pole wygląda na jednorodne, linje układają się równolegle; dzieje się tak, jak-



Rys. 828.

gdyby linje, wytworzone przez prąd w poszczególnych skrętach, łączyły się ze sobą, tworząc nieprzerwany ciąg; dopiero u końcowych skrętów widać zakrzywienie tych linii, przypominających kształtem linje pola u biegunów magnesów.

Na rys. 829 mamy uwidocznione w podobny sposób pole solenoidu, utworzonego ze skrętów leżących jeden przy drugim — tak, że prze-



Rys. 829.

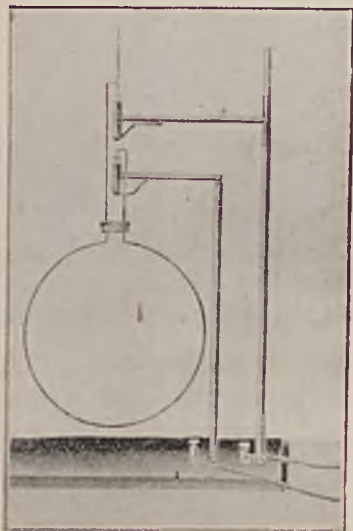


Rys. 830.

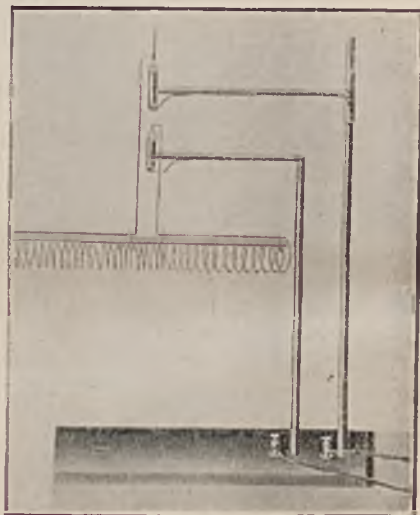
biegu linii pola wewnątrz solenoidu nie widać; widmo magnetyczne wyglądem nie różni się tu od pola magnesu (porówn. rys. 776). Budowę użytego w tem doświadczeniu solenoidu wyjaśnia zrobiony w większej skali rys. 830).

Zatem zwój drutu, w którym płynie prąd elektryczny, wytwarza pole magnetyczne podobnie jak magnes; zwój taki jest w działaniu swem równoważny magnesowi, a poszczególne skręty tego zwoju to jakgdyby elementarne magnesy, uszeregowane tak, że tworzą magnes linjowy — stąd właśnie stosowanie i tu i tam nazwy *solenoidu* (porówn. to, co powiedziane jest o solenoidzie na str. 167).

Ten ważny fakt, że, czy to pojedyncze, czy wielokrotne skręty drutu, w których płynie prąd elektryczny, przypominają swemi własnościami i swem zachowaniem się magnesy, utrwalić jeszcze można przez następujące doświadczenie. Bieguny źródła prądu łączymy z zaciskami (rys. 831), które mają metaliczne połączenia (zapomocą niewidocznych na rysunku drutów, poprowadzonych pod podstawą przyrządu) z dwo-



Rys. 831 a.



Rys. 831 b.

ma pionowymi prętami metalowymi. Pręty te zaopatrzone są w poziome ramiona metalowe, zakończone niewielkimi naczynkami z rtęcią. Gdy w sposób, widoczny na rysunku, zanurzymy w tych naczynkach odgięte ku dołowi i ostro zakończone końce drutu, czy to zwiniętego w pojedynczy skręt (rys. 831a), czy też tworzącego solenoid (rys. 831b) *), uczynimy zarówno ten skręt pojedynczy, jak solenoid zdolnymi do wykonywania ruchu obrotowego dokoła osi pionowej, a zarazem uczynimy możliwym kierowanie przez te zwoje prądu elektrycznego. Wystarczy po puszczeniu prądu czy to w pojedynczym skręcie, czy w solenoidzie zbl-

*) Właściwie jeden tylko z tych drucików służy do zawieszania; ostrze jego spoczywa we wgłębieniu na dnie naczynka z rtęcią; drugi koniec drutu jest tylko zanurzony w rtęci drugiego naczynka w celu ustalenia połączenia metalicznego, niezbędnego dla przechodzenia prądu.

żyć do nich magnes którymkolwiek biegunem, a zobaczymy, że obracają się i ustawiają tak, jakgdyby były magnesami. Zwracają się przytem ku danemu biegunowi odpowiednią stroną, na której przypada w pojedynczym skręcie lub solenoidzie biegun znaku przeciwnego tego magnesu, któremu jest równoważny dany przewodnik z prądem. Notując sobie kierunek prądu w zwojach drutu i obserwując przyciąganie względnie odpychanie tego czy innego końca solenoidu lub tej czy innej strony pojedynczego skrętu przez dany biegun magnesu np. północny, prze-



Rys. 832.

konywamy się o słuszności wypowiedzianej już wyżej reguły. Mianowicie, jeżeli chodzi o solenoid, na tym jego końcu przypada biegun północny równoważny mu magnesowi, na który patrząc, widzimy kierunek prądu jako przeciwny kierunkowi ruchu wskazówek zegara (rys. 832), południowy zaś na tym końcu, na który patrząc, widzimy kierunek prądu zgodny z kierunkiem ruchu wskazówek zegara. To samo daje się stwierdzić co do obu stron pojedynczego skrętu.

Jeżeli zawieszenie solenoidu jest dobre, tak że się on porusza z małym tarcieniem, i jeżeli prąd w nim jest dostatecznie silny (ok. 10 amperów), solenoid taki zachowuje się jak igiełka busoli — ustawia się w polu magnetycznym ziemskim osią swoją w kierunku południka magnetycznego, zwracając się tym końcem, który mamy zaznaczony na rys. 832 z lewej strony, ku północy.

332. Magnesowanie przez prąd elektryczny. Elektromagnesy.

Jeżeli w polu magnetycznym, które się wytwarza wewnątrz solenoidu, gdy przezeń płynie prąd elektryczny, umieszczamy pręt stalowy, ulega on namagnesowaniu (rys. 833). W ten sposób właśnie (w gęściej

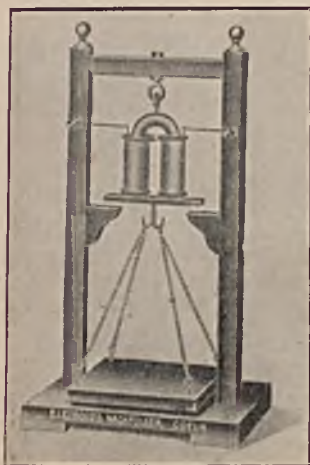


Rys. 833.

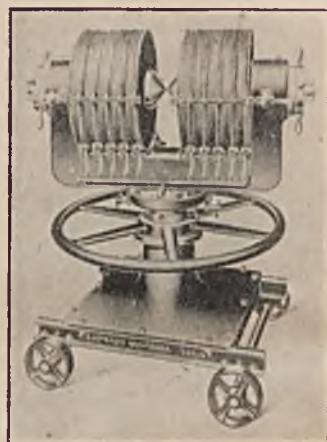


Rys. 834.

tylko położonych zwojach) sporządzają się przeważnie sztuczne magnesy stalowe. O ile zamiast stali wstawimy do wnętrza solenoidu pręt z żelaza miękkiego, namagnesuje się on silnie, lecz utraci niemal zupełnie nabyte własności magnetyczne z chwilą przerwania prądu. Tego rodzaju czasowo funkcjonujące magnesy, utworzone z rdzenia żelaznego, owiniętego zwojami drutu, przez który posyłamy prąd elektryczny, nazywają się elektromagnesami. Na rys. 834 widzimy schemat elektromagnesu w kształcie podkowy. Bieguny elektromagnesu tworzą się zgodnie z podaną wyżej, a przedstawioną zapomocą rys.



Rys. 835.



Rys. 836.

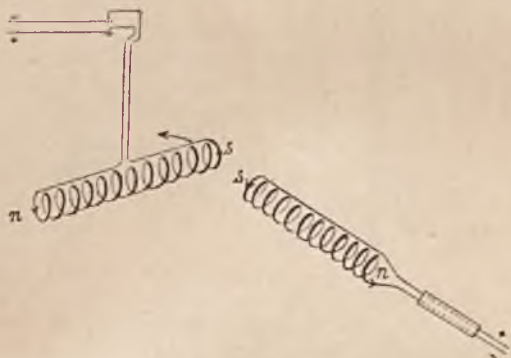
832 regułą. Wyobrażony na rys. 835 elektromagnes wykładowy utrzymuje, gdy płynie w zwojach prąd, kotwicę z szalką, którą można znacznie obciążyć. Na rys. 836 mamy specjalnej konstrukcji elektromagnes z takim nawinięciem drutu, że się wytwarza pole wielkiego natężenia (do 50000 gausów) w niewielkiej przestrzeni między zwróconymi ku sobie biegunami; wymaga to użycia prądu elektrycznego znacznego natężenia (60 amperów).

333. Działania, zachodzące między przewodnikami, w których płyną prądy elektryczne.

Skoro solenoid, zarówno jak pojedynczy zwój, w którym płynie prąd elektryczny, wytwarzają pole magnetyczne i wogóle zachowują się podobnie jak magnesy, oczekiwać należy, że między takimi solenoida-

mi, podobnie jak pojedynczemi skrętami, jak wogóle zresztą między przewodnikami, w których płyną prądy elektryczne, dają się zauważyć pewne charakterystyczne działania.

Istotnie, zawieśmy jeden solenoid tak, jak to widzimy na rys. 831b i zbliżmy do któregośkolwiek z jego końców koniec innego solenoidu, trzymanego za rękojeść izolującą, podczas gdy w obu solenoidach płyną prądy elektryczne (rys. 837); spostrzeżemy, że zachodzi między nie-



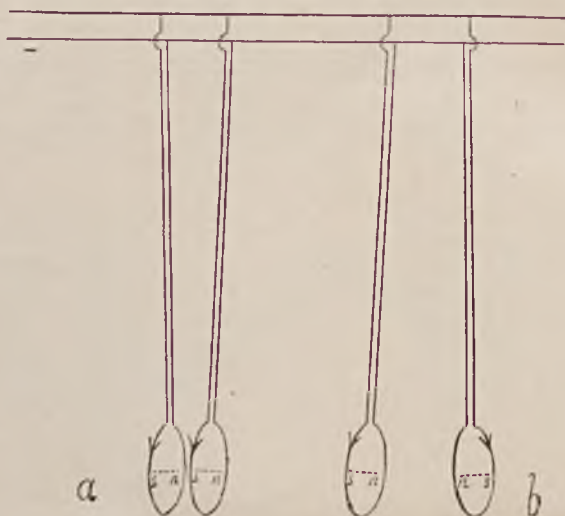
Rys. 837.

mi działanie takie jak w doświadczeniu z magnesami, gdy jeden z nich zawieszamy (na strzemiączku lub na ostrzu), a do biegunów jego zbliżamy bieguny trzymanego w ręce innego magnesu (porówn. doświadcz. na rys. 759).

Zawieśmy równolegle jeden do drugiego dwa pojedyncze skręty kołowe drutu i puśćmy przez oba prąd w z g o d n y m k i e r u n k u, jak to przedstawione jest schematycznie na rys. 838a. Będą to jakgdyby zawieszane obok siebie dwa magnesy, zwrócone do siebie różnoimienne- mi biegunami (południowa strona skrętu prawego zwrócona jest do północnej strony skrętu lewego *); oczekujemy przyciągania się tych pierścieni, co też istotnie doświadczenie potwierdza. Przeciwnie, puśćmy w tych pierścieniach prąd w k i e r u n k a c h p r z e c i w n y c h, jak to zaznaczone jest na rys. 838b, a zajdzie zgodnie z oczekiwaniem odpychanie się pierścieni. Przewidziane w ten sposób, a przez doświadczenie potwierdzone tu zjawisko ująć jeszcze można inaczej, a mianowicie mówiąc, że między przewodnikami równoległemi, w których płyną prądy w zgodnych kierunkach, zachodzi przyciąganie się, natomiast w przypadku, gdy kierunki prądu są przeciwne — od-

*) Na rys. linje proste kropkowane, poprowadzone przez środek pierścieni, prostopadle do ich powierzchni, zaznaczają kierunki osi magnesów, równoważnych tym pierścieniom z prądami.

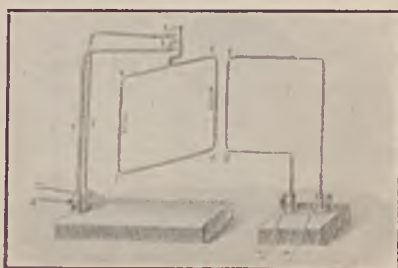
pychanie się. Słuszność tego twierdzenia łatwo jest sprawdzić, przeciągając równoległe w odległości paru centymetrów jeden od drugiego przy pomocy zacisków Holtza dwa długie na jakie $1\frac{1}{2}$ m druty,



Rys. 838.

nie napięte, lecz dość luźno puszczone, i posyłając przez oba druty prąd czy to w kierunku zgodnym, czy przeciwnym — przyciąganie się względnie odpychanie uwidoczniają się wtedy wyraźnie.

Wygodniej można to zjawisko pokazać przy pomocy przyrządu, wyobrażonego na rys. 839. Mamy tam dwa przewodniki, z których je-



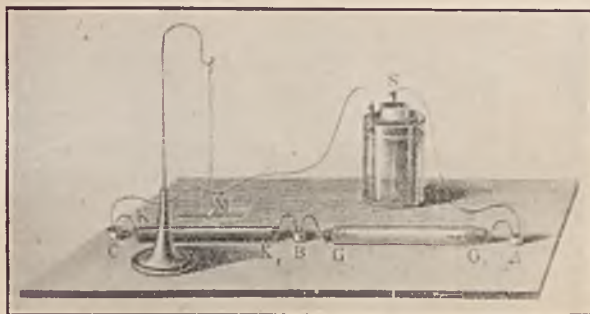
Rys. 839.

den jest nieruchomy, drugi ruchomy (zawieszony w znany już nam sposób); boki tych przewodników mogą być ustawione równoległe i więcej lub mniej zbliżone do siebie tak, jak to widać na rysunku;

prądy w obu mogą być kierowane w zgodną stronę lub w strony przeciwnie i zależnie od tego ruchomy przewodnik wykazuje swym ruchem czy to zachodzące przyciąganie się, czy odpychanie.

334. Pole magnetyczne, wytworzone przez prąd konwekcyjny nabożów elektrycznych.

Zjawisko prądu elektrycznego ujęliśmy jako ruch nabożów elektrycznych. Gdy drutem łączymy dwa przewodniki o różnej wartości potencjału, zrównanie potencjałów zachodzi, jak to rozumiemy, dzięki przeniesieniu się przez drut z jednego przewodnika na drugi pewnego naboju; można byłoby pomyśleć, jak to dawniej czyniono, o ruchu naboju dodatniego z przewodnika o potencjale wyższym na przewodnik o potencjale niższym; albo, jak to sobie dziś wyobrażamy, o ruchu nabożów ujemnych (elektronów) w kierunku wręcz przeciwnym.

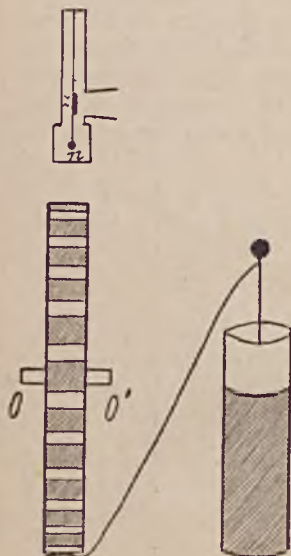


Rys. 840.

Zjawisko elektrolizy zapoznało nas z takim mechanizmem prądu, który polega na wędrówce jonów, a zatem na przenoszeniu w dwu kierunkach przeciwnych co do znaku nabożów elektrycznych, jakimi obdarzone są atomy względnie grupy atomów. Że prądowi elektrycznemu, przechodzącemu przez elektrolit, towarzyszy istnienie dokoła niego pola magnetycznego, tak samo, jak w przypadku, gdy prąd przechodzi przez przewodnik metaliczny, wskazuje takie np. doświadczenie, jak na rys. 840. Widzimy tam obwód prądu, którego część stanowią pręt metalowy KK_1 oraz rurka szklana GG_1 , wypełniona roztworem siarczanu miedziowego i zamknięta z obu stron korkami, przez które przetknięte są miedziane druciki, grające rolę elektrod. A, B, C są to naczynka, wypełnione rtęcią; jak widać z rysunku, łatwo jest na miejsce pręta KK_1 przenieść rurkę GG_1 lub odwrotnie. Pręt i rurkę kładziemy w kierunku południka magnetycznego, który nam wskazuje wisząca na cienkiem rozkręconem włóknie igielka magnesowa M, zaopatrzona w zwiercia-

dełko i osłonięta niewyobrażoną na rysunku rurą szklaną w celu za bezpieczeństwa jej od zakłócających prądów powietrza; ruchy igły magnetycznej obserwujemy, rzucając na zwierciadełko snop światła i uważając, jak zmienia się kierunek snopa odbitego (p. t. II, ust. 230, rys. 472). Zamykamy obwód, gdy pod igłą znajduje się pręt KK_1 , i obserwujemy odchylenie się igły; wtedy przekładamy rurkę GG_1 na miejsce pręta KK_1 , zaś pręt na miejsce rurki, przyczem natężenie prądu w obwodzie otrzymuje się, oczywiście, takie samo jak poprzednio; okazuje się, że znowu obserwujemy tej samej wielkości odchylenie igły.

W roku 1870 fizyk amerykański, Rowland ^{*)}, powziął myśl sprawdzenia doświadczalnie, czy wogóle, jak można było przypuszczać, po-



Rys. 841.

ruszaniu się jakiegokolwiek ciała, niosącego na sobie naboje elektryczny, a zatem wogóle elektrycznemu prądowi konwekcyjnemu towarzyszy tworzenie się w przestrzeni otaczającej pola magnetycznego. Te subtelne i trudne pomiary, powtarzane i doskonalone przez innych badaczy, dały świetne potwierdzenie słusznego domysłu. Doświadczenie wykonać można w sposób, uwidoczniiony na schemacie (rys. 841). Tarcza kołowa szklana lub ebonitowa oklejona jest na obwodzie skrawkami cynfolji i wprawiona w szybki ruch obrotowy dokoła poziomej osi OO' ; wewnętrzna okładka dużej butelki (baterji) lejdejskiej połączona jest drutem z delikatną miotłką metalową, która dotyka obwodu tarczy i podczas jej ruchu podtrzymuje istnienie nabołów elektrycznych na skrawkach cynfolji. Naboje te przy ruchu tarczy poruszają się wraz z temi skrawkami i tworzą prąd elektryczny konwekcyjny. Ponad tarczą mieści się w osłonie metalowej

(dla zapobieżenia nie tylko szkodliwym zakłóceniom ze strony prądów powietrznych, ale i działaniom elektrostatycznym) igielka magnetyczna, zawieszona na cieniułchnem nieskręconem włóknie i zaopatrzona w zwierciadełko z . Przed puszczeniem w ruch tarczy ustawia się jej płaszczyznę w południku magnetycznym, którego kierunek wskazuje igielka magnetyczna. Po wprawieniu tarczy w szybki ruch obrotowy, obserwacja metodą optyczną igielki (porówn. dośw. na rys. 840) wykazuje, iż odchyła się ona, stwierdzając tem istnienie szukanego pola magnetycznego. Przekonywamy się przytem, że: 1) zmiana kierunku ruchu obrotowego wywołuje zmianę kierunku odchylenia igielki, o ile naboje na obwodzie tarczy pozostają tegoż znaku co przedtem; 2) że zmiana znaku nabołów na skrawkach cynfoljowych bez zmiany kierunku ruchu tarczy

^{*)} Wspominaliśmy w t. II (ust. 250) o jego słynnych siatkach dyfrakcyjnych.

warunkuje zmianę kierunku odchylenia igielki; 3) że ruch nabołów dodatnich przy obrocie tarczy w pewnym kierunku warunkuje odchylenie igielki w tę samą stronę, co ruch nabołów ujemnych przy obrocie tarczy w kierunku przeciwnym; 4) że odchylenie igielki wzrasta, jeżeli prędkość obrotów tarczy rośnie lub też, jeżeli przy tej samej prędkości obrotów tarczy na skrawkach cynfoljowych mieszczą się większe naboje (zależy to, oczywiście, od wartości potencjału, do którego naładowana jest butelka (baterja) lejdejska) — słowem, wychylenie rośnie, jeżeli w pewnym określonym czasie przebiega koło igielki większy nabój elektryczny, a więc jeżeli, zgodnie z przyjętem przez nas określeniem, mamy większe natężenie tworzonego w ten sposób prądu elektrycznego *).

Wyniki tych doświadczeń utrwalają nas w przekonaniu o słuszności powziętego wyżej wyobrażenia, że w zjawisku prądu elektrycznego wogóle mamy do czynienia z poruszającymi się nabojami elektrycznymi.

335. Reguła zasadnicza działań elektromagnetycznych i elektrodynamicznych.

Siły, które działają na bieguny magnetyczne, znajdujące się w polu prądu elektrycznego, nazywamy siłami *elektromagnetycznymi*. Siły, którym ulegają w polu magnetycznym przewodniki, przewodzące prąd, nazywają się siłami *elektrodynamicznymi* (obojętne przytem, czy pole magnetyczne wytworzone jest przez magnes czy przez prąd elektryczny **). W poprzednich ustępach zapoznaliśmy się z szeregiem objawów zarówno jednych jak drugich sił.

Zróbmy teraz jeszcze jedno doświadczenie, które przyczyni się do ustalenia pewnej ważnej reguły, ułatwiającej znakomicie orjentowanie się w tych zjawiskach i obejmującej również, jak zobaczymy, podaną przez nas wyżej regułę Ampère'a.



Rys. 842.

Układ doświadczenia wskazuje rys. 842. Widzimy tam ogniwo, z którego przy pomocy łącznika *K* puścić można w dowolnej chwili prąd

*) Ograniczamy się do podania tutaj wniosków jakościowych tych doświadczeń; niemniej ciekawe wypadły też wnioski ilościowe.

**) Siły, wywierane przez magnes na elektryczność, poruszającą się w przewodnikach, nazywają się też *magneto elektrycznymi*.

przez rozpięty dość luźno między zaciskami Holtza drut. Inne źródło, nie wskazane na rysunku, zasila elektromagnes, między którego biegunami przechodzi ten drut. Gdy elektromagnes jest czynny, a bieguny jego i prąd w drucie przypadają tak, jak to wskazane jest na rysunku, drut zostaje w chwili zamknięcia prądu wypchnięty z pomiędzy biegunów elektromagnesu w górę; ruch ten umożliwi drutowi ta okoliczność, że, jak powiedzieliśmy, nie jest on napięty, ale puszczony. dość luźno. Przy zmianie kierunku prądu w drucie, ale bez zmiany kierunku linii pola magnetycznego, zarówno jak przy zmianie kierunku linii tego pola z zachowaniem pierwotnego (jak na rysunku) kierunku prądu, odchylenie drutu następuje ku dołowi. Natomiast przy jednoczesnej zmianie zarówno kierunku prądu w drucie jak kierunku linii pola magnetycznego, w stosunku do tego, co jest na rysunku, wychylenie drutu znowu zachodzi ku górze.

W zjawisku tem dostrzegamy działanie sił na naboje elektryczne przebiegające w drucie, to zaś warunkuje obserwowane działanie na drut, w którym naboje się poruszają.

Zważmy, że *kierunek ruchu nabołów w drucie jest tu prostopadły do kierunku linii pola magnetycznego, zaś kierunek obserwowanej siły elektrodynamicznej jest prostopadły do obu tamtych kierunków.* Wszystkie te więc 3 kierunki ustosunkowują się względem siebie tak, jak kierunki 3-ch osi w układzie współrzędnych prostokątnych w przestrzeni. Przyjrząwszy się zaobserwowanym faktom uważnie, utworzyć możemy następujący schemat, który ujmuje dobitnie wspomnianą wyżej regułę (rys. 843).

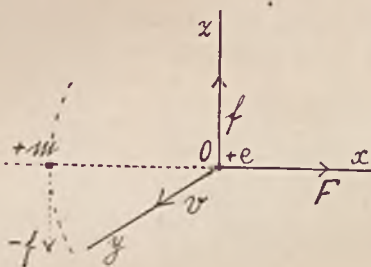
Przypuśćmy, iż na ujemnej części osi x mieści się biegun magnetyczny północny o masie $+m$, który między innymi daje linię pola w dodatnim kierunku osi x ; natężenie pola magnetycznego w początku współrzędnych ma wtedy określoną wartość F ; przypuśćmy, iż przez początek współrzędnych przebiega z pewną prędkością (v) nabój elektryczny dodatni ($+e$) w kierunku dodatnim osi y ; wówczas działanie siły elektrodynamicznej f , której podlega nabój $+e$, przypada w dodatnim kierunku osi z . Wartość siły f musi, oczywiście, jakoś zależeć zarówno od F jak od e oraz v , przyczem F zależy od m oraz odległości tego bieguna od O ; do tej kwestji jeszcze wrócimy w swoim czasie.

Zwróćmy jeszcze uwagę na jedną okoliczność — oto według 3-iej zasady Newtona każdemu działaniu towarzyszy równe i w stronę wręcz przeciwną skierowane przeciwdziałanie. Jeżeli biegun magnetyczny $+m$ warunkuje działanie siły f na przebiegający przez punkt O nabój elektryczny $+e$, to ze swej strony ów poruszający się nabój (*tworzy on prąd elektryczny*) wywiera na biegun magnetyczny $+m$ działanie, wyrażające się tejsamej war-

tości siłą, jedynie skierowaną w stronę wręcz przeciwną ($-f$, na rys. 843 zaznaczoną kropkami). Reguła ta zatem dotyczy zarówno siły elektrodynamicznej, działającej na nabój elektryczny, jak siły elektromagnetycznej, działającej na nabój magnetyczny.

Zmiana znaku jednego z wchodzących tu w grę nabołów (elektrycznego lub magnetycznego *) przy zachowaniu kierunku ruchu naboju elektrycznego, albo zmiana kierunku ruchu naboju elektrycznego bez zmiany znaków e i m , warunkuje zmianę kierunku siły f (a więc i siły $-f$) bez zmiany wszakże wielkości, jeżeli e , m i v nie ulegają zmianie i nie ulega zmianie położenie bieguna m (odległość jego od O).

Czytelnik widzi niewątpliwie, że schemat na rys. 843 jak najściślej odpowiada doświadczeniu, wyobrażonemu na rys. 842. Zastanówmy się jeszcze, czy obejmuje on istotnie, jak powiedzieliśmy, regułę Ampère'a?



Rys. 843.

Otóż wyobraźmy sobie pływaka, płynącego przez O (rys. 843) wraz z prądem (w utartym znaczeniu technicznym), więc w kierunku dodatnim y , i patrzącego na biegun magnetyczny $+m$; siła elektromagnetyczna, działająca na ten biegun, skierowana jest dla tego obserwatora *na lewo*.

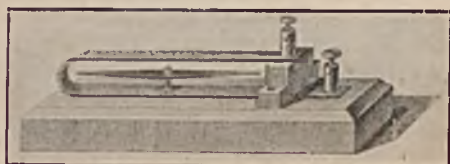
Przypuścmy, że tam, gdzie na rysunku mieści się nabój magnetyczny $+m$, znajduje się igielka magnesowa (przechodzimy tu do zjawiska realnego); prąd elektryczny, płynący według y , jak na rys. 843, wywiera wtedy na biegun $+$ (północny) igielki działanie, skierowane ku dołowi, na biegun zaś $-$ (południowy) tej samej wartości działanie, tylko skierowane do góry; igielka staje w takim razie osią swoją pionowo, zwrócona biegunem n ku dołowi, t. j. *na lewo* dla obserwatora płynącego zgodnie z regułą Ampère'a; igielka ta ustawia się zatem osią *stycznie do linii kołowej pola magnetycznego* (zaznaczonej na rysunku częściowo kropkami), której środek przypada w O . Wszystko to jest w zgodzie z zaobserwowanymi już przez nas wyżej faktami.

*) Czytelnik, oczywiście, pamięta, że pojedynczego bieguna północnego lub południowego otrzymać nie możemy; nie przeszkadza to jednak zbudowaniu schematu, który daje się następnie zastosować do przypadku rzeczywistego.

336. Galwanoskopy i galwanometry, oparte na działaniu sił elektromagnetycznych i elektrodynamicznych.

Działanie prądu na igielkę magnesową daje się wyzyskać w celu budowania *galwanoskopów*, służących czy to jedynie do stwierdzenia obecności prądu elektrycznego, czy też jeszcze do wyznaczenia jego kierunku, jak również do budowania *galwanometrów*, pozwalających mierzyć natężenie prądu. Na rys. 844 widzimy najprostszej budowy galwanoskop: igła magnesowa mieści się w ramie metalowej, przez którą można kierować prąd elektryczny i którą ustawia się przed puszczeniem prądu w płaszczyźnie południka magnetycznego (jak?). Dla spotęgowania działania na igłę używa się nie pojedynczego obwodu, ale zwoju drutu o wielu skrętach; rys. 845 wyobraża schematycznie budowę takiego galwanoskopu. Często znajduje tu zastosowanie igła astatyczna (p. rys. 816 i 817).

W galwanometrach, których budowa oparta jest na tej samej zasadzie, używa się bardzo lekkich magnesów, zawieszonych na cienkich



Rys. 844.

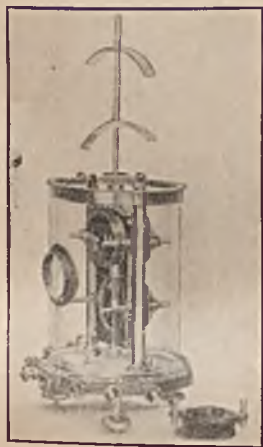


Rys. 845.

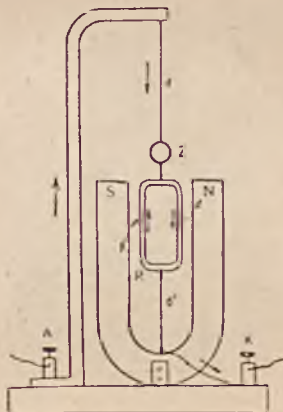
włóknach i zaopatrzonych w lusterka, aby można było zastosować metodę optyczną do wyznaczania małych wartości wychyleń. Na rys. 846 mamy taki typ galwanometru z układem astatycznym igieł, przytwierdzonych do lekkiego pręcika, unoszącego również w swej środkowej części niewielkie zwierciadełko. Górny i dolny układy igieł mieszczą się w środku połączonych ze sobą dwu par cewek, utworzonych z wielu skrętów drutu (jedna z cewek u dołu jest usunięta na rysunku dla lepszego uwidocznienia budowy przyrządu). Na pręcie pionowym, mieszczącym się u góry przyrządu, dają się przesuwają i ustawiać w różnych kierunkach swemi biegunami dwa magnesy stalowe w kształcie łuków; przy ich pomocy można całkowicie skompensować pole magnetyczne ziemskie, o ile układ igieł nie jest doskonale astatyczny, albo też daje się osiągnąć określone ustawianie się igieł i złączonego z nimi lusterka przed puszczeniem prądu mierzonego, jak również daje się zmieniać czułość przyrządu. O cechowaniu galwanometrów wspominaliśmy już wyżej; w dalszym ciągu jeszcze do tej kwestji wrócimy.

Wszakże, jak wynika z faktów, wyżej poznanych, można budować galwanoskopy, wzgl. galwanometry niekoniecznie tak, by zwój drutu, w którym płynie prąd, był nieruchomy, zaś magnes ruchomy, lecz odwrotnie — uczynić nieruchomym magnes, ruchomą zaś cewkę, przez

którą płynie prąd elektryczny. Na rys. 847 widzimy schemat budowy takiego galwanometru z ruchomą cewką. Cewkę tworzy cienki izolowany jedwabiem drut, nawinięty na lekką ramkę drewnianą (R); końce zwoju połączone są z rozpiętni pionowo drucikami d i d' , utrzymującymi ramkę, a zarazem doprowadzającymi do niej prąd (z zacisków A i K). Zwierciadło Z służy do obserwacji metodą optyczną obrotu ramki, mieszczącej się między biegunami magnesu kształtu podkowy. Płaszczyzna ramy przypada, gdy prądu w niej nie ma, równoległe do linii pola magnetycznego (tak jak na rysunku); gdy puszczaemy prąd



Rys. 846.



Rys. 847.

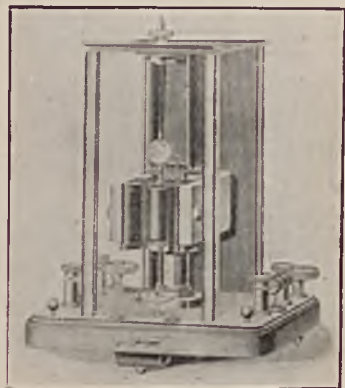
przez galwanometr, ramka pod działaniem sił elektrodynamicznych (porów. regulę w ust. 335) dąży do ustawienia się prostopadle do przebiegu linii pola magnetycznego *); przeciwdziała temu skręcanie się drucików d i d' . Ostateczne ustawienie się zależy od natężenia mierzonego prądu. Przyrząd należy oczywiście wycechować. Na rys. 848 widzimy galwanometr wykładowy tego typu.

Galwanometry z ruchomą cewką mają tę zaletę, że wskazania ich nie ulegają zakłóceniom ani ze strony pola magnetycznego ziemskiego — nie ulegają słabe naogół w porównaniu z polem między biegunami ich magnesu, — ani ze strony otaczających je przedmiotów żelaznych lub prądów elektrycznych w przestrzeni otaczającej (niezbyt silnych); są one jednak naogół mniej czułe od galwanometrów typu poprzedniego, co zależy od sztywności drucików, utrzymujących cewkę.

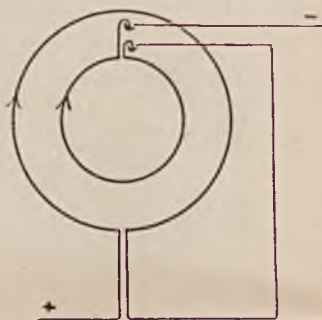
Wreszcie zbudować można galwanometr zupełnie bez magnesów, posługując się tem, że zwoje drutów, przewodzące prądy, wytwarzają pola magnetyczne. Jeżeli weźmiemy nieruchomy zwój, a wewnątrz

*) Ramka zachowuje się tu jak magnes, usiłujący zwrócić się swoją stroną północną ku biegunowi S magnesu, zaś stroną południową ku N.

niego umieścimy ruchomy, jak to schematycznie przedstawione jest na rys. 849 — odgięte ku dołowi końce zwoju wewnętrznego są tu zanurzone w naczynkach z rtęcią; jeżeli zwój ten zawieszony jest tak, że się może obracać dokoła osi pionowej, to w chwili puszczenia *jednego i tego samego prądu przez oba zwoje* ustawią się one tak, że prąd będzie w obu płynął w zgodnym kierunku (o ile oczywiście odrazu zwoje nie zajmują takiego położenia). Jest to zgodne z tem, co wiemy o działaniach elektrodynamicznych. Wystawmy więc sobie, że galwanometr składa się z cewki nieruchomej i zawieszonej w jej środku drugiej



Rys. 848.



Rys. 849.

cewki ruchomej, utrzymywanej przez druciki (w rodzaju *d* i *d'* na rys. 848) w położeniu prostopadłym do pierwszej; że dalej *prąd*, doprowadzany do galwanometru, *przebiega przez obie cewki*. W takim razie cewka wewnętrzna będzie usiłowała zająć położenie równoległe względem zewnętrznej, przytem takie, by kierunek prądu w obu wypadł zgodnie; przeciwdziałać temu będzie skręcanie się drucików, utrzymujących ruchomą cewkę; ostateczne wychylenie cewki względem położenia pierwotnego pozostaje w określonej zależności od natężenia prądu, czego tu już bliżej nie omawiamy. Galwanometry tego typu nazywają się *elektrodynamometrami*. Rys. 850a daje wyobrażenie o wyglądzie zewnętrznym elektrodynamometru, rys. 850b wyobraża oddzielnie w powiększeniu cewkę wewnętrzną ruchomą z przytwierdzonym do niej zwierciadłem *). Jeżeli zmieniamy za pomocą przełącznika kierunek prądu w obu cewkach, nic się względnie nie zmienia i wychylenie pozostaje bez zmiany, o ile w natężeniu prądu żadna zmiana nie zaszła.

*) Płytką platynową u spodu, zanurzona w naczynku z roztworem kwasu siarkowego, służy do doprowadzania do cewki prądu mierzonego od dołu (od góry rolę tę spełnia drucik, na którym jest cewka zawieszona); jednocześnie płytka ta tłumia wahania cewki i przyspiesza jej ostateczne ustawienie się.

Istnieją prądy, zwane zmiennymi, których kierunek ulega wciąż zmianom (w prądach stałych kierunek ten pozostaje niezmienny). Galvano-



Rys. 850 a.



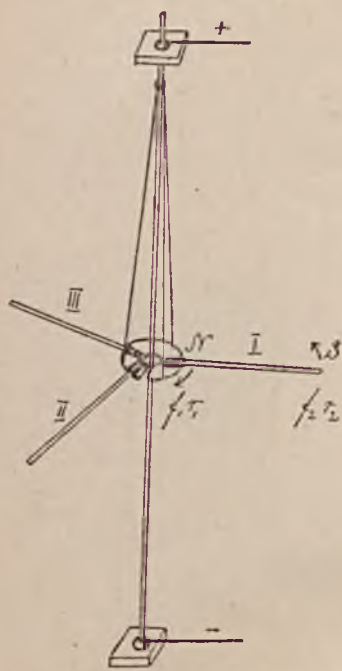
Rys. 850 b.

metry pierwszych dwu opisanych typów nadają się wyłącznie do mierzenia natężeń prądów stałych, natomiast elektrodynamometry służyć mogą zarówno do mierzenia natężenia prądów stałych, jak zmiennych.

337. Jednostka elektromagnetyczna natężenia prądu elektrycznego.

Skoro prąd elektryczny, płynący w przewodniku, wytwarza dokoła tego przewodnika pole magnetyczne, musi istnieć jakaś określona zależność między wartością natężenia owego pola magnetycznego w tym czy innym jego punkcie oraz wartością natężenia prądu, jak również położeniem tego punktu pola względem przewodnika, w którym płynie prąd. Ustalając jednostkę natężenia prądu, *założyć możemy, że przy pozostałych warunkach niezmiennych wartość natężenia pola jest proporcjonalna do natężenia prądu.* Wszakże, jeżeli w danym przewodniku mamy pewien stały prąd, natężenie pola jest różne w różnych jego punktach — pozostaje więc jeszcze znalezienie zależności natężenia pola od położenia rozważanego punktu względem przewodnika. W celu rozstrzygnięcia tego pytania uciec się musimy do doświadczenia, które wykonamy w sposób następujący (rys. 851). Ustawiamy pionowo długi pręt metalowy, przechodzący przez otwór w płycie z cienkiej bla-

chy, poziomo zawieszona na 3 cienkich długich nitkach i zaopatrzonej w 3 symetrycznie na niej umocowane rurczki, w których dają się osadzić poziomo 3 namagnesowane igły stalowe, zwrócone wszystkie jednakowo swemi biegunami do pręta pionowego, jak to wskazane jest na rysunku. Końce pręta pionowego łączyć możemy z biegunami odpowiedniego źródła prądu, by móc otrzymać w pręcie prąd znacznego natężenia. Otóż, gdy po przygotowaniu wszystkiego w powyższy sposób i wyczekaniu, aż zawieszony na nitkach układ magnesów ustali się w stanie spoczynku, puszczamy prąd przez pręt pionowy, nie stwierdzamy nie tylko obrotu, ale nawet najmniejszego skrócenia się części zawieszony — układ magnesów pozostaje nadal w spoczynku, jakkolwiek wielkiego natężenia prądu puszczamy przez pręt. Ale przecież zarówno na biegun N, jak S każdego magnesu działają tu siły, zgodnie z podanymi wyżej faktami. Jeżeli prąd w pręcie idzie z góry na dół, jak na rysunku, to na biegun N magnesu I działa siła f_1 , skierowana według ruchu wskazówek zegara dla obserwatora, patrzącego z góry; w przeciwną stronę działa siła f_2 na biegun S. Przypuśćmy, że



Rys. 851.

masy magnetyczne biegunów N i S są $+m$ i $-m$, natężenie zaś pola magnetycznego w miejscu, gdzie przypada biegun N, jest F_1 , a w miejscu bieguna S wartość tego natężenia wynosi F_2 ; w takim razie

$$f_1 = +F_1 m \text{ i } f_2 = -F_2 m \dots \dots \dots (1)$$

Dla dwu pozostałych magnesów rozumowanie byłoby takie samo, możemy więc o nich nie mówić. Otóż, jeżeli nie obserwujemy żadnego ruchu magnesów wraz z utrzymującą je płytką, dowodzi to, że moment siły, działającej na biegun N, równa się momentowi siły, działającej na biegun S. Jeżeli zatem odległość bieguna N od przewodnika z prądem jest r_1 , bieguna zaś S jest r_2 , to równość tych momentów wyrazimy przez wzór

$$f_1 r_1 = f_2 r_2 \dots \dots \dots (2)$$

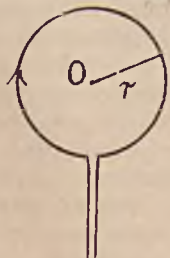
czyli (p. wzór 1) $F_1 m r_1 = F_2 m r_2, \dots \dots \dots (3)$

skąd $F_1 r_1 = F_2 r_2, \dots \dots \dots (4)$

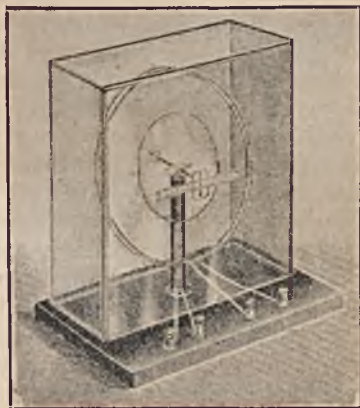
albo $\frac{F_1}{F_2} = \frac{r_2}{r_1} \dots \dots \dots (5)$

Wzór (5) mówi nam, że natężenie pola magnetycznego w określonym punkcie przestrzeni, otaczającej prostoliniowy przewodnik z prądem elektrycznym, jest odwrotnie proporcjonalne względem odległości tego punktu od przewodnika.

Przypuśćmy teraz, że rozważamy natężenie pola magnetycznego w środku O przewodnika kołowego (rys. 852), przez który płynie prąd elektryczny.



Rys. 852.



Rys. 853.

Możemy twierdzić zgóry, że natężenie pola magnetycznego w środku pierścienia zależy od wielkości promienia (praktycznie chodzi tu nie wyłącznie o punkt środkowy, ale o niewielką przestrzeń dokoła tego punktu, gdzie można uważać pole magnetyczne za jednorodne (porów. rys. 825 i towarzyszące jemu rozumowanie). Możemy nawet przypuszczać, że zależność wypadnie tu taka sama, jak wyżej dla przewodnika prostoliniowego, t. j. że wartość rozważanego natężenia pola jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości promienia, t. j. do odległości punktu środkowego od przewodnika, przez który płynie prąd. Domysł wszakże taki, aczkolwiek bardzo pojętny, nie może być uważany za oczywisty. Zachodzi tu zjawisko złożone: natężenie pola w którymkolwiek punkcie dokoła przewodnika prostoliniowego nie jest uwarunkowane tylko tem, co się dzieje na najbliższym względem tego punktu odcinku przewodnika — mamy tu do czynienia z działaniem wypadkowym wszystkich elementów, na które podzielić możemy w myśli przewodnik z prądem, a które przypadają w różnych odległościach od rozważanego punktu. Podobnie w przypadku przewodnika kołowego natężenie pola w jego środku może być uważane za wypadkowe natężeń, uwarunkowanych w tym punkcie przez ruch nabożów w poszczególnych elementach, na które podzielić możemy w myśli przewodnik kołowy i które w danym razie wszystkie jednakowo są położone względem tego punktu środkowego *). Należy przeto uciec się do doświadczenia. Wykonać je można przy pomocy przyrządu, przedstawionego na rysunku 853.

*) Fizycy francuscy, Biot (1774—1862) i Savart (1791—1841), podali matematyczny sposób ujęcia tego zagadnienia dla dowolnego kształtu przewodnika.

Mamy tam pojedynczy pierścień kołowy o promieniu r (np. 5 cm), oraz drugi współśrodkowy z tamtym, złożony z dwu skrętów o promieniu *dwa razy większym*, t. j. $2r$ (np. 10 cm.) Do każdego z tych zwojów prowadzą druty, połączone z widocznymi na rysunku zaciskami. W środku obu pierścieni osadzona jest na ostrzu mała igiełka magnesowa, do niej zaś prostopadle przytwierdzona jest lekka wskazówka, której ruchy obserwujemy na skali w sposób, uwidoczniiony na rysunku. Ustawiamy przyrząd tak, by oba zwoje leżały w płaszczyźnie południka magnetycznego, wskazywanej przez igiełkę magnesową; wtedy wskazówka, złączona z igiełką, przypada na określonej (np. dokładnie środkowej) podziałce skali. Puszczamy następnie prąd elektryczny przez mniejszy pierścień i notujemy na jakimkolwiek galwanometrze (ampermetrze), włączonym w obwód, wychylenie jego części ruchomej, a jednocześnie na skali naszego przyrządu wychylenie igiełki magnesowej z jej położenia pierwotnego; do działania pola magnetycznego ziemskiego, usiłującego utrzymać igiełkę w płaszczyźnie południka magnetycznego, dołącza się tu działanie magnetyczne prądu, skierowane prostopadle do płaszczyzny pierścienia. Potem przerywamy prąd i puściliśmy go ponownie, tym razem przez podwójny skręt o większym promieniu, w tym samym kierunku co poprzednio, dobierając warunki doświadczenia tak, by włączony w obwód galwanometr (ampermetr) wskazywał to samo natężenie prądu *). Okazuje się, iż wychylenie igiełki magnesowej w środku pierścienia tym razem jest dokładnie takie samo jak poprzednio. Otóż mamy wszelką rację uważać, że podwójny skręt drutu, w którym płynie określonego natężenia prąd, równoważny jest prądowi dwukrotnego natężenia, płynącemu przez skręt pojedynczy (przypomnijmy sobie, jak określaliśmy natężenie prądu). Przy pozostałych warunkach niezmiennych prąd dwukrotnego natężenia powinien, według przyjętego wyżej przez nas określenia, wytwarzać natężenie pola o wartości dwa razy większej. Skoro tak się nie dzieje i natężenie pola pozostaje takie samo, jak było, przypisać to należy innemu czynnikowi, który, widocznie, zmniejsza to natężenie pola dwukrotnie. Czynnikiem tym jest rozmiar większego pierścienia, mającego *dwa razy większy* promień. Zatem przypuszczenie nasze co do roli wielkości promienia przewodnika kołowego potwierdza się.

Możemy jeszcze w pewien sposób zmodyfikować doświadczenie, nie dbając już o to, by dwa razy z rzędu, jak wyżej, otrzymać w jednym i drugim pierścieniu prądy tego samego natężenia. Puśćmy jakikolwiek prąd tak, by naraz przechodził przez oba pierścienie, tylko w kierunkach wręcz sobie przeciwnych (np. w mniejszym według kierunku ruchu wskazówek zegara, w większym — w kierunku przeciwnym, o ile patrzemy na przyrząd z określonej strony). Okazuje się, że igiełka magnesowa pozostaje wtedy zupełnie niewychylona — natężenie zatem pola magnetycznego, wytworzone przez prąd w jednym pierścieniu, zostaje tu zniesione przez natężenie pola znaku przeciwnego, wytworzone przez prąd w pierścieniu drugim. Lecz znowu, ponieważ ten

*) Jak to się czyni, dowiemy się w rozdziale następnym.

drugi pierścieni ma 2 skrety, winno to podwoić (przy innych warunkach niezmiennych) natężenie pola w środku pierścienia; jeżeli jednak wartość tego natężenia pola równa się (będąc tylko znaku przeciwnego) wartości natężenia, uwarunkowanego przez pierścieni wewnętrzny, zależy to jedynie od tego, że promień pierścienia zewnętrznego jest dwa razy większy. Zatem istotnie, im większy jest promień pierścienia, w którym płynie prąd elektryczny, tem mniejsze jest, przy pozostałych warunkach niezmiennych, natężenie pola magnetycznego w środku tego pierścienia.

Na podstawie tego wszystkiego, cośmy przed chwilą przytoczyli, możemy powiedzieć, iż *natężenie pola magnetycznego w środku pierścienia kołowego (rys. 852) jest proporcjonalne do natężenia prądu, płynącego w obwodzie kołowym, i odwrotnie proporcjonalne względem promienia r obwodu; wyrazić to możemy wzorem*

$$F = k \frac{i}{r} \dots \dots \dots (6)$$

gdzie k jest pewnym współczynnikiem proporcjonalności.

Wyobraźmy teraz sobie, iż *prąd płynie przez pierścień o promieniu 1 cm (rys. 854)*) i umówmy się, że natężenie prądu w pierścieniu wtedy uważać będziemy za jednostkę, jeżeli ta część obwodu, którą*



Rys. 854.

*stanowi łuk o długości 1 cm**), wytwarza w środku koła natężenie pola magnetycznego, równe jednemu gausowi. Jednostkę taką nazywać będziemy elektromagnetyczną jednostką natężenia prądu elektrycznego.*

Ponieważ natężenie pola magnetycznego w środku pierścienia uważać musimy, zgodnie z przytoczonym wyżej rozumowaniem, jako pewną wielkość wypadkową działań wszystkich części pierścienia, przeto wartość natężenia pola magnetycznego w środku pierścienia jest w danym wypadku tyle razy większa od jednościci, ile razy cały obwód koła jest większy od 1 cm, czyli natężenie to jest

$$F = 2\pi \text{ gausów.} \dots \dots \dots (7)$$

Ale, zakładając na i jednostkę natężenia prądu, na r jeden centymetr, mamy według wzoru (6)

$$F = k \frac{1}{1} \text{ gausów} = k \text{ gausów} \dots \dots \dots (8)$$

*) Na rysunku 854 pierścieni jest całkowicie zamknięty; oczywiście prąd musi jakoś doń ze źródła się dostać (porów. rys. 852), ale szczegóły ten w danym razie nas nie obchodzi.

**) Łuk ten zaznaczony jest na rysunku grubszą linią.

przez porównanie (7) i (8) otrzymujemy $k = 2\pi$ i wtedy wzór (6) przedstawia się, jak następuje:

$$F = 2\pi \frac{i}{r} \dots \dots \dots (9)$$

Możemy przeto powiedzieć, iż za jednostkę elektromagnetyczną natężenia prądu przyjmujemy natężenie takiego prądu, który, przepływając przez przewodnik kołowy o promieniu jednego centymetra, wytwarza w środku tego przewodnika kołowego pole magnetyczne o natężeniu 2π gausów.

Zatem, jeżeli natężenie prądu elektrycznego mierzymy w jednostkach elektromagnetycznych, natężenie pola magnetycznego w środku pierścienia o promieniu r , w którym to pierścieniu płynie prąd o natężeniu i — wyraża się wzorem (9). Odwrotnie, jeżeli mierzymy natężenie F pola magnetycznego w środku przewodnika kołowego o promieniu r , w którym to przewodniku płynie nieznanego natężenia prąd, to natężenie tego prądu w jednostkach elektromagnetycznych wyznaczamy według wzoru, który się otrzymuje z (9), a mianowicie:

$$i = \frac{F \cdot r}{2\pi} \dots \dots \dots (10)$$

Widzimy odrazu, że wymiar natężenia prądu w tych jednostkach elektromagnetycznych jest inny niż w jednostkach elektrostatycznych (porów. wzór (3) ust. 307 na str. 125). W rzeczy samej F mierzy się

w gausach, przyczem $\text{gaus} = 1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{sek}}$, r mierzy się w centymetrach,

2π jest liczbą oderwaną; czyli natężenie prądu i mierzy się w następujących jednostkach, zwanych *weberami* *) (podstawiamy wymiary F i r do wzoru (10):

jednostka elektromagnetyczna natężenia prądu = 1 weber =

$$= 1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{sek}} = 1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} \dots \dots \dots (11)$$

Ponieważ natężenie prądu mierzy się stosunkiem naboju elektrycznego, przepływającego przez dowolny przekrój przewodnika, do czasu, w którym to zachodzi, wynika ze wzoru (11), gdzie w mianowniku mamy jednostkę czasu, że:

$$\text{jednostka elektromagnetyczna naboju elektrycznego} = 1 \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

*) Nazwa ku uczczeniu pamięci wielkiego fizyka niemieckiego Wilhelma Edwarda Webera (1804—1891). Weber był towarzyszem pracy cytowanego już wyżej Gaussa.

W tem miejscu więc zawieramy nareszcie znajomość z układem elektromagnetycznym jednostek, o którym wspominaliśmy wyżej w ust. 322 na str. 173.

338. Busola stycznych. Określenie ampera i kulomba.

Na rys. 855a widzimy *galwanometr bezwzględny* *) albo t. zw. *busolę stycznych*; nazwa pochodzi od tego, że przy pomocy tangensa (po polsku tangens nazywa się styczną **) kąta wychylenia igły magnesowej znaleźć możemy wartość natężenia prądu, płynącego przez galwanometr (busolę).



Rys. 855a.

Gruby pręt miedziany, zgięty jest tak, iż tworzy prawie zamknięte koło; izolowane jeden od drugiego końce ab i cd pręta odgięte są ku dołowi i prowadzą do zacisków, które łączyć możemy ze źródłem prądu. W środku pierścienia mieści się na ostrzu mała igielka magnesowa, do której prostopadle przytwierdzona jest lekka wskazówka, końcami swemi sięgająca podziałek skali kołowej. Igielka winna być możliwie mała, abyśmy popelniali jak najmniejszy błąd, zakładając, że przypada ona w środku pierścienia; niewielkie wymiary igielki utrudniają wszak-

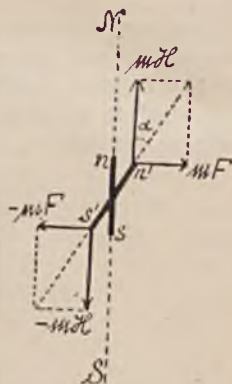
*) Czytelnik społkał się już kilkakrotnie z tem, że rozróżniamy pomiary względne (porównawcze) oraz pomiary bezwzględne, wystarczające do całkowitego wyznaczenia szukanej wielkości w przyjętych do tego jednostkach.

**) Przyjęto w polskiej mowie posługiwać się terminem międzynarodowym *tangens*, co odpowiada znakowi *tg*.

że odczytywanie jej kąta obrotu — dla tego właśnie potrzebna jest przytwierdzona do niej długa wskazówka (igła magnesowa ze wskazówką przedstawione są w powiększeniu na rys. 855b). Przyrząd ustawiamy tak, by oś igielki mieściła się w płaszczyźnie pierścienia, t. j., by pierścień przypadła w płaszczyźnie południka magnetycznego, gdy prądu



Rys. 855b.



Rys. 856.

w pierścieniu nie mamy (oczywiście, przyrząd winien być ustawiony zdala od przedmiotów magnetycznych, któreby zakłócały dokoła przyrządu pole magnetyczne ziemskie). W chwili, gdy puszczamy przez pierścień prąd, igielka się wychyla i staje pod pewnym kątem względem początkowego swego położenia, który to kąt możemy na skali kołowej odczytać.

Rys. 856 tłumaczy układ sił, działających teraz na igielkę; na bieguny igielki, zajmującej początkowo położenie ns , dopóki oś jej leżała w płaszczyźnie południka magnetycznego NS , teraz, gdy wychylona jest do położenia $n's'$, działają dwie pary sił, z których jedna usiłuje sprowadzić oś do płaszczyzny południka magnetycznego (działaniem pola magnetycznego ziemskiego), druga — ustawić tę oś prostopadłe do płaszczyzny pierścienia (działaniem pola magnetycznego, wytworzonego przez płynący w pierścieniu prąd elektryczny). Jak zwykle, oznaczamy przez H składową poziomą pola ziemskiego, przez F zaś natężenie pola prądu w środku pierścienia; dla uproszczenia zakładamy, że wartość F jest ta sama w całej tej okolicy, w której mieści się i porusza igielka. Jeżeli przez $+m$ i $-m$ oznaczymy masy magnetyczne biegunów igielki, to np. na jej biegun północny działają przy takim wychyleniu siły mH i mF i, podobnie jak w przypadku, rozważanym na str. 202, rys. 801, wartość kąta wychylenia α określa wzór.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{m F}{m H} = \frac{F}{H} \dots \dots \dots (1)$$

O ile chcemy mieć natężenie prądu w jednostkach elektromagnetycznych, to według tego, co powiedziane zostało w ust. poprzednim

$$F = 2\pi \frac{i}{r} \dots \dots \dots (2)$$

gdzie i oznacza natężenie (w jednostkach elektromagnetycznych) płynącego w pierścieniu prądu, zaś r promień tego pierścienia. Podstawiając (2) do (1), otrzymujemy:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2\pi i}{r H}, \dots \dots \dots (3)$$

skąd
$$i = \frac{r H}{2\pi} \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots (4)$$

Jeżeli zatem w miejscu, gdzie dokonywamy pomiaru, wartość składowej H magnetyzmu ziemskiego jest znana, to wobec tego, że dla danego przyrządu można r raz na zawsze wymierzyć, wystarcza za każdym razem tylko odczytać wartość kąta α , o który się wychylił igiełka względem jej położenia początkowego, aby obliczyć następnie szukaną wartość natężenia prądu. Dodajmy, że zazwyczaj używamy przy pomiarze przełącznika, pozwalającego zmienić kierunek prądu w pierścieniu, a przez to zmienić kierunek wychylenia igielki; odczytując dwa położenia końców igielki przy wychyleniu w jedną i drugą stronę, otrzymujemy kąt, którego połowa stanowi wartość kąta, podlegającego wyznaczeniu; stosując tę metodę, unikamy błędu, związanego z niepewnością, czy początkowy kierunek osi igielki przypada ściśle w płaszczyźnie pierścienia.

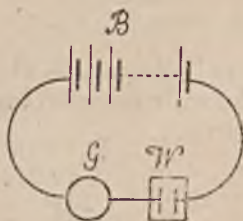
Przykład: pomiar składowej poziomej w miejscu, gdzie pracujemy z busolą stycznych, dał nam $H = 0,186 \Gamma$; pierścień użytej w doświadczeniu busoli ma promień 20 cm; kąt wychylenia igielki, gdy przez pierścień busoli płynie prąd, który chcemy zmierzyć, jest $\alpha = 18^{\circ}45'$. Według wzoru (4) otrzymujemy:

$$i = \frac{20 \text{ cm} \cdot 0,186 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{ sek}}}{2 \cdot 3,14} \cdot 0,3395 =$$

$$= 0,2 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} = 0,2 \text{ jed. el. magn. nat. prądu.}$$

Gdyby prąd, który w tym przykładzie mierzymy, przechodził przez woltametr (według schematu na rys. 857, gdzie B oznacza baterję ogniw, W — woltametr, zaś G — busolę stycznych), zauważylibyśmy dość energiczne wydzielanie się produktów elektrolizy; tymczasem natężenie prą-

du wyraża się niewielkim ułamkiem 0,2. Wskazuje to, iż na elektromagnetyczną jednostkę natężenia prądu obraliśmy prąd znacznego względnie natężenia. Okazuje się z całego szeregu danych, że istotnie dla celów



Rys. 857.

praktycznych określona w powyższy sposób jednostka elektromagnetyczna natężenia prądu jest za wielka i dlatego ustalono *jednostkę praktyczną natężenia prądu, zwaną amperem, w ten sposób, że:*

$$1 \text{ amper} = \frac{1}{10} \text{ jednostki elektromagnetycznej natężenia prądu} . . . (5)$$

Dając określenie ampera, teraz dopiero spełniamy to, cośmy zapowiedzieli w ust. 307.

Busola stycznych pozwala, oczywiście, mierzyć prąd także w amperach, tylko należy w tym celu zmienić nieco wzór (4). Skoro amper jest jednostką dziesięć razy mniejszą od jednostki elektromagnetycznej, przeto liczba, wyrażająca natężenie jakiegokolwiek prądu w amperach, jest dziesięć razy większą od tej, która wyraża to natężenie w jednostkach elektromagnetycznych (podobnie, jeżeli pewna długość wynosi 5 dm, ta sama długość w centymetrach wyrazi się dziesięć razy większą liczbą 50 cm). Chcąc dostosować wzór (4) do mierzenia przy pomocy busoli stycznych natężenia prądu w amperach, należy go zmienić tak:

$$i = 10 \cdot \frac{r H}{2 \pi} \operatorname{tg} \alpha = \frac{5 r H}{\pi} \operatorname{tg} \alpha (6)$$

Bywa, że busola stycznych zamiast pojedynczego pierścienia ma zwój, utworzony z wielu skrętów drutu (jeden skręt od drugiego jest, oczywiście, izolowany); działanie magnetyczne tych skrętów sumuje się i w środku zwoju — tam, gdzie przypada igła magnesowa busoli, otrzymuje się przy n skrętach n razy większe natężenie pola magnetycznego niż przy pojedynczym pierścieniu. Dla tego rodzaju busoli wzór (2) przybiera postać

$$F = 2 \pi \frac{n i}{r} , (7)$$

zamiast wzoru (3) mamy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \pi n i}{r H} \dots \dots \dots (8)$$

i odpowiednio dalej zamiast wzorów (4) i (6):

$$i = \frac{r H}{2 \pi n} \operatorname{tg} \alpha, \dots \dots \dots (9)$$

gdy chodzi o zmierzenie natężenia prądu w jednostkach elektromagnetycznych, oraz

$$i = \frac{5 r H}{2 \pi n} \operatorname{tg} \alpha, \dots \dots \dots (10)$$

gdy chodzi o zmierzenie natężenia prądu w amperach.

Dodajmy, że igielki busoli bywają też zaopatrzone w zwierciadélka, przy których pomocy metodą optyczną znacznie dokładniej wyznaczamy kąt α wychylenia, aniżeli przy pomocy zwykłej wskazówki, jak na rys. 855.

We wzorze dla busoli stycznych spółczynnik, przez który trzeba mnożyć $\operatorname{tg} \alpha$, by otrzymać i , nie jest stały, gdyż w skład jego wchodzi H , które jest zmienne. Wszakże, jeżeli zaniedbamy te zmiany H , co w wielu pomiarach natury technicznej można uczynić, spółczynnik ten staje się wielkością stałą, charakterystyczną dla danej busoli w danym miejscu. Wzór (6), względnie (10) można wtedy napisać w postaci

$$i = C \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots (11)$$

Spółczynnik C nosi nazwę *spółczynnika redukcijnego* busoli.

Zróbmy teraz doświadczenie według schematu, przedstawionego na rysunku 857, ale z myślą następującą. Prąd elektryczny z odpowiedniej baterji ogniów idzie przez busolę stycznych (G) i przez woltametr (W) np. srebrowy. Notujemy czas trwania prądu i wychylenie igły magnesowej (kąt wychylenia odczytujemy np. co pół minuty — jeżeli są pewne wahania tej wartości, bierzemy ostatecznie wartość średnią). Po przerwanii prądu ważymy katodę, która była również zważona przed rozpoczęciem doświadczenia, i wyznaczamy, ile się wydzielilo w tym czasie na niej srebra. Według wzoru (6), względnie (10) obliczamy, jakiego natężenia prąd (w amperach) szedł przez woltametr, a stąd już łatwo znajdujemy, ile srebra wydziela w woltametrze srebrowym prąd 1 ampera w ciągu jednej sekundy, t. j. wyznaczamy równoważnik elektrochemiczny srebra. W podobny sposób postępujemy z woltametrem miedziowym, tlenowodorowym i t. d. (możemy te wszystkie woltometry włączyć naraz jeden za drugim w szereg); tą drogą właśnie tworzymy tabelkę równoważników elektrochemicznych (patrz ust. 311, str. 136).

Określając praktyczną jednostkę natężenia prądu *amper*, ustalamy tem również praktyczną jednostkę naboju elektrycznego — *kulomb*, jako nabój, przenoszony przy prądzie stałym o natężeniu jednego ampera przez ten czy inny przekrój przewodnika w ciągu 1 sekundy. Na

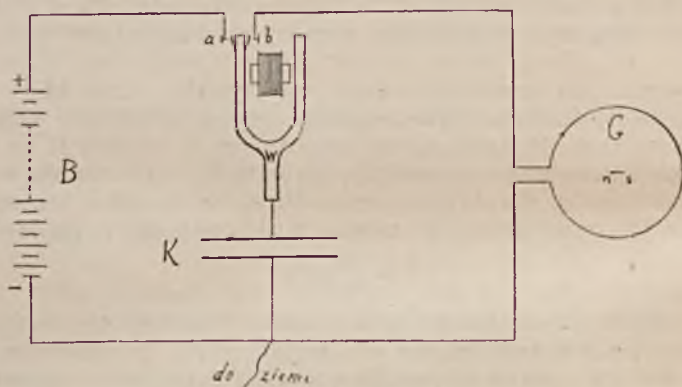
tej właśnie podstawie znajdujemy podaną wyżej (ust. 313, str. 143) stałą Faraday'a. Oczywiście, (patrz wzór 12 ust. poprzedniego).

$$1 \text{ kulomb} = \frac{1}{10} \text{ gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (12)$$

339. Stosunek jednostki elektromagnetycznej do jednostki elektrostatycznej natężenia prądu elektrycznego.

Na rys. 858 przedstawiony jest schemat niezmiernie doniosłego doświadczenia.

B oznacza tu baterję akumulatorów wysokiego napięcia; jeden biegun tej baterji jest uziemiony, drugi zapomocą śrubki *a* to się łączy, to odłącza od sprężynki, przytwierdzonej do ramienia drgającego kamertonu *W* *). Druga sprężynka, połączona z temże ramieniem kamerto-



Rys. 858.

nu, podczas drgań jego to dotyka, to nie dotyka końca śrubki *b*, połączonej drutem z jednym zaciskiem busoli stycznych *G*. Drugi zacisk busoli stycznych jest uziemiony. Kamerton jest izolowany i na stałe połączony z jedną okładką kondensatora *K*, którego druga okładka jest uziemiona. W chwili, gdy ramię kamertonu łączy się ze śrubką *a*, kondensator ładuje się do potencjału baterji, który to potencjał może być wyznaczony przy pomocy elektrometru bezwzględnego (rys. 687 na str. 65); po upływie połowy okresu drgania kamertonu, t. j. w chwili, gdy ramię kamertonu dotyka śrubki *b*, kondensator zostaje wyładowany poprzez busole stycznych *G*.

Jeżeli potencjał baterji jest *V*, zaś pojemność kondensatora jest *c*, nabój na kondensatorze, gdy jest naładowany, jest $e = cV$. Jeżeli częstotliwość drgań kamertonu jest *N*, to *N* razy w ciągu sekundy nabój warto-

*) Drgania kamertonu wywoływane są przez umieszczony między jego ramionami elektromagnes — szczegóły tego urządzenia pomijamy.

ści $e = cV$ przebiega przez pierścień, względnie zwój busoli. Mamy tu wprawdzie w busoli nie prąd ciągły, ale szereg szybko po sobie następujących prądów; możemy jednak do tego zjawiska zastosować termin „natężenia prądu”, rozumiejąc tu, jak zawsze, przez natężenie prądu stosunek naboju, przechodzącego przez dowolne miejsce obwodu, do czasu, w którym to przejście zachodzi. Zatem w jednostkach elektrostatycznych wartość średnia tego natężenia prądu wyrazi się wzorem

$$i_E = NcV \dots \dots \dots (1)$$

Z drugiej strony prąd ten płynie przez busołą stycznych, powodując wychylenie igły o kąt α . Jeżeli n jest liczbą skrętów busoli, r wartością promienia tych skrętów, to według ust. poprzedniego w jednostkach elektromagnetycznych wartość natężenia prądu wyraża się wzorem

$$i_M = \frac{rH}{2\pi n} \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots (2)$$

Mamy zatem możliwość zmierzenia jednego i tego samego prądu elektrycznego w jednostkach elektrostatycznych i elektromagnetycznych. Liczby te łącznie z ich wymiarami dają się porównać i w ten sposób daje się ustalić stosunek wzajemny obu tych jednostek.

Weźmy dla przykładu dane jednego z takich pomiarów. Pojemność kondensatora jest $0,1MF = 9 \cdot 10^4$ cm; różnica potencjałów na biegunach baterji = $4 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$ *). Kamerton wykonywa 150 pełnych drgań w sekundzie. Mamy więc

$$i_E = 150 \frac{1}{\text{sek}} \cdot 9 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot 4 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} = 54 \cdot 10^6 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2} \quad (3)$$

Z drugiej strony busola stycznych ma 10 skrętów o średniej wartości promienia 10 cm; wartość składowej poziomej w miejscu obserwacji jest 0,185 l' i kąt wychylenia igły wynosi $3^{\circ}29',8$ **). A więc

$$i_M = \frac{10 \text{ cm } 0,185 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{sek}}}{2 \cdot 3,14 \cdot 10} \cdot 0,0611 = 0,0018 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$$

Szukany stosunek wynosi

$$\frac{i_E}{i_M} = \frac{54 \cdot 10^6 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2}}{0,0018 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}} = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sek}} \dots \dots \dots (5)$$

*) Jest to np., mniej więcej, napięcie baterji, złożonej z 600 małych akumulatorów, połączonych w szereg (1200 woltów).

**) Wyznaczenia kąta wychylenia dokonywa się w tym razie metodą optyczną, co wymaga, by magnes busoli był zaopatrzony w zwierciadko.

Jest rzeczą znaną, że na stosunek ten otrzymujemy liczbę, wyrażającą (łącznie z wymiarem) *prędkość światła* w próżni *). Do tego wrócimy jeszcze w dalszym ciągu naszego wykładu.

O ile chodzi tylko o liczby, wyrażające natężenie jednego i tego samego prądu w jednostkach elektromagnetycznych i elektrostatycznych, możemy rozumować w sposób następujący: Wyrażenie (3) daje nam wartość natężenia prądu w jednostkach elektrostatycznych, wyrażenie (4) daje wartość tegoż natężenia w jednostkach elektromagnetycznych. Możemy więc napisać:

$$54,10^7 \text{ jedn. el. st. nat. prądu} = 0,018 \text{ jedn. el. magn. nat. prądu.}$$

$$\text{stad} \quad \frac{\text{jedn. el. mag. nat. pr.}}{\text{jedn. el. stat. nat. pr.}} = \frac{54 \cdot 10^7}{0,018} = 3 \cdot 10^{10},$$

albo

$$\text{jedn. el. mag. nat. prądu} = 3 \cdot 10^9 \text{ jedn. el. stat. nat. prądu.}$$

Amper jest $\frac{1}{10}$ webera (jedn. el. mag. nat. prądu), przeto

$$\text{amper} = 3 \cdot 10^9 \text{ jedn. el. st. nat. prądu.}$$

Takie właśnie określenie ampera podaliśmy na str. 125. Pamiętajmy jednak, że natężenie prądu, wyrażone raz w jednostkach elektromagnetycznych, drugi raz w jednostkach elektrostatycznych, przedstawia się nie tylko inną liczbą ale i *innym wymiarem*. A więc prąd tego natężenia, który nazywamy amperem, przedstawia się w układzie elektrostatycznym tak

$$3 \cdot 10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2};$$

ten sam prąd w jednostkach elektromagnetycznych wyraża się, jako

$$\frac{1}{10} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$$

Weźmy stosunek obu tych wielkości.

$$\frac{3 \cdot 10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2}}{\frac{1}{10} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}} = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

Nie otrzymujemy na ten stosunek liczby oderwanej, i raz jeszcze podkreślamy, że stosunek ten oznacza *prędkość światła* w próżni.

*) Oczywiście, doświadczenia te, bynajmniej niełatwe, były niejednokrotnie powtarzane dla wykluczenia nieuniknionych przy każdej pracy eksperymentalnej błędów.

Ćwiczenia i zadania.

531. Prąd elektryczny stały płynie przez długi pręt metalowy. Jak należy umieścić w pobliżu pręta krótki kawałek prostoliniowy drutu żelaznego, by można było przyjąć praktycznie, iż utworzyła się z niego igielka magnesowa o osi magnetycznej, przypadającej w kierunku długości odcinka drutu?

532. Prąd elektryczny stały płynie przez długi pręt metalowy, przechodzący przez środek pierścienia żelaznego, którego płaszczyzna jest prostopadła do pręta. Jak magnesuje się pierścień żelazny?

533. Jaka jest wartość natężenia pola magnetycznego w środku kołowego zwoju drutu, złożonego z 30 skrętów o średnicy przeciętnej 25 cm, gdy przez zwój pły-

nie prąd elektryczny o natężeniu 1) 3 amperów, 2) $25000 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2}$?

534. Zwój kołowy drutu, złożony z 10 skrętów o średnicy 16 cm, ustawiony jest pionowo prostopadle do płaszczyzny południka magnetycznego. Zawieszona poziomo w środku zwoju igielka magnesowa, wprawiona w ruch wahadłowy, wykonywa 18 wahań na minutę, gdy pewnego natężenia prąd płynie przez zwój w jednym kierunku, zaś 30 wahań, gdy kierunek tegoż prądu w zwojach zostaje zmieniony na wręcz przeciwny. Jaka jest wartość natężenia prądu w zwoju, jeżeli wiadomo, że w danym miejscu $H = 0,18 \Gamma$ oraz że natężenie pola magnetycznego prądu w środku zwoju ma większą wartość niż H ?

535. Zwój kołowy drutu o 30 skrętach i promieniu 40 cm ustawiony jest pionowo prostopadle do płaszczyzny południka magnetycznego. Gdy prądu w tym zwoju nie ma, zawieszona poziomo w środku zwoju na cienkim nieskręconym włóknie igielka magnesowa wykonywa po wprawieniu jej w drganie 15 wahań w minucie; gdy puszczamy przez zwój prąd, igła zwraca się biegunami swemi w przeciwne strony i, drgając, wykonywa 50 wahań w ciągu minuty. Jakie jest natężenie danego prądu, jeżeli w miejscu obserwacji $H = 0,2 \Gamma$?

536. Dwie busole stycznych posiadają zupełnie jednakową budowę, różniąc się jedynie liczbą skrętów w zwojach. Puszczamy prąd przez obie busole, łączone w szereg, i otrzymujemy w jednej z nich odchylenie igły 45° , w drugiej 31° . W jakim stosunku pozostają liczby skrętów w zwojach obu przyrządów?

537. Busola stycznych ma zwój, złożony z 10 skrętów o średnicy 30 cm. Zakładamy, że w tej busoli odczytania są niepewne przy odchyleniach igielki mniejszych niż 3° i większych niż 60° . W jakich granicach mieszczą się natężenia prądów, które mogą być mierzone przy pomocy tej busoli?

538. W pewnej busoli stycznych prąd o natężeniu 5 amperów warunkuje odchylenie igielki magnesowej o 45° ; jakiego natężenia prąd warunkuje w tej samej busoli odchylenie igielki 30° i 60° ?

539. Jaka średnicę powinien posiadać pierścień (pojedynczy) busoli stycznych jak na rys. 855, by w miejscu, gdzie wartość składowej poziomej jest $H = 0,192 \Gamma$, wartość natężenia prądu dawana była przez wartość tangensa kąta wychylenia?

540. Prąd o natężeniu 1,188 amperów warunkuje wychylenie igielki danej busoli stycznych o kąt 23° . Jaka jest wartość współczynnika redukcyjnego dla danej busoli, jeżeli zaniedbujemy zmiany H ?

541. W szereg z busolą stycznych włączony jest woltametr tlenowodorowy (jak na rys. 731, na str. 129). Dany prąd warunkuje w busoli wychylenie igielki $\alpha = 28^\circ$, w woltametrze zaś wydziela się w ciągu 5 minut 86,6 cm³ wodoru. Dzieje się to w temperaturze $t = 26^\circ$, przy ciśnieniu atmosferycznym $b = 763$ mm. Końcowe położenie poziomu cieczy w zbiorniku kulistym woltametrzu przypada o 62 cm ponad poziomem cieczy w rurce z wodorem: 1) jakiego natężenia jest prąd użyty? 2) jaki jest współczynnik redukcyjny danej busoli (zakładając, że zmiany H zaniedbujemy)? 3) jakiego natężenia prądu trzeba, by w danej busoli nastąpiło wychylenie igielki o kąt $\alpha = 45^\circ$.

542. W busoli stycznych o pojedynczym skręcie (jak na rys. 855), którego promień jest $r = 16,5$ cm, dany prąd wywołuje wychylenie igły, wahające się w ciasných granicach, które przyjąć można za $\alpha = 55^\circ$. We włączonym w szereg z busolą woltametrze srebrowym wydziela się w ciągu 3 m 20 sek. 1,677 gr srebra. Jaka jest wartość składowej poziomej magnetyzmu ziemskiego w miejscu obserwacji?

543. Składowa pozioma magnetyzmu ziemskiego w miejscu obserwacji jest $H = 0,186$ Γ; busola stycznych ma 20 skrętów o promieniu 10 cm. Znaleźć natężenie prądu, płynącego przez busolę, gdy igła busoli wychyla się o kąt 32° ?

544. Jak daje się wycechować przy pomocy busoli stycznych jakikolwiek ampermetr?

545. W doświadczeniu, wykonanem według schematu z rys. 858, wyładowania baterji kondensatorów zachodzą 200 razy na sekundę; pojemność baterji wynosi 1MF i ładuje się ona do potencjału 1000 woltów. Busola stycznych użyta w doświadczeniu składa się z pojedynczego pierścienia o średnicy 20 cm: 1) jaka jest wartość natężenia pola magnetycznego w środku pierścienia busoli; 2) jakie otrzymuje się wychylenie igły busoli, jeżeli w miejscu obserwacji $H = 0,2$ Γ; 3) jakie wychylenie igły otrzyma się w razie, gdy wszystkie warunki doświadczenia pozostaną bez zmiany, jedynie busola mieć będzie nie pojedynczy pierścień, ale zwój o 30 skrętach tej samej średnicy.

546. Posługując się określeniem potencjału, podanem w ust. 288, dowieść, że jednostka potencjału w układzie elektromagnetycznym jest: $1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2}$?

547. Posługując się określeniem pojemności elektrycznej, podanem w ust. 294, dowieść, że jednostką pojemności w układzie elektromagnetycznym jest: $\frac{\text{sek}^2}{\text{cm}}$?

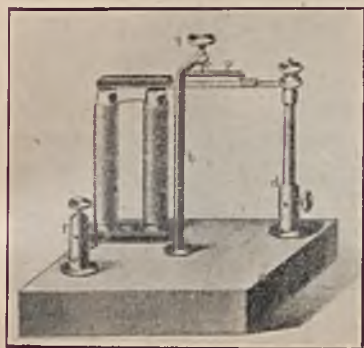
548. Pamiętając, że, jeżeli z przeniesieniem naboju 1 kulomba z jednego miejsca w polu elektrycznym do innego miejsca związane jest wykonanie pracy 1 dżula, to różnicę potencjałów w tych obu miejscach pola określamy jako równą jednemu woltowi (p. ust. 288), dowieść, że wolt = 10^9 jedn. el. magn. potencjału = $10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2}$?

549. Przypominając sobie określenie farada (ust. 294), dowieść, że farad = 10^{-9} jedn. el. magn. pojemności = $10^{-9} \frac{\text{sek}^2}{\text{cm}}$?

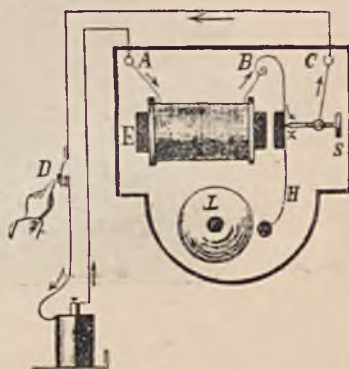
550. Jaki jest wymiar współczynnika redukcyjnego busoli stycznych?

551. W elektromagnesie typu takiego, jak na rys. 835, osiąga się namagnesowanie rdzenia żelaznego do nasycenia przy prądzie 15 amperów. Czy otrzymamy jaki pożyteczny wynik, puszczać przez zwoje tego elektromagnesu prąd większego natężenia, np. 25 amperów. Jak można się przekonać doświadczalnie o słuszności zrobionego wniosku?

552. Na rys. 859 widzimy urządzenie, zwane przerywaczem elektromagnetycznym, albo częściej młotkiem Neefa. Prąd idzie od zacisku *f* do zacisku *d* drogą następującą: najpierw przez zwoje elektromagnesu, stamtąd przez pręt *b*, ostrze platynowe *c*, mieszczące się na końcu śruby *q*, płytkę platynową, której to ostrze dotyka, i wreszcie złączoną z tą płytką blaszkę *p*, tworzącą jedną całość z blaszką stalową, przytwierdzoną jednym końcem do słupa *d*, drugim — leżącą ponad biegunami elektromagnesu i dźwigającą tam na końcu płytkę żelazną. Z chwilą puszczenia prądu przez ten przyrząd płytka żelazna zostaje przyciągnięta do biegunów elektromagnesu, co powoduje pochYLENIE SIĘ KU DOŁOWI blaszki *p*, a co zatem idzie — przerwanie zetknięcia



Rys. 859.



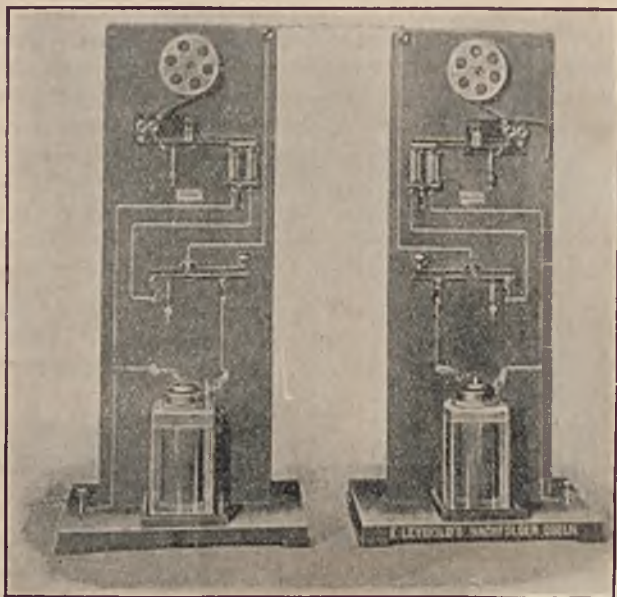
Rys. 860.

między ostrzem platynowym a płytką platynową. Prąd przez to zostaje przerwany, elektromagnes przestaje działać, siły sprężyste unoszą *p* w górę, znowu zachodzi zetknięcie ostrza platynowego i płytki, zamknięcie na nowo prądu, poczem proces opisany się powtarza. Zachodzi w ten sposób automatyczne przerywanie prądu oraz towarzyszące temu drganie „młoteczka“. Urządzenie to znajduje wiele zastosowań, między innymi w budowie dzwonka elektrycznego. Na rys. 860 przedstawiona jest schematycznie budowa takiego dzwonka. Proponujemy czytelnikowi zorientowanie się w tym schemacie, znalezienie w nim młoteczka Neefa i wytłumaczenie funkcjonowania dzwonka.

553. Wobec możliwości połączenia dowolnych dwu miejsc na ziemi przewodnikiem, rozpiętym w powietrzu na izolatorach, utrzymywanych przez słupy, przyczem drugi przewodnik zastąpić może sama ziemia, do której są wkopane w obu miejscach, ze sobą połączone, płyty miedziane *), daje się przez zamknięcie obwodu

*) W przypadku, gdy miejsca te są przedzielone oceanem, używa się do połączenia t. zw. kabli podmorskich, t. j. umieszczonych na dnie morskiem przewodników, chronionych przez odpowiednie osłony.

prądu w jednym z tych miejsc uruchomić elektromagnes, znajdujący się w drugim, a w ten sposób przesłać z jednego miejsca do drugiego *sygnal telegraficzny*. Za wiele czasu zajęłoby nam opisywanie udoskonalonego dziś telegrafu. Wystarczy, jeżeli



Rys. 861.

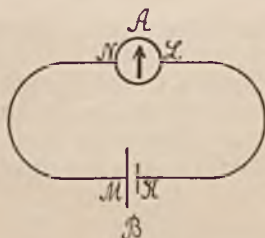
zrozumiemy zasadę najprostszego urządzenia, pozwalającego zapomocą elektromagnesu nakreślić znak (dłuższą kreskę lub krótszą) na taśmie papieru, przeciąganej przez mechanizm zegarowy pod lub nad kreślącym znaki piórem. Ze znaków takich daje się odczytywać w umówiony sposób litery. Na rys. 861 mamy model szkolny telegrafu. Proponujemy czytelnikowi zorientowanie się w urządzeniu modelu.

ROZDZIAŁ VIII.

OPÓR ELEKTRYCZNY, PRAWO OHMA. PRAWO JOULE'A.

340. Pojęcie oporu elektrycznego.

Połączmy bieguny ogniwa Greneta niedługim (30 cm—50 cm) drutem miedzianym o przekroju około 1 mm², włączając w obwód galwanometr wykładowy lub lepiej ampermetr. Na schemacie (rys. 862) *B* oznacza ogniwo, *A* — ampermetr, *MN* i *KL* — wzmiarkowany drut, podzielony dla wygody na dwie części. Po zanotowaniu wychylenia gal-



Rys. 862.

wanometru, względnie odczytaniu na ampermetrze natężenia prądu w utworzonym obwodzie, zastąpmy dane odcinki drutu *MN* i *KL* przez inne dwa, np. dwa długie na kilka metrów każdy druty miedziane o średnicy około 0,1 mm, albo przez dwa żelazne takich mniej więcej wymiarów, jak pierwsze dwa miedziane. Powtórzenie doświadczenia z temi nowemi drutami wykazuje, że teraz natężenie prądu w obwodzie jest mniejsze.

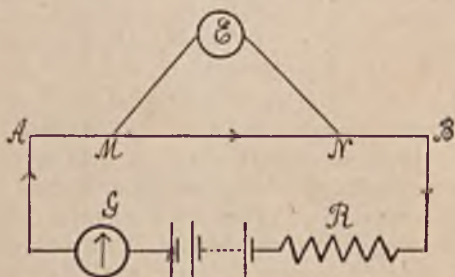
Zmieniamy raz jeszcze doświadczenie, używając ponownie pierwszej pary drutów, ale zastępując użyte ogniwo Greneta również przez ogniwo Greneta, tylko znacznie mniejszych rozmiarów, mające płyty w tej samej odległości co pierwsze tylko o powierzchni — dajmy na to — dziesięciokrotnie mniejszej. Przekonywamy się, że i tym razem prąd w obwodzie ma natężenie mniejsze niż w doświadczeniu pierwszym.

Zatem ze źródła prądu o określonej różnicy potencjałów na biegunach (różnica ta, jak wiemy, nie zależy od wymiarów ogniwa, a więc w obu użytych do doświadczenia ogniwach jest jednakowa), otrzymuje się w obwodzie prąd różnego natężenia, zależnie od wymiarów drutu, łączącego bieguny, zależnie od materiału, z którego drut jest zrobiony, wreszcie zależnie od rozmiarów samego ogniwa. Chcąc sobie zdać sprawę z zauważonych tu faktów, wprowadzamy pojęcie *oporu elektrycznego*, mówiąc, że użyte w doświadczeniach powyższych przewodniki mają różne opory elektryczne, a im większy jest opór obwodu, tem mniejsze tworzy się natężenie prądu przy tej samej sile elektromotorycznej źródła. Podobnie, gdy dwa naczynia z wodą, podtrzymywaną w nich na różnych lecz określonych poziomach, łączymy wąską rurką, otrzymujemy w niej mniejszego natężenia prąd wodny (mniej wody przepływa przez taką rurkę w określonym czasie), aniżeli w przypadku, gdy używamy do połączenia naczyń rury szerokiej — mówimy, iż wąski kanał stawia wodzie większy opór.

Z powiedzianego wynika, że brać tu należy pod uwagę zarówno opór drutów, łączących bieguny ogniwa w danym obwodzie — opór ten nazywamy *oporem zewnętrznym*, jak również opór samego ogniwa, które wszak tworzy część składową obwodu — ten opór źródła prądu nazywamy *oporem wewnętrznym*.

341. Prawo Ohma. Jednostka oporu elektrycznego.

W ust. 303 poznaliśmy jeden z faktów zasadniczych, wiążących się ze zjawiskiem prądu elektrycznego, a mianowicie spadek potencjału wzdłuż drogi prądu. Ograniczyliśmy się tam do podania bardzo prostego doświadczenia, stwierdzającego ten fakt. Rozporządzając dosta-



Rys. 863.

tecnie czułym i wycechowanym elektrometrem, możemy powtórzyć to doświadczenie w innej nieco postaci, przedstawionej na schemacie (rys. 863). Tworzymy obwód prądu, którego źródłem jest ogniwo, względnie bateria ogniw; w obwód włączamy galwanometr G , pozwalający mierzyć natężenie prądu; część obwodu tworzy rozpięty prosto-

linjowy drut jednorodny AB ; część tegoż obwodu stanowi odpowiednic dobrany zwój drutu R . Doświadczenie nie należy do łatwo dających się uskutecznić; nie wdajemy się w szczegóły, podkreślając jedynie zasadnicze jego strony, by czytelnik mógł zdać sobie sprawę z przebiegu obserwacji *). Mamy tedy w obwodzie prąd elektryczny o kierunku, wskazanym strzałką (w przyjętem technicznem znaczeniu), a zarazem według tego, co już wiemy—spad potencjału wzdłuż przewodnika, łączącego bieguny baterji (ogniwa). Istotnie, jeżeli jakiegokolwiek dwa miejsca M i N drutu AB połączymy z odpowiednio czułym elektrometrem E , wykaże on istnienie w tych punktach M i N pewnej różnicy potencjałów, przyczem, im dalej od siebie są położone te punkty, tem różnica ta przy pozostałych warunkach niezmiennych jest większa, im bliżej — tem mniejsza. Jak już wyjaśniliśmy, różnica potencjałów V_M i V_N w punktach M i N jest niezbędnym warunkiem ruchu elektryczności na tym odcinku (w istocie ruchu elektronów od N ku M).

Obierzmy teraz sobie określone położenie punktów M i N i zanotujmy zarówno różnicę potencjałów $V_M - V_N$, wskazaną przez elektrometr, jak dane przez galwanometr natężenie prądu i , płynącego przez obwód, a więc i przez odcinek MN . Potem zastąpmy w obwodzie zwój R przez inny, o innym oporze elektrycznym, i powtórzmy doświadczenie. Zgodnie z oczekiwaniem, wypływajacem z tego, co poznaliśmy w ust. poprzednim, otrzymujemy teraz inne natężenie prądu w obwodzie, a więc i na odcinku MN ,—dajmy na to i' ; ale jednocześnie elektrometr E wskazuje istnienie między punktami M i N innej różnicy potencjałów V'_M i V'_N . Zmieńmy jeszcze raz lub kilka razy zwój drutu, włączony w obwód, na coraz to inny i zanotujmy za każdym razem natężenie prądu i i różnicę potencjałów w punktach M i N , dbając jednocześnie, by temperatura obserwowanego odcinka MN drutu pozostawała bez zmiany (drut może np. mieścić się w kąpeli z oleju parafinowego o stałej temperaturze). Przekonywamy się na podstawie szeregu takich pomiarów, że, jakkolwiek zmienia się natężenie i prądu w odcinku MN (to samo natężenie mamy w całym obwodzie), a jednocześnie zmienia się różnica potencjałów V_M i V_N na jego końcach M i N , wielkości te pozostają przez cały czas *w stałym do siebie stosunku, t. j. są proporcjonalne* (o ile — powtarzamy — stan fizyczny drutu MN nie ulega podczas tego zamianie, np. temperatura jego się nie zmienia). Możemy zatem napisać

$$\frac{V_M - V_N}{i} = r \dots \dots \dots (1)$$

albo

$$V_M - V_N = r \cdot i \dots \dots \dots (2)$$

*) W ciągu całego wykładu nie ograniczamy się do podawania jedynie doświadczeń, które każdy może łatwo powtórzyć; opisujemy też doświadczenia, nie dla wszystkich dostępne, o ile chodzi o zapoznanie czytelnika z ważniejszymi zdobyczami nauki.

gdzie r jest pewnym dla danego odcinka MN drutu stałym współczynnikiem proporcjonalności.

Jeżeli powtórzymy całą serję podanych pomiarów, wzięwszy bliżej albo dalej siebie położone punkty M i N , przyczem podczas całej serji odległość ta zmienianą nie będzie, przekonamy się, że i tym razem, o ile stan fizyczny obranego odcinka MN drutu będzie pozostawał niezmienny, natężenie prądu w odcinku oraz różnica potencjałów na jego końcach pozostawać będą w stosunku do siebie stałym, innym wszakże niż poprzednio, tak że napisać teraz będziemy mogli

$$\frac{V'_M - V'_N}{i'} = r' \dots \dots \dots (3)$$

albo
$$V'_M - V'_N = r' \cdot i' \dots \dots \dots (4)$$

Podobnie, jeżeli, nie zmieniając miejsc M i N na drucie, ogrzejemy odcinek MN drutu do wyższej temperatury, albo oziębimy (dobierzemy odpowiedniej temperatury kąpiel, w której drut jest zanurzony; zmieniają się przytem nieco wymiary drutu, co daje się w odpowiedni sposób uwzględnić) i, podtrzymując tę temperaturę, powtórzymy całą

serję pomiarów, to znowu stosunek $\frac{V''_M - V''_N}{i''}$ będzie pozostawał stały, inny jednak, niż poprzednio, a więc

$$\frac{V''_M - V''_N}{i''} = r'' \dots \dots \dots (5)$$

albo
$$V''_M - V''_N = i'' \cdot r'' \dots \dots \dots (6)$$

Gdy wreszcie usuniemy z obwodu (np. wytniemy) odcinek MN danego drutu i zastąpimy go przez inny odcinek np. z tegoż materiału lecz innej grubości, albo z innego jakiegoś materiału, znowu się okaże dla całej serji opisanych pomiarów stosunek różnicy potencjałów na końcach odcinka do natężenia prądu wielkością stałą, lecz inną niż w powyższych przypadkach.

Jeżeli zatem w przewodniku o stałych własnościach fizycznych (w powyższych doświadczeniach odcinku drutu MN) tworzy się prąd elektryczny (i), uwarunkowany przez istnienie pewnej różnicy potencjałów ($V_1 - V_2$) *) na końcach tego przewodnika, między wielkościami temi zachodzi zawsze stosunek proporcjonalności. Wyrażamy to właśnie wzorem

$$V_1 - V_2 = i \cdot r \dots \dots \dots (7)$$

*) Podkreślamy, że nie chodzi tu o wartość bezwzględną V_1 oraz V_2 , ale tylko o różnicę $V_1 - V_2$.

gdzie r jest stałym dla danego przewodnika w danych warunkach fizycznych współczynnikiem proporcjonalności. Ten współczynnik r cechuje zatem dany przewodnik, jest dla niego i tylko dla niego charakterystyczny, będąc różnym naogół dla różnych przewodników. Otóż temu właśnie charakterystycznemu współczynnikowi nadajemy miano oporu elektrycznego danego przewodnika.

Wzór (7) napisać można inaczej, a mianowicie:

$$i = \frac{V_1 - V_2}{r} \dots \dots \dots (8)$$

który odczytać możemy tak: natężenie prądu elektrycznego w danym odcinku przewodnika mierzy się ilorazem różnicy potencjałów na jego końcach przez jego opór elektryczny. Im większa jest ta różnica potencjałów przy danym oporze, tem większe jest natężenie prądu; przeciwnie, im większy jest opór elektryczny przewodnika przy tej samej różnicy potencjałów na jego końcach, tem mniejsze jest natężenie prądu. Wszystko to jest w doskonałej zgodzie z wyobrażeniem o oporze, które wyrobiliśmy sobie na podstawie powiedzianego w ust. poprzednim.

Twierdzenie, wyrażone czy to wzorem (7), czy równoznacznym mu wzorem (8), ustalone zostało przez Ohma i nosi nazwę prawa Ohma*). Prawu temu podlegają ściśle wszystkie przewodniki metaliczne zarówno jak elektrolity**).

Ze wzorów (7) i (8) wypływa też określenie jednostki oporu elektrycznego. Opór takiego przewodnika uważamy za jednostkę, w którym istnienie na jego końcach różnicy potencjałów, równe jednostce, warunkuje istnienie prądu elektrycznego o natężeniu, równem jednostce. Dla tego przypadku wzór (8) nam daje

$$\text{jednostka natężenia prądu} = \frac{\text{jednostka różnicy potencjałów}}{\text{jednostka oporu}} \dots \dots (9)$$

Według tego łatwo jest znaleźć jednostkę oporu w układzie elektrostatycznym i elektromagnetycznym; rozwiązanie tego zagadnienia zalecamy czytelnikowi, odsyłając go do ćwiczeń i zadań tego rozdziału. Tutaj podkreślamy przyjętą powszechnie jednostkę praktyczną oporu elektrycznego, zwaną *omem* (ku uczczeniu nazwiska Ohma). Według powyższego możemy określić *om* w sposób następujący: opór jednego oma posiada przewodnik, w którym płynie prąd o natężeniu jednego ampera, o ile na końcach tego przewodnika podtrzymywana jest różnica potencjałów, równa jednemu woltowi. Zgodnie z wzorem (9) piszemy

$$1 \text{ amper} = \frac{1 \text{ wolt}}{1 \text{ om}} \dots \dots \dots (10)$$

*) Jerzy Szymon Ohm (1787 — 1854), znakomity fizyk niemiecki.

***) Przechodzeniu prądu przez elektrolity towarzyszą znane już nam, a komplikujące przebieg zjawiska prócesy; ograniczamy się narazie tylko do podkreślenia samego faktu, niżej zaś wskażemy, jak się dają pokonać doświadczalnie te komplikacje.

Z określenia wynika, że, gdybyśmy np. na końcach drutu, którego opór wynosi 5 omów, podtrzymywali różnicę potencjałów, równą 100 woltom, tobyśmy otrzymali natężenie prądu w drucie

$$I = \frac{100 \text{ woltów}}{5 \text{ omów}} = 20 \text{ amperów} \dots \dots \dots (11)$$

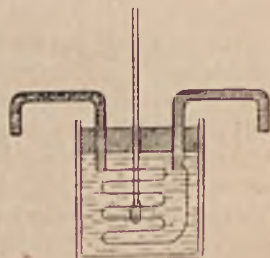
Jak widzimy, znane już nam czynności mierzenia natężenia prądu i różnicy potencjałów prowadzą do mierzenia oporu elektrycznego. Byłoby to jednak bardzo niedogodne i uciążliwe, gdybyśmy zawsze tą tylko drogą wyznaczeni opory. Zapomocą takich pomiarów jesteśmy w stanie ustalić *wzorzec oma*, t. j. znaleźć odpowiedni przewodnik, którego opór w określonych warunkach równa się jednemu omowi. Przez porównywanie oporów nieznanymi z takim wzorcem metodami, o których powiemy niżej, wyznaczać możemy te nieznanne opory. Teoretycznie ścisły om winien dokładnie odpowiadać wzorowi (10); realizacja praktyczna wzorca wiąże się zawsze z pewnymi trudnościami. W drodze umowy międzynarodowej ustalono więc wzorzec t. zw. *oma międzynarodowego*, oznaczając tem mianem opór słupka rtęci w temperaturze 0°, długości 106,3 cm. i masie = 14,4521 gr; przekrój poprzeczny tego słupka równa się niemal dokładnie 1mm² (słupek rtęci mieści się, oczywiście, w rurce o odpowiednim kanale). Om międzynarodowy niemal się równa teoretycznemu; w praktyce przyjęto posługiwać się nim wyłącznie.

Om oznacza się w skróceniu grecką literą Ω *).

Wzorce oma można też robić z drutów; zwłaszcza wskazane tu są jako materiały niektóre stopy, których opory bardzo nieznacznie się zmieniają wraz ze zmianami temperatury; najlepszym jest t. zw. *manganin* (stop miedzi manganu). Na wzorcach wskazana jest zawsze



Rys. 864a.



Rys. 864b.

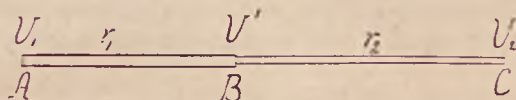
temperatura, w której opór jest ściśle taki, jaki na nim jest zaznaczony. Na rys. 864a widzimy taki manganinowy wzorzec oma; rys. 864b wskazuje schematycznie jego budowę — z końcami 2 grubych przewodników, których opory, jak zobaczymy niebawem, mogą być

*) Duże greckie O długie — t. zw. „omega“.

zupełnie niebrane pod uwagę, połączony jest drut manganinowy, mieszczący się w kąpeli oliwnej (temperaturę kąpeli utrzymujemy w danym razie 20°). Dobry wzorzec porównany jest zawsze pośrednio czy bezpośrednio ze wzorcem międzynarodowym i zaopatrzony w świadectwo, zawierające ewentualną poprawkę.

342. Opór przewodników, złączonych w szereg i równolegle.

Złączmy w szereg 2 druty, mające różne opory (np. miedziane różnych wymiarów, jak na rys. 865). Przypuśćmy, że opór jednego z tych drutów (AB) jest r_1 , drugiego (BC) — r_2 . Przypuśćmy, iż na końcu A



Rys. 865.

całego tego przewodnika podtrzymujemy stałą wartość potencjału V_1 , na końcu C — wartość V_2 , przyczem $V_1 > V_2$, a więc prąd (w znaczeniu technicznym) podąży od A do C. W punkcie B mamy wtedy pewien potencjał V' , mniejszy od V_1 , większy od V_2 . Oznaczmy natężenie prądu, płynącego przez oba przewodniki przez i . Według prawa Ohma napiszemy dla przewodnika AB

$$V_1 - V' = i \cdot r_1 \quad , \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

zaś dla przewodnika BC

$$V' - V_2 = i \cdot r_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Przez dodanie obu tych równości otrzymujemy

$$V_1 - V_2 = i (r_1 + r_2) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Z drugiej strony oznaczmy przez r opór całego przewodnika AC; znowu zgodnie z prawem Ohma napiszemy dla tej całości

$$V_1 - V_2 = i \cdot r \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Porównanie (3) i (4) daje

$$i (r_1 + r_2) = i \cdot r \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

czyli

$$r = r_1 + r_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

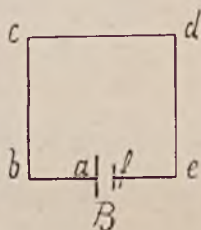
Zatem, jeżeli łączymy przewodniki w szereg, opór takiego szeregu równa się sumie oporów składowych jego części.

W przypadku nie dwu lecz większej liczby oporów, złączonych w szereg, otrzymać możemy wzór ogólniejszy, który proponujemy uzasadnić samemu czytelnikowi:

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n \dots \dots (7)$$

Nasuwa się tu uwaga, że, gdy w obwód, w którym pragniemy zmierzyć natężenie prądu, włączamy ampermetr, opór ampermetru dodaje się do już istniejących w obwodzie oporów, a zatem zmienia się mierzone natężenie. Dla uniknięcia właśnie tej okoliczności sporządzamy ampermetry o tak małym oporze, by mógł być w stosunku do oporu całego obwodu zaniedbany.

W ust. 340, rozważając prąd w obwodzie, zawierającym ogniwo, podkreślaliśmy konieczność uwzględniania zarówno oporu *zewnątrznego* jak *wewnętrznego*. Opór samego ogniwa łączy się tu w szereg



Rys 866

z oporem drutu, łączącego bieguny ogniwa (rys. 866). Stosując do tego obwodu zamkniętego prawo Ohma, napiszemy na wartość natężenia prądu w obwodzie

$$i = \frac{E}{r + R}, \dots \dots \dots (8)$$

gdzie przez E oznaczamy siłę elektromotoryczną ogniwa, przez r opór zewnętrzny, t. j. opór łączącego bieguny ogniwa drutu $abcdef$, zaś przez R opór wewnętrzny ogniwa B . Siła elektromotoryczna ogniwa, jak wiemy, mierzy się różnicą potencjałów na biegunach, gdy ogniwo jest otwarte. Jest to jedyny czynnik, podtrzymujący prąd w całym obwodzie. Przypuśćmy jednak, że rozpatrywalibyśmy jedynie część zewnętrzną obwodu i chcielibyśmy zastosować wzór Ohma jedynie dla drutu $abcdef$ o oporze r . Napisalibyśmy więc

$$i = \frac{V' - V''}{r}, \dots \dots \dots (9)$$

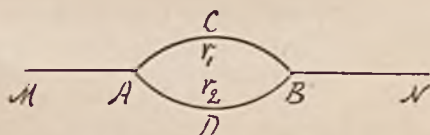
gdzie $V' - V''$ oznacza różnicę potencjałów na biegunach ogniwa B ,

gdym jest ono zamknięte. Wzory (8) i (9) oznaczają jedno i to samo natężenie prądu, a zatem

$$\frac{E}{r+R} = \frac{V' - V''}{r} \dots \dots \dots (10)$$

Z tego, że $r < r + R$ wynika, że $V' - V'' < E$, t. j. różnica potencjałów na biegunach ogniwa zamkniętego jest mniejsza niż na biegunach tegoż ogniwa otwartego — zwracaliśmy już na to uwagę w ust. 315. To zmniejszanie się różnicy potencjałów nie zawsze jest jednakowe, zależy ono, oczywiście, od wartości r w stosunku do R , przyczem opór wewnętrzny danego ogniwa w danych warunkach (np. termicznych) jest oznaczony, opór zaś zewnętrzny może być dobrany rozmaicie.

Przypuśćmy teraz, że w obwodzie prądu jest rozgałęzienie — tak, że prąd idzie na pewnej części obwodu nie jedną, lecz kilku drogami, albo, jak się mówi—opory na tej części obwodu są złączone równolegle. Rys. 867 przedstawia takie rozgałęzienie w przypadku połączenia równoległego dwu przewodników o różnych oporach r_1 i r_2 . Prąd o natężeniu



Rys. 867.

niem i , płynący od M do A , dzieli się w A na dwie części, z których jedna płynie drogą ACB o oporze r_1 , druga droga ADB o oporze r_2 ; od punktu B dalej prąd podąża ku N już po jednym przewodniku. Z tego wyobrażenia, jakie już mamy o prądzie, wypływa, że na jakiegokolwiek części podzieli się dany prąd w rozgałęzieniu, jakiegokolwiek będą wartości jego natężenia i_1 i i_2 w dwu przewodnikach ACB i ADB , zawsze

$$i = i_1 + i_2 \dots \dots \dots (11)$$

Przypuśćmy dalej, że wartość potencjału w punkcie A jest V_1 , w punkcie B zaś V_2 . W takim razie dla przewodnika ACB wzór Ohma daje:

$$i_1 = \frac{V_1 - V_2}{r_1} \dots \dots \dots (12)$$

zaś dla przewodnika ADB

$$i_2 = \frac{V_1 - V_2}{r_2} \dots \dots \dots (13)$$

Rozpatrując jednak rozgałęzienie prądu jako całość, przez którą płynie prąd o natężeniu i , i oznaczając przez r opór tej całości, napiszemy

$$i = \frac{V_1 - V_2}{r} \dots \dots \dots (14)$$

Podstawiając (12) (13) i (14) do wzoru (11) otrzymujemy

$$\frac{V_1 - V_2}{r} = \frac{V_1 - V_2}{r_1} + \frac{V_1 - V_2}{r_2}, \dots \dots (15)$$

zaś po podzieleniu wszystkich wyrazów przez $V_1 - V_2$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \dots \dots \dots (16)$$

Wzór (16) pozwala nam tedy znaleźć opór r przewodnika, utworzonego z dwu przewodników o oporach r_1 i r_2 , złączonych równolegle. Jak widzimy, w danym razie *odwrotność oporu wypadkowego równa się sumie odwrotności oporów, złączonych równolegle.*

Jeżeli chodzi o wartości natężeń prądu i_1 oraz i_2 w rozgałęzieniach, znajdujemy je łatwo, pisząc wzory (12) i (13) w postaci:

$$V_1 - V_2 = i_1 r_1 \quad \text{i} \quad V_1 - V_2 = i_2 r_2, \dots \dots (17)$$

a co zatem idzie

$$i_1 r_1 = i_2 r_2, \dots \dots \dots (18)$$

skąd
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1} \dots \dots \dots (19)$$

Prąd zatem dzieli się tu na części odwrotnie proporcjonalne do wartości oporów rozgałęzienia. Tylko w przypadku, gdy oba opory są równe, prąd dzieli się na równe części — połowa idzie przez jeden przewodnik ACB , druga połowa przez ADB . W przypadku, gdy opór jednego odgałęzienia np. ACB jest 9 (albo 99 lub też 999) razy większy niż odgałęzienia ADB , przez ACB płynie, oczywiście, 0,1 (albo 0,01 lub też 0,001) całkowitego prądu i . Fakt ten znajduje ważne zastosowanie w praktyce pomiarowej.

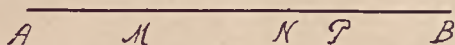
Proponujemy czytelnikowi uzasadnić bardziej ogólny wzór dla przypadku, gdy rozgałęzienie składa się z n przewodników, złączonych równolegle:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots \dots \dots \frac{1}{r_n} \dots \dots \dots (20)$$

343. Zależność oporu przewodnika od jego rozmiarów. Opór właściwy.

Najczęściej przewodniki dane nam są w postaci drutów. Zastanówmy się, jak zależeć musi opór drutu od jego długości i przekroju. Przedewszystkiem weźmy pod uwagę długość, zakładając, że przekrój drutu na całej długości pozostaje ściśle ten sam.

Przypuśćmy, iż dany jest drut AB (rys. 868); w myśli rozważać go możemy jako złożony z części AM , MN , NP , PB i opór całości uważać za sumę oporów jego części (wzór (7) ust. poprzedniego). Podzielmy w myśli drut na n równych części; nie mamy powodu do wątpienia,



Rys. 868.

by opór każdej z tych części nie stanowił $\frac{1}{n}$ oporu całości, a co zatem idzie wypowiedzieć możemy twierdzenie, że *opór drutu jednorodnego, mającego na całej długości przekrój jednakowy, przy warunkach niezmiennych dla całego drutu, jest proporcjonalny do jego długości.*

Przypuśćmy teraz, że n jednakowych drutów o równych oporach, z których każdy jest r , łączymy równolegle. Opór R takiej całości według ust. poprzedniego (wzór 20) jest taki, iż napisać możemy:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots + \frac{1}{r} = \frac{n}{r} \dots \dots (1)$$

$$\text{skąd} \quad R = \frac{r}{n} \dots \dots \dots (2)$$

Każdy drut gruby (o przekroju np. 5 mm²) uważać możemy za zrobiony jakgdyby z większej liczby (np. 5-ciu) złączonych ze sobą równolegle drutów tej samej co on długości lecz mniejszego przekroju: jeżeli opór każdego z tych drutów składowych oznaczmy przez r , opór drutu grubego będzie tyle razy mniejszy, ile tych cieńszych drutów składa się na jeden gruby (w przypadku naszego przykładu liczbowego jest 5 razy mniejszy). Wypływa z tego wniosek, że *opór drutu jednorodnego przy innych warunkach niezmiennych jest odwrotnie proporcjonalny do jego przekroju.*

Oba te wnioski potwierdzają się całkowicie doświadczalnie (o sposobach mierzenia oporów pomówimy w najbliższym ustępie); dotyczą one wogóle oporu słupów jednorodnych, utworzonych z metali lub elektrolitów, o pewnym stałym przekroju (mniejsza jakiego kształtu — kołowego, kwadratowego, czy innego) i znajdujących się na całej swej długości w jednakowych warunkach fizycznych. Druty są poszczególnym przypadkiem takich słupów; jeżeli chodzi o elektrolity, wymiary słupów określają mieszczące je naczynia i rozmiary elektrod.

Przypuśćmy teraz, że mamy drut o długości l i przekroju s . Na opór jego r możemy napisać

$$r = k \frac{l}{s}, \dots \dots \dots (3)$$

co wyraża, że opór ten w *danych warunkach fizycznych* (przede wszystkim w danej temperaturze) *jest proporcjonalny do długości drutu i odwrotnie proporcjonalny do jego przekroju*. k jest tu pewnym współczynnikiem proporcjonalności, jak wnosić możemy z poprzedniego, charakterystycznym dla materiału, z którego drut jest zrobiony; nazywamy go *oporem właściwym* danego materiału. Liczbowo wyraża on opór słupka z danego materiału o długości 1 cm i przekroju 1 cm², gdyż wtedy *liczbowo*

$$r = k \cdot \frac{1}{1}, \dots \dots \dots (4)$$

a więc *liczbowo* k oznacza np. opór sześciangu, zrobionego z danego materiału. Jeżeli chodzi o ściśle określenie k z uwzględnieniem jego wymiaru, uczynić to należy w sposób nam znany, pamiętając, że opór mierzy się w omach, długość w centymetrach, powierzchnia w cm². Znajdźmy np. opór właściwy dla rtęci, przypominając sobie, że oporem 1 oma nazywamy opór słupka rtęci w 0° o długości 106,3 cm i przekroju 1 mm² = 0,01 cm²:

$$1 \text{ om} = k_{Hg} \frac{106,3 \text{ cm}}{0,01 \text{ cm}^2}; \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{stad } k_{Hg} = 0,000094073 \text{ om} \cdot \text{cm} = 94,073 \cdot 10^{-6} \text{ om} \cdot \text{cm} \dots (6)$$

Odwrotność oporu nazywamy *przewodnictwem*.

$$\varrho = \frac{1}{k}; \dots \dots \dots (7)$$

jest to zrozumiałe — wszak im mniejszy opór ciało stawia prądowi, tem lepszym jest ono przewodnikiem prądu elektrycznego.

Oto dla przykładu wartość oporu właściwego dla niektórych metali i stopów:

	k (w 0°)		k (w 0°)
Srebro	$1,5 \cdot 10^{-6}$ om. cm	Platyna	$11,0 \cdot 10^{-6}$ om. cm
Miedź	$1,7 \cdot 10^{-6}$ „ „	Manganin	$42,0 \cdot 10^{-6}$ „ „
Cynk	$5,7 \cdot 10^{-6}$ „ „	Konstantan *)	$49,0 \cdot 10^{-6}$ „ „
Żelazo	$9,5 \cdot 10^{-6}$ „ „	Rtęć	$94,073 \cdot 10^{-6}$ „ „

*) Stop miedzi, niklu i cynku. Godne jest uwagi, że opór właściwy manganinu i konstantanu jest znacznie większy aniżeli metali, wchodzących w ich skład.

Podkreślamy, że opór elektryczny chemicznie czystych metali wzrasta wraz z temperaturą (przewodnictwo maleje); dlatego powyższe dane dotyczą określonej temperatury 0°; inaczej rzecz się ma ze stopami; opory manganinu i konstantanu zmieniają się wraz z temperaturą tak mało, że zmiany te mogą być często całkiem zaniedbane praktycznie. Zmarły niedawno znakomity fizyk holenderski Kammerling-Onnes, który się wślawił badaniami zjawisk w możliwie najniższych temperaturach ^{*}), wykazał, że istnieje dla każdego metalu pewna, w swoim rodzaju „krytyczna“, temperatura, poniżej której opór tego metalu staje się znikomo mały; dla ołowiu np. temperatura ta wynosi około 7^o,5 skali bezwzględnej (t. j.—265^o,5 C), dla cyny 3^o,5 w skali bezwzględnej i t. d. Z tabelki widać, że najmniejszy opór prądowi stawia srebro — jest ono zatem najlepszym przewodnikiem; miedź jest cokolwiek gorszym, niemniej nie o wiele gorszym; przy względnej taniości miedzi czyni to ją metalem powszechnie używanym w technice elektrycznej; żelazo jest już przewodnikiem znacznie gorszym i t. d. Przypominamy czytelnikowi tabelkę przewodnictwa cieplnego (t. I, ust. 180). Zastępuje na uwagę, że, jeżeli ułożymy metale w szereg według ich przewodnictwa elektrycznego i cieplnego, następują one w tych szeregach jedne po drugich w tym samym porządku (a więc srebro, miedź i t. d.). Wskazuje to, że istnieje jakiś związek między zjawiskami przewodnictwa cieplnego i elektrycznego metali.

Dla uzmysłowienia różnych wartości oporów (przewodnictwa) poszczególnych metali przytaczamy jeszcze następujące dane. Oto opór 1 metra drutu z różnych metali o przekroju 1 mm² wynosi (w temperaturze 18^o):

srebro	0,016 omów	manganin	0,428 omów
miedź	0,017 „	konstantan	0,490 „
żelazo	0,122 „	rtęć	0,941 „

Opór właściwy elektrolitów jest naogół znacznie większy niż metali. Dla przykładu przytaczamy przybliżone wartości (w temperaturze 18^o) oporu właściwego

10% wodnego roztworu kwasu siarkowego	2,55 om. cm
„ „ „ soli kuchennej	8,26 „ „
„ „ „ siarczanu miedziowego	31,3 „ „

Zauważmy, że opór roztworów wodnych soli i kwasów zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Zauważmy również, że wręcz odwrotnie niż w przypadku stopów przewodnictwo roztworów wodnych soli i kwasów jest zawsze większe niż czystej chemicznie wody. Opór właściwy czystej chemicznie wody (niezmiernie trudnej do otrzymania) jest rzędu 10⁸ om. cm. Jeszcze większe wartości oporu właściwego znajdujemy u złych przewodników, zwanych popularnie, ale nieściśle, nieprzewodnikami; tak np. opór właściwy marmuru jest rzędu 10¹⁰ om. cm, szellaku i laku rzędu 10¹⁶ om. cm, ebonitu i parafiny rzędu 10¹⁸ om. cm, bursztynu i kwarcu rzędu 10²⁰ om. cm.

^{*}) Był on kierownikiem słynnej pracowni kriogenicznej — to znaczy poświęconej badaniom w najniższych temperaturach — w Lejdzie.

344. Mierzenie oporów. Mostek Wheatstone'a ^{*)}. Opornice.

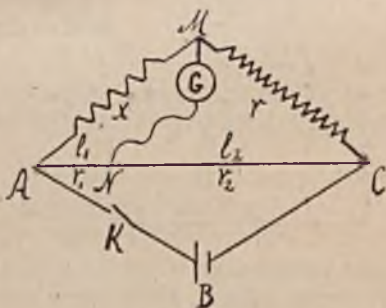
Poniższe urządzenie, zwane mostkiem Wheatstone'a, a przedstawione fotograficznie na rys. 869, schematycznie zaś na rys. 870 pozwala na mierzenie oporów, skoro posiadamy ustalony wzorzec.

Prąd z ogniwa B rozgałęzia się między punktami A i C w ten sposób, że część jego płynie przez drut prostoliniowy AC o stałym wszędzie przekroju, rozpięty na drewnianej podstawie ponad podziałką milime-



Rys. 869.

trową; druga część płynie przez nieznaną opór x , włączony przy pomocy grubych i krótkich przewodników ^{**)} miedzianych pomiędzy A i M , a następnie przez opór znany r (wzorzec) włączony przy pomocy również grubych i krótkich przewodników pomiędzy M i C . Od M prowadzi drut poprzez galwanometr G do ruchomego styku N , który daje się przesuwac po drucie AC ; styk ten tworzy płytka metalowa, przyciskana do drutu AC ostrą jej krawędzią, ustawioną poprzecznie względem długości tego drutu. Między punktami A i C istnieje określona różnica potencjałów — przypuśćmy np., że w A potencjał jest wyższy niż w C ;



Rys. 870.

oczywiście tedy, zarówno na drodze AMC , jak ANC zachodzi spadek potencjału i można znaleźć, przesuwając styk N na drucie, takie jego położenie, że w M i N potencjały będą równe (oba niższe od potencjału w A , wyższe od potencjału w C). W tym przypadku — i tylko w tym —

^{*)} Czyt. „Wheatstone“.

^{**)} Takie grube i krótkie przewodniki mają według tego, co poznaliśmy w ust. poprzednim, tak małe opory, że dają się one w rozważaniu zupełnie zaniedbać.

galwanometr G , łączący M i N , nie wykaże żadnego prądu; przy każdym innym położeniu styku będzie szedł prąd przez galwanometr, czy to od N do M (gdy N będzie leżało za blisko względem A), czy to od M do N (gdy N będzie przypadło za blisko C). Doświadczenie polega właśnie na takim ustawieniu styku N , by galwanometr G żadnego prądu nie wykazywał. Aby przez cały czas przesuwania styku nie puszczać niepotrzebnie prądu, robi się tak, iż po pewnem nastawieniu styku zamyka się na krótko łącznik K i obserwuje się, czy galwanometr się wychyla; w razie wychylenia natychmiast się prąd przerywa, przesuwa styk, znowu zamyka łącznik i t. d., aż się nie osiągnie tego, że po puszczeniu prądu w obwodzie galwanometr nie daje wcale wychylenia — wtedy wiemy, że ostrze styku znajduje się na właściwem miejscu.

Przypuśćmy teraz, że w A mamy potencjał V_1 , w C — potencjał V_2 , zaś w M i N potencjał jednakowy V . Oznaczmy natężenie prądu w odgałęzieniu AMC przez i_1 , zaś w odgałęzieniu ANC przez i_2 ; oznaczmy wreszcie przez r_1 i r_2 opory części AN i NC drutu AC ; przez r oznaczyliśmy już opór wzorca (może to np. być om międzynarodowy), zaś przez x opór jakiś nieznan, który chcemy wyznaczyć. (Jak już powiedzieliśmy, inne niezbędne do połączeń druty miedziane używamy krótkie i grube, by można było ich opór całkowicie zaniedbać). Zgodnie z prawem Ohma napiszemy dla odcinków AM i MC .

$$V_1 - V = i_1 x \quad V - V_2 = i_1 \cdot r, \quad \dots \quad (1)$$

skąd
$$\frac{V_1 - V}{V - V_2} = \frac{x}{r} \quad \dots \quad (2)$$

Podobnie dla odcinków AN i NC napiszemy:

$$V_1 - V = i_2 r_1 \quad V - V_2 = i_2 r_2, \quad \dots \quad (3)$$

skąd
$$\frac{V_1 - V}{V - V_2} = \frac{r_1}{r_2}, \quad \dots \quad (4)$$

albo, zważywszy, że opory części drutu AC , mającego jednakowy przekrój na całej długości i utrzymywanego na całej długości w jednej i tej samej temperaturze, są proporcjonalne do długości tych części (patrz ust. 343), zaś długości te odczytać możemy na skali, ponad którą drut AC jest rozpięty, napisać możemy

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad \dots \quad (5)$$

gdzie l_1 jest długością części AN drutu AC , l_2 — długością części NC .

Wobec (5) wzór (4) napiszemy tak:

$$\frac{V_1 - V}{V - V_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad \dots \quad (6)$$

Porównanie wzorów (2) i (6) daje

$$\frac{x}{r} = \frac{l_1}{l_2}, \dots \dots \dots (7)$$

skąd ostatecznie.

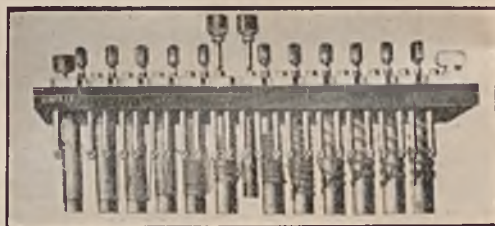
$$x = r \frac{l_1}{l_2} \dots \dots \dots (8)$$

Przerzucony zatem między M a ruchomym stykiem N „most“, zawierający galwanometr, pozwala przy przesuwaniu tego styku znaleźć takie jego położenie, przy którym niema prądu w galwanometrze, następujące zaś potem odczytanie długości odcinków AN i NC daje łącznie ze znanym oporem r wszystkie dane do wyznaczenia nieznanego oporu x .

Byłoby rzeczą bardzo niewygodną w praktyce, gdybyśmy rozporządzali tylko wzorcami oma; często potrzebne nam są wzorce, wynoszące



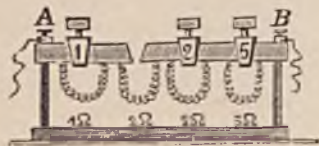
Rys. 871.



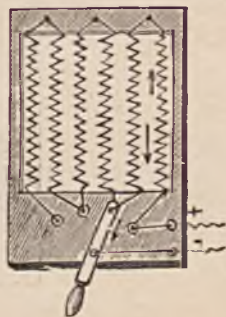
Rys. 872.

wielokrotności oma, to znów ułamki oma. Można sporządzać takie różne opory na wzór wyobrażonego na rys. 864. Można też sporządzać je inaczej, budując t. zw. *pudełka oporowe*. Rys. 871 daje nam wygląd zewnętrzny takiego pudła oporowego; na rys. 872 widzimy wewnętrzne urządzenie podobnego przyrządu. Przykrywę pudła tworzy płyta ebonitowa, na której są umocowane grube kawałki mosiądzu, poprzedzielane szparami z kołowymi otworami pośrodku; w te otwory dają się szczelnie wstawiać wtyczki mosiężne o kształcie zleżka stożkowym; takiż kształt stożkowy posiadają otworki między płytkami mosiężnymi na pokrywie pudła; wtyczki są zaopatrzone w główki ebonitowe, za które ujmujemy je ręką. Kolejno pomiędzy jedną a następną płytką mosiężną, przytwierdzonemi na pokrywie pudła, umieszczamy wewnątrz pudła połączone końcami z temi płytkami zwoje drutu manganinowego. Druty te posiadają różną długość i grubość, a zatem różny opór; idą

np. w takim porządku: 1 Ω , 2 Ω , 2 Ω , 5 Ω , 10 Ω , 20 Ω , 20 Ω , 50 Ω i t. d., albo też 0,1 Ω , 0,2 Ω , 0,2 Ω , 0,5 Ω lub 0,01 Ω , 0,02 Ω , 0,02 Ω , 0,05 Ω i t. d. *). Gdy wszystkie wtyczki są wciśnięte do otworów, wówczas prąd, doprowadzony do zacisków, widocznych na pokrywie pudła, na rys. 871 z lewej jego strony, idzie całkowicie przez grube przewodniki na płycie (w rozgałęzieniu, które tu faktycznie istnieje — gdyż prąd może iść przez druty, mieszczące się wewnątrz pudła, opór tych grubych przewodników jest, praktycznie biorąc, nieskończenie razy mniejszy od oporu drutów, czyli w drutach tych wtedy natężenie prądu, praktycznie biorąc, jest zero (p. o rozgałęzieniu prądów w ust. 342). Jeżeli jednak wyjmemy którąkolwiek wtyczkę, prąd będzie musiał iść przez zwój, mieszczący się między tymi płytkami mosiężnymi na pokrywie, z pomiędzy których wyjęliśmy wtyczkę, i w ten sposób włączymy w obwód ten czy inny opór, którego wartość jest zaznaczona na pudle. Jeżeli np. wyjmemy wtyczki na pudle w miejscach, gdzie zaznaczone są opory 5 omów, 2 omy, 0,1 omów, 0,05 omów, otrzymamy w obwodzie połączone w szereg zwoje, które razem mieć będą opór 7,15 omów. Na rys.



Rys. 873.



Rys. 874.

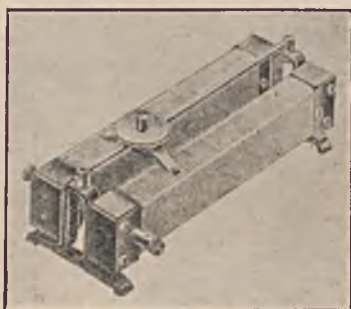
873 mamy schemat budowy pudełka oporowego, którego opór całkowity jest dziesięć omów; do obwodu mamy włączone pudełko oporowe za pomocą zacisków *A* i *B*; wyjęcie wtyczki tej, której brakuje na rys. 873 wprowadza zatem do obwodu opór 2 Ω ; gdybyśmy wyjęli jeszcze wtyczkę, położoną najbliżej *A*, opór włączony byłby 3 omy i t. d.

Oczywiście, mając sprawdzony wzorzec oma, oraz niesprawdzone pudełko oporowe, możemy metodą mostku Wheatstone'a zmierzyć poszczególne opory pudła oporowego, t. j. wycechować daną *opornicę*, jak ogólnie nazywają się przyrządy, dostarczające nam oporów elektrycznych.

Oprócz *opornic* precyzyjnych, które pozwalają włączać do obwodu zupełnie określone opory, posługujemy się też *opornicami*, które po-

*) Wartości te dobierane są tak, jak wartości mas odważników w pudłach z odważnikami; w ten sposób daje się przez łączenie tych oporów w szereg otrzymywać dowolne opory; o sposobie tego łączenia mowa będzie za chwilę.

zwalają dobierać opory, potrzebne do osiągnięcia określonego natężenia prądu (wskazywanego przez włączony do obwodu ampermetr), jednak bez znajomości wartości wprowadzonego w obwód oporu (jak np. w doświadczeniu z przyrządem, przedstawionym na rys. 853). Rys. 874 wyobraża jeden z bardziej rozpowszechnionych typów takich opornic t. zw. *opornicę korbową*. Mamy tu zwoje drutu, złączone w szereg przy pomocy guzików metalowych; tych guzików dotykać może pręt metalowy korby, dającej się obracać dokoła osi, przez poruszanie rękojeści izolującej tego pręta. Przypuśćmy, iż oś korby złączona jest, jak na rys., z ujemnym biegunem źródła prądu, dodatni zaś biegun złączony jest z pierwszym guzikiem (licząc z prawej strony rysunku), do którego przytwierdzony jest początek drutu opornicy. Przy takim położeniu korby jak na rys., gdy pręt korby dotyka drugiego guzika, prąd przechodzi tylko przez dwa mieszczące się z prawej strony zwoje, w których kierunek prądu wskazany jest strzałkami. Gdybyśmy korbę przesunęli na następny guzik (w lewo), wprowadzilibyśmy w obwód prądu



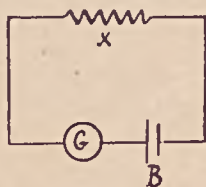
Rys. 875.

dwa następne zwoje, t. j. włączylibyśmy w obwód większy opór; przez przesunięcie pręta korby na następny guzik w lewo (w danym razie ostatni) spowodowałibyśmy włączenie całkowitego oporu danej opornicy do obwodu prądu. Przeciwnie ustawienie korby na pierwszym guziku z prawej strony, t. j. na tym, który bezpośrednio łączy się z biegunem dodatnim źródła, byłoby zupełnym wyłączeniem opornicy z obwodu. Jak widać, zmiany oporu zapomocą tego rodzaju opornicy nie mogą być dokonywane w sposób ciągły, a jedynie skokami.

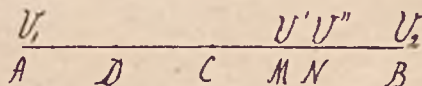
Na rys. 875 mamy inny typ, bardzo rozpowszechniony, opornicy t. zw. suwakowej. Opornicę włączamy do obwodu zapomocą widocznych na rysunku zacisków; przesuwanie osadzonego na poziomym pręcie metalowym suwaka sprężynowego, zaopatrzonego w główkę izolującą, włącza w obwód większą lub mniejszą część drutu, nawiniętego na dwa równoległe podłużne kłocze, zrobione z substancji izolującej, a przez to zmienia się wartość oporu, włączonego w obwód prądu.

Rozporządzając wycechowanym pudłem oporowym, względnie kilku takimi przyrządami, które pozwalają na dobranie dowolnego opo-

ru, możemy użyć innej metody niż podana na początku tego ustępu, do mierzenia nieznanych oporów. Rys. 876 objaśnia tę metodę t. zw. „podstawiania“. Puszczamy prąd przez obwód, w którym mamy włączony galwanometr oraz nieznaną opór x , przyczem notujemy wychylenie ruchomej części galwanometru. Następnie usuwamy nieznaną opór x i na jego miejsce wstawiamy pudło oporowe, włączając coraz to inne, zawarte w nim opory, i dobierając je tak, by się osiągnęło to samo wychylenie galwanometru, jakie mieliśmy przy nieznanym oporze x ; wtedy, oczywiście, wartość oporu, który odczytamy bezpośrednio na wycechowanej opornicy, da nam wartość nieznanego oporu x .



Rys. 876.



Rys. 877.

Na zakończenie podamy tu jeszcze wskazówkę co do tego, jak można, korzystając z faktu, że wzdłuż drogi prądu elektrycznego zachodzi spadek potencjału, otrzymać potrzebne niekiedy dla pomiarów bardzo małe różnice potencjałów. Przypuśćmy, iż między punktami A i B (rys. 877), w których stale są podtrzymywane wartości potencjałów V_1 i V_2 , rozpięty jest drut o jednakowym na całej długości przekroju; oczywiście, między A i C , jeżeli punkt C przypada w samym środku drutu, różnica potencjałów stanowi połowę tej różnicy, jaka istnieje między A i B ; zaś między A i D , jeżeli $AD = \frac{1}{4} AB$, ta różnica wynosi $\frac{V_1 - V_2}{4}$. Gdybyśmy wzięli jakiegokolwiek dwa punkty M i N na drucie, różnica potencjałów między nimi $V' - V''$ byłaby tyle razy mniejsza od $V_1 - V_2$, ile razy MN jest mniejsze od AB , t. j.

$$\frac{V' - V''}{V_1 - V_2} = \frac{MN}{AB} \dots \dots \dots (9)$$

Lecz zamiast wzoru (9) napisać możemy

$$\frac{V' - V''}{V_1 - V_2} = \frac{r}{R} \dots \dots \dots (10)$$

gdzie przez r oznaczamy opór odcinka MN drutu, przez R zaś opór całego drutu AB , jest to bowiem konsekwencja podanego wyżej określenia oporu drutu.

Wzór (10) pozostaje słuszny i w tym przypadku, gdy przewodnik AB nie jest jednorodny na całej swej długości. Gdy na końcach jego

A i B mamy potencjały V_1 i V_2 , opór zaś jego jest R , natężenie prądu na całej drodze AB jest określone przez wzór Ohma.

$$i = \frac{V_1 - V_2}{R} \dots \dots \dots (11)$$

To samo natężenie prądu mamy zatem i na odcinku MN , czyli

$$i = \frac{V' - V''}{r} \dots \dots \dots (12)$$

Porównanie wzorów (11) i (12) daje

$$\frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V' - V''}{r} \dots \dots \dots (13)$$

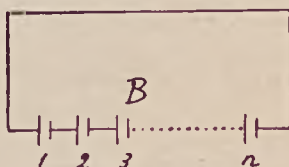
skąd

$$\frac{V' - V''}{V_1 - V_2} = \frac{r}{R} \dots \dots \dots (14)$$

Jeżeli zatem w A i B mamy różnicę potencjałów np. 1 wolt, zaś $r = 0,01 R$, to między punktami M i N mamy różnicę potencjałów 0,01 woltów. Metodą tą, zwłaszcza z zastosowaniem pudeł oporowych, posługujemy się często, gdy chodzi o wprowadzenie w grę bardzo małych różnic potencjałów. Zapoznamy się z tem w zadaniach i ćwiczeniach.

345. Obwody, zawierające baterje ogniw, połączonych w szereg i równolegle.

Przypuśćmy, iż źródłem prądu jest baterja, złożona z n ogniw, z których siła elektromotoryczna każdego jest E , zaś opór wewnętrzny każdego jest R . Przypuśćmy, iż opór zewnętrzny obwodu (rys. 878), w któ-



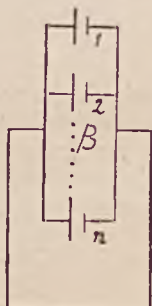
Rys. 878.

rym płynie z tego źródła prąd, jest r , wliczając w to i opór drutów, łączących ze sobą ogniwa. Siła elektromotoryczna danej baterji, jak już wiemy (ust. 306) jest nE ; opór wewnętrzny baterji, złożonej z opo-

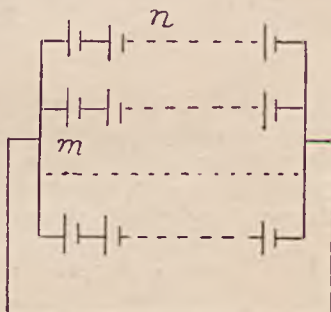
rów poszczególnych ogniw, połączonych w szereg, jest nR (ust. 342, wzór 7). Zatem natężenie prądu w obwodzie jest (ust. 341, wzór 8).

$$i = \frac{nE}{r + nR} = \frac{E}{\frac{r}{n} + R} \dots \dots \dots (1)$$

Przypuśćmy teraz, iż źródłem prądu w obwodzie o tym samym oporze zewnętrznym jest bateria ogniw takich samych jak wyżej, lecz połączonych równolegle (rys. 879). W tym razie siła elektromotoryczna baterji jest taka sama jak pojedynczego ogniwa, t. j. E (ust. 306), opór zaś wewnętrzny baterji jest $\frac{R}{n}$ (ust. 342, wzór 20) *).



Rys. 879.



Rys. 880.

W tym razie więc

$$i = \frac{E}{r + \frac{R}{n}} \dots \dots \dots (2)$$

Porównanie wzorów (1) i (2) wskazuje, kiedy jest korzystne użycie baterji ogniw, połączonych w szereg, a kiedy — połączonych równolegle; pierwsze zachodzi wtedy, gdy opór zewnętrzny obwodu jest znaczny w porównaniu z oporem wewnętrznym ogniw; drugi — przeciwnie, gdy opór wewnętrzny ogniw jest znaczny w porównaniu z oporem zewnętrznym obwodu.

Przypuśćmy wreszcie, że mamy przypadek mieszanego połączenia ogniw, a mianowicie, że bateria składa się z m seryj, połączonych równolegle, przyczem każda serja składa się z n ogniw, złączonych w szereg (rys. 880). Przypuśćmy przytem, że E , r i R oznaczają to sa-

*) Można to uzasadnić jeszcze tem, że n połączonych ze sobą równolegle ogniw to jakgdyby jedno wielkie ogniwo, którego powierzchnie płyt są w stosunku do pojedynczego ogniwa n razy większe; z tego zaś wypływa wniosek oparty na wzorze 2, ust. 343.

mo co przedtem. Siła elektromotoryczna jest tu, oczywiście, nE , opór wewnętrzny jednej serji, spiętej w szereg, jest nR , zaś opór wewnętrzny m takich seryj, złączonych równolegle jest $\frac{nR}{m}$; słowem opór wewnętrzny baterji jest

$$\frac{nR}{m} \dots \dots \dots (3)$$

Wobec tego

$$i = \frac{nE}{r + \frac{nR}{m}} = \frac{E}{\frac{r}{n} + \frac{R}{m}} \dots \dots \dots (4)$$

Na podstawie ostatniego wzoru (4), możemy znaleźć, jakie jest najkorzystniejsze dla danego oporu zewnętrznego połączenie ogniów — w tem znaczeniu najkorzystniejsze, że otrzymuje się wtedy maximum natężenia prądu. Ponieważ licznik E w ułamku, wyrażającym natężenie i prądu, mamy dany, przeto ułamek osiąga największą wartość, gdy mianowicie jego $\frac{r}{n} + \frac{R}{m}$ staje się najmniejszy. Wszakże, jakkolwiek będziemy zmieniali m i n , t. j. liczbę n ogniów, połączonych w szereg i liczbę m takich seryj, ogólna liczba mn ogniów jest dana, a więc stała. Zatem iloczyn $\frac{r}{n} \cdot \frac{R}{m}$ jest także wielkością stałą. Znane jest rozwiązanie zagadnienia, kiedy suma dwu zmiennych wielkości jest najmniejsza, gdy iloczyn ich jest stały; zachodzi to wtedy, gdy te wielkości zmienne są sobie równe (przypadek szczególny z geometrii: z pośród wszystkich prostokątów o tej samej powierzchni najmniejszy obwód posiada kwadrat). W danym razie zatem, by i osiągnęło maximum, trzeba mieć

$$\frac{r}{n} = \frac{R}{m} \dots \dots \dots (5)$$

czyli

$$r = \frac{nR}{m} \dots \dots \dots (6)$$

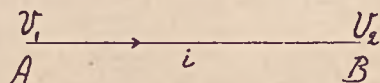
t. j. trzeba takiego połączenia ogniów, przy którym opór wewnętrzny (wzór 3) baterji równa się wartości oporu zewnętrznego całego obwodu.

346. Praca i ciepło w obwodzie prądu. Dzielnosc prądu. Prawo Joule'a.

Dowiedzieliśmy się już dawno (ust. 288), że przeniesienie naboju elektrycznego e z miejsca, w którym potencjał jest V_1 , do miejsca, gdzie wartość potencjału jest V_2 , połączone jest z wykonaniem pracy

$$e(V_1 - V_2) \dots \dots \dots (1)$$

Jeżeli nabój i różnicę potencjałów mierzymy w jednostkach CGS, praca wykonana wyraża się w ergach; jeżeli nabój mierzymy w kulombach, zaś różnicę potencjałów w woltach, wyrażenie (1) na pracę daje nam ją w dżulach.



Rys 881.

Przypuśćmy, iż po drucie AB (rys. 881), którego opór jest r , płynie stały prąd o natężeniu i , podczas gdy w A i B podtrzymywana jest stała wartość potencjałów V_1 i V_2 . Według prawa Ohma mamy

$$i = \frac{V_1 - V_2}{r} \dots \dots \dots (2)$$

Przypuśćmy, że w czasie t zostaje przeniesiony z A do B nabój dodatni e (według utartej umowy technicznej — w rzeczywistości płyną tu naboje ujemne w kierunku od B do A , co jest tamtemu równoważne). W takim razie zostaje przytem wykonana praca:

$$e \cdot (V_1 - V_2) \dots \dots \dots (3)$$

Poraz tej pracy przez czas, w którym zostaje dokonana, oznacza *dzielnosc*. Zatem dzielnosc prądu w danym razie wynosi

$$\frac{e(V_1 - V_2)}{t} \dots \dots \dots (4)$$

Jednak według określenia natężenia prądu (ust. 307)

$$i = \frac{e}{t} ; \dots \dots \dots (5)$$

zatem zamiast (4) otrzymujemy na *dzielnosc prądu* wyrażenie

$$i \cdot (V_1 - V_2) ; \dots \dots \dots (6)$$

mierzy się więc ona iloczynem z natężenia prądu przez różnicę potencjałów, która jest niezbędna, by mógł prąd ten trwać.

Jeżeli i oraz $V_1 - V_2$ mierzymy w jednostkach elektrostatycznych dzielność zostanie zmierzona w jednostkach bezwzględnych CGS

$$1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2} \cdot 1 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} = 1 \frac{\text{gr cm}^2}{\text{sek}^3} = \frac{\text{erg}}{\text{sek}} \quad (7)$$

Przypuśćmy teraz, że prąd mierzymy w amperach, różnicę zaś potencjałów w woltach. W takim razie w układzie elektrostatycznym mamy:

$$\begin{aligned} \text{amper. wolt} &= 3 \cdot 10^9 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2} \cdot \frac{1}{300} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} = 10^7 \frac{\text{gr cm}^2}{\text{sek}^3} = \\ &= \frac{10^7 \text{ ergów}}{\text{sek}} = \frac{1 \text{ dżul}}{\text{sek}} = 1 \text{ wat} \quad \dots \quad (8) \end{aligned}$$

Do tegoż wyniku dochodzimy w układzie elektromagnetycznym; w rzeczy samej:

$$\begin{aligned} \text{amper. wolt} &= \frac{1}{10} \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}} \cdot 10^8 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2} = 10^7 \frac{\text{gr cm}^2}{\text{sek}^3} = \\ &= \frac{10^7 \text{ ergów}}{\text{sek}} = 1 \frac{\text{dżul}}{\text{sek}} = 1 \text{ wat} \quad \dots \quad (9) \end{aligned}$$

Jeżeli zatem mamy źródło prądu, dostarczające nam stałej różnicy potencjałów na biegunach, wyrażonej w woltach, i jeżeli ze źródła tego przy tej różnicy potencjałów czerpiemy prąd o pewnym natężeniu, mierzonem w amperach, wówczas iloczyn danej liczby woltów przez daną liczbę amperów oznacza dzielność prądu, wyrażoną w watach. Przykład:

$$10 \text{ amperów, } 110 \text{ woltów} = 1100 \text{ watów} = 1,1 \text{ kilowatów} \quad \dots \quad (10)$$

Rozporządzając źródłem o pewnej dzielności, możemy korzystać z tego źródła więcej lub mniej, krócej lub dłużej. Otrzymana przytem przez nas praca mierzyć się będzie iloczynem dzielności przez czas, bowiem:

$$\text{wat. sek} = \text{dżul (p. t. I, ust. 69)} \quad \dots \quad (11)$$

Przypuśćmy np., że z prądu o dzielności 1100 watów korzystamy przez 2 godziny; otrzymujemy przytem pracę

$$1100 \text{ watów. } 7200 \text{ sekund} = 7920000 \text{ dżulów} \quad \dots \quad (12)$$

Przyjęto jest także wyrażać otrzymaną pracę prądu elektrycznego w jednostkach, zwanych kilowatgodzinami. W przypadku rozpatrywanym praca ta będzie:

$$1,1 \text{ kilowatów. } 2 \text{ godz.} = 2,2 \text{ kilowatgodzin} = 2,2 \text{ KWG.}$$

Otrzymuje się wtedy mniejsze liczby do oznaczania tej pracy, gdyż oczywiście 1 kilowatgodzina jest wielką względnie jednostką:

$$1 \text{ kilowatgodzina} = 1000 \text{ watów. } 3600 \text{ sek.} = 36 \cdot 10^5 \text{ dżulów} \dots (13)$$

Przejawem pracy, dokonanej w przewodnikach, przez które płynie prąd elektryczny jest grzanie się ich; jeżeli prąd żadnej innej postaci energii nam nie dostarcza, praca ta zamienia się całkowicie na ciepło. Wykazał to znany już nam badacz Joule; stąd też często stosowana do ciepła, tworzącego się w przewodnikach, podczas przepływu przez nie prądu, nazwa „ciepła Joule’a“.

Ze przewodniki istotnie grzeją się, gdy przez nie płynie prąd, i to tem bardziej, im większy jest opór przewodników przy tej samej wartości natężenia prądu, wykazuje takie proste doświadczenie: puszczamy prąd przez 3 złączone ze sobą w szereg jednakowej długości druty, z których jeden jest np. miedziany o średnicy 0,5 mm, drugi też miedziany, ale cieńszy, np. o średnicy 0,1 mm, trzeci żelazny o średnicy 0,5 mm; natężenie prądu daje się regulować przy pomocy włączonej w obwód opornicy. Zwiększając stopniowo natężenie prądu, dostrzegamy, iż przy pewnej wartości tego natężenia zaczyna się żarzyć drut żelazny; przy większem natężeniu zaczyna się żarzyć na czerwono cieńszy drut miedziany, gdy żelazny już dochodzi do białego żaru; wreszcie żelazny się topi, co przerywa prąd w obwodzie, zanim jeszcze zacznie się żarzyć grubszy drut miedziany, którego ogrzanie się pewne daje się jednak stwierdzić przez dotknięcie.

Umiejąc obliczyć wartość pracy danego prądu elektrycznego w danym czasie, znaleźć możemy ilość ciepła, która z tej pracy powstaje; trzeba tylko pamiętać, że (t. I, ust. 184).

1 dżul równoważny jest 0,239 kaloryj gramowych

Zatem, skoro dzielnosc prądu o natężeniu i (w amperach) przy różnicy potencjałów $V_1 - V_2$ (w woltach), warunkującej ten prąd, jest (w woltach)

$$i \cdot (V_1 - V_2) \dots \dots \dots (14)$$

wówczas praca, wykonana przez ten prąd w czasie t (w sekundach) i zmierzona w dżulach jest

$$i \cdot (V_1 - V_2) \cdot t \dots \dots \dots (15)$$

Ponieważ $V_1 - V_2 = ir$, gdzie r oznacza opór przewodnika, będziemy mieli na wartość tej pracy

$$i^2 r t, \quad (16)$$

zaś na ilość otrzymanego z tej pracy ciepła (w kalorjach gramowych)

$$Q = 0,239 i^2 r t \quad (17)$$

Ostatni wzór, wyrażający właśnie prawo Joule'a *), tłumaczy nam zaobserwowane w przytoczonym przed chwilą doświadczeniu różnice grzania się drutów, mających różne opory. Oczywiście, słuszny też jest wzór

$$Q = 0,239 (V_1 - V_2) i \cdot t \quad (18)$$

Można się posługiwać zarówno wzorem (17) jak (18), zależnie od tego, czy dana jest nam znajomość różnicy potencjałów, czy też oporu. Można by jeszcze napisać, rugując ze wzoru i ,

$$Q = 0,239 \frac{(V_1 - V_2)^2 \cdot t}{r} \quad (19)$$

Najczęściej przydatny bywa wzór (17).

Sprawdzić słuszność prawa Joule'a można zapomocą t. zw. *kalorymetru elektrycznego*, przedstawionego w jego najprostszej postaci na rys. 882. Zwój cienkiego drutu mieści się w nafcie, której temperaturę wskazuje zanurzony w niej termometr; zmierzwszy uprzednio opór zwoju (najlepiej zrobić go z manganinu, by nie mieć do czynienia ze zmianami oporu, towarzyszącymi zmianom temperatury), oraz mierząc natężenie prądu, przepuszczanego przez kalorymetr, jak również czas trwania prądu; notując przytem przyrost temperatury cieczy kalorymetru i znając ciepło właściwe nafty, mamy wszystkie dane do uzasadnienia doświadczalnego prawa Joule'a, względnie, o ile przyjmijemy słuszność tego prawa — do wyznaczenia drogą elektryczną wartości dynamicznego równoważnika ciepła.

Grzanie się przewodników, przez które płynie prąd elektryczny, jest wyzyskiwane w różnych celach. Na fakcie tym opiera się budowa pieców elektrycznych, w których grzeją się odpowiednio dobrane zwoje drutu. Edisonowi **) zawdzięczamy pomysł budowy tak rozpowszechnionych dziś żarówek (rys. 883). Pierwsze żarówki miały włókna węglowe, które się żarzyły w próżni (aby uniknąć utraty ciepła przez przewodnictwo i aby się węgiel przytem nie spalał); okazało się zcza-

*) Mimo, iż za czasów Joule'a jednostki, w których teraz mierzymy dane wielkości elektryczne, jeszcze nie były ustalone.

**) Tomasz Edison, słynny społeczny wynalazca amerykański, urodzony w r. 1817.

sem, że temperatury włókna węglowego nie można podnosić powyżej 1800°, gdyż rozpyla się ono wówczas prędko, pokrywając nalotem węglowym ścianę żarówek. Dziś używane są włókienka z trudno topliwych metali (osmu, wolframu, tantalu), które dają się ogrzewać do wyższej temperatury, a przez to są ekonomiczniejszymi źródłami światła (wymagają na każdą świecę mniejszej dzielnosci prądu — patrz zadania). Ogrzewania elektrycznego używa się też do spawania metali. Rozżarzone przez prąd druciki platynowe służą do różnych zabiegów chirurgicznych i t. d. To samo zjawisko grzania się przewodników znajduje zastosowanie w wyrobie t. zw. *bezpieczników*: drucik z ołowiu odpowiednich wymiarów włącza się w obwód prądu, którego natężenie nie może przekroczyć pewnej wartości, gdyż to groziłoby uszkodzeniem danej instalacji elektrycznej; gdy skutkiem jakiejś niedokładności



Rys. 882.



Rys. 883.

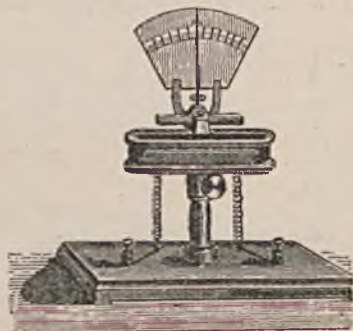
w urządzeniu, czy nieoczekiwanego przypadku natężenie prądu wzrasta ponad miarę, drucik ten się topi, a w ten sposób prąd w obwodzie zostaje w porę przerwany.

347. Woltmetry.

Mówiąc dotychczas o przyrządach, służących do mierzenia różnicy potencjałów, mieliśmy na myśli znane już nam przyrządy elektrostatyczne — tak czy inaczej zbudowane elektrometry. Wszakże można zastosować do mierzenia różnic potencjałów i galwanometry, odpowiednio je budując. Takie przyrządy z podziałką, pozwalającą odczytywać wolty, noszą nazwę *woltmetrów* *); w razie gdy na ich podziałce można odczytywać tysięczne części wolta, nazywają się one *miliwoltmetrami*.

*) Przypominamy treść dopisku drugiego na str. 128.

W ust. 342 podkreślaliśmy, iż ampermetry winny mieć jak najmniejszy opór, by włączenie ich w obwód możliwie nie wpływało na zmianę oporu obwodu. Rzecz ma się przeciwnie z woltmetrami — ich opór, jak łatwo wykazać, winien być możliwie wielki. Poza tem zasada budowy woltmetru może być zupełnie ta sama co ampermetru. Weźmy np. typ galwanoskopu jak na rys. 884; składa się on ze zwoju drutu, ustawionego skrętami poziomo, ponad którym lub wewnątrz których mieści się oparty na ostrzach magnes poziomy, gdy prądu w galwanometrze nie ma. Z chwilą puszczenia przez przyrząd prądu magnes pochyła się więcej lub mniej (zależnie od natężenia wytworzonego przez prąd w zwoju pola magnetycznego) jednym końcem albo drugim (zależnie od kierunku prądu w zwoju) ku dołowi. Ruch magnesu każe



Rys. 884.

połączonej z nim wskazówce pionowej przesunąć się więcej lub mniej w tę czy inną stronę względem ustawionej pionowo podziałki. Jeżeli zwój zrobiony jest z kilku zaledwie skrętów dostatecznie grubego (izolowanego) drutu, wówczas wycechować możemy przyrząd w znany już nam sposób na ampermetr. Przypuśćmy jednak, że zwój ten składa się z bardzo wielu skrętów bardzo cienkiego drutu, tak, że jego opór r jest znaczny np. 1000 Ω . Połączmy końce tego zwoju z biegunami ogniwa o sile elektromotorycznej E i o bardzo małym oporze wewnętrznym np. 0,2 Ω ; otrzymamy słaby prąd w zwoju, którego natężenie możemy uważać za

$$i = \frac{E}{r} \dots \dots \dots (1)$$

opór wewnętrzny ogniwa zaniedbujemy jako znikomy w stosunku do r . Gdy zamiast jednego ogniwa weźmiemy 2 także, połączone w szereg, otrzymamy na natężenie prądu

$$2i = \frac{2E}{r} ; \dots \dots \dots (2)$$

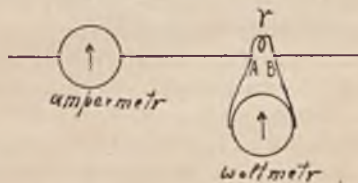
słowem natężenie prądu będzie tu proporcjonalne do siły elektromotorycznej ogniwa i może posłużyć za miarę tej siły, czyli podziałka może być wycechowana w woltach, skoro E jest znane. Zauważyć należy, że, wprowadzając prąd w zwoju otrzymuje się tu bardzo słaby, ale zato liczba skrętów jest bardzo znaczna, co daje razem dostateczną wartość na natężenie pola magnetycznego, w którym ma wykonać ruch magnes woltmetru.

Na rys. 885 mamy dwa zbudowane bardzo podobnie galwanoskopy, z których jeden o *małym oporze* jest wycechowany na *amper-*



Rys. 885.

metr, drugi o *wielkim oporze* — na *woltmetr*. Zasada budowy tych przyrządów oparta jest na tem, że pręt żelazny, zawieszony na sprężynie, wciągany jest do środka pionowo ustawionego pod nim zwoju drutu, przez który płynie prąd elektryczny *). Większe lub mniejsze zagłębienie się pręta do wnętrza zwoju (zależnie od natężenia pola magnetycznego, wytwarzanego przez prąd) wiąże się z większym lub



Rys. 886.

mniejszym przesuwaniem się wskazówki przed skalą. Ampermetr zaołączony jest w *upust*, t. j. przewodnik, który można włączyć równolegle do zwoju przyrządu; woltmetr ma dodatkowy obwód, który daje się włączyć w szereg ze zwojem zasadniczym **). Zależnie od włączenia — lub nie — tych dodatkowych przewodników, odczy-

*) Jest to, oczywiście, zjawisko natury magnetycznej; niżej dotkniemy wyjaśnienia tego zjawiska.

***) P. koniec ust. 342 i koniec ust. 344.

tywać możemy wedle jednej lub drugiej podziałki skali. Ampermetry i woltmetry tego typu są bardzo rozpowszechnione w nauce szkolnej.

Rys. 886 wyjaśnia, jak się włącza do obwodu ampermetr i woltmetr, gdy mają dać te informacje, które dać powinny. Przypuśćmy, mamy żarówkę, której włókno oznaczone jest na rysunku przez r , i pragniemy zbadać, pod jakim napięciem i przy jakim prądzie żarówka działa należycie; ampermetr włączamy w szereg z żarówką, natomiast woltmetr równolegle, łącząc końce idących do woltmetru drutów z zaciskami A i B , prowadzącymi do włókna żarówki. Przez woltmetr płynie tu, wobec wielkiej wartości jego oporu, tylko bardzo nieznaczna, praktycznie znikoma, część prądu (p. str. 266); woltmetr zatem nie wpływa (praktycznie) na zmianę natężenia prądu, wskazywanego przez ampermetr.

Ćwiczenia i zadania.

554. Jaki jest opór *) drutu miedzianego o średnicy 1 mm i długości 1,5 km? Jaki jest opór tychże wymiarów drutu żelaznego?

555. Jaka jest potrzebna różnica potencjałów na końcach drutów z zad. 554, by dał się w nich otrzymać prąd o natężeniu 0,4 A (amperów)?

556. Leżąca na stole rurka kauczukowa o średnicy wewnętrznej 1,5 mm, wypełniona jest całkowicie rtęcią w temperaturze 0° i na końcach zatkana króciutkimi koreczkami stalowymi. Jaki jest opór zawartego w rurce słupka rtęci, gdy długość rurki = 1 m?

557. Jaki jest opór słupka rtęci, zawartego w rurce z zad. 556, gdy rurkę rozciągamy do długości 1,5 m?

558. Pragniemy zbudować pudełko oporowe, zawierające opory w układzie, podanym w ust. 344. Druty manganinowe, których opory mają wynosić 0,1 omów — 0,5 omów, powinny mieć 1 mm średnicy, od 1 oma do 5 omów po 0,5 mm, od 10 omów do 50 omów po 0,2 mm, od 100 omów do 500 omów po 0,1 mm. Jakiej długości winny być poszczególne druty tej opornicy?

559. Pierścień busoli stycznych, jak na rys. 855, zrobiony jest z taśmy miedzianej 2 cm szerokości i 0,5 mm grubości. Jaką średnicę winien mieć ten pierścień, by opór jego wynosił 0,001 omów?

560. W obwodzie takim, jak na rys. 862, użyte jest ogniwo Grenela o powierzchni płytek 80 cm^2 . Czy zastąpienie w tym obwodzie danego ogniwa przez ogniwo tegoż typu o powierzchni płytek 10 cm^2 , odległych tak samo jedna od drugiej, jak w pierwszym, pozwoli otrzymać prąd większego czy też mniejszego natężenia? Uzasadnić odpowiedź.

561. Czy w obwodzie, o którym mowa w zad. 560, można osiągnąć tę samą wartość natężenia prądu, używając raz ogniwa o pewnym rozmiarze płytek, drugi raz — ogniwa o powierzchni płytek 2 razy mniejszej? Czem winny się poza tem różnić te dwa ogniwa, by rozwiązanie zadania było możliwe?

562. Bieguny dodatnie dwu ogniw Daniella różnych rozmiarów połączone są ze sobą drutem; bieguny ujemne obu ogniw są również połączone drutem. Czy

*) O ile w zadaniu nie jest wymieniona temperatura, wskazuje to, iż zaniedbujemy dla uproszczenia sprawy zmiany oporu, towarzyszące zmianom temperatury.

w danym obwodzie otrzymamy prąd elektryczny? Zanalizować szczegółowo odpowiedź na pytanie.

563. Tworzymy obwód z jednego ogniwa Daniella, łącząc jego bieguny drutem miedzianym i włączając w obwód ampermetr. Gdy w tym samym obwodzie do danego ogniwa Daniella dołączamy w szereg drugie tegoż typu i tych samych rozmiarów, natężenie prądu staje się większe, ale nie dwukrotnie. Jak to należy wytłumaczyć?

564. Bieguny danego ogniwa łączymy krótkimi, grubymi drutami miedzianymi z busołą stycznych, której opór = 0,05 omów; otrzymujemy wychylenie igielki $\alpha = 58^\circ$. Po włączeniu do obwodu (w szereg) dodatkowego oporu 3 omów otrzymujemy wychylenie igielki $\alpha = 30^\circ$. Jaki jest opór wewnętrzny użytego w doświadczeniu ogniwa?

565. Mamy obwód, złożony z baterji ogniów i łączącego jej bieguny drutu; nie znamy ani siły elektromotorycznej baterji, ani całkowitego oporu obwodu. Włączamy do obwodu wycechowany ampermetr o oporze 0,25 omów i odczytujemy na ampermetrze, że natężenie prądu wynosi 14,5 A. Włączamy następnie do obwodu (w szereg) opór dodatkowy 10 omów i wtedy ampermetr wskazuje nam 8,2 A. Jaka jest siła elektromotoryczna baterji oraz jakie było natężenie prądu i opór całego obwodu, podczas gdy nie zawierał on ampermetru i dodatkowego oporu?

566. Tworzymy raz połączenie w szereg n przewodników o oporach jednakowych, drugi raz — połączenie równoległe tychże przewodników. Ile razy opór pierwszej kombinacji jest większy od oporu kombinacji drugiej?

567. Łączymy równoległe 3 przewodniki o oporach 5 omów, 10 omów i 15 omów. Jaki jest opór wypadkowy danego połączenia przewodników?

568. Prąd o natężeniu 3 amperów rozgałęzia się na pewnej części swej drogi, przechodząc przez 3 równoległe spięte druty o oporach 1 om, 2 omy i 3 omy. Znaleźć wartość natężenia prądu w każdym z tych drutów?

569. Jakiego oporu drut złączyć należy równoległe z drutem o oporze 10,5 omów, aby się otrzymał opór takiego połączenia = 10 omów?

570. Opór drutu długości 12 m i średnicy 0,5 mm wynosi 3 omy. Jaki jest opór właściwy tego materiału, z którego drut jest zrobiony?

571. Cztery ogniwa, z których każde posiada siłę elektromotoryczną 1,5 woltów i opór wewnętrzny 2 omy, łączą się: a) wszystkie szeregowo; b) po dwa w szereg i dwa równoległe; c) wszystkie równoległe. Opór zewnętrzny we wszystkich tych trzech przypadkach jest ten sam i wynosi 2 omy. Jaka jest wartość natężenia prądu we wszystkich tych przypadkach?

572. Baterja ogniów o sile elektromotorycznej 20 woltów i oporze wewnętrznym 4 omów łączy się równoległe z drugą baterją ogniów o tej samej sile elektromotorycznej i oporze wewnętrznym 3 omy w celu przesłania prądu przez opór zewnętrzny, wynoszący 10 omów. Jakie jest natężenie prądu w całym obwodzie oraz w każdej z połączonych równoległe baterji?

573. Dwa ogniwa, z których jedno ma siłę elektromotoryczną 1,1 woltów i opór wewnętrzny 0,4 omów, drugie zaś odpowiednio 1,3 woltów i 0,6 omów łączą się w szereg w obwodzie, którego opór zewnętrzny jest 4 omy. Jakie jest natężenie prądu w obwodzie, gdy a) biegun ujemny pierwszego ogniwa połączony jest z biegunem dodatnim drugiego, b) gdy w sposób niezwykły biegun ujemny pierwszego ogniwa złączony jest z biegunem ujemnym drugiego?

574. Źródłem prądu w obwodzie są dwa spięte w szereg ogniwa, z których każde ma siłę elektromotoryczną 1,5 woltów i opór wewnętrzny 5 omów. Obwód zawiera pudło oporowe oraz solenoid o oporze 10 omów. Jakiej wielkości opór należy włączyć do obwodu z pudła oporowego, by na końcach solenoidu istniała różnica potencjałów = 0,1 woltów?

575. Rozporządzając baterją ogni o sile elektromotorycznej 8 woltów i oporze wewnętrznym 5 omów, tworzymy obwód prądu, łącząc bieguny baterji drutem o oporze 6 omów. Ile wynosi różnica potencjałów na biegunach baterji, gdy pozostaje w ten sposób zamknięta?

576. Bieguny baterji ogni o sile elektromotorycznej 6 woltów łączymy drutem o oporze 12 omów, przyczem różnica potencjałów na biegunach baterji spada do 4 woltów. Jakie z tego wyciągamy wnioski?

577. Rozporządzając 12 jednakowemi ogniwami, z których każde posiada siłę elektromotoryczną 1,2 woltów oraz opór wewnętrzny 0,5 omów, łączymy je: 1) wszystkie w szereg w zwykły sposób; 2) wszystkie równolegle; 3) po 3 równolegle i po 4 w szereg. Opory drutów, spinających ogniwa w baterję zaniedbujemy, jako znikomo małe. Bieguny sformowanych w ten sposób 3 baterji łączymy dwoma równoległemi przewodnikami, z których jeden posiada opór 2 omy, drugi 5 omów. Znaleźć dla wszystkich 3-ch przypadków całkowite natężenie prądu w obwodzie oraz natężenie prądu w każdym z dwu zewnętrznych przewodników?

578. Rozporządzamy 12 jednakowemi ogniwami, z których każde posiada siłę elektromotoryczną 1,8 woltów i opór wewnętrzny 0,2 omów. Jak należy połączyć te ogniwa w baterję, by otrzymać maximum natężenie prądu w obwodzie, gdy opór zewnętrzny obwodu wynosi 0,15 omów? Jaka jest wartość tego maximum natężenia prądu?

579. Rozporządzamy 8 jednakowemi ogniwami, z których każde posiada siłę elektromotoryczną 1,08 woltów oraz opór wewnętrzny 0,6 omów. W jaki sposób połączyć należy te ogniwa w baterję, aby otrzymać maximum natężenia prądu w obwodzie, gdy bieguny danej baterji zamknijemy przy pomocy drutu żelaznego 0,5 mm średnicy i 3 m długości. Jaka będzie wartość tego maximum natężenia prądu zaraz po zamknięciu, zanim się drut za bardzo nie rozgrzeje? (dlaczego wprowadzamy to ograniczenie?).

580. Przez drut o oporze 0,8 omów chcemy przesłać prąd o natężeniu 20 A. Rozporządzamy dowolną liczbą ogni o sile elektromotorycznej 2 woltów i oporze wewnętrznym 0,15 omów każde. Ile tych ogni należy użyć i jak je połączyć w baterję, by zadanie rozwiązać w najekonomiczniejszy sposób?

581. Z pewnej baterji ogni otrzymujemy w obwodzie natężenie prądu 3 ampery, przyczem różnica potencjałów na biegunach tej zamkniętej baterji wynosi 20 woltów. Ta sama baterja tworzy w innym obwodzie prąd o natężeniu 4 amperów, gdy różnica potencjałów na biegunach baterji jest 18 woltów. Jaki jest opór wewnętrzny baterji? Jaka jest siła elektromotoryczna baterji? Jaki opór zewnętrzny zostaje w obu przytoczonych przypadkach włączony w obwód?

582. Dowieść, że wymiar oporu w układzie elektrostatycznym jest $\frac{\text{sek}}{\text{cm}}$, w układzie zaś elektromagnetycznym $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$?

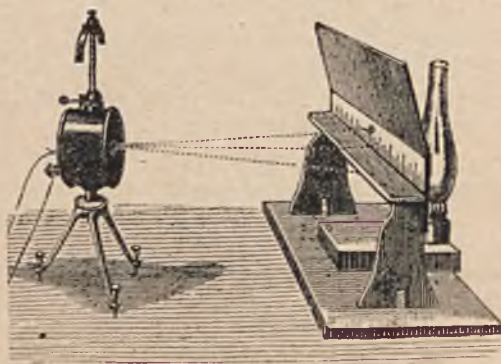
583. Dowieść, że $1 \text{ om} = \frac{1}{9.10^{11}}$ jedn. el. stat. oporu $= 10^9$ jedn. el. magn. oporu?

584. Dlaczego przy mierzeniu oporów metodą mostku Wheatstone'a nie jest wskazane zawsze posługiwać się wzorcem 1Ω , jako oporem znanym, natomiast dobieramy zazwyczaj opór znany tegoż rzędu, co szukany?

585. Przesuwanie styku na drucie mostku Wheatstone'a dokonywa się zazwyczaj tak, iż raz dochodzi się do wyznaczenia właściwego jego miejsca przez przesuwanie jego w jedną stronę (od A do C na schematycznym rysunku 870), drugi raz w stronę przeciwną (od C do A). Jednego i drugiego nastawienia dokonywamy kilkakrotnie. Za wynik ostateczny przyjmujemy średnie ze wszystkich odczytań. Dlaczego?

586. Na rys. 871 i 872 widzimy po dwie dłuższe wtyczki, zaopatrzone u góry w zaciski; z zaciskami temi łączyć można druty, na których końcach ma być otrzymana mała różnica potencjałów. Zaciski pudełka oporowego łączymy z biegunami ogniwa Daniella i wyjmujemy wszystkie krótsze wtyczki, włączając w ten sposób w obwód następujące opory: $0,1 \Omega$, $0,2 \Omega$, $0,2 \Omega$, $0,5 \Omega$, 1Ω , 2Ω , 2Ω , 5Ω , 10Ω , 20Ω , 20Ω , 50Ω , 100Ω , 200Ω , 200Ω , 500Ω . Długie wtyczki wstawiamy w otwórki w płytkach mosiężnych na pokrywie pudła tak, by między nimi był włączony opór $0,2 \Omega$. Końce drutów, połączonych z temi wtyczkami, doprowadzamy do galwanometru, którego opór jest 50Ω . Jakiego natężenia prąd otrzymuje się w galwanometrze?

587. Prąd taki, jak w zad. 586 przechodzi przez galwanometr, którego wychylenie zostaje odczytane metodą optyczną tak, jak to wskazane jest na rysunku 887.



Rys. 887.

Wąski snop światła przedostaje się z lampy przez mały otworek w osłonie, umieszczonej pod statywem ze skalą (osłony tej nie widać na rysunku); snop światła odbija się od zwierciadła galwanometru i po odbiciu pada na skalę, tworząc na niej niewielką plamę świetlną. Gdy zwierciadło wykonywa ruch wraz z całą ruchomą częścią galwanometru, plamka zmienia swoje położenie na skali. Wartość prądu, jaką obliczamy z poprzedniego zadania (Nr. 586), warunkuje przesunięcie się plamki

na skali o 12 mm. Odległość skali od zwierciadła wynosi 1,5 m. Wyznaczyć czułość danego galwanometru, rozumiejąc przez to wartość natężenia prądu, warunkującego przesunięcie się plamki świetlnej na skali o 1 mm przy odległości 1 m skali od zwierciadła galwanometru?

588. Rozporządzamy *miliampermetrem*, t. j. galwanometrem ze skalą, której podziałki oznaczają miliampery (miliamper = 0,001 ampera). Stosując metodę rozgałęzienia prądów (p. ust. 342), dołączamy do galwanometru t. zw. upust, t. j. przewodnik, włączony równolegle do galwanometru i mający znacznie mniejszy od niego opór. Jak należy dobrać do danego miliampermetru upust, by móc mierzyć za pomocą takiego urządzenia natężenie prądu, wynoszące ok. dziesięciu amperów?

589. Rozwiązać zadanie Nr. 588 dla przypadku, gdy mierzyć chcemy prądy o natężeniu 1 — 10 amperów, galwanometr zaś posiada czułość 10^{-7} A?

590. Dwa druty w połączeniu szeregowym mają opór 8Ω , w połączeniu równoległym $1,5 \Omega$. Jaki jest opór każdego z drutów?

591. Prąd o natężeniu 2 amperów rozgałęzia się na dwa równoległe do siebie spięte zwoje. Jeden z tych zwojów ma opór 10Ω i zrobiony jest z manganinu. Drugi zwoj jest miedziany o oporze 6Ω w 15° , przyczem współczynnik termiczny oporu wynosi 0,004 w temperaturze, pobliskiej 15° (o taką część opór wzrasta ze wzrostem temperatury o jeden stopień). Jakie jest natężenie prądu w obu zwojach w temperaturze 25° ?

592. Dzwonek elektryczny wymaga do uruchomienia go napięcia 1,5 woltów (wystarczy jedno ogniwo Leclanché'go). Jak można skorzystać z sieci miejskiej o napięciu 110 woltów do uruchomienia tego dzwonka (por. niżej zad. 637)?

593. Jakiego natężenia winien być prąd elektryczny, jeżeli pod napięciem 400 woltów dzielność jego ma wynosić 8 kilowatów?

594. Bateria, złożona z dwu szeregowo połączonych ogniw, z których każde posiada siłę elektromotoryczną 1,5 woltów i opór wewnętrzny 5Ω , dostarcza prądu do obwodu, na którego część zewnętrzną przypada opór 30Ω . Przewodnik ten grzeje się skutkiem tego. W jaki sposób zmienić należy ten opór zewnętrzny, by ilościowa strona procesu cieplnego w obwodzie podwoiła się?

595. W kalorymetrze elektrycznym mamy zwoj drutu manganinowego o średnicy 0,2 mm i długości 80 cm. Ile ciepła tworzy w tym drucie prąd 0,5 A w sekundzie?

596. Ile ciepła tworzy się w sekundzie we włóknie żarówki, zasilanej prądem 0,5 ampera pod stałym napięciem 220 woltów?

597. Stwierdzamy przy pomocy kalorymetru elektrycznego (jak?), że prąd o natężeniu 0,75 A wywiązuje w użytym do doświadczenia przewodniku 23 kaloryj gramowych w ciągu $\frac{1}{2}$ minuty. Jaki jest opór przewodnika?

598. Mierzymy opór włókna żarówki metodą mostku Wheatstone'a, przyczem włókno, oczywiście, się nie żarzy (dlaczego?). Czy obliczenie ilości tworzącego się we włóknie ciepła, gdy żarówka świeci, według wzoru $Q = 0,239 \cdot i^2 \cdot r$, gdzie r jest w powyższy sposób wyznaczone, da ten sam wynik, co obliczenie tej wartości według wzoru $Q = 0,239 (V_1 - V_2) i \cdot t$?

599. Prąd o natężeniu 0,5 amperów płynie przez druty: miedziany i żelazny, spięte w szereg i mające: pierwszy długość 1 m i średnicę 0,1 mm, drugi dłu-

gość 75 cm i średnicę 0,1 mm. W jakim stosunku pozostają ilości ciepła, tworzące się w jednym i drugim drucie w równych czasach?

600. Kalorymetr elektryczny zawiera wodę w ilości 150 gr. Zwój drutu z konstantanu, zanurzony w wodzie, ma 50 cm długości i 0,1 mm średnicy. Zaniedbując zjawisko ostygnięcia kalorymetru i zawartej w nim wody, obliczyć, ile czasu puszczać należy przez zwój w kalorymetrze prąd o natężeniu 20 amperów, by doprowadzić wodę w kalorymetrze, mającą początkowo temperaturę 14° , do wrzenia?

601. Utworzony jest obwód z ogniwa Daniella, mającego opór wewnętrzny 4Ω i łączącego bieguny ogniwa drutu o oporze 6Ω . Jaka jest dzielność prądu w obwodzie? Ile pracy elektrycznej tworzy się w części wewnętrznej oraz części zewnętrznej obwodu?

602. Przy wyznaczaniach oporów zapomocą opornic precyzyjnych (pudeł oporowych w rodzaju przedstawionej na rys. 871) używa się prądów bardzo słabych. Dlaczego?

603. Bieguny baterji, złożonej z 6 ogniw Daniella, złączone są drutem o oporze 6Ω (opór wewnętrzny każdego ogniwa jest 4Ω). Przy jakim połączeniu ogniw w baterję — równoległym czy szeregowym — grzanie się drutu będzie mniejsze?

604. Lampki żarowe dawnego typu (węglowe) wymagały dzielności zasilającego je prądu ok. 1,5 watów na świecę; teraźniejsze (z włóknami metalowymi) wymagają dzielności prądu zaledwie 0,5 watów na świecę (rys. 883 wyobraża właśnie taką *półwatówkę*). Wytlumaczyć, w jaki sposób można ustalić te doniosłe ze względów ekonomicznych fakty?

605. Sala oświetlona jest 100 żarówkami, spiętymi, jak zazwyczaj, równolegle (dlaczego?), z których każda zużywa 0,5 amperów pod napięciem 220 woltów. Ile ciepła tworzy tu prąd elektryczny w ciągu godziny? Jaka winna być co najmniej dzielność źródła, dostarczającego prąd? Dlaczego powiadamy „co najmniej“?

606. W pewnym mieszkaniu w miesiącach zimowych korzysta się przeciętnie przez 6 godzin na dobę z 6 żarówek 25 świecowych najnowszego typu (p. zad. 604). Za kilowatogodzinę elektrownia pobiera 50 groszy. Ile wynosi rachunek miesięczny za światło, o którym mowa?

607. W pewnym mieszkaniu instalacja elektryczna dostarcza stałego prądu o napięciu 110 woltów; mieszkanie to w miesiącach letnich oświetla się 3 żarówkami, z których każda zużywa 0,75 amperów i czynna jest przeciętnie przez 3 godziny dziennie. Cena energii elektrycznej jest taka sama, jak w przypadku z zad. 606. Ile wynosi miesięczny rachunek elektrowni?

608. W domowej instalacji elektrycznej lampki żarowe włączają się, jak zwykle, równolegle. Narysować schemat takiej najprostszej instalacji?

609. Dlaczego na linii każdej instalacji elektrycznej mieszczą się *bezpieczniki*? W jakich wypadkach bezpiecznik staje się nieodzowny?

610. Salę wykładową oświetla codziennie w ciągu 4 godzin 20 lampek żarowych półwatówek po 50 świec każda. Jako źródła prądu używa się baterji akumulatorów. Jaka winna być pojemność tej baterji, by można ją było ładować tylko 2 razy na tydzień?

611. Pewna instalacja świetlna zawiera 80 równolegle połączonych żarówek, z których każda ma opór 200Ω , gdy się żarzy, i wymaga napięcia 110 woltów.

Jakiego natężenia prąd jest potrzebny, gdy się żarzy jedna tylko z tych lampek? Jakiego natężenia prąd jest potrzebny, gdy się żarzą wszystkie? Jaki jest opór całej instalacji?

612. Ile spiąć należy w szereg ogniów, z których siła elektromotoryczna każdego jest 0,85 woltów i opór wewnętrzny 0,06 Ω , aby zasilić 10 spiętych równolegle żarówek, z których opór każdej przy żarzeniu się wynosi 50 Ω i z których każda wymaga natężenia prądu = 1 A ? 1) Jaka jest całkowita dzielnosc zużytego tu prądu? 2) Jakie jest napięcie na biegunach baterji ogniów podczas funkcjonowania? 3) Jaka tu jest dzielnosc użytkowa prądu? 4) Jaki jest współczynnik użytecznej wydajności danej instalacji?

613. Elektrownia dostarcza nieustannie prądu pod napięciem 550 woltów. Natężenie prądu, czerpanego z elektrowni o godz. 6 rano, wynosi 60 A, o godz. 8 rano 120 A, o godz. 9 — 80 A i wartość ta nie ulega zmianie do godz. 15¹/₂. o godz. 17 natężenie to wynosi 350 A, o godz. 18 — 440 A, o godz. 20 — 400 A, o północy 75 A, wreszcie o 6 rano znowu 60 A. Zakładając, iż zmiany natężenia prądu zachodzą zawsze w sposób jednostajny, znaleźć, ile energii dostarcza elektrownia w ciągu doby?

ROZDZIAŁ IX.

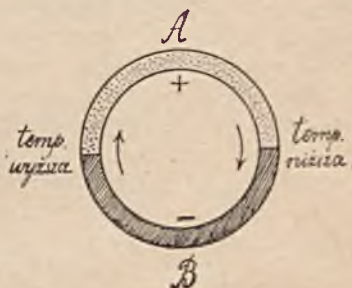
PRĄDY TERMoeLEKTRYCZNE.

348. Zjawisko prądu termoelektrycznego.

Podkreślaliśmy w ust. 315, że w obwodzie zamkniętym, złożonym tylko z przewodników metalicznych (rys. 747), niema prądu elektrycznego, o ile obwód cały pozostaje w jednej i tej samej temperaturze. Jest przytem rzeczą obojętną, czy różnorodne metale stykają się tu bezpośrednio, jak np. druty, skrecone mocno jeden z drugim, czy też spojone są przy pomocy lutowia. Co innego, jeżeli miejsca spojeń mają różną temperaturę. Tak np. gdy w przypadku obwodu, złożonego z dwu różnych metali (rys. 747b), temperatury obu spojeń są różne, powstaje



Rys. 888.



Rys. 889.

w obwodzie prąd, zwany *termoelektrycznym*, a samo urządzenie, dostarczające takiego prądu, nosi nazwę *ogniwa termoelektrycznego* albo *termoelementu*.

Zjawisko prądów termoelektrycznych odkryte zostało w roku 1823 przez T. Seebecka *). Rys. 888 wyobraża jeden z najprostszych przyrządów, które uwidoczniają powstawanie prądów termoelektrycznych. Dwa spojone ze sobą pręty z różnych metali (np. z miedzi i żelaza) tworzą ramę, wewnątrz której mieści się na ostrzu igielka magnesowa. Ustawiamy ramę według wskazań igielki w płaszczyźnie południka ma-

*) T. Seebeck (1770—1831) uczony niemiecki, ojciec znanego badacza z dziedziny akustyki, o którym wspominaliśmy w ust. 210, tom II (syrena Seebecka).

gnetycznego, poczem jedno ze spojeń ogrzewamy — igielka się wychyla, wskazując, iż w obwodzie, ją otaczającym, płynie prąd elektryczny, przytem wychylenie rośnie w miarę, jak się wytwarza większa różnica temperatur między spojeniami. Gdy, zaprzestawszy ogrzewania jednego spojenia, zaczynamy ogrzewać drugie, igielka stopniowo wraca do pierwotnego położenia, poczem, gdy to drugie spojenie osiąga wyższą temperaturę od pierwszego, igielka wychyla się w stronę przeciwną, czyli prąd termoelektryczny zmienia kierunek.

W doświadczeniu tem uderza nas odrazu jedna rzecz. Oto przy znacznej nawet różnicy temperatur obu spojeń danego termoelementu (jedno ma temperaturę mniej więcej pokojową, drugie ogrzewamy płomieniem lampki spirytusowej albo palnika gazowego) odchylenie igielki otrzymuje się niezbyt wielkie (prąd w obwodzie posiada natężenie rzędu jednego ampera); tymczasem opór obwodu wobec znacznej grubości użytych tu prętów jest niemal znikomy. Świadczy to, jeżeli weźmiemy pod uwagę prawo Ohma, że powstająca tu w obwodzie siła elektromotoryczna jest bardzo mała. Dodajmy odrazu, że, jakkolwiek ta siła elektromotoryczna według danych doświadczenia rośnie wraz z różnicą temperatur spojeń, to jednak nie ma tu zależności prostej proporcjonalności i tylko w ciasnych granicach zmian temperatur można zakładać istnienie tej proporcjonalności.

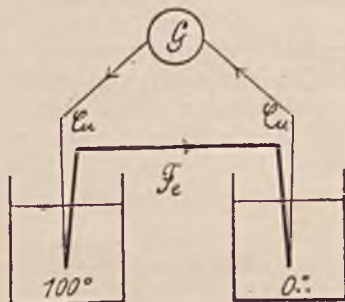
Przyjęto nazywać ten metal, w którym prąd termoelektryczny płynie od spojenia cieplejszego do chłodniejszego, *dodatnim* względem drugiego metalu, z którym on tworzy ogniwo termoelektryczne; przeciwnie ten drugi metal (w którym prąd — w przyjętem znaczeniu technicznym — płynie od chłodniejszego spojenia ku cieplejszemu) jest *ujemny* względem pierwszego (p. schemat na rys. 889). W przypadku, wyobrażonym na rys. 888, dolna część ramy zrobiona jest z miedzi, górna — z żelaza; zaobserwowany kierunek prądu wskazuje, że miedź jest ujemną względem żelaza, żelazo zaś dodatnie względem miedzi.

Różne metale dają się ułożyć w taki szereg, że bliżej początku przypadają dodatnie względem tych, które leżą dalej ku końcowi. A więc np. możemy ułożyć szereg następujący:

tellur	srebro	platyna
antymon	cyna	nikiel
żelazo	olów	konstantan
cynk	miedź	bismut

Jest rzeczą oczywistą, że im dalej w tym szeregu przypadają dwa jakiegokolwiek metale, tem większa siła elektromotoryczna powstaje w utworzonym z nich ogniwie termoelektrycznym przy tej samej różnicy temperatur na spojeniach. Najkorzystniej przeto jest używać do robienia tych ogniw bizmutu i antymonu (tellur jest metalem mało dostępnym). Należy zauważyć, że własności termoelektryczne metali w ogromnej mierze zależą od najdrobniejszych bodaj zanieczyszczeń; własności stopów ulegają znacznym zmianom przy niewielkich nawet zmianach w ustosunkowaniu składowych ich części.

I to jeszcze dodać trzeba, że siła elektromotoryczna ogniwa zależy nie tylko od różnicy temperatur na spoiniach, ale i od samych wartości tych temperatur. Zdarza się przytem zjawisko t. zw. *inwersji* (odwrócenia); jeżeli np. w ogniwie Cu/Fe jedno spoinie utrzymujemy w stałej temperaturze (przypuścimy 0°), a temperaturę drugiego podnosimy, siła elektrotermiczna rośnie, dając się wykreślnie przedstawić przez parabolę, osiąga maximum, potem się zmniejsza, dochodzi do zera, a przy dalszym wzroście *zmienia znak*.



Rys. 890.

Aby dać wyobrażenie, jak małe są występujące tu siły elektromotoryczne, wystarczy przytoczyć, że w ogniwie Cu/Fe przy różnicy temperatur na spoiniach 100° (na rys. 890 jedno spoinie drutu miedzianego i żelaznego mieści się w wodzie z lodem, drugie we wrzącej wodzie) otrzymuje się siła elektromotoryczna zaledwie 0,001woltów. W przypadku bizmutu i antymonu (Bi/Sb) przy tejże różnicy temperatur na spoiniach siła elektromotoryczna wynosi 0,011 woltów.

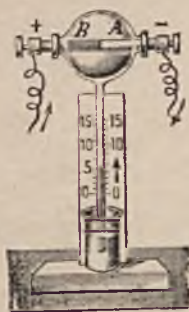
349. Zjawisko Peltiera.

Mniej więcej w 10 lat po odkryciu Seebecka Peltier *) odkrył inne zjawisko, które zostało ochrzczone jego imieniem, a które pozostaje w jak najściślejszym związku ze zjawiskiem prądów termoelektrycznych. Zjawisko polega na tem, że gdy prąd elektryczny płynie w obwodzie, gdzie stykają się ze sobą różne przewodniki, to na granicy zetknięcia tych różnych przewodników w zależności od kierunku prądu albo wywiązuje się, albo pochłania ciepło. Na rys. 891 widzimy przyrząd, który służy do wykazania tego faktu. Mamy tam termoskop powietrzny, przez którego bańkę przechodzą szczelnie w niej osadzone i spojone ze sobą pręty z bizmutu (B) i antymonu (A). Jeżeli przez te pręty kierujemy prąd elektryczny od B do A, jak na rysunku, słupek ciecży w termoskopie podnosi się, co wskazuje na oziębienie się powietrza w kuli, a zatem na pochłanianie ciepła w miejscu zetknięcia

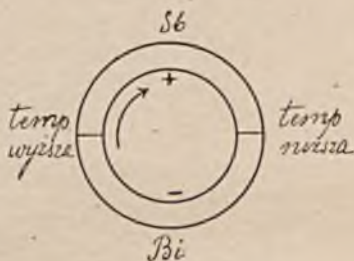
*) Wybitny zegarmistrz i uczoney francuski (1785—1845).

prętów. Gdy zmieniamy kierunek prądu, słupek rtęci w termoskopie opada, co jest dowodem wywiązywania się ciepła tam, gdzie przedtem zachodziło pochłanianie. Należy podkreślić, że — jak zawsze — przechodzeniu prądu przez pręty B i A towarzyszy ich grzanie się — tworzenie się znanego nam już ciepła Joule'a nie zależy od kierunku prądu. Właśnie, żeby to ciepło Joule'a nie maskowało zjawiska Peltiera, używamy grubych prętów z bizmutu i antymonu, czyniąc w ten sposób ich opór znikomym, a zatem zmniejszając możliwie ciepło Joule'a.

Gdybyśmy w powyższym doświadczeniu przetknęli przez kulę termoskopu pręt jednorodny z jakiegokolwiek metalu, mielibyśmy do czynienia jedynie z ciepłem Joule'a. Oczywiście, zatem siedliskiem obserwowanego zjawiska w doświadczeniu z przyrządem, który mamy na rysunku 891, jest miejsce styku różnorodnych metali (wydzielanie się lub pochłanianie ciepła w tym miejscu warunkuje, rzecz prosta, grzanie się, wzgl. oziębianie przyległych do miejsca styku części obu prętów).



Rys. 891.



Rys. 892.

Jak wykazują dokładniejsze badania, to „ciepło Peltiera“ jest wielkością, proporcjonalną do natężenia prądu, poza tem zależną od rodzaju stykających się metali oraz od temperatury spojenia.

Zjawisko Peltiera pozwala nam zdać sobie sprawę, w jaki sposób tworzą się prądy termoelektryczne. Weźmy np. ogniwo termoelektryczne, złożone z bizmutu i antymonu (Bi/Sb), wyobrażone na rys. 892 schematycznie (por. rys. 889).

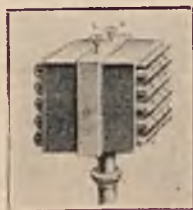
Antymon jest dodatnim względem bizmutu i prąd termoelektryczny płynie tak, jak na rys. 892, t. j. przez spojenie cieplejsze od bizmutu do antymonu. Wszakże, jak pouczyło nas przed chwilą doświadczenie z przyrządem, wyobrażonym na rys. 891, przy tym kierunku prądu w tym miejscu zetknięcia danych metali zachodzi *pochłanianie* ciepła, natomiast na spojeniu chłodniejszym, gdzie prąd idzie z antymonu do bizmutu, mamy *wydzielanie się* ciepła. Jak powiedzieliśmy przed chwilą, te ilości chłoniętego i wydzielanego ciepła zależą od temperatury, a więc nie są równe; ciepło pochłonięte na spojeniu cieplejszem jest większe, niż wydzielone na chłodniejszym. Otóż, podobnie jak w motorze cieplnym (patrz t. I, rozdz. IX), pobierana jest pewna ilość ciepła Q_1

w kotle, ilość Q_2 oddawana chłodnicy, różnica zaś $Q_1 - Q_2$ jest ciepłem, które się przekształca na pracę mechaniczną, tak tu pewna ilość q_1 ciepła pochłaniana jest na spoinieniu o wyższej temperaturze, pewna mniejsza ilość q_2 wydzielana na spoinieniu o niższej temperaturze, z różnicy zaś $q_1 - q_2$ tworzy się energia powstającego prądu termoelektrycznego. W głównych zatem zarysach rzecz przedstawia się tak, iż w ogniwie termoelektrycznym mamy przekształcanie się energii cieplnej w energię prądu elektrycznego; warunkiem zaś niezbędnym tego przekształcenia (niech czytelnik przypomni sobie 2-gą zasadę termodynamiki) jest różnica temperatur na spoinieniach, podobnie jak warunkiem przekształcenia się energii cieplnej na dynamiczną w motorze cieplnym jest różnica temperatur kotła i chłodnicy.

350. Praktyczne zastosowania ogniw termoelektrycznych. Baterje termoelektryczne.

Siła elektromotoryczna ogniw termoelektrycznych, jak już wiemy, jest bardzo mała. Niemniej czułe galwanometry pozwalają mierzyć bardzo słabe prądy, które się tworzą przy bardzo małych różnicach temperatur na spoinieniach termoelementów. Stąd metoda elektryczna wyznaczania małych różnic temperatur. Skoro np. w doświadczeniu według schematu na rys. 890 określona różnica temperatur na spoinieniach termoelementu warunkuje w danym obwodzie określone natężenie prądu, to odwrotnie, używając znanego ogniwa termoelektrycznego, z tego natężenia prądu wnosić można o różnicy temperatur. W ten sposób jesteśmy w stanie wyznaczać różnice temperatur wynoszące tysięczne części stopnia, a nawet mniej.

Ogniwa termoelektryczne dają się spinać w baterje. Na rys. 893a widzimy termobaterję Nobili'ego (urządzenie starego typu), złożoną



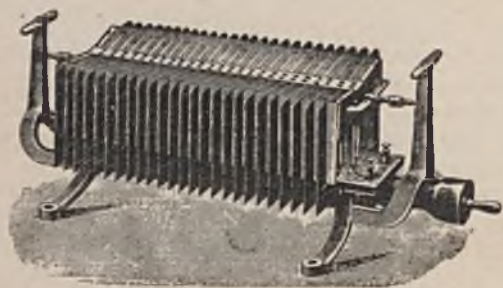
Rys. 893 a.



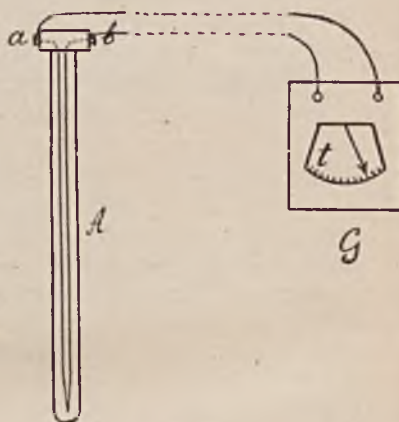
Rys. 893 b.

z ogniw antymon—bismut (Sb/Bi). Rys. 893b wyjaśnia schematycznie budowę tej termobaterji. Przypuśćmy, iż wszystkie spoinienia z prawej strony pozostają w wyższej temperaturze, niż spoinienia z lewej; wówczas siły elektromotoryczne poszczególnych ogniw sumują się, jak w przypadku spięcia w szereg jakichkolwiek ogniw elektrochemicznych; w ten sposób zyskujemy możliwość potęgowania prądu w takim obwodzie

w porównaniu z przypadkiem, gdy używamy zamiast baterji jednego tylko ogniwa. W baterji Nobili'ego (rys. 893a) spojenia po jednej stronie (np. prawej), pokryte sadzą, wystawione są na działanie promieniowania, dajmy na to, słońca, albo tej czy innej lampy (do czego służy sadza^{?)}; spojenia po stronie przeciwnej przykryte są osłoną metalową, a zatem utrzymywane w stałej temperaturze otaczającego powietrza. Wytwarza się wówczas różnica temperatur na spojeniach baterji, co warunkuje w galwanometrze, połączonym z zaciskami *x* i *y*, przepływ prądu elektrycznego. Z natężenia prądu wnosić możemy o tworzącej się różnicy temperatur, a stąd dalej wnioskować o badanem promieniowaniu.



Rys. 894.



Rys. 895.

Rys. 894 wyobraża często używaną w pracowniach termobaterję Gülcnera. Składa się ona z wąskich rurek niklowych, które służą jako palniki gazowe; na górnych częściach tych rurek mieszczą się nasady miedziane, złączone z prętami ze stopu antymonowego, te zaś znowu z wystającymi o wielkiej wzgl. powierzchni płytami miedzianymi. Cykulacja powietrza dokoła tych płyt służy do możliwie prędkiego ich oziębiania i utrzymywania w możliwie niskiej, prawie pokojowej temperaturze, a w ten sposób do wytwarzania znacznej różnicy temperatur na spojeniach (mniej więcej temperatura płomienia gazowego — temperatura pokojowa). Tak zbudowana termobaterja z 66 ogniw (stop antymonowy — nikiel), gdy zapalimy doprowadzony do niej gaz, posiada siłę elektromotoryczną około 4 woltów, przy małym zaś oporze wewnętrznym, wynoszącym zaledwie nieco więcej od $\frac{1}{2}$ oma, pozwala na otrzymywanie prądów, które służyć mogą do ładowania akumulatorów, do doświadczeń wykładowych i t. p.

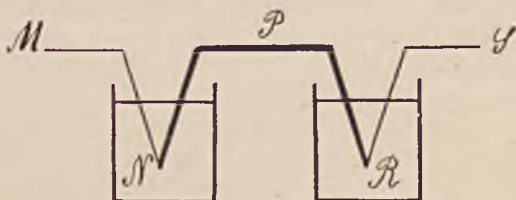
Ważne jest również zastosowanie termoelementów do wyznaczania wysokich temperatur. Rys. 895 wyobraża schematycznie takie ogniwo Le-Chateliera, utworzone z drutów platynowego i platyno-rodowego

(metale trudnotopliwe). Druty mieszczą się w długiej na jaki metr osłonie porcelanowej, której koniec wstawiamy np. do pieca; chłodne końce drutów połączone są z zaciskami *a* i *b*, od których dalej zwykle druty miedziane prowadzą do galvanometru, wycechowanego zazwyczaj tak, że odrazu odczytujemy na skali szukaną temperaturę. Tego rodzaju *pirometry elektryczne* służą do wyznaczania temperatur w granicach 1000° — 2000° .

Ćwiczenia i zadania.

614. Rozporządzając przyrządem, przedstawionym na rys. 888, w którym górna płyta zrobiona jest z miedzi, dolna z bizmutu, oziębiamy lodem lewe (na rysunku) spojenie, pozostawiając prawe w temperaturze pokojowej. W którym kierunku płynie prąd termoelektryczny w ramie, otaczającej igłę magnesową, i jak wychyli się igielka, jeżeli z lewej (na rysunku) strony przypada biegun *N* tej igielki?

615. W dwu naczyniach (rys. 896) mieści się woda z lodem; spojne ze sobą druty z miedzi (*MN* i *RS*) i konstantanu (*NPR*) tworzą drogę dla prądu elektrycznego; w jednym z naczyń zanurzone jest jedno ze spojeń tych drutów, w drugim —



Rys. 896.

drugie. Gdy puszczaemy prąd przez drut, przy jednym ze spojeń woda krzepnie. W którym naczyniu to zachodzi, gdy prąd kierujemy od *M* do *S*? Co się stanie, gdy zmienimy kierunek prądu?

616. Czy do mierzenia prądów termoelektrycznych wskazane są galvanometry o małym, czy o znaczniejszym oporze?

617. Jak można wyznaczyć siłę elektromotoryczną termoelementu, zbudowanego z dwu danych metali, oraz znaleźć zależność tej siły elektromotorycznej od temperatury?

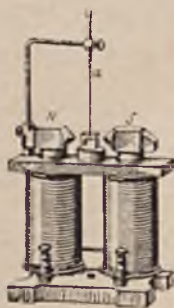
618. Pragniemy wyznaczać przy pomocy termoelementu, według schematu z rys. 890, temperaturę w granicach 70° — 100° . W jaki sposób należy wycechować w tym celu galvanometr?

ROZDZIAŁ X.

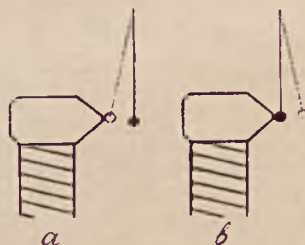
WIADOMOŚCI UZUPEŁNIAJĄCE O POLU MAGNETYCZNYM I MAGNETYCZNYCH WŁASNOŚCIACH CIAŁ.

351. Ciała paramagnetyczne i diamagnetyczne.

Mówiąc wyżej o magnetyzmie, nie braliśmy pod uwagę innych ciał poza żelazem i stalą. W tych dwu substancjach zarysowują się pewne własności, które w innych na pierwszy rzut oka jakgdyby nie istnieją. Nikiel, kobalt, pewne stopy manganu i miedzi z domieszkami innych metali zaliczyć jeszcze można do ciał, w których własności te występują wyraźnie, jakkolwiek nie w takim stopniu, jak w żelazie.



Rys. 897.



Rys. 898.

Umiejąc wytwarzać przy pomocy elektromagnesów pola magnetyczne o wielkiej wartości natężenia (dziesiątki tysięcy gausów *), jesteśmy w możności rozszerzyć w tej dziedzinie zakres naszej wiedzy. Okazuje się, jak na to pierwszy wskazał M. Faraday, że wszystkie ciała są, powiedzmy ogólnie, magnetyczne, przyczem dają się podzielić na dwie wielkie grupy: ciała *paramagnetyczne* i *diamagnetyczne*.

Elektromagnes taki, jaki widzimy na rys. 897, pozwala w sposób dogodny wykazać, na czem polega różnica tych dwu rodzajów ciał. Mię-

*) W ostatnich czasach znaleziono sposób otrzymywania — wprawdzie na czas krótki — pól o natężeniu do miliona gausów.

dzy odpowiednio ukształtowanymi bryłami żelaza miękkiego, położone-
mi na biegunach elektromagnesu, t. zw. *okowami*, daje się wytworzyć
pożądane pole, a w niem umieścić badane ciało *). O ile okowy elektro-
magnesu zwrócone są do siebie stożkowemi zakończeniami, jak na ry-
sunku, otrzymujemy, oczywiście, pole niejednorodne.

Zawieśmy na nitce w pobliżu któregośkolwiek bieguna elektro-
magnesu, podczas gdy w zwojach jego niema prądu, bryłkę żelaza (rys. 898a);
w chwili puszczenia prądu przez zwoje bryłka zostaje przyciągnięta
gwałtownie do bieguna elektromagnesu. Zjawisko to nie nowego nam
nie daje. Zawieśmy jednak w podobny sposób kawałek szkła. Powtór-
zywszy doświadczenie, przekonywamy się, że szkło również jest przez
biegun magnesu przyciągane, z tą różnicą, iż bryłkę żelaza można
umieścić dość daleko od bieguna i znane działanie się objawi, szkło zaś
należy umieścić względnie blisko bieguna. Podobne działanie daje się
zauważyć i na bryłkach z manganu, glinu, platyny, nie mówiąc już
o niklu, kobaltie i wzmiankowanych stopach manganowych. Inaczej
jednak rzecz się przedstawia, gdy doświadczenia tego rodzaju powta-
rzamy z bizmutem, zamiast bowiem przyciągania w tym razie stwier-
dzamy odpychanie. Jeżeli zawiesimy na nitce bryłkę z bizmutu tak,
by zleпка dotykała bieguna elektromagnesu (rys. 898b), podczas gdy
w zwojach elektromagnesu prądu niema, z chwilą puszczenia prądu
bryłka zostaje odrzucona i utrzymywana w pewnej odległości od bie-
guna, jak to jest zaznaczone na rysunku kropkami. Podobnie jak z bi-
zmutem zachodzi działanie — tylko w słabszym stopniu — z antymo-
nem, cynkiem, miedzią, ołowiem i t. d.

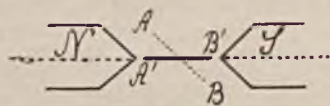
Otóż, wszystkie te ciała, które, powiedzmy krótko, są przyciągane
przez magnes, nazywamy *paramagnetycznymi*, te zaś, które są odpy-
chane, *diamagnetycznymi*. Wyżej w rozdziale VI wyjaśniliśmy mecha-
nizm przyciągania kawałków żelaza przez magnes: przez indukcję że-
lazo magnesuje się w ten sposób, iż w części kawałka żelaza, bliższej
względem magnesu, powstaje biegun znaku przeciwnego, niż biegun
magnesu — tak właśnie dzieje się w ciałach paramagnetycznych.
Wręcz odwrotnie zachodzi to w ciałach diamagnetycznych — tu przez
indukcję zostaje wytworzony w części bryłki, bliższej bieguna magnesu,
biegun znaku tego samego, co warunkuje odpychanie.

Rzecz możemy ująć jeszcze inaczej. Oto ciała paramagnetyczne,
umieszczone w polu magnetycznym, o ile mogą się poruszać, przesuwa-
ją się z miejsc o natężeniu mniejszem (gdzie rurki pola są mniej sło-
czone) do miejsc o natężeniu większem (gdzie rurki pola są bardziej
stłoczone). Wręcz odwrotnie zachowują się ciała diamagnetyczne
w tych warunkach, poruszając się z miejsc o większej ku miejscom
o mniejszej wartości natężenia pola.

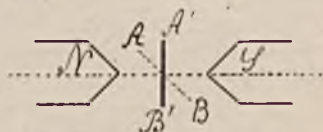
Dokonyjmy teraz badania różnych ciał w sposób, przedstawiany
na rys. 897, t. j. zawieszając na nieskręconej nitce w środkowej części.

*) Naczynko między biegunami spoczywa na drewnianym kločku, który leży
na płytce drewnianej, nasadzonej na rdzeń żelazny elektromagnesu.

poła, między zwróconemi do siebie stożkowemi końcami oków, pręciki, zrobione z różnych substancyj. Okazuje się, że te, które są zrobione z materiałów paramagnetycznych (mangan, glin, szkło), o ile ich os AB (rys. 899a*) przed puszczeniem prądu do elektromagnesu nie zgadza się z kierunkiem osiowym MN mających się wytworzyć linii pola, po puszczeniu prądu w elektromagnesie, t. j. w chwili utworzenia się pola magnetycznego zmieniają swe położenie na A' B', czyli ustawiają



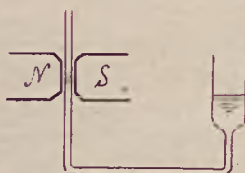
Rys. 899 a.



Rys. 899 b.

się, że tak powiemy, *podłużnie*. Natomiast pręciki z ciał diamagnetycznych, np. z bizmutu, w tych samych warunkach zajmują położenie *poprzeczne* (rys. 899b). I tu więc zauważamy, że pręcik paramagnetyczny dąży do ustawienia się w miejscu najgęstszego przebiegu rurek pola, t. j. w miejscach największego natężenia pola; wręcz przeciwnie zachowuje się pręcik diamagnetyczny, usiłując jakgdyby uciec z miejsca, gdzie natężenie pola jest największe.

Paramagnetyzm względnie diamagnetyzm cieczy stwierdzić można przy pomocy doświadczenia według schematu, przedstawionego na



Rys. 900.



Rys. 901.

rys. 900. Ciecz paramagnetyczna (np. roztwór wodny chlorku żelaza) w wąskim ramieniu rurek połączonych, umieszczonem między biegunami, wznosi się z chwilą zamknięcia prądu w elektromagnesie; przeciwnie, obniża się w przypadku cieczy diamagnetycznej (rtęć, alkohol, woda).

Na rys. 897 widzimy, że pręcik wisi wewnątrz naczynka szklanego. W przypadku słabych działań (a naogół działania, o których teraz mowa, są słabe) jest rzeczą ważną zabezpieczenie się przeciw zakłócającym wpływom prądów powietrza — naczynko tworzy więc pożądaną osłonę. Poza tem jednak można tego naczynka użyć w celu wykonania niezmiernie ważnego doświadczenia, wykazującego, iż takie czy inne zachowanie się w polu magnetycznem danego ciała zależy od wzglę-

*) Rysunek przedstawia rzecz tak, jak ją widziałby obserwator, patrząc z góry.

nych własności magnetycznych (jakich mianowicie, niebawem powiemy) danego ciała i tego ośrodka, w którym się ono znajduje (porówn. doświadczenie elektrostatyczne, wyobrażone na rys. 715, str. 102). Zawieśmy na włóknie *a* między biegunami elektromagnesu zatopioną z obu końców rurkę szklaną, wypełnioną *niestężonym* roztworem wodnym chlorku żelaza. Rurka taka, zanurzona w wodzie, którą wypełniamy wtedy wspomniane naczynko szklane, zachowuje się, w chwili puszczenia prądu przez zwoje elektromagnesu, tak, jak ciało paramagnetyczne, t. j. ustawia się *podłużnie*. Należmy teraz do naczynka zamiast czystej wody *stężonego* roztworu wodnego chlorku żelaza; okazuje się, że teraz rurka ustawia się *poprzecznie*, t. j. zachowuje się jak ciało diamagnetyczne. We wszystkich zatem poprzednich doświadczeniach mieliśmy wyniki, uwarunkowane ustosunkowaniem własności magnetycznych badanych ciał do własności magnetycznych powietrza.

Możemy jeszcze użyć tegoż elektromagnesu w celu pokazania, że i gazy posiadają określone własności magnetyczne. Jeżeli między bieguny N i S (możliwie blisko położone — okowy dają się przesuwać) umieszczamy płomień świecy, płomień ten z chwilą wzbudzenia elektromagnesu przybiera kształt, wyobrażony na rys. 901 — wydłuża się *poprzecznie* i wykazuje tem, że produkty gazowe spalania się (w stosunku do powietrza) są diamagnetyczne.

Jak już wspominaliśmy, ogół ciał, należąc czy to do grupy para- czy diamagnetycznych, w słabym naogół stopniu zdradza te własności, tak że tylko w polach magnetycznych o wielkiem natężeniu własności te dają się poznać. Jest wszakże wśród ciał paramagnetycznych niewielka liczba znanych już nam z żelazem na czele (żelazo, stal, nikiel, kobalt, pewne stopy), w których własności te wyjątkowo silnie się zarysowują, a przytem odznaczają się one inną jeszcze odrębnością, o której niżej powiemy. Tę nieliczną podgrupę ciał paramagnetycznych wyodrębniamy pod nazwą *ferromagnetycznych* *).

352. Przenikliwość magnetyczna.

W doświadczeniu, przedstawionem na rys. 779 (str. 182), pokazaliśmy sposób otrzymywania pola magnetycznego, które w swojej części środkowej uważać możemy za jednorodne. Gdy doświadczenie powtórzymy, umieszczając między okowami magnesu na płycie, na której leżą opilki żelazne, krążek z żelaza miękkiego, otrzymamy widmo takie, jak na rysunku 902. Biała plama przypada w miejscu, gdzie leżał krążek; linje pola nie są już jednak równoległe — zbiegają się one ku krążkowi żelaznemu, jakgdyby żelazo dla nich przedstawiało dogodniejszą drogę. Przypomina to nam rozważania nasze w stosunku do dielektryków (p. rys. 712, na str. 100). Ujmujemy wynik, teraz zaobserwo-

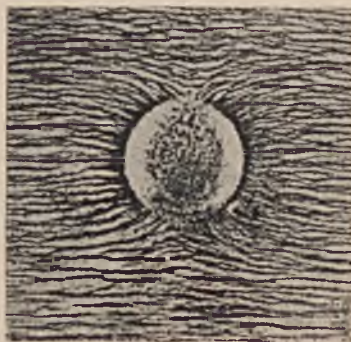
*) Od ferrum = żelazo (po łacinie).

wany, mówiąc, że *magnetyczna przenikliwość żelaza* jest większa niż powietrza.

Powtórzmy znowu doświadczenie, tym razem umieszczając pierścień żelazny w polu, które w nieobecności pierścienia byłoby jednorodnym. Teraz otrzymujemy widmo, przedstawione na rys. 903. Tak samo jak w poprzednim doświadczeniu, linje pola skierowały się ku bryle żelaznej, wewnątrz jednak pierścienia nie widzimy prawidłowego ukła-



Rys. 902.



Rys. 903.

du opitek — niema tam pola magnetycznego (przynajmniej zarysowującego się wyraźnie); wskazuje to, iż dalszy ciąg tych linii po dojściu ich do żelaza został skierowany poprzez masę żelaza, jako przez substancję o *większej przenikliwości magnetycznej* niż powietrze. W ten sposób żelazny pierścień tworzy t. zw. *osłonę magnetyczną*, zapobiegając, a przynajmniej znacznie zmniejszając działanie magnetyczne na ciała, znajdujące się w osłoniętej przezeń przestrzeni.

I znowu musimy się odwołać do tego, co mówiliśmy wyżej (p. rys. 711 na str. 99) o przypadku, gdy pierścień z substancji o większej wartości stałej dielektrycznej mieści się w ośrodku o mniejszej wartości tej stałej. Podkreślić jednak musimy z naciskiem, że w przypadku pola magnetycznego nie jesteśmy w możności uzyskać osłony tak doskonałej, jakiej w polu elektrycznym dostarczają nam przewodniki elektryczne (p. rys. 710 na str. 99). Przenikliwość magnetyczna żelaza jest, powiedzmy ogólnie, kilka tysięcy razy większa niż powietrza, tymczasem tłumaczyliśmy w ust. 299, że, chcąc mówić o wartości stałej dielektrycznej metali, musielibyśmy tę wartość podać jako nieskończenie wielką. Grubościenne kula żelazna, wydrążona w środku, tworzy mimo to bardzo dobrą osłonę magnetyczną dla ciał, znajdujących się w wydrążeniu, i do tych osłon uciekamy się nieraz (np. robią się galwanometry t. zw. *opancerzone*, w których w ten sposób zapobiega się wpływom magnetycznym, które mogłyby działać z zewnątrz na igielkę magnesową).

Doświadczenia, opisane w ustępie poprzednim, pozostają w najzupełniejszej zgodzie z tem, co mówimy teraz. Ciała paramagnetyczne,

mające swobodę ruchów w polu magnetycznym, podążają z miejsc o mniej stłoczonych do miejsc o więcej stłoczonych liniach pola — w ten sposób wchłaniają one ich więcej w siebie, zaspokajając jakgdyby pewną żądę, idącą w parze z ich względnie większą (w stosunku do ośrodka) przenikliwością magnetyczną. Wręcz przeciwnie zachowują się ciała diamagnetyczne, których przenikliwość magnetyczna jest mniejsza niż ośrodka (powietrza) — te ciała są zatem jakgdyby gorsze-
mi przewodnikami dla linii pola, które je usiłują ominąć (porów. przypadek pola elektrostatycznego na rys. 713, str. 101); ciała diamagnetyczne, posiadając swobodę ruchów w polu magnetycznym, podążają skutkiem tego od miejsc większego do miejsc mniejszego stłoczenia linii pola.

Mówiąc w swoim czasie o wartości stałej dielektrycznej poszczególnych dielektryków, podaliśmy, że wartość tej stałej dla powietrza jest niewiele większą od stałej dla próżni; jeżeli zatem stałą dielektryczną dla próżni oznaczymy przez 1, praktycznie biorąc, tak samo możemy oznaczyć stałą dielektryczną powietrza (w zwykłym ciśnieniu wynosi ona w rzeczywistości 1,0006, p. tabl. na str. 81). Co jednak jest charakterystyczne, że wszystkie bez wyjątku ciała materjalne posiadają stałą dielektryczną większą niż próżnia.

Co innego stwierdzamy w stosunku do przenikliwości magnetycznej. Jeżeli, podobnie jak w przypadku stałej dielektrycznej, oznaczymy przenikliwość magnetyczną dla próżni przez *jedynkę* ($\mu = 1$), to istnieje cały szereg ciał o większej przenikliwości magnetycznej ($\mu > 1$) i te właśnie są ciałami *paramagnetycznymi*, ale istnieje również szereg ciał o mniejszej przenikliwości magnetycznej ($\mu < 1$) i te stanowią ciała *diamagnetyczne*.

Powietrze jest ciałem tak słabo paramagnetycznym, że praktycznie można przyjmować dlań wartość $\mu = 1$ (naprawdę dla powietrza $\mu = 1,00000037$). Dla stężonego roztworu wodnego chlorku żelaza μ jest względnie znacznie większe, ale mimo to bardzo małe, a mianowicie $= 1,000044$; roztwór niestężony tejże substancji ma przenikliwość magnetyczną mniejszą, — stąd zachowanie się jego względem roztworu stężonego jak ciała diamagnetycznego. Podobnie olbrzymia większość ciał paramagnetycznych ma wartość μ cokolwiek większą od jedynki, ale tak nieznacznie większą, że różnice tych własności mogą być wykryte tylko w specjalnych warunkach doświadczalnych. Co do ciał diamagnetycznych, wszystkie one mają wprawdzie μ mniejsze od jedynki, ale tak nieznacznie mniejsze, że również tylko przy potężniejszych środkach badania odrębność tych ciał się ujawnia. Tak np. dla bizmutu, w którym własność ta występuje w największym stopniu, μ wynosi 0,999824, a np. dla wody, ciała również diamagnetycznego, $\mu = 0,99999093$, co również w większości wypadków może być uważane za równe jedności.

Inaczej rzecz się przedstawia dla nielicznej grupy ciał ferromagnetycznych, co do których stwierdzamy ponadto, że wartość μ nie jest wielkością stałą, a zależną od natężenia pola magnetycznego, w którym te

ciała się znajdują. Tak np. dla wspomnianych wyżej stopów manganowych otrzymywano na μ wartość, sięgającą 40, dla kobaltu do 170, dla niklu do 290; dla żelaza miękkiego w polu o natężeniu 1000 gausów znajdujemy ok. 20, w polu o natężeniu 100 gausów ok. 180, w polu o natężeniu 10 gausów ok. 1400, w polu o natężeniu 1 gausa przeszło 6000, dla pól jednak o natężeniach znacznie mniejszych od 1 gausa wartość μ staje się znowu coraz mniejszą. Wartości tego współczynnika różnią się dla poszczególnych próbek żelaza miękkiego, a nawet dla jednej i tej samej próbki otrzymują się różne, zależnie od jej dziejów, t. j. od tych wpływów magnetycznych, którym kolejno ta próbka uprzednio podlegała.

353. Przenikliwość magnetyczna (ciąg dalszy). Postać ogólniejsza wzoru Coulomba.

Jak wyjaśniliśmy w ust. poprzednim, przenikliwość magnetyczna ogółu ciał tak nieznacznie różni się od 1, że tylko wzmożone środki obserwacji pozwalają wykryć te różnice. Dlatego w życiu praktycznym wyodrębnia się jedynie nieliczna grupa ciał ferromagnetycznych. Mimo to powinniśmy pamiętać, że wszystkie ciała w polu magnetycznym podlegają pewnym zmianom, a mianowicie tworzeniu się w nich polaryzacji magnetycznej; zmiany te ujmujemy ogólną nazwą *indukcji magnetycznej*.

Wyobraźmy sobie, iż mamy solenoid, przez który płynie prąd elektryczny (rys. 904). Przypuśćmy, iż rzecz dzieje się, jak zwykle, w powie-



Rys. 904.

trzu i założmy, iż dla powietrza $\mu = 1$, co niewiele odbiega od rzeczywistości *). Wewnątrz i nazewnątrz solenoidu tworzy się pole magnetyczne. Możemy w którymkolwiek punkcie zewnętrznym zmierzyć natężenie tego pola — oznaczmy je przez F . Linje i rurki pola przebiegają tak, jak to zaznaczono linjami ciągłymi na rysunku. Przypuśćmy teraz, że wewnątrz solenoidu zostaje całkowicie wypełnione przez włożony weń rdzeń z żelaza miękkiego i płynący przez solenoid prąd posiada to samo co pierwiej natężenie. Żelazo się magnesuje (zachodzi w niem polary-

*) Ściśle biorąc, należałoby wykonywać doświadczenie w próżni.

zacja magnetyczna) i z północnego jak południowego końca solenoidu wybiega teraz znacznie więcej linii i rurek pola (część ich zaznaczona jest na rysunku kropkami): natężenie pola w uprzednio zbadanym punkcie (zarówno jak w innych punktach) wzrośnie tyłokrotnie, ilokrotnie zęszczą się w tych miejscach pola jednostkowe rurki pola. Z tego, czegośmy się dowiedzieli w ust. poprzednim, domyślać się możemy, co też jest istotnie słuszne, że zagęszczenie to będzie μ -krotne, a zatem natężenie pola w rozważanym punkcie będzie μF . Jak widzimy, wyznaczanie natężenia pola w obu przytaczanych razach prowadzi nas do znalezienia liczby μ , t. j. przenikliwości magnetycznej użytego w doświadczeniu żelaza.

Można zrobić nieco inaczej, a mianowicie wziąć najpierw solenoid z rdzeniem żelaznym i zaobserwować w określonym punkcie pola jakiegokolwiek działanie magnesu, które wogóle daje się zmierzyć, zmierzysz jednocześnie natężenie prądu i w solenoidzie. Następnie po wyjęciu rdzenia z solenoidu należy zwiększać natężenie prądu, dopóki zaobserwowane działanie w obranym punkcie nie otrzyma się równe poprzednio zanotowanemu. Przypuśćmy, że teraz natężenie prądu będzie i' . Z tego, czego nauczyliśmy się o polu magnetycznym prądu, wynika, że $\frac{i'}{i} = \mu$, t. j. że doświadczenie podobne prowadzi nas do znalezienia przenikliwości magnetycznej użytego w doświadczeniu rdzenia.

Nie rozważamy bliżej, jak w istocie wyznaczają się wartości przenikliwości magnetycznej. Wystarczy, by czytelnik rozumiał, jakiego rodzaju doświadczenia prowadzą do takiego wyznaczania.

W ust. 323 na str. 184 zwracaliśmy uwagę na słuszność takiego poglądu, że linje pola, wytwarzanego przez magnes, znajdują swe przedłużenie wewnątrz magnesu. W tym razie, gdy solenoid nie zawiera rdzenia, ten charakter zamkniętych linii pola (w próżni) jest oczywisty. Gdy jednak solenoid wypełniony jest przez żelazo, należy w myśl uwag poprzednich rzecz brać tak, iż linje i rurki pola zewnętrznego (w zwiększone, μ razy liczbie) mają swój dalszy ciąg w żelazie, co godzi się z wyobrażeniem towarzyszącej temu polaryzacji. W ten sposób należałoby uważać, iż, jeżeli przez solenoid, gdy rdzenia w nim niema, przy danym natężeniu prądu, przechodzi ogółem np. N rurek jednostkowych, to przez rdzeń przy tem samym natężeniu prądu w solenoidzie liczba ta wzrasta do μN , t. j. powiększa się o $\mu N - N = \mu(N - 1)$. Tak też ujmujemy zachodzące tu zjawisko indukcji w żelazie, tworzącem rdzeń, nazywając nowo powstające linje i rurki *linjami indukcji, rurkami indukcji*.

Rozważając w rozdz. VI oddziaływanie wzajemne biegunów magnetycznych, oraz podając kierujące tem oddziaływaniem prawo Coulomba, nie braliśmy bynajmniej pod uwagę własności magnetycznych powietrza, jako tego ośrodka, w którym obserwowaliśmy te oddziaływania. Zastrzeżliśmy się jedynie co do tego, podkreślając, iż świadomie pomijamy to narazie, oraz kładąc nacisk, że podane wówczas sformu-

łowanie prawa Coulomba ściśle jest tylko dla próżni i prawie ściśle dla powietrza.

To też, gdybyśmy oddziaływania wzajemne jakichś danych biegunów magnetycznych badali raz w powietrzu, drugi raz w innym ośrodku, np. gdybyśmy naczynie wagi Coulomba (rys. 767 na str. 171) wypełnili do tego drugiego, pomiaru stężonym roztworem chlorku żelaza, przekonalibyśmy się, iż wzór Coulomba należy poprawić i to w podobny sposób, jak należało poprawić ten wzór w przypadku zastosowania jego do zjawisk elektrostatycznych, z uwzględnieniem stałej dielektrycznej poszczególnych ośrodków (p. ust. 298). Mianowicie napisać należy

$$f = \pm \frac{m_1 m_2}{\mu \cdot r^2}; \dots \dots \dots (1)$$

czynnik μ , występujący w mianowniku, oznacza właśnie, jak wykazuje doświadczenie, przenikliwość magnetyczną. Dostrzegamy więc tu jeszcze raz podobieństwo między pojęciami stałej dielektrycznej i przenikliwości magnetycznej (p. wzór 2 na str. 93); różnica wszakże jest ta, że, gdy w przypadku pola elektrostatycznego najsilniejsze działanie między danej wielkości nabojami, umieszczonemi w danej odległości, zachodzi w próżni i jest mniejsze we wszystkich innych ośrodkach, w przypadku pola magnetycznego są ośrodki (ciała paramagnetyczne), w których działanie między danej wielkości biegunami magnetycznemi, umieszczonemi w danej od siebie odległości, jest mniejsze niż w próżni, ale są też ośrodki (ciała diamagnetyczne), w których działania te są większe niż w próżni.

Jak tedy w przypadku pola, wytworzonego przez pojedynczy nabój magnetyczny $+m$, mieszczący się w określonym punkcie, wyraża się natężenie pola w dowolnym innym punkcie, którego odległość od naboju jest r , gdy ośrodek, w którym to się dzieje, ma jakąkolwiek wartość μ przenikliwości magnetycznej? Oczywiście, natężenie to wynosi (p. ust. 323)

$$F = \frac{m}{\mu \cdot r^2} \dots \dots \dots (2)$$

Wzór $F = \frac{m}{r^2}, \dots \dots \dots (3)$

który podaliśmy w ust. 323 (wzór (2) i (3) na str. 176, 177), jest przypadkiem szczególnym, gdy $\mu = 1$.

Czytelnikowi może się nasunąć uwaga, że w przyjętym przez nas sposobie oznaczania natężenia pola w poszczególnych jego punktach przez liczbę przechodzących tam rurek jednostkowych poprzez powierzchnię 1 cm^2 , ustawioną prostopadle do przebiegu rurek, zawiera się coś niejasnego, gdy przechodzimy od przypadku próżni do przypadku jakiegokolwiek ośrodka materialnego, który w sposób, nie dają-

cy się zaniedbać, różni się pod tym względem od próżni. Równoznaczne z tem pytanie dotyczy może liczby rurek jednostkowych, wychodzących z bieguna o danej masie m — liczba ta winna zależeć od przenikliwości magnetycznej ośrodka. Dla uniknięcia tego rodzaju niejasności wprowadzamy pojęcie *indukcji magnetycznej, jako określonej wielkości* i to w sposób następujący. Przypuśćmy, iż F oznacza natężenie pola w określonym miejscu próżni, gdy dany układ czynników (przewodniki z prądami, magnesy) wytwarza pole magnetyczne; przypuśćmy, że przy dalszem trwaniu tych samych czynników mamy w rozważanym miejscu zamiast próżni ośrodek materialny o przenikliwości magnetycznej μ ; wówczas wartość indukcyjności magnetycznej w tem miejscu, oznaczanej zazwyczaj przez B , określamy jako

$$B = \mu \cdot F \dots \dots \dots (4)$$

Przypuśćmy teraz, iż, mówiąc o rurkach jednostkowych pola, jak to robiliśmy dawniej, uczynimy tę jedną zmianę, iż liczba tych rurek, przypadających w określonym miejscu pola na powierzchnię 1 cm^2 , ustawioną prostopadle do przebiegu rurek, wyznaczać ma nie natężenie pola, ale właśnie indukcję. W takim razie dla przytoczonego przed chwilą przypadku pojedynczego bieguna w dowolnym ośrodku o przenikliwości magnetycznej μ

$$F = \frac{m}{\mu r^2}, \dots \dots \dots (5)$$

indukcja zaś

$$B = \mu F = \frac{m}{r^2}, \dots \dots \dots (6)$$

innemi słowy, wartość indukcyjności magnetycznej określa się jako wielkość, zależną jedynie od wartości masy bieguna i odległości rozważanego punktu od bieguna, natomiast nie zależy od μ . W przypadku szczególnym — próżni ($\mu = 1$) wartość indukcyjności utożsamia się z wartością natężenia pola (wzory 5 i 6 są równoznaczne).

Zatem możemy zachować wyżej przyjęte twierdzenie, że biegun o masie magnetycznej m wysyła zawsze $4\pi m$ rurek jednostkowych, jeno pamiętać należy, iż w ogólnym przypadku gęstość rurek pola wyznacza nie natężenie pola, ale indukcję.

Oczywiście, to samo uzupełnienie trzeba uczynić w stosunku do pola elektrostatycznego, wprowadzając pojęcie *indukcyjności elektrostatycznej* i określając ją jako

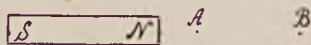
$$E = DF \dots \dots \dots (7)$$

gdzie F oznacza natężenie pola w przypadku próżni, D zaś jest stałą dielektryczną ośrodka, który przy tem samym rozmieszczeniu nabożów elektrycznych wypełnia próżną przedtem przestrzeń.

354. Histereza. Koercja.

Gdy podnosimy ciało z danej wysokości ponad poziomem do wysokości większej, wykonywamy pracę przeciw sile ciężkości. Gdy to samo ciało spada z tej drugiej wysokości do pierwszej, siły pola grawitacyjnego oddają nam dokładnie tę samą ilość pracy, którą wykonaliśmy na podniesienie (p. t. I, ust. 65).

Inaczej niż w polu grawitacyjnym dzieje się w polu magnetycznym, gdy np. kawałek żelaza, umieszczonego w A, oddalamy do B (rys. 905),



Rys. 905.

wykonywając pracę na pokonanie zachodzącego w tym razie przyciągania, następnie zaś dajemy możliwość zbliżania się temu kawałkowi żelaza z B do A, przyczem teraz siły pola wykonywają pracę.

W miarę zbliżania się do magnesu żelazo się magnesuje, przy oddalaniu — rozmagnesowuje, lecz jedno i drugie zachodzi z opóźnieniem, skutkiem czego podczas przechodzenia żelaza przez to samo miejsce przy oddalaniu się od magnesu siła przyciągania się jest większa, niż przy zbliżaniu się. To też w opisywanym zjawisku nigdy nie otrzymujemy całkowitego zwrotu pracy, przez nas wykonanej, część tej pracy zostaje dla nas stracona i przekształca się w żelazie na ciepło, które może być nam zgoła niepotrzebne, a nawet szkodliwe.

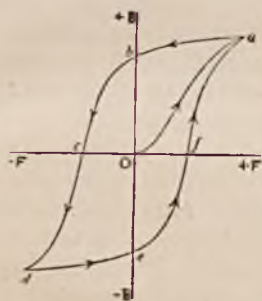
Podobną rzecz mamy, gdy w zwoju drutu umieszczamy rdzeń żelazny i puszczamy przez zwój prąd elektryczny o stopniowo rosnącym natężeniu, poczynając od $i = 0$, następnie zaś, również stopniowo, natężenie to zmniejszamy. Rdzeń ulega stopniowo namagnesowaniu, potem (przy zmniejszaniu natężenia prądu) namagnesowanie słabnie; ale zmiany te nie idą bynajmniej w obie strony jednakowymi drogami. Zachodzi tu ciekawa zależność między pewnymi, wchodzącymi w grę, wielkościami, a mianowicie natężeniem prądu, a indukcją magnetyczną.

Nie będziemy się wdawali w szczegóły, jak tego rodzaju pomiary się dokonywają — z rozważań, dotychczas przytoczonych, rozumiemy, że zarówno natężenie prądu, jak indukcja magnetyczna dają się zmierzyć. Wynik podobnego badania, przedstawiony odrazu wykresnie, wyjaśnia nam rzecz bardzo obrazowo. Na rys. 906a mamy właśnie taki wykres dla pewnej próbki żelaza.

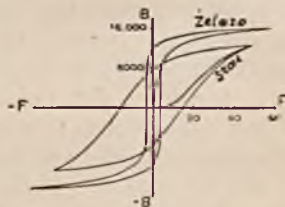
Na osi odciętych widzimy tam odmierzone wartości, natężenia pola magnetycznego, wytworzonego przez prąd, na osi odciętych wartości zaobserwowanej indukcji w danej próbce żelaza. Jak widzimy na wykresie, najpierw, gdy świeżo wyżarzone żelazo podlega działaniu indukcyjnemu, w miarę jak natężenie pola rośnie, indukcja rośnie według krzywej Oa . Gdy po osiągnięciu przez natężenie wytwarzającego pola prądu określonej wartości zaczynamy natężenie prądu, a zatem i natężenie pola zmniejszać, zmiany odwrotne nie podążają już

po tej samej krzywej, lecz po krzywej *ab*; zatem, gdy natężenie wytwarzającego pole prądu spada do zera, indukcja nie równa się zero, lecz wynosi pewną wartość, przedstawioną wykreślnie przez odcinek *Ob* — jest to t. zw. *pozostałość magnetyczna* *). Chcąc pozbawić żelazo całkowicie nabytych własności magnetycznych, należy zmienić kierunek prądu, wytwarzającego pole, i czynić stopniowo natężenie prądu coraz większem. Gdy w ten sposób dochodzimy do wartości natężenia pola, wyobrażonej na rysunku przez odcinek *Oc*, indukcja staje się $= 0$. Ta wartość natężenia prądu, odpowiadająca odcinkowi *Oc*, która pozbawia żelazo nabytych własności magnetycznych, jest miarą t. zw. *koercji* żelaza.

Nie zatrzymujemy się jednak na tem. Powiększamy dalej natężenie zmienionego co do kierunku prądu, aż osiągamy tę samą wartość maksymalną, jaką mieliśmy przedtem ($-i_{max}$) — odpowiada temu na rysunku punkt *d*. Następnie zmniejszamy natężenie prądu, doprowadzając je do zera; potem zmieniamy znowu kierunek prądu na



Rys. 906 a.



Rys. 906 b.

pierwotny i dalej zwiększamy natężenie do uprzedniej maksymalnej wielkości ($+i$). Zmiany indukcji idą teraz według krzywej *defa* — otrzymywana jest znowu wartość, którą reprezentuje punkt *a*, ale punktu tego już się nie osiąga po pierwotnej drodze *Oa*. Cały proces opisany, cały ten *cykl* może być znowu powtórzony — i okazuje się, że przy wielokrotnem powtarzaniu wszystko się odbywa według takiej krzywej zamkniętej, jak *abcdefa*, o ile zmiany natężenia pola utrzymujemy wciąż w tych samych granicach. Rys. 906a służył nam do zapoznania się z istotną treścią omawianego zjawiska; na rys. 906b widzimy podobne krzywe, otrzymane dla żelaza miękkiego i stali — jak widzimy, pozostałość magnetyczna jest w żelazie większa, niż w stali, ale koercja w stali jest znacznie większa, niż w żelazie, to też żelazo znacznie łatwiej traci nabyte własności magnetyczne.

Ołóż całe to zjawisko, polegające na tem, że indukcja magnetyczna nie jest w ciałach ferromagnetycznych wielkością, której określona

*) Nie należy jej utożsamiać z magnetyzmem trwałym, który zachowuje stał.

wartość odpowiada zawsze tej samej wartości natężenia pola, wywołującego tę indukcję; że w zjawisku tem okazuje się pewne ociąganie się, opóźnianie, a przeto strata pracy, która się nam nie zwraca (wszak nie wystarcza w celu rozmagnesowania rdzenia, mieszczącego się w solenoidzie, zmniejszyć natężenie prądu do zera, trzeba jeszcze zmienić kierunek prądu i poddać rdzeń działaniu wręcz odwrotnie skierowanego pola) — całe to zjawisko nosi nazwę *histerezy* *) i posiada wielkie znaczenie nie tylko naukowe, ale i techniczne.

Można wykazać, że miarą traconej przy magnesowaniu i rozmagnesowywaniu pracy jest pole, objęte krzywą *abcdefa*, którą widzimy na rys. 906a — a podobnie i krzywami na rys. 906b. (Gdyby histerezy nie było, zmiany szłyby według krzywej *Oa* (rys. 906a) i tą samą drogą zpowrotem; nie byłoby wcale pola, objętego tą krzywą). Jak powiedzieliśmy, praca ta jest dla nas stracona z punktu widzenia magnetycznego; nie ginie ona jednak zgodnie z prawem zachowania energii, przekształca się tylko na ciepło — magnesowany i rozmagnesowany rdzeń żelazny czy stalowy grzeje się przytem, co jest dla nas zjawiskiem zbędnem, jakkolwiek nieuniknionem (porówn. szkodliwy wpływ tarcia). To też nie pozostaje nam nic innego, jak w poszczególnych przypadkach wpływ histerezy możliwie zmniejszać; podobnie czynimy, usiłując zmniejszyć wpływ tarcia.

Wszakże, podobnie jak tarcie, niepożądane w wielu przypadkach, w innych jest zjawiskiem bardzo pożytecznem, a nawet dla naszego życia niezbędnem, podobnie ma się rzecz z omawianem teraz zjawiskiem. Gdyby stal nie posiadała w wybitnym stopniu własności, zwanej koercją, nie byłibyśmy w stanie robić trwałych magnesów. Gdy w solenoidzie na rys. 904 mieści się rdzeń stalowy, rurki indukcji nie znikają z chwilą przerwania prądu w solenoidzie, ale — powiedzmy — dość uporczywie trwają; właśnie dzięki temu w dalszym ciągu pręt stalowy jest magnesem. W żelazie koercja jest bardzo mała, dlatego też z żelaza nie można robić trwałych magnesów.

355. Okowy i zwory magnetyczne.

Gdy na bieguny elektromagnesu nakładamy, jak na rys. 897, okowy z żelaza miękkiego, wyzyskujemy przenikliwość magnetyczną żelaza, by możliwie w tych bryłach skupić linje i rurki, któreby w nieobecności tych brył rozproszyły się w znacznej mierze w otaczającej przestrzeni. Skierowując te linje do oków, jak to schematycznie zaznaczone jest na rys. 907, osiągnąć można otrzymanie bardzo gęstego przebiegu tych linii w niewielkiej szparze pomiędzy biegunami elektromagnesu, a w ten sposób wielkiego natężenia pola w tem miejscu.

Zwory — pręty żelazne, łączące bieguny magnesu (rys. 908), chwytają w siebie wszystkie wybiegające z biegunów linje i rurki i nie dają

*) Histereza — słowo pochodzenia greckiego — oznacza opóźnianie się.

się im rozpraszać w otaczającej przestrzeni. Przez to zwory zapobiegają zakłóceniom magnetycznym, które „nie zamknięte“ magnesy wywierają dookoła (często takie działania są niepożądane); poza tem chronią one magnesy od rozmagnesowywania się. Zważyć bowiem trzeba, że gdy np. pręt stalowy jest namagnesowany, bieguny jego



Rys. 907.



Rys. 908.

w samym jego wnętrzu wytwarzają pole o kierunku przeciwnym niż bieg linii indukcji — jest to t. zw. pole wsteczne biegunów. Zachodzi to w każdym magniesie trwałym, o ile bieguny jego nie są zamknięte zworą. Gdy natomiast bieguny łączymy zworą (rys. 908), powstają na jej końcach przez indukcję bieguny znaków przeciwnych, co osłabia, albo nawet zgola niweczy owo działanie wsteczne.

356. Działanie pola magnetycznego na rozchodzące się w niem promieniowanie,

Pierwszy M. Faraday, przeczuwając ścisły związek między zjawiskami elektromagnetycznymi a zjawiskiem promieniowania, szukał doświadczalnego potwierdzenia tego związku. Wynikiem jego poszukiwań było odkrycie zjawiska skręcenia płaszczyzny polaryzacji w polu



Rys. 909.

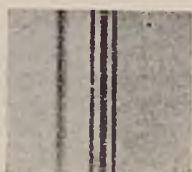
magnetycznym. Rys. 909 wyobraża schemat doświadczenia: A i B są to owinięte drutem rdzenie elektromagnesu, zaopatrzone w kanał*), przez który można przesłać snop światła (najlepiej jednorodnego) w kierunku linii pola. K oznacza użyte w doświadczeniu przez Faraday'a i przez niego sporządzone szkło ołowiowe, N_1 i N_2 — nikole. Gdy prądu w elektromagnesie niema, krzyżujemy nikole; z chwilą utworze-

*) Elektromagnesy typu, przedstawionego na rys. 836, są zawsze zaopatrzone w takie kanały, by można było dokonywać badań optycznych.

nia się pola magnetycznego widzimy rozjaśnianie się pola w analizatorze; światło to jednak można zgasić przez pokręcenie analizatora, czyli mamy tu do czynienia ze skręceniem płaszczyzny polaryzacji.

Zamiast szkła Faraday'owskiego użyć można dwusiarczku węgla, umieszczonego w rurce, zamkniętej z obu końców przez szkiełka płaskie. Zjawisko magnetycznego skręcania płaszczyzny polaryzacji może być obserwowane w całym szeregu substancyj.

Inne zjawisko, niezmiernie doniosłe, zostało zaobserwowane przez współczesnego fizyka holenderskiego, P. Zeemana w roku 1896 *). Gdy źródłem promieniowania jest świecąca para (gaz), mieszcząca się w polu magnetycznym, wówczas pewne linje widma rozszczepiają się na podwójne, tworząc t. zw. *dublety* — w przypadku, gdy promieniowanie badamy w kierunku linii pola magnetycznego, lub też na potrójne, tworząc *tryplety* — w przypadku badania promieniowania, rozcho-



Rys. 910.

dzącego się w kierunku prostopadłym do linii pola magnetycznego. Rys. 910 daje wygląd podobnego trypletu. Promienie dubletów są spolaryzowane kołowo w kierunkach sobie przeciwnych; promienie trypletów są spolaryzowane prostoliniowo (środkowy w płaszczyźnie \perp do linii pola, skrajne \parallel do linii pola). Jak się okazało, bywają przypadki, gdy liczba linii, na które zachodzi rozszczepienie, jest znacznie większa.

Nie wdając się w tłumaczenie podanych tu zjawisk, podkreślamy je dla zwrócenia uwagi raz jeszcze na niewątpliwe istnienie głębokiego związku między dziedzinami zjawisk promieniowania oraz tych, które obejmujemy nazwą elektromagnetycznych. Poza tem dodajemy, że analiza widmowa wykryła zjawisko Zeemana w plamach słonecznych. Pozwoliło to nie tylko stwierdzić istnienie pola magnetycznego na słońcu, ale nawet znaleźć jego natężenie (p. ust. 330, str. 213).

Ćwiczenia i zadania.

619. Uwzględniając podane na str. 305 wartości przenikliwości magnetycznej, znaleźć, jak się zmienia działanie między dwoma danymi biegunami magnetycznymi, mieszczącymi się w danej odległości jeden od drugiego, gdy ośrodkami przedziela-

*) Inicjatorem tych badań był inny fizyk holenderski, H. A. Lorentz, jeden z największych teoretyków współczesnych, który przewidywał istnienie tego zjawiska.

jącami i otaczającymi je staje się zamiast powietrza wodny roztwór nasycony chlorku żelaza?

620. Biegun o masie magnetycznej $m = 50 \frac{\text{gr}^{1/2} \text{cm}^{3/2}}{\text{sek}}$ pomyślany jest w próżni. Ile rurek jednostkowych przecina część, wynosząca 20 cm^2 , powierzchni kulistej, opisanej około bieguna promieniem 6 cm ? Jakie jest natężenie pola w którymkolwiek punkcie tej powierzchni kulistej?

621. Jakie zmiany znajdą w poprzednim zadaniu, gdy pomyślimy wymieniony tam biegun nie w próżni, lecz w ośrodku o przenikliwości magnetycznej:

1) $\mu > 1$, 2) $\mu < 1$?

622. Pary stałowych magnesów w kształcie prętów przechowywane są w pudełkach tak, jak to wskazuje schematycznie rys. 911 — pręty zwrócone są bie-

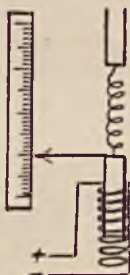


Rys. 911.

gunami w przeciwne strony i z obu końców przystawione są do nich dwa kawałki (A i B) żelaza miękkiego. Wyłumaczyć rację tego rodzaju sposobu przechowywania magnesów?

623. Poddajemy szeregowi jednakowych cykliów magnetycznych (rys. 906b) kawałek żelaza miękkiego i kawałek stali. Które z tych ciał bardziej się przytem grzeje?

624. Zasadniczą częścią ampermetrów i woltmetrów tego typu, co przedstawione na rys. 885, jest rdzeń żelazny, wiszący na sprężynie i wciągany do wnętrza umie-



Rys. 912.

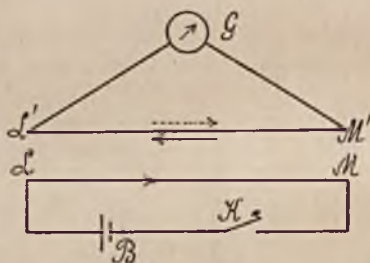
szczonego pod nim zwoju, przez który płynie prąd (rys. 912). Na podstawie rozważań, podanych w ust. 351, wyłumaczyć, dlaczego zachodzi to zjawisko wciągania rdzenia oraz jaka istnieje zależność między ilościową stroną tego zjawiska a natężeniem prądu, przepływającego przez zwoj?

ROZDZIAŁ XI.

ZJAWISKO INDUKCJI ELEKTROMAGNETYCZNEJ.

357. Powstawanie prądów indukcyjnych.

Poznaliśmy już dawniej zjawisko indukcji elektrostatycznej (ust. 279) oraz indukcji magnetycznej (ust. 319): przewodnik, znajdujący się w pobliżu innego przewodnika, który jest naelektryzowany, elektryzuje się indukcyjnie; żelazo, mieszczące się w pobliżu magnesu, magnetyzuje się indukcyjnie. Nie dziw, że wielu uczonym przychodziło na myśl pytanie, czy też w przewodniku, znajdującym się w pobliżu in-



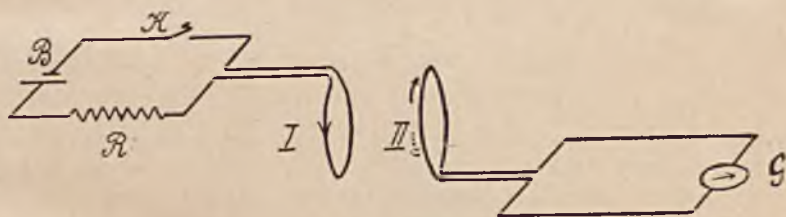
Rys. 913.

nego przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny, nie powstaje również prąd elektryczny? Między innymi myślał nad tem i M. Faraday, czyniąc różne doświadczenia, i jemu to właśnie udało się wykryć warunki powstawania t. zw. *prądów indukcyjnych*, a tem dokonać odkrycia, które samo wystarczyłoby do unieśmiertnienia jego imienia, tak doniosłe bowiem pociągnęło następstwa zarówno w nauce o elektryczności, jak jej zastosowaniach. Jeżeli dziś mówimy, iż żyjemy w wieku elektryczności, zawdzięczamy to właśnie rzeczonemu odkryciu genialnego samouka.

Wykonajmy tak, jak to czynił Faraday, doświadczenie według następującego schematu (rys. 913). Mamy rozpięty drut LM , przez który przy pomocy łącznika K możemy puścić prąd z ogniwa lub baterji ogniw B , względnie ten prąd przerwać. W pobliżu drutu LM i równoległe do niego rozpięty jest inny drut $L'M'$, którego końce są połączo-

ne z galwanometrem. Przekonywamy się, że wtedy, gdy w drucie LM płynie prąd elektryczny, galwanometr G nie wykazuje najmniejszych śladów prądu, jakkolwiek wielkiego natężenia prąd mamy w LM i jakkolwiek blisko $L' M'$ leży względem LM . Natomiast w chwili zamykania prądu w LM zarówno, jak w chwili przerywania zjawiają się w $L' M'$ krótkotrwałe prądy, przytem w chwili zamykania powstaje w $L' M'$ prąd o kierunku przeciwnym, niż w LM (zaznaczone to jest strzałką ciągłą na rysunku), w chwili przerywania — prąd o kierunku zgodnym (strzałka kreskowana na rys.). Te właśnie krótkotrwałe prądy, zjawiające się w $L' M'$ w czasie ustalania się, względnie znikania prądu w LM , noszą nazwę *prądów indukcyjnych*, a całe zjawisko wogóle — zjawiska *indukcji elektromagnetycznej*.

Wykonane doświadczenie nasuwa nam myśl, że powstawanie w przewodniku prądu indukcyjnego wiąże się ze *zmianami pola magnetycznego*, w którym ten przewodnik pozostaje. Powtarzamy, że gdy w przewodniku LM trwa prąd dowolnego natężenia, a zatem gdy przewodnik $L' M'$ pozostaje w stałym polu magnetycznym, istnienia w nim prądu indukcyjnego nie stwierdzamy; stwierdzamy natomiast, gdy prąd w LM zamykamy lub przerywamy, t. j. gdy pole magnetyczne się *two-*



Rys. 914 a.

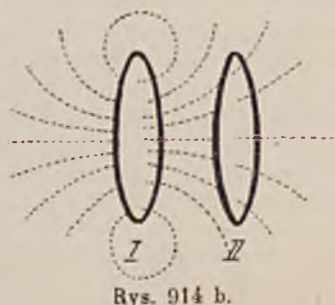
rzy lub *znika*. Możemy w obwodzie prądu, płynącego przez przewodnik LM , umieścić opornicę i, zamknąwszy prąd, zmieniać w LM natężenie prądu. Okazuje się, że gdy natężenie prądu wzrasta, w $L' M'$ powstaje prąd indukcyjny o kierunku przeciwnym niż w LM , gdy się to natężenie zmniejsza — o kierunku zgodnym. A więc zmianie pola magnetycznego, w którym pozostaje $L' M'$, towarzyszy powstanie prądu indukcyjnego — wzrost natężenia odpowiada tu jakościowo zamknięciu prądu w poprzednim doświadczeniu, zmniejszenie — przerywaniu.

W celu głębszego wyśledzenia, o jakie tu właściwie zmiany pola magnetycznego chodzi, wykonajmy inne jeszcze doświadczenie, którego schemat mamy na rysunku 914a.

Mamy tu dwa pierścienie I i II, z których w pierwszym (I) zamykać możemy, względnie przerywać, prąd z ogniwa (baterji) B lub też przy pomocy opornicy R zwiększać lub zmniejszać natężenie prądu, drugi zaś (II) tworzy z galwanometrem obwód, gdzie niema żadnych znanych nam dotychczas sił elektromotorycznych, któreby mogły warunkować prąd elektryczny. Stwierdzamy, że podczas gdy w pierście-

niu I mamy prąd określonego natężenia, w pierścieniu II, bez względu na wartość tamtego natężenia, żadnego śladu prądu niema. Gdy jednak w pierścieniu I prąd zamykamy lub natężenie jego zwiększamy, w trakcie tej zmiany w pierścieniu II powstaje prąd indukcyjny o kierunku przeciwnym, niż w I (zaznacza to na rys. strzałka ciągła), gdy zaś prąd w I przerywamy lub natężenie jego zmniejszamy, w pierścieniu II kierunek prądu indukcyjnego zgadza się z kierunkiem prądu w pierścieniu I (strzałka kreskowana na rys.).

Nietrudno jest wykonać doświadczenie tak, że podczas gdy w pierścieniu I płynie określonego natężenia prąd, zbliżamy ten pierścień do pierścienia II (lub odwrotnie) albo oddalamy — podczas takiego zbli-



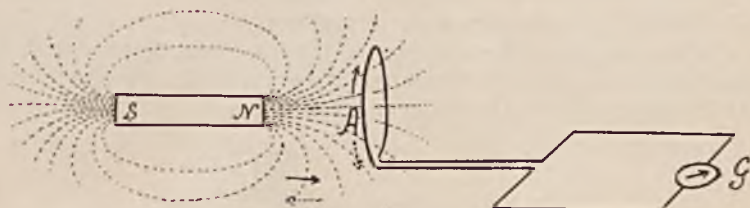
żania lub oddalania powstaje również w pierścieniu II prąd indukcyjny, przyczem przy zbliżaniu prąd o kierunku przeciwnym, niż w I (jak poprzednio przy zamykaniu prądu lub zwiększaniu natężenia), przy oddalaniu — o kierunku zgodnym (jak przy przerywaniu prądu lub zmniejszaniu jego natężenia).

Jak wiemy, pierścień I, gdy płynie w nim prąd elektryczny, jest równoważny magnesowi — pole, objęte konturem prądu, jest źródłem linii i rurek pola magnetycznego, a jednocześnie miejscem zakończeń tych linii i rurek, tworzących zamknięte krzywe. Określonej wartości natężenia prądu w I odpowiada określona liczba rurek jednostkowych, przechodzących przez pole, ograniczone konturem pierścienia II, gdy pierścień ten zajmuje dane względem pierścienia I położenie (rys. 914b) *). Gdy jednak prąd w I dopiero się tworzy, lub natężenie jego wzrasta albo gdy pierścień I zbliża się do II bez zmiany w I natężenia prądu, liczba rurek jednostkowych, ujętych konturem pierścienia II wzrasta. Przeciwnie, gdy prąd w I się przerywa, albo natężenie jego się zmniejsza, albo wreszcie pierścień I oddala się od II (przez co natężenie prądu w I nie ulega zmianie), liczba tych rurek jednostkowych, objętych konturem pierścienia II, zmniejsza się. Pierwszemu z tych przypadków (zwiększaniu się wskazanej tu liczby rurek) odpowiada tworzenie się prądu indukcyjnego o kierunku przeciwnym, niż w pier-

*) Opuszczone są tu dla uproszczenia pozostałe części rysunku.

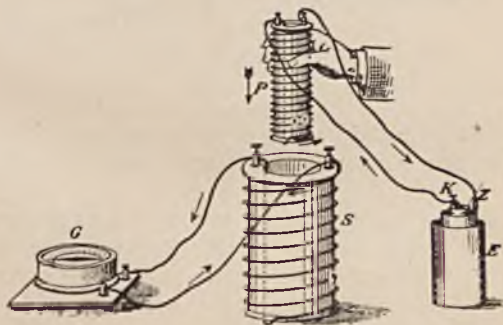
ścieniu I; drugiemu — tworzenie się prądu indukcyjnego o kierunku, zgodnym z tamtym.

Nasuwa się więc odrazu myśl, że zjawisko prądu indukcyjnego może być otrzymane przy użyciu magnesu stałego zamiast przewodnika I z prądem. Istotnie, włączmy w zamknięty obwód galwanometr, jak na rys. 915, i umieśmy przed pierścieniem *A*, tworzącym część tego



Rys. 915.

obwodu, magnes *NS*. Dopóki magnes pozostaje w spoczynku, linie i rurki pola rozmieszczone są względem obwodu w określony sposób i przez pole, objęte konturem przewodnika *A*, przechodzi określona liczba rurek jednostkowych. Gdy jednak magnes zbliżymy lub oddalimy od obwodu *), to podczas zbliżania liczba rurek jednostkowych, objętych konturem obwodu *A*, będzie wzrastała, przy oddalaniu natomiast — będzie się zmniejszała. Oczekiwać należy powstawania w tych przypad-



Rys. 916.

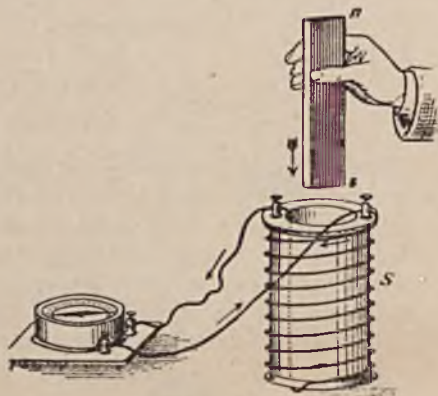
kach prądów indukcyjnych w obwodzie. Galwanometr wykazuje istotnie tworzenie się tych prądów, przyczem zgodnie z przewidywaniem kierunki tych prądów, powstających podczas zbliżania i oddalania magnesu, są wręcz przeciwne.

Zamiast pojedynczych skrętów drutu, jak w schematach na rys. 914 i 915, użyć można zwojów o większej liczbie skrętów. Na rys. 916 widzimy dwie cewki utworzone przez nawinięcie drutu na wydrążone walce

*) Jest rzeczą obojętną, czy poruszać będziemy magnes, czy przewodnik *A*; chodzi o ich względne położenie.



drewniane; jedna z tych cewek ma średnicę taką, że wchodzić może do wnętrza cewki większej. Przez drut cewki P puszczaemy prąd z ogniw E ; końce drutu, nawiniętego na cewkę S , łączymy z galwanometrem G . Gdy cewkę P zbliżamy do cewki S lub oddalamy, względnie wsuwamy lub wysuwamy, w zwojach cewki S powstają prądy indukcyjne. Można też, trzymając cewkę P w określonym położeniu względem S , zamykać prąd w P lub przerywać przy pomocy łącznika, nie oznaczonego na rysunku; i wtedy powstają prądy indukcyjne w cewce S , przy czem zamykanie prądu odpowiada zbliżaniu P do S , przerywanie — oddalaniu. Na rysunku wyobrażony jest przypadek zbliżania (wsuwania) cewki P do S ; przy takim kierunku prądu w P , jak wskazuje strzałka



Rys. 917.

ka, powstaje w S prąd indukcyjny, również wskazany strzałką — prąd indukcyjny ma wtedy kierunek przeciwny względem prądu wzbudzającego.

Na rysunku 917 widzimy tę samą cewkę S z włączonym do niej galwanometrem; prąd indukcyjny wszakże otrzymujemy tu przez zbliżanie lub oddalanie (wsuwanie lub wysuwanie) magnesu. Ruchowi magnesu, wskazanemu strzałką, towarzyszy powstawanie prądu indukcyjnego, którego kierunek również wskazany jest strzałką.

Pole magnetyczne solenoidu, w którym płynie prąd określonego natężenia, staje się, jak wiemy, potężniejsze, gdy solenoid zawiera zamiast powietrza, rdzeń żelazny. To też, gdy do cewki P (rysunek 916) wstawimy rdzeń z żelaza miękkiego i powtórzymy opisane doświadczenie, galwanometr G wykaże znacznie większe wychylenie — otrzymamy prądy indukcyjne o znacznie większym natężeniu.

Wykonywając te doświadczenia, dostrzegamy odrazu jedną ważną okoliczność: oto, im prędzej zachodzą ruchy przesuwanych cewek czy magnesów, im większa jest prędkość zachodzącej zmiany w liczbie rurek jednostkowych, objętych konturem przewodnika, w którym powstaje prąd indukcyjny, tem większe otrzymuje się — przy innych

warunkach pozostałych — wychylenie galwanometru, tem większego natężenia tworzy się prąd indukcyjny, a więc tem większa zostaje wzbudzona w obwodzie z galwanometrem siła elektromotoryczna.

358. Powstawanie prądów indukcyjnych (ciąg dalszy).

Wykonajmy jeszcze jedno doświadczenie, w którym również otrzymamy prąd indukcyjny, a które układem swym przypomina doświadczenie, wyobrażone na rys. 842 (str. 233). Mamy tu elektromagnes (rys. 918), między którego biegunami rozpięty jest luźno, przy pomocy dwu zacisków Holta, drut; dwa inne druty prowadzą od zacisków do



Rys. 918.

galwanometru, tak że mamy zamknięty obwód z drutu, zawierający tylko galwanometr. Elektromagnes zasilany jest ze źródła, nie wyobrażonego na rysunku, widzimy tylko końce drutów, doprowadzających prąd do elektromagnesu.

Otóż, gdy drut, mieszczący się między biegunami czynnego elektromagnesu, prędkim ruchem unosimy nieco w górę lub popychamy w dół, t. j. gdy drut ten wykonywa taki ruch, iż przecina przytem linje pola, to galwanometr, który przy nieruchomym drucie żadnego prądu nie wykazywał, daje wyraźne wychylenie, przytem podczas ruchu drutu do góry wychylenie to zachodzi w jedną stronę, podczas ruchu na dół — w przeciwną. Otrzymujemy więc w obwodzie z galwanometrem prądy indukcyjne.

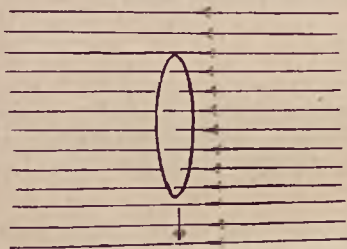
Łatwo spostrzec, że i w tym przypadku obwód z galwanometrem podczas wskazanych ruchów drutu (a tylko przy ruchach drutu prąd indukcyjny powstaje, nie podczas spoczynku!) zagarnia swym konturem więcej linii oraz rurek pola, to znów ich pewną liczbę traci. Niemniej zwróćmy uwagę, iż przytem zachodzi właśnie to, co podkreślaliśmy, a mianowicie przecinanie się przewodnika z linjami pola *).

Wróćmy teraz do doświadczeń, opisanych w ust. poprzednim, i zastrzymajmy się np. na doświadczeniu, przedstawionem na rys. 915. Podczas zbliżania się obwodu, w którym powstaje prąd indukcyjny, do magnesu, kontur obwodu zagarnia coraz więcej linii i rurek pola. Ale

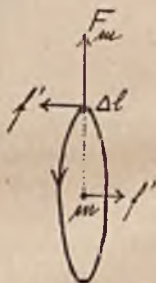
*) Można zmienić doświadczenie tak, że drut będzie pozostawał nieruchomy, elektromagnes zaś będzie podnoszony lub opuszczany w dół — skutek pozostanie ten sam.

wszak te nowe linje i rurki, które przedtem były poza obwodem, a teraz weń wchodzą, podczas tego wchodzenia *przecinają się* z obwodem. Tak samo przecinanie się linii pola z drutem zachodzi przy oddalaniu wzajemnym magnesu i obwodu — tym razem linje, objęte konturem, wychodzą poza kontur.

Zatem powstawaniu prądu indukcyjnego zawsze towarzyszy zjawisko przecinania się linii pola magnetycznego i przewodnika, w którym powstaje ów prąd indukcyjny. Twierdzenia jednak tego nie można odwrócić i nie można powiedzieć, iż zawsze, gdy takie przecinanie się zachodzi, powstaje prąd indukcyjny. Tak np., gdy w polu jednorodnym porusza się zamknięty obwód, którego płaszczyzna pozostaje przez cały czas pod tym samym kątem względem linii pola, np. prostopadła do linii pola (rys. 919, kierunek ruchu obwodu wskazany jest podwójną strzałką), przecinanie się to zachodzi, ale w liczbie rurek jednostkowych, objętych konturem obwodu, niema przytem żadnej zmiany; to też w tym razie, jak stwierdza doświadczenie, prąd indukcyjny w przesuwanym przez pole obwodzie nie powstaje.



Rys. 919.



Rys. 920.

Mówiąc o tworzeniu się prądów indukcyjnych, nie możemy poprzestać na stwierdzeniu samego faktu, ale musimy także szukać podstaw do rozważania strony ilościowej tego zjawiska. Przypomnijmy więc sobie w tym celu, jakim siłom podlega przewodnik z prądem w polu magnetycznym, względnie biegun magnetyczny w polu, wytworzonym przez prąd. Rzecz tę omawialiśmy w ust. 335, 337, 338; stamtąd zatem zaczerpnijemy wątku do dalszych rozważań.

W środku pierścienia (rys. 920) o promieniu r , gdy przez pierścień płynie prąd elektryczny o natężeniu i , mamy natężenie pola (wzór 2 na str. 247, gdzie mowa o busoli stycznych).

$$F = 2\pi \frac{i}{r} \dots \dots \dots (1)$$

Przypuśćmy, iż w tym punkcie mieści się biegun magnetyczny o masie — m ; na biegun ten działa tedy siła

$$f = m \cdot F = 2\pi m \cdot \frac{i}{r} \dots \dots \dots (2)$$

Siłę tę, jak wyjaśnialiśmy, możemy uważać za wypadkową działań wszystkich elementów, na które podzielić można cały obwód kołowy z prądem. Przypuśćmy, że jednym z tych elementów jest bardzo mały odcinek Δl tego obwodu. Część całej siły f , uwarunkowana działaniem tego odcinka, jest, oczywiście, tyle razy mniejsza od f , ile razy Δl jest mniejsze od całego obwodu $2\pi r$, t. j. rozważany element prądu działa na biegun $+ m$ siłą

$$f' = \frac{\Delta l}{2\pi r} \cdot 2\pi m \frac{i}{r} = \frac{\Delta l \cdot m \cdot i}{r^2} \dots \dots \dots (3)$$

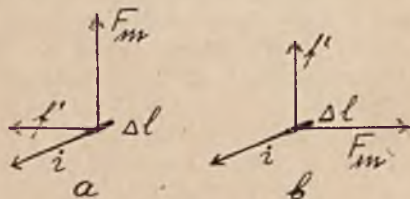
Każdemu działaniu towarzyszy w myśl trzeciej zasady Newtona równne w stronę wręcz przeciwną skierowane przeciwdziałanie. Skoro na biegun $+ m$ działa odcinek Δl przewodnika, w którym płynie prąd i , siłą f' , taką samą siłą, lecz w stronę wręcz przeciwnie skierowaną, działa biegun $+ m$ na element Δl , t. j. element Δl podlega działaniu siły

$$\frac{\Delta l \cdot i \cdot m}{r^2} \dots \dots \dots (4)$$

Jednak w tym wzorze $\frac{m}{r^2}$ oznacza natężenie F_m pola magnetycznego, wytworzonego przez biegun $+ m$ w miejscu, gdzie się mieści element Δl . Zatem wartość siły, działającej na odcinek Δl , wyrazić możemy inaczej, a mianowicie.

$$\Delta l \cdot i F_m \dots \dots \dots (5)$$

Zauważmy, że jak w przypadku, rozpatrywanym na str. 235 (rys. 843), mamy kierunek prądu w odcinku Δl prostopadły do kierunku



Rys. 921.

natężenia pola magnetycznego; działanie zaś siły na wymieniony odcinek skierowane jest prostopadłe do obu tamtych kierunków, t. j. kierunki te ustosunkowane są tak, jak kierunki osi współrzędnych w układzie prostokątnym (rys. 921a).

Łatwo dostrzec, że rysunki 843 i 921a są identyczne; dla ułatwienia tego spostrzeżenia obróćmy figurę 921a dokoła prostej, według której płynie prąd, o 90° w kierunku ruchu wskazówek zegara, a otrzymamy figurę 921b, która w zupełności jest taka, jak na rys. 843. Tam tylko mieliśmy skierowaną według osi y -ów prędkość v naboju $+e$, tutaj kierunek prądu — ale wszak to jest jednoznaczne, ruch bowiem naboju tworzy prąd.

Jednakowoż, wracając raz jeszcze do omówionej wtedy rzeczy, posuwamy się tutaj naprzód przez osiągnięcie wyrażenia, które pozwala nam zdać sprawę ilościowo z rozważonego teraz zjawiska. Możemy mianowicie otrzymany wynik sformułować w następujący sposób:

Jeżeli prostoliniowy odcinek Δl drutu z płynącym przezzeń prądem i w kierunku dodatnim na osi y -ów, mieści się w polu magnetycznym o natężeniu F_m , skierowanym w dodatnią stronę osi x -ów, podlega on działaniu siły elektrodynamicznej, skierowanej według dodatnich z -ów i mającej wartość

$$\Delta l \cdot i \cdot F_m \dots \dots \dots (6)$$

Jest to ważny wynik, z którego niebawem skorzystamy. Wszak, gdy w posuwającym się poprzez pole magnetyczne przewodniku powstaje prąd indukcyjny, na elementy tego przewodnika, a zatem i na jego całość, gdy w nim ten prąd płynie, działają siły elektrodynamiczne i działanie to musi mieć ścisły związek z tworzeniem się prądu indukcyjnego. Że tak jest istotnie, zaraz zobaczymy.

359. Reguła Lenza.

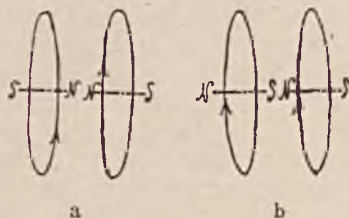
Rozpatrując wyżej przytoczone przykłady powstawania prądów indukcyjnych, możemy dostrzec, że zjawisko to zawsze jest zgodne z t. zw. *regułą Lenza* *), którą sformułować można w sposób następujący: *gdy zachodzi pewna zmiana, pociągająca za sobą powstanie prądu indukcyjnego, kierunek powstającego prądu jest zawsze taki, że przeciwdziała zachodzącej zmianie.*

Rozpatrzmy np. przypadek, wyobrazony na rys. 914. W pierścieniu II powstaje prąd indukcyjny o kierunku przeciwnym, niż w pierścieniu I, gdy zbliżamy te pierścienie jeden do drugiego; ale wszak pierścienie I i II, gdy w nich płyną takie prądy, równoważne są magnesom, których bieguny zwrócone są tak, jak to przedstawia rysunek 922a **) — mamy więc tu, jakgdyby dwa magnesy, zwrócone do siebie jednoimiennymi biegunami, które się odpychają; powstanie zatem wska-

*) H. Lenz podał tę regułę w roku 1834.

**) Opuszczone są tu dla uproszczenia ogniwa.

zanego prądu w pierścieniu II *przeciwdziała* zbliżaniu się pierścieni, które ten prąd indukcyjny wywołuje. Gdy oddalamy od siebie te same pierścienie, w II powstaje prąd o kierunku zgodnym z prądem w I — lecz



Rys. 922.

teraz te pierścienie są równoważne (rys. 922b) dwu magnesom zwróconym do siebie różnoimiennymi biegunami, które się przyciągają — powstanie więc prądu indukcyjnego tego kierunku *przeciwdziała* oddalaniu pierścienia I od II.

Zamknięcie prądu równoznaczne jest „zbliżaniu“. W doświadczeniu, wyobrażonem na rys. 913, przy zamknięciu prądu w LM powstaje w $L'M'$ prąd indukcyjny o kierunku przeciwnym. Widzieliśmy wyżej (ust. 333), że między przewodnikami takimi, w których płyną prądy o kierunkach przeciwnych, zachodzi odpychanie się — w $L'M'$ powstaje zatem prąd o takim kierunku, że *przeciwdziała* on umieszczeniu się obok niego przewodnika LM z tworzącym się w nim prądem. W ten sam sposób zgodne jest z regułą Lenza powstanie w $L'M'$ prądu o kierunku zgodnym z płynącym w LM , gdy w tym ostatnim przewodniku prąd przerywamy.

Weźmy wreszcie przypadek wzbudzania prądu w przewodniku przez magnes jak w doświadczeniu, przedstawionem na rys. 915. Gdy magnes zbliżamy do obwodu A , powstaje w nim prąd, o kierunku wskazanym strzałką ciągłą — wtedy obwód równoważny jest magnesowi, zwróconemu do bieguna N magnesu biegunem jednoimiennym, a więc zachodzi *przeciwdziałanie* zbliżaniu. Przeciwnie, gdy magnes oddalamy od A , powstaje w tym przewodniku prąd o kierunku, wskazanym strzałką kropkowaną, — wtedy obwód z prądem równoważny jest magnesowi, zwróconemu do bieguna N naszego magnesu biegunem różnoimiennym, co *przeciwdziała* oddalaniu. Oczywiście, kierunki prądów indukcyjnych w A zmienilyby się na odwrotne przy zbliżaniu i oddalaniu magnesu, gdyby magnes zwrócony był do A nie biegunem N , lecz biegunem S . Proponujemy to rozważyć samemu czytelnikowi.

Reguła Lenza daje się uzasadnić. Skoro powstaje prąd elektryczny, a zatem tworzy się swoisty rodzaj energii, musi się to stać kosztem określonej pracy, inaczej bowiem zachodziłaby sprzeczność z zasadą zachowania energii. To też właśnie powstawanie prądów indukcyjnych w ten sposób, iż przytem zachodzi *przeciwdziałanie* czynności, która prądy te wywołuje, jest równoznaczne temu, że pokonanie tego

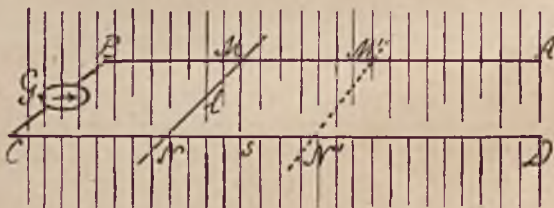
przeciwdziałania stanowi pracę, której kosztem tworzy się prąd indukcyjny.

Zjawisko całe przypomina nam objawy bezwładności w dziedzinie ruchu. Ciało spoczywające stawia opór bezwładny, gdy chcemy je wprowadzić w ruch; musimy użyć pewnej siły, aby mu ten ruch nadać — wykonywamy przytem pracę, której kosztem tworzy się energia kinetyczna poruszającego się ciała. Podobnie, gdy poruszające się ciało usiłujemy zatrzymać, albo próbujemy zmienić kierunek jego ruchu, objawy bezwładności są wyrazem zachowania energii kinetycznej ciała. Gdziekolwiekbyśmy tedy dostrzegli objawy bezwładności, t. j. okazywany sprzeciw tym czy innym zmianom, zawsze to daje się wytłumaczyć energetycznie — skoro zjawia się przytem określona postać energii, musi się znaleźć równoważnik tej energii, musi być wykonana praca, która się w tę energję przestacza.

360. Siła elektromotoryczna prądu indukcyjnego.

Jeżeli w pierścieniu, jak na rys. 914 lub 915, powstaje prąd indukcyjny, świadczy to, iż tworzy się wtedy potrzebna do tego siła elektromotoryczna. Zastanówmy się, co wyznacza wartość tej siły.

Przypuśćmy, że mamy obwód z drutu, ustawiony prostopadle do linii pola jednorodnego. Możemy np. ustawić ten obwód poziomo; prostopadle do niego będą szły linje składowej pionowej pola magnetycznego ziemskiego. Zrobimy tak, jak to nam wyjaśnia rys. 923, a więc:



Rys. 923.

ustawiamy poziomo prostokątną ramę metalową $ABCD$, na niej zaś osadzamy pręt metalowy MN prostopadle do boków AB i DC , przytem tak, by pręt ten dawał się przesuwać po ramie, a przez to oddalać od boku CB ramy lub też się zbliżać do tego boku. Obwodem rozważanym będzie tu zatem prostokąt $MBCN$.

Przypuśćmy, że przesuujemy pręt MN z pewną stałą prędkością v z położenia jego pierwotnego do położenia $M'N'$; liczba jednostkowych rurek pola, objętych konturem obwodu, wzrasta przytem i w obwodzie powstaje prąd indukcyjny, którego istnienie stwierdza włączony do obwodu (np. między B i C) galwanometr. Zgodnie z regułą Lenza kierunek prądu indukcyjnego musi być taki, aby tem został wywołany sprze-

civ dokonywanemu ruchowi; przesuwanie zatem pręta MN do położenia $M'N'$ wiąże się z wykonaniem pewnej pracy, której wartość znajdujemy, mając wartość siły, którą przytem trzeba pokonać oraz długość drogi ($MM' = s$), na której praca ta winna być dokonana.

Wartość siły f znajdziemy, opierając się na końcowych rozważaniach ust. 358; kierunek jej winien być przeciwnym kierunkowi ruchu pręta MN czyli jest ona w danym razie skierowana w stronę BC ; ze schematu na rys. 921 wynika zatem, że kierunek prądu indukcyjnego w pręcie MN idzie od N do M . Oznaczając składową pionową magnetyzmu ziemskiego przez Z , napiszemy według wzoru (5) na str. 323.

$$f = l \cdot i \cdot Z \quad , \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

gdzie przez l oznaczamy długość MN ruchomego boku rozważanego obwodu (wszystkie elementy tego odcinka drutu ułożone są według jednej prostej, odrązu przeto we wzorze (1) piszemy l zamiast sumy $\Delta_1 l + \Delta_2 l + \dots$), zaś i natężenie (w jednostkach elektromagnetycznych) prądu indukcyjnego.

Praca pokonywania siły f na drodze $s (= MM')$ równa się

$$Q = f \cdot s = l \cdot s \cdot i \cdot Z \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Energja powstającego tu prądu zmienia się na ciepło Joule'a w obwodzie. Pracę wykonaną w czasie t , równoważną temu ciepłu wyrazić możemy, o ile wzbudzoną w obwodzie siłę elektromotoryczną oznaczymy przez E , opór zaś obwodu przez r , w sposób następujący: (wzór 15 str. 281).

$$Q = E i t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Mając dwa wyrażenia (2) i (3) na tę samą wartość pracy, napisać możemy

$$E \cdot i \cdot t = l \cdot s \cdot i \cdot Z \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Skąd

$$E = \frac{l s Z}{t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

W (5) iloczyn $s \cdot l$ oznacza pole $MM'N'N$, o które się powiększa początkowa wartość pola $BMNC$ obwodu. Liczba rurek jednostkowych, przechodzących przez 1 cm^2 , zgodnie z umową (p. ust. 287 i 323), wyraża się liczbą Z . Zatem iloczyn $l \cdot s \cdot Z$ oznacza liczbę rurek jednostkowych, przechodzących przez pole $MM'N'N$, t. j. przyrost rurek jednostkowych, przecinających kontur obwodu, podczas gdy zmienia się on z $BMNC$ na $BM'N'C$. Oznaczmy liczbę rurek jednostkowych, przecinających początkowo obwód $BMNC$ przez N , liczbę zaś tych rurek, objętych kon-

turem $BM'N'C$ przez N' ; przyrost wyraża się różnicą $N' - N$, a na wartość E otrzymujemy

$$E = \frac{N' - N}{t} \dots \dots \dots (6)$$

Stosunek przyrostu liczby rurek, objętych konturem, do czasu, w którym to zachodzi, stanowi *prędkość*, z którą ta zmiana zachodzi. Jak widzimy, siła elektromotoryczna, wzbudzona w obwodzie, mierzy się prędkością, z jaką się zmienia liczba objętych przez obwód rurek pola. Jest to zgodne z tem, cośmy już podkreślili w końcu ust. 357; poza tem jednak poznamy tu jeszcze ilościową stronę zjawiska indukcji prądu.

Dodajmy odrazu, że, gdyby kontur rozważanego obwodu obejmował pewną substancję, której przenikliwość magnetyczna nie byłaby $= 1$, rozumowania nasze i wynikające z nich wnioski zostałyby te same, z tą różnicą, iż przez N i N' rozumielibyśmy wtedy rurki indukcji, o których była mowa w ust. 353.

Dla orjentacji spróbujmy wyznaczyć wartość siły elektromotorycznej w rozważanym na rys. 923 przykładzie, zakładając określone dane liczbowe. Przypuśćmy, iż $l = 10$ cm, $s = 20$ cm, $Z = 0,4$ gausa, czas zaś t , w którym dokonywa się przesunięcie prętą MN , jest $= 0,01$ sek. Otrzymujemy tedy siłę elektromotoryczną w jednostkach elektromagnetycznych.

$$E = \frac{200 \text{ cm}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{ sek}}}{0,01 \text{ sek}} = 8000 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2}$$

albo, zważywszy, że wolt $= 10^8 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2}$,

$$E = \frac{8 \cdot 10^3}{10^8} \text{ woltów} = \frac{8}{10^5} \text{ woltów} = 0,00008 \text{ woltów.}$$

Jakkolwiek siła elektromotoryczna otrzymuje się w tym razie mała, mamy jednak wszelką możność sprawdzić doświadczalnie wynik rachunku. Przypuśćmy np., że opór obwodu wynosi 1,5 omów. Wówczas, zgodnie z prawem Ohma, natężenie prądu indukcyjnego

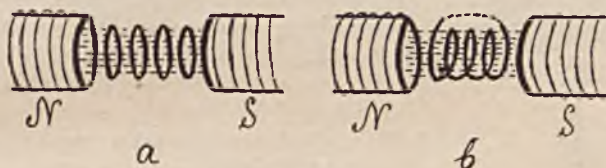
$$i = \frac{0,00008 \text{ woltów}}{1,5 \text{ omów}} = 0,00005 \text{ amperów.}$$

Jest to natężenie prądu, które wykazać może włączony do obwodu

czyły galvanometr i tem dostarczyć dowodu słuszności naszego rozumowania.

Doświadczenia dokonywamy umyślnie w takiej formie, by w jak najprostszy sposób dojść do posiadania zasadniczego wzoru na wartość wzbudzonej siły elektromotorycznej. Po ustaleniu tego wzoru możemy go stosować we wszelkich innych przypadkach, gdy zjawisko daje się łatwiej otrzymać i wchodzą w grę większe wartości zarówno natężenia prądu indukcyjnego, jak siły elektromotorycznej.

W przypadku, gdy prąd indukcyjny powstaje w solenoidzie, o wartości siły elektromotorycznej wnosić możemy, co potwierdza doświadczenie, drogą następującego rozumowania. Przypuśćmy, iż umieszczamy między biegunami elektromagnesu, gdy jest nieczynny, szereg pierścieni tak, by płaszczyzny ich przypadały prostopadle do kierunku linii



Rys. 924.

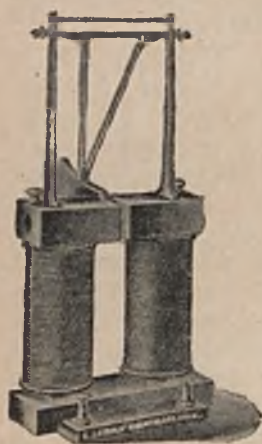
poła, powstających w chwili puszczenia prądu przez zwoje elektromagnesu (rys. 924a). W momencie zamknięcia prądu w elektromagnesie we wszystkich pierścieniach powstają prądy indukcyjne, czyli powstają we wszystkich siły elektromotoryczne. Przypuśćmy teraz, iż zamiast takich pojedynczych pierścieni mamy między biegunami elektromagnesu solenoid, a zatem, jakgdyby te same pierścienie tylko złączone ze sobą w szereg (rys. 924b). Możemy oczekiwać i to właśnie doświadczenie potwierdza, że siły elektromotoryczne, powstające w oddzielnych skrętach, sumują się tutaj, podobnie jak się sumują siły elektromotoryczne złączonych w szereg ogniw — siła elektromotoryczna, powstająca w takim solenoidzie równa się sumie sił elektromotorycznych, powstających w poszczególnych skrętach; im więcej skrętów będzie posiadał dany solenoid, tem większa będzie przy pozostałych warunkach niezmiennych (tych samych wymiarów skręty, cały solenoid tej samej długości i tak samo umieszczony w polu magnetycznym etc.) tworząca się w nim siła elektromotoryczna indukcji.

Ilościowa strona zjawiska indukcji zależeć musi, jak to wynika z rozważań rozdziału poprzedniego, od przenikliwości magnetycznej ośrodka, w którym to zjawisko zachodzi. Działanie indukcyjne w solenoidzie jest znacznie większe, gdy solenoid zawiera rdzeń żelazny, aniżeli wtedy, gdy obejmuje, że się tak wyrazimy, powietrze. Wykazać to można z łatwością, jak już o tem mówiliśmy, przy pomocy przyrządu, wyobrażonego na rys. 916, wstawiając do zwoju, przy którego pomocy

wytwarzamy prądy indukcyjne, pręt żelazny. Otóż w tym przypadku w chwili powstania pola magnetycznego, wobec znacznie większej przenikliwości magnetycznej żelaza, wytwarza się w przestrzeni objętej przez skręty solenoidu, znacznie większa liczba linii i rurek indukcji, aniżeli w przypadku powietrza. Zgodnie z regułą, wyrażoną wzorem (6), gdzie przez N rozumiemy właśnie liczbę tych rurek indukcji, powinniśmy w tym przypadku otrzymać znacznie większą wartość wzbudzonej siły elekt.omotorycznej, wynik doświadczenia zatem znajduje całkowite uzasadnienie.

361. Prądy Foucaulta.

Prądy indukcyjne powstawać mogą nie tylko w przewodnikach, mających postać drutów i tworzących obwody zamknięte, ale i w większych bryłach metali. Nie wdając się w bliższy rozbiór tego, jak w takich bryłach prądy indukcyjne przebiegają, poprzestaniemy na stwierdzeniu



Rys. 925.

pewnych faktów i zgodności ich z regułą Lenza. Oto na rys. 925 widzimy elektromagnes, między którego okowami wahać się może wahadło, zakończone u dołu tarczą miedzianą. Gdy elektromagnes jest nieczynny, wychylone z położenia równowagi i następnie swobodnie puszczone wahadło wykonywa szereg wahań, stopniowo zanikających skutkiem tarcia; jeżeli jednak, podczas gdy wahadło się waha, zamkamy prąd w elektromagnesie, wahadło zatrzymuje się niemal odrazu; gdy poruszająca się tarcza miedziana wpada pomiędzy okowy (a więc w miejsce gęsto stłoczenia rurek pola magnetycznego), porusza się tak, jakgdyby wpadła w jakiś bardzo lepki ośrodek, w którym ruch jej jest utrudniony — wahaniami zstają gwałtownie stłumione. Dzieje się to właśnie dzięki t. zw. *prądom Foucaulta*, powstającym indukcyjnie w tej tarczy zgodnie z regułą

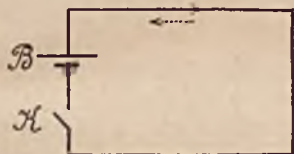
Lenza, t. j. tak, że przeciwdziałają one wywołującemu je czynnikowi.

Prądy Foucaulta bywają szkodliwe w pewnych zjawiskach i usiłujemy przeciw nim się bronić. Czasem jednak są pożyteczne i wtedy je chętnie wyzyskujemy. Tak np. gdy chodzi o prędkie stłumienie wahań igły busoli, albo ruchomej części galwanometru czy też warjomietru magnetycznego, a przez to prędsze osiągnięcie przez te ruchome ciała położenia równowagi, umieszczamy możliwie blisko wahających się magnesów płyty lub innego kształtu osłony miedziane — w nich poruszające się magnesy wzbudzają prądy Foucaulta, działające zawsze w zgodzie z regułą Lenza, t. j. hamująco na ruchy magnesów; w busoli rolę tę odgrywają dno i ściany pudła miedzianego, w którym mieści się igła.

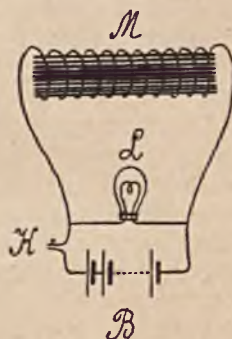
362. Indukcja własna.

Jeżeli podczas zachodzącej zmiany w liczbie rurek pola, wzgl. rurek indukcji, objętych konturem obwodu, powstaje w tym obwodzie prąd elektryczny, należy przypuszczać, że gdy w jakimkolwiek obwodzie prąd zamykamy lub przerywamy, musi temu również towarzyszyć zjawisko prądu indukcyjnego, powstającego w tym samym obwodzie.

W rzeczy samej, wyobraźmy sobie, że mamy obwód narazie niezamknięty, zawierający ogniwo (baterję) B (rys. 926); gdy obwód zamykamy przy pomocy łącznika K, tworzy się dokoła obwodu znane już nam pole magnetyczne i wtedy kontur obwodu obejmuje pewną liczbę rurek pola. Gdy następnie przy pomocy tegoż klucza K prąd



Rys. 926.



Rys. 927.

w obwodzie przerwiemy, istniejące już pole magnetyczne zniknie. W obu przypadkach więc zajdzie zmiana w liczbie rurek pola, objętych konturem przewodnika — w pierwszym przypadku liczba ta wzrośnie od zera do pewnej wartości N , w drugim zmniejszy się od N do zera.

Podobny proces zwiększania się, wzgl. zmniejszania się liczby rurek indukcji, objętych konturem obwodu, będzie zachodzić, gdy do obwodu włączymy opornicę i po zamknięciu prądu będziemy przy pomocy tej opornicy natężenie prądu zwiększali lub zmniejszali.

Wszakże według tego, czego dowiedzieliśmy się wyżej, w obwodzie tym winny wtedy powstawać prądy indukcyjne zgodnie z regułą Lenza, t. j. w chwili zamykania prądu powstać winna w obwodzie siła elektromotoryczna indukcji o znaku przeciwnym względem tej, która tworzy prąd w obwodzie (t. j. względem siły elektromotorycznej ogniwa lub baterji B), w chwili przerywania — siła elektromotoryczna, o znaku tym samym.

Ze istotnie zjawisko takie, któremu nadajemy miano *indukcji własnej*, zachodzi, przekonać się możemy przy pomocy następującego doświadczenia (rys. 927). Zamykając łącznik K, puszczaemy prąd z baterji przez zwój M , nawinięty na pęk prętów z żelaza miękkiego, oraz

równolegle ze zwojem włączoną lampkę żarową, którą dobieramy tak, by przy danej różnicy potencjałów na biegunach baterji ledwo się żarzyła. W chwili, gdy prąd przy pomocy klucza K przerywamy, lampka rozbłyśka na krótko jasnym światłem. Dzieje się to naskutek *indukcji własnej*: w zwoju M powstaje w chwili przerywania prądu tak znaczna elektromotoryczna siła indukcji, że warunkuje to rozżarzenie się lampki, złożonej wtedy w szereg ze zwojem M . Siła elektromotoryczna indukcji własnej w zwoju jest (podobnie jak w rozważanym już przypadku indukcji) sumą sił elektromotorycznych, powstających w poszczególnych jego skrętach. Umieszczenie wewnątrz zwoju rdzenia żelaznego *) warunkuje większą znacznie liczbę rurek indukcji, objętych konturem zwoju w porównaniu z liczbą rurek w powietrzu, a przez to zwiększa elektromotoryczną siłę indukcji własnej.

Gdy w jakimkolwiek obwodzie, w którym płynie stały prąd elektryczny, prąd ten przerywamy, obserwujemy w miejscu przerywania charakterystyczną iskrę; powstanie tej iskry uwarunkowane jest również przez siłę elektromotoryczną indukcji własnej — jest ona tak znaczna, że daje tę szczególną postać prądu w powietrzu, jaką jest iskra **).

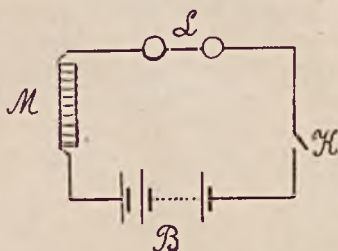
Zjawisko indukcji własnej (zwanej też samoindukcją) rozważać możemy w sposób następujący (porów. to, co mówiliśmy o indukcji na str. 326): zjawienie się w obwodzie w chwili zamykania w nim prądu siły elektromotorycznej indukcji własnej, warunkującej prąd o kierunku przeciwnym, równoznaczne jest temu, że natężenie prądu w obwodzie ustala się nie w samej chwili zamknięcia, lecz z pewnym opóźnieniem, t. j. że natężenie wzrasta w pewnym czasie od wartości $= 0$ do tej, która się osiąga ostatecznie. Zjawisko to jest więc objawem swojego rodzaju bezwładności. Podobnie, gdy prąd trwa i my go przerywamy, stwierdzamy znowu ten szczególny objaw jakgdyby bezwładności, a mianowicie powstanie prądu indukcji własnej o kierunku, tym razem zgodnym z kierunkiem prądu, co zmierza do przedłużenia trwania prądu przerywanego.

Indukcja własna w przewodniku jest objawem sprzeciwu zmianom, zachodzącym w natężeniu prądu, płynącego przez przewodnik. W chwili takich zmian opór ten kombinuje się z oporem, o którym mówiliśmy wyżej, który mierzymy w omach i z tego powodu nazywamy *oporem omicznym*. Podczas jednak, gdy opór omiczny danego przewodnika jest wielkością określoną w danej temperaturze, niezależną od kształtu przewodnika, ani też od własności otaczającego przewodnik ośrodka, indukcja własna zależy i od kształtu, i od ośrodka. Tak np. indukcja własna w danym drucie, rozpiętym w postaci prostolinjowej, jest znacznie mniejsza, aniżeli w tym samym drucie, zwiniętym spiralnie; przytem ta ostatnia wartość zależy od liczby, wielkości i względnego położenia

*) Zamiast jednolitego rdzenia bierzemy pęk izolowanych jeden od drugiego prętów dla możliwego uniknięcia szkodliwego wpływu prądów Foucaulta w tym rdzeniu.

**) O iskrze elektrycznej będzie mowa niżej.

nia skrętów. Umieszczenie w tym spiralnie zwiniętym drucie rdzenia żelaznego, jak już o tem wyżej mówiliśmy, zmienia ogromnie indukcję własną. Bardzo efektowne jest doświadczenie, w którym używamy elektromagnesu o odpowiedniemu uzwojeniu, mającemu wysoką wartość



Rys. 928.

indukcji własnej. Obwód (rys. 928) zawiera baterję *B*, elektromagnes *M*, oraz jedną lub kilka żarówek *L*. Gdy zapomocą łącznika *K* zamykamy prąd w obwodzie, żarówki rozżarzają się nie tak niemal odrazu, jak to obserwujemy przy posługiwaniu się światłem elektrycznym w życiu codziennem, ale powoli, tak, że pełnię światła otrzymujemy z bardzo dostrzegalnym opóźnieniem, wynoszącym czasem parę sekund.

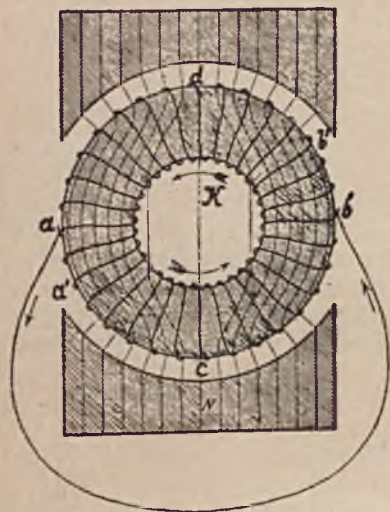
363. Prądnicę prądu stałego.

Odkrycie przez Faraday'a prądów indukcyjnych pociągnęło, jak już wspomnieliśmy, doniosłe następstwa nie tylko w dziedzinie samej nauki o zjawiskach elektromagnetycznych, ale i jej zastosowań praktycznych. Między innymi dostarczyło ono sposobu otrzymywania prądu elektrycznego na innej drodze, aniżeli to było robione do tego czasu, przytem ten nowy sposób otrzymywania prądu uczynił właśnie z prądów elektrycznych tę potęgę, jaką one są dzisiaj.

Otóż, skoro ruchy zamkniętego obwodu w polu magnesu albo elektromagnesu, lub odwrotnie ruchy magnesu w stosunku do takiego obwodu, powodują w obwodzie powstawanie prądu elektrycznego, należy tylko we właściwy sposób ruchami temi pokierować, aby otrzymać źródło prądu. Urządzenie, dostarczające prądu elektrycznego na skutek zjawiska indukcji elektromagnetycznej, nosi ogólną nazwę *prądnicy*. Nie wdając się w szczegółowy opis dzisiejszych prądnic, poprzestaniemy na podaniu ogólnych zasad ich budowy, biorąc za punkt wyjścia przestarzały dziś wprawdzie, ale historycznie zasłużony typ.

Na rys. 929 mamy schemat takiej prądnicy. Między biegunami *N* i *S* magnesu mieści się t. zw. *twornik* (*K*) prądnicy, t. j. ta część przyrządu, w której powstaje prąd. Twornik ten składa się z pierście-

nia żelaznego, utworzonego nie z jednolitej bryły, lecz z pęku izolowanych jeden od drugiego prętów żelaznych (dla uniknięcia szkodliwego wpływu prądu Foucaulta) i owiniętego zamkniętym w sobie zwojem drutu, który na schemacie wyobrażony jest jako niepokryty izolacją, a jedynie oddzielony od rdzenia żelaznego warstwą izolatora. Pierścieni ten może się obracać dokoła osi, przechodzącej przez jego środek. W *a* i *b* dotykają skrętów zwoja sprężyny metalowe, połączone ze sobą drutem; przy obrocie pierścienia sprężyny te zeslizgują się z jednych skrętów i dotykają coraz to dalej położonych.



Rys. 929.



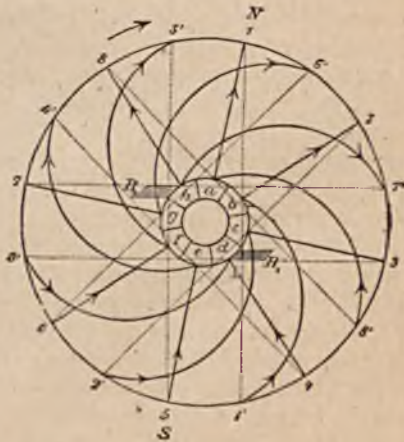
Rys. 930.

Linje i rurki pola magnetycznego między biegunami N i S skierowują się przeważnie poprzez rdzeń żelazny pierścienia (porów. rys. 711 i 903), tworząc tam linje i rurki indukcji, co jest zaznaczone na rysunku cieńszymi linjami. Przypuśćmy, iż pierścień pozostaje w ruchu obrotowym w kierunku, wskazanym strzałką. Kontur któregośkolwiek skrętu drutu, nawiniętego na pierścieniu, przypadający w pewnym momencie w *a*, obejmuje w tem położeniu największą liczbę rurek indukcji; w miarę poruszania się tego skrętu w stronę, wskazaną strzałką, liczba rurek indukcji, objętych konturem, zmniejsza się, stając się równą zero w *c*; winno temu towarzyszyć powstanie w tym skręcie podczas tego ruchu siły elektromotorycznej indukcji. Przy dalszym ruchu następuje wzrost liczby rurek, objętych konturem, i maximum ich osiąga się w *b*, przyczem jednak zauważyć należy, że teraz te rurki wchodzą do konturu z przeciwnej jego strony, aniżeli to się działo przy ruchu od *a* do *c*; wynika stąd, że siła elektromotoryczna indukcji będzie w tym skręcie w dalszym ciągu w tę samą stronę skierowana. Znak tej siły elektro-

motorycznej zmienia się jednak w momencie przejścia przez b ; poczynając od tego momentu, podczas gdy skręt przechodzi do d , a potem do a , liczba rurek indukcji, objętych konturem, najpierw się zmniejsza, a potem (poczynając od d) wzrasta, przyczem po przejściu przez d rurki wchodzą do konturu z przeciwnej jego strony, skutkiem czego znowu na całej tej drodze znak siły elektromotorycznej pozostaje niezmienny. Oczywiście to, co zostało powiedziane, dotyczy wszystkich skrętów. Zatem w dolnej i górnej połowie zwoju mamy równe, lecz w strony wręcz przeciwne skierowane siły elektromotoryczne, czyli w b oraz a mamy przy obrocie pierścienia pewną różnicę potencjałów, a, co zatem idzie, w drucie, łączącym sprężyny a i b , stale płynący prąd elektryczny.

Oparty na tej zasadzie twornik starego typu, zwany pierścieniem Gramme'a składa się z cewek, złączonych w szereg i nasadzonych na rdzeń żelazny, jak to widoczne jest na rys. 930, gdzie również wskazana jest struktura rdzenia. Końce drutów, tworzących te cewki, połączone są kolejno z szeregiem płytek miedzianych, izolowanych jedna od drugiej (najczęściej przy pomocy warstewki miki) i rozmieszczonych na obwodzie walca współśrodkowego z pierścieniem. Z dwu diametralnie przeciwnych stron przytykają do tych prętów szczotki metalowe, których rola jest taka, jak sprężyn w a i b na rys. 929. Dodać trzeba, że prąd, powstający w tworniku, warunkuje również nowe pole magnetyczne w jego rdzeniu; wobec tego przebieg linii i rurek indukcji nie jest, ściśle biorąc, taki, jak na rys. 929 i szczotki umieszczać należy nie w a i b , lecz w miejscach nieco dalej względem a i b w kierunku ruchu pierścienia położonych (a' , b' na rys. 929).

Pierścień Gramme'a ustąpił miejsca bardziej racjonalnemu, cylindrycznemu twornikowi z uzwojeniem Heffnera-Altenecka. Schemat tego twornika mamy na rys. 931. Litery a, b, \dots, h oznaczają płytki kolektora, do których przylegają szczotki B_1, B_2 . Drut 1, przytwierdzony do płytki a przechodzi najpierw po tej stronie podstawy walca żelaznego*), która zwrócona jest do czytelnika, dalej przebiega po powierzchni walca do przeciwległej jego podstawy, tam wzdłuż tamtej podstawy przedostaje się znów na powierzchnię walca i po tej powierzchni dochodzi do punktu 1, dalej zaś biegnie do płytki b kolektora; od



Rys. 931.

*) Również nie jednolitego ze względu na prądy Foucaulta, lecz utworzonego z izolowanych jeden od drugiego drutów lub blach.

plytki *b* drut biegnie dalej według drogi, wskazanej przez 2 2', i dochodzi do płytki *c* kolektora; stamtąd nawinięcie drutu wskazane jest kolejno przez 3, 3'... do 8, 8', poczem koniec drutu dochodzi do pierwszej płytki *a* kolektora. Twornik kształtu pierścienia ma tę wadę, iż rdzeń żelazny pierścienia tworzy osłonę magnetyczną dla tych części nawiniętego na pierścień zwoju, które przypadają wewnątrz pierścienia; na-



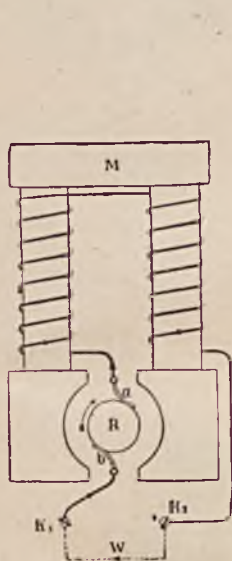
Rys. 932.

winięcie Heffnera-Altenecka usuwa tę niekorzystną okoliczność — w tworniku tym lepiej jest wyzyskane zjawisko indukcji. Wygląd rzeczywisty twornika cylindrycznego (bębnowego) mamy na rys. 932.

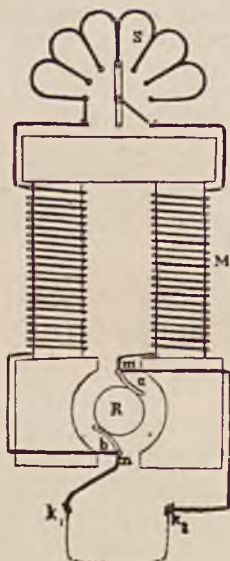
Prądnicę, w których pole magnetyczne wytwarzają bieguny stałego magnesu, noszą nazwę maszyn *magnetoektrycznych* i należą już dziś do historii. Obecnie zamiast magnesów stałych używamy wyłącznie elektromagnesów *), dających pole o większym bezporównania natężeniu, co zwłaszcza jest ważne, gdy chodzi o otrzymywanie prądów wielkiego natężenia. Prądnicę, mające elektromagnesy w miejscu magnesów stałych, nazywają się *dynamomaszynami*. Budowa dynamomaszyny na prąd stały podana jest na poniższych schematach (rys. 933 a, b, c). Twornik mieści się tu między biegunami elektromagnesu. Dzięki śladom magnetyzmu, które posiada zawsze rdzeń magnesu (jest to t. zw. magnetyzm pozostały), mamy między biegunami elektromagnesu słabe pole magnetyczne. Gdy twornik zostaje wprawiony w ruch, powstaje w nim słaby początkowo prąd elektryczny, który skierujemy przez zwoje elektromagnesu; w ten sposób natężenie pola między biegunami elektromagnesu wzrasta, a zarazem wzrasta natężenie otrzymywanego prądu indukcyjnego, co w dalszym ciągu potęguje pole elektromagnesu. Zatem do zasilania elektromagnesu używamy części prądu, wytwarzanego przez prądnicę i jednocześnie doprowadzanego od zacisków k_1 i k_2 do zewnętrznego obwodu *W*, dla którego właściwie prąd jest potrzebny. Rys. 933a, b, c przedstawia różne sposoby kierowania prądu do elektromagnesu i nazewnątrz; na rys. 933a mamy obwód elektromagnesu, złączony w *szereg* z obwodem zewnętrznym. Jeżeli opór zewnętrzny wzrasta, to (przy stałej prędkości ruchu twornika) słabnie prąd i w zwojach elektromagnesu, dzięki czemu spada również wartość wzbudzonej siły elektromotorycznej. Korzystniejsze

*) Pomysł ten zawdzięczamy W. Siemensowi (1867).

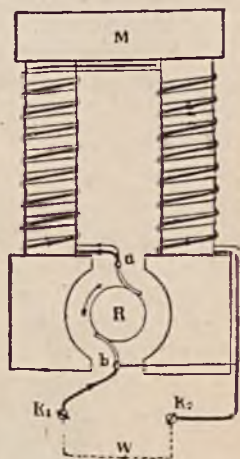
jest połączenie *równoległe* zwoju elektromagnesu i oporu zewnętrznego (rys. 933b). Jeżeli opór zewnętrzny wzrasta, natężenie prądu w zwojach elektromagnesu rośnie, a zatem rośnie siła elektromotoryczna. Rys. 933c wskazuje wreszcie połączenie *mieszane*; tu nawinięcie na elektromagnesie jest podwójne, przyczem większa część tego nawinięcia, utworzona z cienkiego względnie drutu, włączona jest równoległe



Rys. 933 a.



Rys. 933 b.

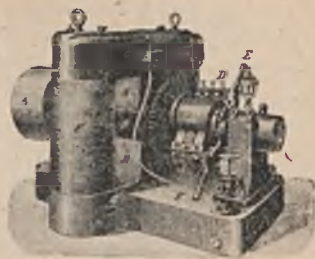


Rys. 933 c.

do obwodu zewnętrznego, mniejsza zaś część, utworzona z grubego względnie drutu, połączona jest z nim w szereg. Przy odpowiednim doborze oporów tych części nawinięcia daje się osiągnąć niezależność różnicy potencjałów na zaciskach k_1, k_2 , skąd prowadzimy prąd do obwodu zewnętrznego, od oporu zewnętrznego, co jest, oczywiście, najkorzystniejsze.

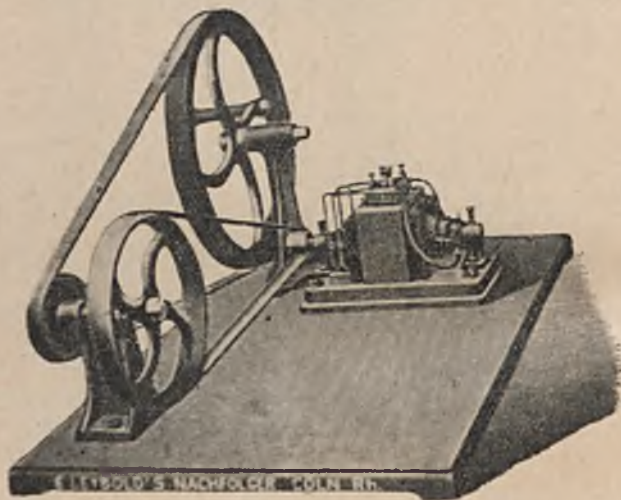
Używając w powyższym opisie wyrażeń „siła elektromotoryczna“ oraz „różnica potencjałów na zaciskach“ (mówi się też „napiecie na zaciskach“), oznaczamy przez nie rzeczy różne. Różnica potencjałów ($V_1 - V_2$) na zaciskach, z której korzystamy, czerpiąc prąd z dynamo do tego czy innego celu, jest zawsze mniejsza, niż siła elektromotoryczna E , która się wytwarza, tu bowiem jak w przypadku ogni (ust. 342) pamiętać należy, że oprócz oporu zewnętrznego mamy jeszcze do czynienia i z oporem wewnętrznym samej dynamomaszyny; nazewnątrz tedy mamy do rozporządzenia jedynie część (wprawdzie przeważną) dostarczanej przez dynamo energii.

Na rys. 934 mamy prawdziwy wygląd dynamomaszyny starego typu. Poznajemy tu odrazu twornik *B* i kolektor *C*, osadzone na wspólnej osi z kołem *A*, które zostaje wprawione w ruch obrotowy przy pomocy pasa, połączonego z jakimkolwiek motorem. W *D* mamy szczotki, które przy pomocy rękojeści *E* dają się nastawić na właściwych miejscach (p. *a'*, *b'* na rys. 929), miejsca te poznaje się w ten sposób, iż nie ma wtenczas iskrzenia między szczotkami a kolektorem.



Rys. 934.

Rys. 935 wyobraża małą prądnicę wykładawą, której twornik wprawiany w ruch ręką w sposób, zupełnie zrozumiały z rysunku.



Rys. 935.

W dynamomaszynach nowszego typu używa się często nie jednej pary biegunów elektromagnesu, lecz wielu. Tworniki mieszczą się w przestrzeni między biegunami, to znowu odwrotnie tworniki obejmują bieguny elektromagnesu. Na rys. 936 widzimy dynamo z czterema biegunami elektromagnesu (kolejno *N* i *S*), mieszczącymi się wewnątrz twornika. Dynamo ma cztery szczotki, z których po dwie połączone są ze sobą i z zaciskami, z których czerpie się prąd nazewnątrz. W bliższe szczegóły konstrukcji tych przyrządów wdawać się nie będziemy.

Energja elektryczna, dostarczana nam przez dynamomaszyny, tworzy się kosztem pracy mechanicznej, którą wykonywamy, podtrzymując niezbędny do funkcjonowania maszyny ruch obrotowy. Pamiętajmy, że zgodnie z regułą Lenza prądy indukcyjne tworzą się zawsze tak, że przeciwdziałają to ruchowi, przy którym te prądy powstają.

Pouczającą jest następująca próba z dynamomaszyną wykładową: wprawiamy w ruch twornik, gdy bieguny dynamomaszyny nie są połączone przez żaden przewodnik, a więc, gdy prądu z maszyny nie czerpiemy; zauważywszy, jak niewielkiego wysiłku trzeba, aby twor-



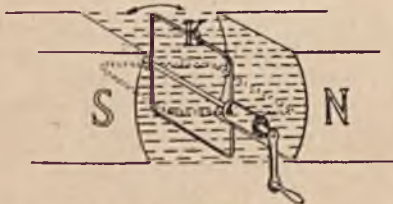
Rys. 936.

nik maszyny utrzymać w ruchu, zamykamy obwód zewnętrzny przez jakikolwiek przygotowany do tego przewodnik, a natychmiast uczuwamy, że energia otrzymywanego teraz prądu kosztuje nas pracy.

Porównywając energję, użytą na podtrzymanie niezbędnego ruchu obrotowego, z zyskaną z dynamo energją prądu elektrycznego, przekonujemy się, że przyrządy te są bardzo ekonomiczne; wydajność ich wynosi ok. 90%.

364. Prądnicę prądu przemiennego.

Przypuśćmy, iż w polu między biegunami magnesu (rys. 937) obraca się z prędkością stałą osadzony na izolującej osi obwód druciany *K*. Gdy z położenia, poprzecznego względem linii pola, obwód przechodzi



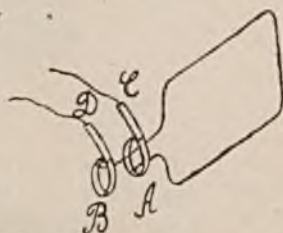
Rys. 937.

w położenie podłużne, zaznaczone na rysunku kropkami, liczba rurek pola, objętych konturem obwodu, zmniejsza się do zera, poczem przy dalszym obrocie wzrasta, jednakże tym razem przy wchodzeniu rurek pola do konturu z przeciwnej jego strony. Po osiągnięciu obrotu o 180°

i przekroczeniu tego położenia zaczyna się znowu zmniejszanie się liczby rurek, objętych konturem, ale bez zmiany kierunku tych rurek względem konturu. W tym momencie zmienia się znak siły elektromotorycznej, wzbudzonej w obwodzie. Mówiliśmy już o tem w ust. poprzednim, rozpatrując schematycznie rys. 929. Stosując znany już nam kolektor, którego połączenie z końcami obracającego się obwodu wyobraża schematycznie rys. 938a (szczotki *D* i *C* przeskakują kolejno z jednego półpierścienia *A* na drugi *B* i odwrotnie), będziemy mieli na szczotkach potencjały o znakach niezmiennych, mimo iż siła elektromotoryczna oraz prąd indukcyjny w obwodzie perjodycznie będą zmieniały znak. Jeżeli jednak zamiast kolektora użyjemy styku ślizgowego, schematycz-



Rys. 938 a.



Rys. 938 b.

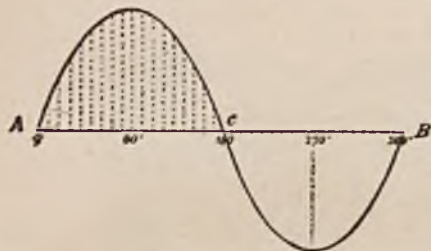
nie wyobrażonego na rysunku 938b, a składającego się z dwu pierścieni metalowych *A* i *B*, izolowanych jeden od drugiego i połączonych jeden z jednym, drugi z drugim końcem obwodu, to na szczotkach *D* i *C*, przytykających i ślizgających się po tych pierścieniach, będziemy mieli zmienne co do znaku potencjały, odpowiednio do zmian tych znaków w ruchomym obwodzie; w przewodniku, którym połączymy te szczotki, otrzymamy skutkiem tego prąd o kierunku zmiennym. Przyrząd nasz stanie się w ten sposób źródłem prądu t. zw. *przemienne*go (nazywają go też zmiennym).

Można wykazać, że przy stałej prędkości ruchu obrotowego tak zbudowanego prostego twornika, jak na rys. 937, wartość siły elektromotorycznej oraz napięcia uzyskanego prądu indukcyjnego zmienia się nie tylko co do znaku, ale i co do wielkości, przyczem zmiany te dają się przedstawić wykreślnie przy pomocy sinusoidy (rys. 939).

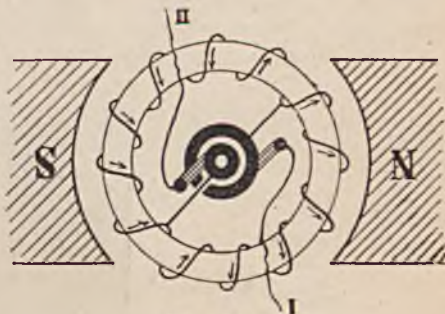
Zjawisko tego rodzaju prądu jest zjawiskiem okresowym, w którym pewien przebieg powtarza się w równych odstępach czasu, podobnie jak powtarzają się jedno po drugim drgania wahadła. Przez analogję do tego, co mówiliśmy o ruchu drgającym (t. I, ust. 82), możemy zastosować ustalone tam terminy, jak okres zmian, częstość, obszerność; terminy te winny być dla czytelnika odrazu zrozumiałe. Zauważmy przytem, że jak w dziedzinie drgań głosowych rozróżniliśmy drgania proste i złożone, z których tylko pierwsze wykreślnie są przedstawione przez sinusoidy, podobnie i w dziedzinie prądów zmiany, że tak po-

wiemy, sinusoidalne siły elektromotorycznej i natężenia prądu to tylko przypadek najprostszy. I tu dają się otrzymywać zmiany okresowe bardziej złożone, które można rozkładać na części proste. Wzmiankując o tych rzeczach, nie wdajemy się w szczegóły. Pewne przypadki, zasługujące na uwagę, omówimy niżej.

Urządzenie tego rodzaju, jakie mamy na rys. 937, służy jedynie jako model najprymitywniejszej prądnicy prądu zmiennego. Jak widzimy, istotną różnicę jej w porównaniu z prądnicą prądu stałego sta-



Rys. 939.



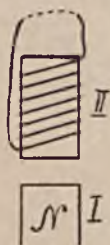
Rys. 940.

nowi odbiór i wyprowadzenie nazewnątrz otrzymywanego w tworniku prądu. Porównanie rozważania, przeprowadzonego na początku tego ustępu, oraz rozważania, dotyczącego prądnicy prądu stałego (rys. 929), prowadzi do wniosku, że z prądnicy prądu stałego otrzymamy prądnicę prądu zmiennego, o ile zastąpimy kolektor przez styk ślizgowy, którego urządzenie wyjaśniliśmy przed chwilą (rys. 938b). Na rys. 940 widzimy schemat pierścienia Gramme'a, zaopatrzonego w taki styk ślizgowy zamiast kolektora, podkreślić tylko należy, że w rzucie pierścienie metalowe styku przedstawione są na rysunku jako współśrodkowe, podczas gdy w rzeczywistości są one umieszczone na izolującym walcu (patrzac na rys. 938b, można sobie wyobrazić, że pierścienie A i B nie są przedzielone powietrzem, ale umocowane są np. na ebonitowym walcu). Oczywiście, w dynamomaszynie prądu zmiennego, zbudowanej według takiego schematu, jak na rys. 940, nie możemy użyć dostarczanego przez dynamo prądu zmiennego do zasilania elektromagnesu. To też do elektromagnesu doprowadzamy prąd stały z innego, specjalnie do tego przeznaczonego przyrządu *); są wszakże i takie urządzenia, że twornik posiada na jednej stronie osi styk ślizgowy, na drugiej kolektor, tak, że częściowo dynamo dostarcza prądu stałego do zasilania elektromagnesu (wzgl. elektromagnesów), w większej zaś części dostarcza prądu zmiennego, do którego wytwarzania jest przeznaczona.

Budowa nowocześniejszych prądnic prądu przemiennego, t. zw. *alternatorów*, oparta jest na innym jeszcze pomysśle. Wyobraźmy sobie, że

*) Budują zresztą i dynamomaszyny prądu stałego z elektromagnesami, zasilanymi z oddzielnego źródła.

nad biegunem magnesu I może być umieszczony, a następnie z tego miejsca usunięty rdzeń żelazny, na którym nawinięty zwoj tworzy zamknięty obwód. W czasie, gdy rdzeń zbliżamy do bieguna I i umieszczamy w położeniu, przedstawionem na rys. 941, w obwodzie powstaje prąd indukcyjny. W chwili usunięcia rdzenia z tego położenia i oddalenia, w zwoju powstaje prąd indukcyjny o kierunku przeciwnym. Przypuśćmy, iż perjodycznie będziemy rdzeń zbliżali w ten sposób do magnesu i oddalali (albo, co na jedno wychodzi, będziemy do rdzenia zbliżali i oddalali magnes); w zwoju, otaczającym rdzeń, powstawać będą wtedy prądy przemienne — cewka ta będzie grała rolę twornika. Oczywiście, magnes I można zastąpić, a nawet należy (z powodów wyżej już



Rys. 941.

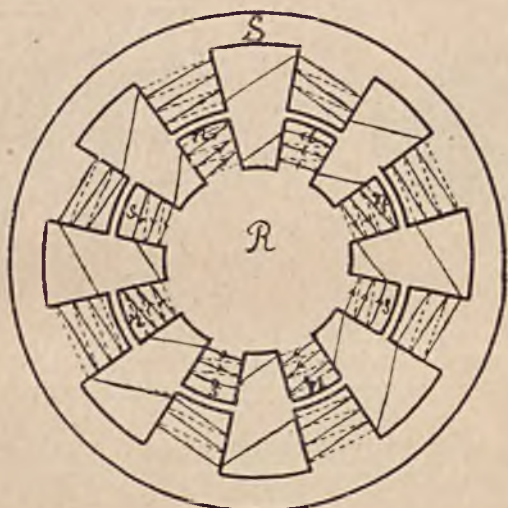


Rys. 942.

wyjaśnionych) przez elektromagnes; o sposobie zasilania tego elektromagnesu możemy nie mówić, gdyż, jak już widzieliśmy, daje się to w odpowiedni sposób uskutecznić. Na tych kilku słowach wyjaśnienia możemy poprzestać, by w ogólnych zarysach objaśnić funkcjonowanie potężnej dynamomaszyny prądu zmiennego, o dzielności 3000 kilowatów, przedstawionej na rys. 942. Na obwodzie wielkiego koła (schemat na rys. 943), które zostaje wprawione w ruch obrotowy, mieści się szereg elektromagnesów, zasilanych z odpowiedniego źródła — jest to t. zw. *rotor*; na wewnętrznej stronie wielkiego pierścienia nieruchomego, otaczającego koło, mieści się szereg cewek, formujących razem twornik — jest to t. zw. *stator*. Gdy rotor się obraca, bieguny jego elektromagnesów mijają cewki statora. W ten sposób realizuje się zbliżanie i oddalanie cewek twornika względem biegunów magnetycznych. Na schemacie (rys. 943) nie zaznaczono, jak wprowadza się prąd do elektromagnesów, oraz jak z twornika wyprowadza się prąd nazewnątrz.

Prądy przemienne posiadają olbrzymie znaczenie zarówno dla nauki jak jej zastosowań. Nie możemy tu więcej czasu im poświęcić, gdyż przekraczałoby to znacznie plan niniejszej książki; musimy jednakże kilka szczegółów jeszcze dodać. Czytelnik, który uważnie przestudjował to, co podane zostało wyżej, rozumie, że istnieją dziedziny, w któ-

rych stosowanie prądów zmiennych jest niemożliwe — przykładem zjawiska elektrolizy. Przypuśćmy jednak, że zastosowanie to jest możliwe, np. chodzi nam o zbudowanie pieca elektrycznego, albo o żarzenie żarówek; pytanie, co rozumiemy wtedy przez natężenie prądu, skoro wartość ta wciąż się zmienia (w przypadku najprostszym p. rys. 939; zmiany kierunku nie grają tu roli) — otóż przez natężenie rozumiemy jego *wartość średnią*, ale i to jeszcze wymaga wyjaśnień uzupełniających,

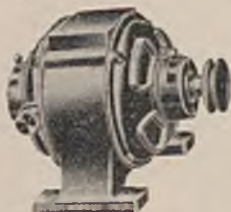


Rys. 943.

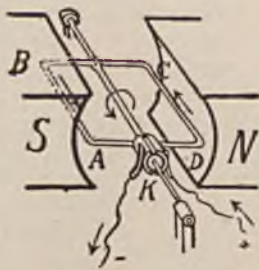
o ile pragniemy rozumieć, jak się mierzy natężenie tych prądów przemiennych. Mianowicie jest rzeczą zrozumiałą, iż galwanometr z ruchomą cewką lub ruchomym magnesem, jakie już opisywaliśmy wyżej, do tego celu się nie nadaje, podczas zmian bowiem kierunku prądu musiałyby dawać kolejno wychylenia to w jedną, to w drugą stronę, a ostatecznie nie wychylałyby się wcale, gdyż nie pozwalałaby na to bezwładność jego ruchomych części. Pozostaje więc działanie cieplne prądu (patrz ust. 346; prawo Joule'a) oraz metoda elektrodynamometru (ust. 336); w obu tych przypadkach wielkość obserwowana jest proporcjonalna do *kwadratu natężenia prądu*, a zatem jest niezależna od zmiany kierunku prądu. Wychylenie czy to igły ampermetru cieplnego (rys. 728), czy to cewki elektrodynamometru (rys. 850), czy to na wzór takiego elektrodynamometru zbudowanego ampermetru technicznego, będzie odpowiadało średniej wartości kwadratu natężenia prądu i ; na tej zasadzie przyrządy te są tak cechowane, iż wskazania ich na skali dają już wartość tych natężeń. Bliższych wyjaśnień w tej sprawie podawać nie będziemy.

365. Motory elektryczne.

Rozporządzając małą prądnicą wykładową (rys. 935), w której twornik obracamy własnoręcznie, możemy dokonać spostrzeżenia, o którym już była mowa w ust. 363. Mianowicie, gdy zaciski prądnicy nie są połączone z końcami żadnego obwodu, czyli, jak się mówi, obwód zewnętrzny jest otwarty, obrót twornika daje się łatwo uskutecznić —



Rys. 944.



Rys. 945.

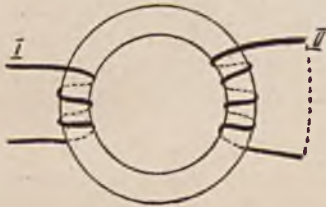
po pokonaniu oporu bezwładnego i doprowadzeniu ruchu do pewnej stałej prędkości kątowej, uczujemy jedynie lekki opór, uwarunkowany przez tarcie.

Z chwilą, gdy zewnętrzny obwód zamykamy, posyłając tam tworzący się w prądnicy prąd, czujemy odrazu, że prąd ten kosztuje nas pracy. Z tej właśnie pracy, przez nas wykonanej, tworzy się, jako jej równoważnik, otrzymana tu energia elektryczna. Jeżeli jednak obracanie twornika w polu magnetycznym powoduje powstawanie prądu kosztem wykonywanej przytem pracy, to można się domyślać, że odwrotnie, puszczenie z zewnątrz prądu do zwoju twornika powinno uwarunkować jego ruch obrotowy. Doświadczenie potwierdza w zupełności ten domysł. W ten sposób przyrząd o budowie prądnicy użyty być może jako motor elektryczny, gdyż ruch obrotowy jego części ruchomej może być zużytkowany do wprowadzenia w ruch obrotowy jakiegokolwiek innego urządzenia. Na rys. 944 widzimy specjalnie już na tej zasadzie skonstruowany motor elektryczny; części jego składowe ukryte są pod osłoną. Podobnie jak prądnice, bywają i motory elektryczne na prąd stały i zmienny.

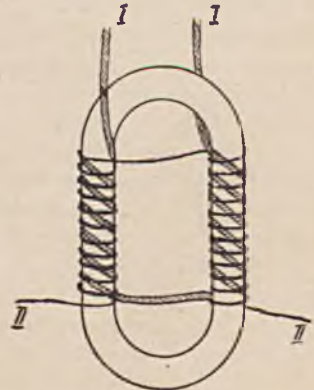
W celu bliższego zorientowania się, jak funkcjonuje motor elektryczny, proponujemy czytelnikowi rozważenie schematu, wyobrazonego na rys. 945; mamy tam osadzoną na osi izolującej prostokątną ramę ABCD z drutu, którego końce połączone są z płytkami kolektora K. Gdy kierujemy z zewnątrz do tej ramy prąd w kierunku, wskazanym strzałką, rama zaczyna się obracać w stronę, która również wskazana jest strzałką. Ruch ramy daje się wytłumaczyć na podstawie znanych już nam działań elektrodynamicznych (ust. 335). Pozostawiamy to do uczynienia czytelnikowi.

366. Transformatory.

Nawińmy na pierścień z żelaza miękkiego dwa zwoje drutu I i II (rys. 946) i skierujemy przez zwoj I (nazwijmy go *głównym*) prąd przemienny *). Wywoła to tworzenie się w pierścieniu rurek indukcji, ko-



Rys. 946 a.



Rys. 946 b.

lejno to w jedną to w przeciwną stronę skierowanych, a przez to wzbudzona będzie siła elektromotoryczna o zmieniającym się kolejno znaku w zwoju II (który nazwiemy *wtórny*) oraz — w przypadku, gdy zwoj ten jest zamknięty — prąd indukcyjny przemienny w tym zwoju. Jeżeli liczba skrętów w zwojach głównym i wtórnym jest niejednakowa, to siła elektromotoryczna, wzbudzona w zwoju wtórnym, będzie inna niż w głównym. Wytłumaczenie znajdujemy w rozważaniu, przytoczonym na str. 329, a dotyczącym sumowania się sił elektromotorycznych, wzbudzonych w poszczególnych skrętach zwoju. W pierwszym przybliżeniu powiedzieć możemy, że w tym samym stosunku otrzymuje się większe napięcie w zwoju wtórnym w porównaniu z napięciem w zwoju głównym, ile razy większa jest liczba skrętów zwoju II w stosunku do liczby skrętów w zwoju głównym. Energia prądu wzbudzonego powstaje tu z energii prądu wzbudzającego; w idealnym przypadku, gdyby część energii prądu wzbudzającego nie przestaczała się w ciepło Joule'a; gdyby nie było częściowego przynajmniej rozpraszania linii indukcji, t. j. gdyby wszystkie one bez wyjątku przebiegały przez rdzeń żelazny; gdyby wreszcie nie było zjawiska histerezy (p. ust. 354), wówczas dzielność prądu wzbudzonego byłaby równa dzielności prądu wzbudzającego; wobec istnienia wszakże tych wszystkich okoliczności, zawsze pewna część tej dzielności prądu wzbudzającego ginie dla nas na marne. Zaniedbując te

*) Albo też prąd stały, periodycznie przerywany i zamykany; o sposobach automatycznych przerywania wspominaliśmy wyżej (p. rys. 859 i 860); będzie jeszcze również mowa o tem w ust. 367.

okolicości i zakładając przytoczony przypadek idealny, a także pamiętając, że dzielność prądu mierzy się iloczynem z jego natężenia przez napięcie, napiszemy dla tego przypadku

$$V_I i_I = V_{II} i_{II} \dots \dots \dots (1)$$

gdzie przez V_I i V_{II} oznaczamy napięcie, zaś przez i_I i i_{II} — natężenie prądu w zwojach głównym i wtórnym. Wynika z tego, że za pomocą urządzenia, wyobrażonego na rys. 946, jesteśmy w stanie przekształcać, albo jak się mówi, *transformować* prąd niskiego napięcia na prąd napięcia wysokiego, przyczem tracimy przy takim przekształcaniu na natężeniu prądu co najmniej, jak wynika ze wzoru (1), tyle razy, ile zyskujemy na napięciu (w rzeczywistości tracimy zawsze nieco więcej).

Jeżeli zwój II składa się z bardzo wielkiej liczby skrętów w porównaniu ze zwojem I, otrzymujemy przy pomocy takiego *transformatora* prądy wysokiego napięcia, ale odpowiednio małego natężenia. Ostatnia okoliczność pozwala na użycie w zwoju wtórnym drutu cienkiego bez obawy grzania się jego, należy tylko mieć ten drut dobrze izolowany, aby przy wysokich napięciach zapobiec iskrzeniu między skrętami.

Zamiast takiego schematu do budowy transformatora, jak na rys. 946a, możemy użyć schematu z rys. 946b, gdzie na zamknięty w sobie rdzeń żelazny (kształtu pierścienia, prostokąta etc.) nawinięte są jeden na drugim zwoje główny i wtórny, przedzielone izolacją.

Oczywiście, role zwojów mogą być zmienione; jeżeli zwój II o wielu skrętach uczynimy głównym, t. j. puścimy doń prąd przemienny słaby wysokiego napięcia, otrzymamy przekształcenie jego w zwoju I o małej liczbie skrętów na prąd niskiego napięcia, ale wielkiego odpowiednio natężenia (zwój ten zrobiony jest z drutu względnie grubego — dlaczego?)

Na rys. 947 widzimy, jak wygląda jeden z typów prawdziwego transformatora. Na ramie z żelaza miękkiego mamy unieszczone dwa zwoje: jeden (P) z grubego drutu o niewielkiej liczbie skrętów, oraz drugi (S) z cienkiego drutu o bardzo wielu skrętach; końce pierwszego z tych drutów doprowadzone są do zacisków *a* i *b*, drugiego — do zacisków *A* i *B*. Zależnie od tego, który z tych zwojów uczynimy głównym, który zaś wtórnym, będziemy mogli transformować albo prądy silne o małym napięciu na prądy słabe o wysokim napięciu, albo odwrotnie — prądy słabe o wysokim napięciu na prądy silne o napięciu małym.

Dodajmy jeszcze, że, mimo iż zupełnie bez strat nie można transformować prądów, wydajność transformatorów dochodzi do 98⁰/₁₀₀, t. j. około 2⁰/₁₀₀ energii elektrycznej zostaje przy takim przekształceniu prądu stracona.

Transformatory łącznie z prądnicami odgrywają doniosłą rolę zarówno w nauce jak w technice. Energia prądu elektrycznego ma tę wyższość nad innymi rodzajami energii, iż daje się łatwo przenosić z miej-

sca, gdzie powstaje, w miejsca bardzo odległe. Można wyzyskać energję mechaniczną, której dostarcza nam przyroda, np. w rzekach lub wodospadach, wprawiać przy pomocy prądu wodnego w ruch obrotowy prądnicę i wytwarzać prąd elektryczny, który daje się przy pomocy drutów przesyłać tam, gdzie ma być użyty do poruszania tramwajów, motorów w fabrykach, oświetlania ulic, domów etc. *). Hości przesyłanej w ten



Rys. 947.

sposób energii elektrycznej są zazwyczaj znaczne, posługując się tedy prądami niskiego napięcia, należałoby przesyłać drutami prądy znacznego natężenia (pamiętajmy, że dzielność prądu mierzy się iloczynem napięcia przez natężenie), to zaś warunkowałoby grzanie się znaczne przewodników i marnowanie w ten sposób energii prądu; albo — dla zmniejszenia się grzania — należałoby używać grubych miedzianych przewodników (chodzi wszak o jak najmniejszy ich opór), co byłoby bardzo kosztowne. Korzystniej jest zatem przesyłać prądy słabe lecz wysokiego napięcia. W miejscu więc, gdzie mieści się źródło prądu, transformujemy go na wysokie napięcie i te właśnie już słabe prądy przesyłamy na wielkie odległości, w miejscach zaś, do których ten prąd jest doprowadzony, transformujemy go odwrotnie z napięciem wysokiego na niskie i tu już zaprzęgamy silne prądy do pełnienia tej pracy, do której są przeznaczone. Jak wspomnieliśmy, przy transformowaniu prądu traci się zawsze część energii, tracilibyśmy jej jednak znacznie więcej, gdybyśmy tego transformowania nie stosowali.

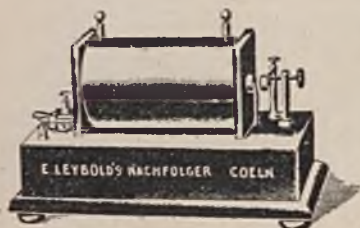
367. Cewka Ruhmkorffa.

Jednym z bardzo rozpowszechnionych typów transformatora jest powszechnie używana w praktyce laboratoryjnej cewka Ruhmkorffa, która służy do otrzymywania wysokich napięć.

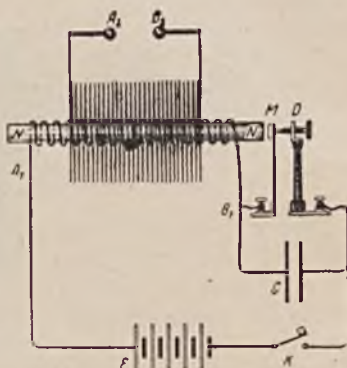
Na rys. 948 widzimy najzwyczajniejszy szkolny typ cewki Ruhmkorffa, na rys. 949 schemat jej budowy. Na rdzeń żelazny NN (rys. 949), składający się z pęku izolowanych jeden od drugiego drutów z żelaza

*) Jedna z największych takich instalacyj istnieje u wodospadu Niagary.

miękkiego (dla uniknięcia szkodliwego działania prądów Foucaulta), nawinięty jest zwój główny, składający się z niewielkiej liczby skrętów grubego drutu miedzianego, do którego doprowadzamy prąd z baterji ogni. Gdy prąd ten zamykamy przy pomocy łącznika K, rdzeń NN magnesuje się i przyciąga płytkę żelazną, mieszczącą się na końcu sprężyny stalowej M; w chwili tej czopek platynowy, umieszczony z przé-



Rys. 948.



Rys. 949.

ciwnej strony na tym samym końcu sprężyny M, przestaje dotykać platynowego pręcika, przytwierdzonego na końcu śrubki D. Prąd, jak widać ze schematu, zostaje w tym momencie przerwany i rdzeń NN przestaje być elektromagnesem; sprężyna, uprzednio zgięta nieco przez przyciągnięcie do rdzenia NN, wyprostowuje się i odrywa płytkę żelazną od rdzenia, skutkiem czego zachodzi ponownie zetknięcie czopka platynowego na sprężynie M oraz pręcika platynowego na końcu śruby D i prąd znowu zostaje zamknięty, poczem następuje nowe przerwanie prądu, nowe jego zamknięcie i t. d. W urządzeniu M, D poznajemy, oczywiście, młotek Neefa (p. rys. 859), który odgrywa tu rolę przerywacza prądu (przerwy te zachodzą parę lub najwyżej kilka dziesiątków razy na sekundę). Na zwój główny nawinięty jest izolowany od niego zwój wtórny, złożony z wielkiej liczby (często z wielu tysięcy) skrętów izolowanego cienkiego drutu, którego końce łączą się z kuleczkami A_2 B_2 . Z wierzchu zwój wtórny pokryty jest całkowicie warstwą ebonitu (rys. 948). Przypuśćmy narazie, że kuleczki A_2 i B_2 połączone są ze sobą drutem tak, że obwód wtórny jest zamknięty. Wówczas z tego, co już wiemy o zjawisku indukcji elektromagnetycznej, wnosimy, że w chwili zamknięcia prądu w zwoju głównym (A_1 B_1) powstaje w zwoju wtórnym (A_2 B_2) prąd indukcyjny o kierunku przeciwnym, niż w zwoju głównym, w chwili zaś przerwania prądu w zwoju głównym powstaje w zwoju wtórnym prąd indukcyjny o kierunku, zgodnym z kierunkiem prądu głównego. Procesy te zachodzą raz po raz, dopóki pozostaje zamknięty łącznik K. W ten sposób, podobnie jak w opisanym w ust. poprzednim transformatorze przekształcamy

prąd małego napięcia, ale znacznego względnie natężenia, w zwoju głównym na prąd słaby, lecz wysokiego napięcia, przytem zmiennego kierunku, w zwoju wtórnym. Ze istotnie tworzą się tu napięcia wysokie, przekonać się możemy, usuwając połączenie metaliczne między kulkami A_2 i B_2 — wtedy między temi kulkami przeskakuje raz po raz iskra, która, jak już wiemy, jest szczególną postacią prądu, powstającego w złym przewodniku, jakim jest powietrze, gdy istnieje dostatecznie wielka, potrzebna do tego różnica potencjałów między A_2 i B_2 .

Wszakże nie powiedzieliśmy jeszcze wszystkiego. Podkreślić tu mianowicie należy różnicę, jaka zachodzi, gdy prąd w zwoju głównym zamykamy, a gdy go przerywamy. Dzięki indukcji własnej po zamknięciu prądu natężenie jego nie osiąga odrazu swej ostatecznej wartości, ale stopniowo, aczkolwiek w krótkim czasie, narasta; co innego przy przerwaniu — wtedy odrazu wraz z otwarciem obwodu wartość natężenia prądu spada do zera, prąd zaś samoindukcyjny tworzy sobie drogę iskrową w miejscu przerwania. Ponieważ działanie indukcyjne, jak już mówiliśmy, jest proporcjonalne do prędkości zmian pola magnetycznego, wytworzonego przez prąd wzbudzający, prędkość zaś ta jest wobec powyższego większa przy otwarciu prądu niż przy zamknięciu, przeto siła elektromotoryczna indukcji jest większa przy przerwaniu prądu, niż przy zamknięciu, czyli różnica potencjałów na końcach A_2 i B_2 zwoju wtórnego jest większa przy przerwaniu prądu głównego, niż przy jego zamknięciu. Cewka jest tak zwykle urządzona, że końce zwoju wtórnego (A_2 B_2) — mogą to być kuleczki, albo ostrza, albo najczęściej jedno ostrze i przeciwległa jemu tarcza metalowa, jak na rys. 952 — że końce te dają się zbliżać i oddalać. Słuszność tego, cośmy powiedzieli przed chwilą, można sprawdzić, wyłączając z obwodu cewki młotek Neefa *) i zamykając lub przerywając prąd w zwoju głównym przy pomocy łącznika K; przekonywamy się wtedy, że przy zamykaniu przeskakuje tylko krótka iskierka między A_2 i B_2 , gdy końce te są do siebie bardzo zbliżone, natomiast przy otwieraniu prądu dają się otrzymać długie iskry między A_2 i B_2 .

Jednak, jak już powiedzieliśmy, przy przerywaniu prądu tworzy się iskra w miejscu przerwania, a więc w naszym przypadku iskra ta powstaje między czopkiem platynowym M i pręcikiem platynowym na końcu śruby D. Iskra ta przedłuża trwanie prądu, który winien być przzerwany, i czyni znikanie wytworzonego uprzednio pola magnetycznego wolniejszem, co znów wpływa na obniżenie się napięcia w zwoju wtórnym cewki. W celu usunięcia tej iskry łączymy równolegle do przerywacza kondensator, który na schemacie (rys. 949) oznaczony jest przez C, w rzeczywistości zaś mieści się w pudle drewnianem, na którym spoczywa cewka (rys. 948), i składa się z wielkiej liczby arkuszy cynfolji, poprzedzielanych papierem parafinowanym (por. rys. 704); w chwili przerwania prądu kondensator ten się ładuje, a przez to obniża się różnica potencjałów na końcówkach platyno-

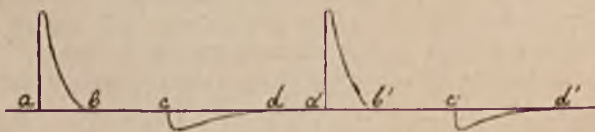
*) W tym celu wystarczy tak przykręcić śrubę D, by unieruchomić sprężynę M przez przyściśnięcie jej do rdzenia cewki.

wych, między którymi może przeskoczyć iskra; uniemożliwia to, a przynajmniej osłabia znacznie wyładowanie iskrowe.

Cewka Ruhmkorffa jest, oczywiście, swego rodzaju transformatorem—rozporządzając prądem stałym małego napięcia, przekształcamy go, stosując przerywanie, na prąd wysokiego napięcia, tracąc jednocześnie na natężeniu (na którym nam teraz nie zależy, lub zależy znacznie mniej). Na biegunach cewki — tak nazywają się końce A_2 i B_2 wtórnego zwoju — mamy kolejno napięcia o zmiennym znaku; wobec tego wszakże, że zjawisko indukcji przy zamykaniu prądu głównego odchodzi znacznie na drugi plan *), możemy je zaniedbać i uwzględnić tylko przerywanie, a zatem traktować rzecz tak, jakgdyby przez cały czas funkcjonowania cewki jeden z jej biegunów posiadał znak + drugi —. Jeżeli iskiernik cewki ma jako jeden biegun ostrze, jako drugi tarczę, kierujemy prąd główny tak, by ostrze miało znak +.

Przerywacz młoteczkowy daje niewiele przerw w sekundzie, mniej więcej około 30. Jest cały szereg innych przerywaczy, które czynią to znacznie częściej i dają przerwy gwałtowniejsze, przez co warunkują tworzenie się większych napięć na biegunach cewki. Napięcia te dochodzą w pewnych okolicznościach do 2000000 woltów, umożliwiając tworzenie się iskry przeszło metrowej długości. Nie podając opisu urządzenia różnych przerywaczy, wspomnimy tylko o przerywaczu Wehnelta, wyobrażonego na rys. 951. Składa się on z dwu elektrod, zanurzonych w 20% roztworze wodnym kwasu siarkowego; elektrodę dodatnią tworzy drucik platynowy, osadzony w rurce porcelanowej (lub szklanej) tak, by rozmiar jego części, zanurzonej w roztworze był odpowiedni, elektrodą zaś ujemną jest płytką ołowiana. Przy napięciu baterji, która zasila zwój główny cewki, przewyższającym 30 woltów, „gęstość“ prądu u elektrody platynowej staje się tak wielką, że zaczyna się ona żarzyć i pokrywa się przez to warstewką pary, co przerywa prąd; niezwłocznie jednak po przerwaniu prądu para ta się kondensuje, zachodzi znowu zetknięcie drucika platynowego z cieczą i znowu prąd jest zamknięty i t. d. Gdy napięcie baterji wynosi około 100 woltów, liczba przerw, otrzymanych przekracza 1000 w sekundzie. Przy przerywaczu Wehnelta nie używa się kondensatora — przerwy następują tu zbyt prędko, co nie odpowiada warunkom na-

*) Wykreślnie rzecz przedstawia się mniej więcej tak, jak na rys. 950; krzywa napięć ponad osią poziomą odpowiada przerywaniu prądu głównego, krzywa pod



Rys. 950.

osią — zamykaniu prądu głównego. Pomiedzy chwilami zamknięcia a przerywania nie ma wcale przez czas pewien napięcia w zwoju wtórnym, — zjawia się ono okresowo.



Rys. 951.



Rys. 952.

leżytego ładowania się kondensatora. Na rys. 952 mamy obraz wyładowania iskrowego cewki przy użyciu przerywacza Wehnelta.

Dodajmy jeszcze, że częstości przerywania prądu głównego w cewce Ruhmkorffa nie należy znacznie powiększać, nawet gdyby to się dawało technicznie osiągnąć. Wszak mamy tam rdzeń żelazny, który skutkiem histerezy nie magnesuje się i rozmagnesowuje momentalnie w chwili zamknięcia i przerywania prądu — to nieuniknione opóźnienie się procesu magnetycznego w żelazie stawia kres stosowanej częstości przerw.

368. Telefon.

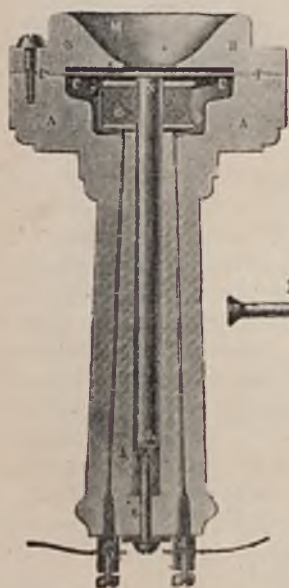
Jedno z ważniejszych zastosowań znajdują prądy indukcyjne w urządzeniu *telefonu*. Jeżeli chodzi o wyjaśnienie samej zasady tego urządzenia, mamy je na rys. 953. Widzimy tam 2 magnesy, znajdujące się w pewnej od siebie odległości; każdy z nich kilkakrotnie owinięty jest częścią drutu, tworzącego zamknięty obwód. Przed biegunem jednego, a odpowiednio i drugiego magnesu, mieszczą się blaszki żelazne P i P' , które magnesują się indukcyjnie. Jeżeli jedną z tych blaszek, np. PP , zbliżymy nagłym ruchem do magnesu NS , wywołamy tem zmianę w istniejącem już rozmieszczeniu linii indukcji magnetycznej, co pociągnie za sobą powstanie prądu indukcyjnego w drucie. Ten prąd indukcyjny, przebiegający przez zwoje, otaczające drugi magnes ($N_1 S_1$), wywołuje w nim *vice versa* zmianę stanu magnetycznego, czemu towarzyszy wykonanie przez blaszkę $P'P'$ takiegoż ruchu (oczywiście, blaszka ma swobodę wykonania tego ruchu), jaki wykonany był przez blaszkę PP . Na rysunku rzecz tę wyjaśniają strzałki, wskazujące zarówno kierunek ruchu blaszek, jak kierunek prądu indukcyjnego. Gdyby zamiast pojedynczego przesunięcia jednej z blaszek (wszystko jedno której) zachodziło drganie tej blaszki albo w całości albo w jej częściach, powodowałoby to szereg prądów indukcyjnych, a co zatem idzie, drganie blaszki drugiej w tym samym

rytmie i tego samego charakteru, co blaszki pierwszej. Jeżeli zatem na blaszkę PP padają fale głosowe i wprawiają ją w drgania, w takie same drgania za pośrednictwem prądu indukcyjnego wprawiana jest blaszka $P'P'$, która w ten sposób wytwarza takie same fale glo-

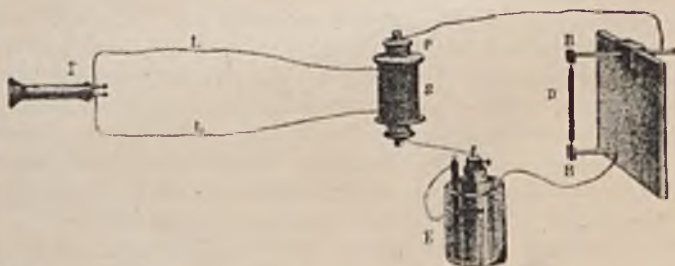


Rys. 953.

sowe, jak te, które wprawiły pierwszą blaszkę w drgania — w ten sposób w miejscu, gdzie mieści się blaszka $P'P'$, słyszymy głos, pochodzący z miejsca, gdzie mieści się blaszka PP . Rys. 954 przedstawia w przekroju słuchawkę telefoniczną, zbudowaną według zasady, wy-



Rys. 954.

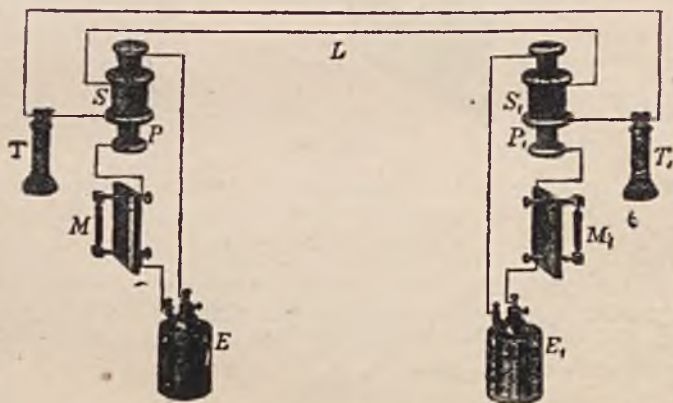


Rys. 955.

jaśnionej na schemacie z rys. 953; zwój drutu, w którym przebiegają prądy indukcyjne, to cewka D , nasadzona na jeden koniec magnesu; blaszka drgająca PP osadzona jest tuż przed tym końcem magnesu, gdzie mieści się cewka. Prawdziwe słuchawki telefoniczne, które

się dziś posługujemy, zawierają magnesy nie w kształcie pręta, lecz podkowy, by można było wyzyskać działanie obu biegunów — w szczególności te wdawać się nie będziemy.

Telefon, zbudowany w podany wyżej sposób, jak to odpowiada historycznemu rozwojowi tego przyrządu, byłby bardzo niedoskonały i pozwalałby na przenoszenie głosu i porozumiewanie się w ten sposób na bardzo nieznacznej odległości. Dziś posługujemy się wyłącznie połączeniem telefonu z innym przyrządem, a mianowicie z *mikrofonem*, którego jedno z najprostszych urządzeń mamy na rys. 955. Pręcik węglowy *D* wspiera się ostremi końcami w zagłębieniach dwu klocków węglowych *B*, *B* i włączony jest w ten sposób w obwód, zawierający ogniwo *E*, za pośrednictwem prętów metalowych, przytwierdzonych do drewnianej deseczki *C*, która utrzymuje wspomniane klocki *B*. Gdy deseczka *C* zostaje potrącona, np. zostaje wprawiona



Rys. 956.

w drgania przez padające na nią fale głosowe, drgania te udzielają się pręcikowi *D*, skutkiem czego w zetknięciu jego z klockami węglowymi zachodzi zakłócenie, wpływające na zmianę oporu węglowej części obwodu (opór ten jest mniejszy, gdy poszczególne bryłki węglowe mocno dotykają jedna drugiej, zwiększa się natomiast, gdy podczas drżenia zetknięcie staje się mniej dokładne). Kiedy pręcik *D* drży w swej obsadzie, zmienia się natężenie prądu w obwodzie, w który mamy również włączoną cewkę *P*; zmiany natężenia prądu, zachodzące w cewce *P*, odgrywają rolę głównej cewki transformatora, wywołują powstawanie prądów indukcyjnych w cewce wtórnej *S* tego transformatora, te zaś prądy indukcyjne przebiegają przez zwoje w słuchawce telefonicznej i warunkują tym drganie blaszki w słuchawce w tym samym rytmie, co rytm drgań deseczki *C* mikrofonu. Mikrofon zatem jest tu przyrządem, odbierającym bezpośrednio głos; słuchawka telefoniczna służy jako odbiornik przeniesionych za pomocą prądu indukcyjnego na odległość fal głosowych. Rys. 956 przedstawia

schematyczne połączenie dwu stacyj, z których każda zaopatrzona jest w mikrofon i telefon; zarówno z jednej, jak z drugiej można przesyłać sygnały głosowe; tak na jednej, jak drugiej sygnały te można odbierać.

W rzeczywistości nie posługujemy się mikrofonami tak prymitywnej budowy, jak wyobrażony na rys. 955. Na rys. 957 widzimy w przekroju jeden ze współczesnych typów mikrofonu. Mieszcząca się u dołu tuba (przed nią się mówi) służy do chwytania fal głosowych i prowadzenia ich do płytki węglowej, położonej poziomo w podstawie wła-



Rys. 957.

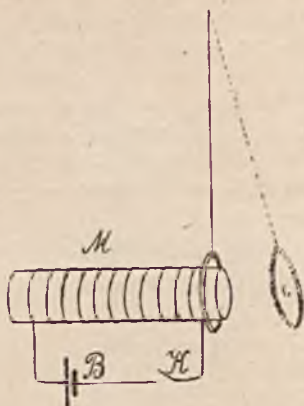
ściwego mikrofonu i wprowadzanej w drgania przez te fale głosowe. Ponad tą płytką mieści się grubsza płytką węglowa o podstawie nie płaskiej lecz przedstawiającej się w przekroju zygzakowato, jak to widać na rys.; zamiast pojedynczego pręcika (D na rys. 955) mamy specjalnie spreparowany proszek węglowy, wypełniający wąską szczelinę pomiędzy płytkami węglowymi.

Dziś telefony tak się udoskonaliły, że niesposób w podręczniku podawać o nich informacj więcej, niżby to dotyczyło zasady ich budowy.

Ćwiczenia i zadania.

625. U końca elektromagnesu, mającego postać ustawionego poziomo rdzenia żelaznego, owiniętego drutem (rys. 958), zawieszony jest lekki pierścień P z glinu. W chwili zamknięcia prądu w elektromagnesie pierścień zostaje odepchnięty do pozycji, wskazanej kropkami, poczem wraca do pierwotnego położenia. Wytlumaczyć to zjawisko?

626. Cewkę, której końce drutu są połączone z dostatecznie czułym galwanometrem, zbliżamy do jednego bieguna magnesu postaci pręta, poruszając ten zwój w kierunku osi magnesu i trzymając przytem płaszczyznę cewki prostopadle do tej osi; następnie wsuwamy cewkę na magnes, przesuwamy ją wzdłuż magnesu do drugiego jego końca, wreszcie zsuwamy z magnesu cewkę i oddalamy ją od magnesu. Co wykazuje galwanometr podczas wszystkich opisanych tu, a kolejno po sobie następujących, czynności, dokonywanych odpowiednio szybkimi ruchami?



Rys. 958.

627. Jak należy poruszać pierścień metalowy w polu magnesu prostoliniowego, by ruchowi temu nie towarzyszyło powstawanie w nim prądu indukcyjnego?

628. Jak można wyznaczyć w przybliżeniu kierunek południka magnetycznego w danym miejscu, rozporządzając cewką, dającą się obracać dokoła osi pionowej, przechodzącej równoległe do płaszczyzny skrętów drutu cewki, oraz czułym galwanometrem?

629. Zamykamy i przerywamy obwód, złożony z drutu, baterji ogni i elektromagnesu, zapomocą łącznika, utworzonego ze zgiętego łukowato drucika, zanurzonego w dwa naczynia z rtęcią, wchodzące też w skład obwodu. Przy każdym przerywaniu obserwujemy w tejże przerwie charakterystyczną, bardzo jaskrawą iskrę. Iskra ta staje się znacznie mniej jasna, gdy z obwodu wyłączamy elektromagnes. Dlaczego?

630. Magnes w postaci pręta, zawieszony na włóknie, wykonywa wahań w płaszczyźnie poziomej, jak w doświadczeniu (rys. 799), mającym na celu wyznaczenie składowej poziomej magnetyzmu ziemskiego. Co się dzieje, jeżeli podczas wahań podkładamy pod magnes poziomą grubą płytę miedzianą, umieszczając ją możliwie blisko magnesu, tak jednak, by magnesu nie dotykała?

631. Po torze kolejowym poziomym porusza się pociąg z prędkością $80 \frac{\text{Km}}{\text{godz}}$. Jaka siła elektromotoryczna wzbudza się wtedy na końcach osi wagonowych, mających długość 1,435 m, jeżeli składowa pionowa magnetyzmu ziemskiego wynosi w danym miejscu $Z = 0,425$ gausów?

632. Na zaciskach dynamomaszyny mamy napięcie 110 woltów. Opór wewnętrzny dynamo wynosi $0,4 \Omega$, opór obwodu zewnętrznego jest 18Ω . Jaka jest siła elektromotoryczna dynamomaszyny? Jakiego natężenia prądu w danym razie ona dostarcza?

633. Dynamomaszynę porusza motor 75-konny; przy napięciu 560 woltów na zaciskach daje ona prąd o natężeniu 64 amperów. Jaka jest dzielność dynamo w Kw? Jaka jest jej wydajność?

634. Machina parowa o dzielności 192 HP porusza dynamomaszynę, której opór wewnętrzny wynosi $0,018 \Omega$. Gdy opór zewnętrzny jest $3,282 \Omega$, otrzymany w nim prąd posiada natężenie 200 amperów. Jaka jest dzielność dynamomaszyny? Jaka jest jej wydajność?

635. Dynamo o sile elektromotorycznej 110 woltów, mająca opór wewnętrzny $1,5 \Omega$, zasila 50 włączonych równolegle żarówek, z których każda zużywa prąd 0,85 amperów. Przy pomocy drutu o oporze $0,01 \Omega$ czynimy krótkie spięcie między zaciskami dynamo. Jakiego natężenia prąd powstaje w tym drucie? Ile ciepła wytwarza się w nim w ciągu 1 sek.?

636. Dynamomaszyna dostarcza prądu 10 amperów przy napięciu na biegunach 110 woltów; wydajność dynamo stanowi 90%. Jakiej dzielności motoru trzeba do podtrzymywania ruchu danej dynamomaszyny.

637. Jaki brak posiadać będzie urządzenie dzwonka elektrycznego, zaprojektowane w zad. 592? Jak zapobiec można temu brakowi przez zastosowanie transformatora?

638. Zwój główny cewki Ruhmkorffa zasilany jest z baterji o napięciu 4 woltów, przyczem natężenie prądu w nim posiada wartość 3 amperów. Jakiego natężenia prąd otrzymuje się w zwoju wtórnym, jeżeli cewka daje iskry długości 2 cm w iskierniku, zakończonym kulkami o średnicy 1 cm?, (p. koniec ust. 301).

639. Opisać przemiany energii, towarzyszące przesyłaniu telefonicznemu fal głosowych.

ROZDZIAŁ XII.

PRĄDY ELEKTRYCZNE W GAZACH.

369. Prądy elektryczne w powietrzu przy zwykłej wartości ciśnienia atmosferycznego.

Wspominaliśmy już wyżej o wyładowaniu iskrowem, zaznaczając, że iskra stanowi szczególny rodzaj prądu elektrycznego. W końcu ust. 301 podaliśmy wartości różnicy potencjałów, które warunkują wyładowanie iskrowe między kuleczkami metalowymi o średnicy 1 cm przy różnych odległościach tych kuleczek; widzieliśmy, że to zjawisko iskry zachodzi w powietrzu przy wysokich względnie napięciach. Doświadczenia nad wyładowaniem iskrowem w innych gazach, pozostających pod ciśnieniem, równem ciśnieniu atmosferycznemu, wykazują, że zjawisko to zależy i od własności poszczególnych gazów; tak np. potrzebna do wyładowania iskrowego różnica potencjałów na tych samych elektrodach, pozostających w tej samej od siebie odległości, jest mniej więcej dwa razy mniejsza w wodorze niż w powietrzu, w tlenie i bezwodniku węglowym jest trochę mniejsza niż w powietrzu, natomiast w azocie trochę większa niż w powietrzu.

Gdy elektrody kuliste czynnej maszyny elektrostatycznej, umieścimy odpowiednio daleko jedną od drugiej, przestaje bić między nimi iskra, mimo to wyładowanie zachodzi w tej szczególnej postaci, iż, gdy doświadczenie wykonywamy w ciemnym pokoju, nie widzimy w przestrzeni, przedzielającej kuleczki, żadnego światła, natomiast powierzchnie samych kuleczek pokryte są jakgdyby warstewką świetlną. Towarzyszy temu charakterystyczny szmer.

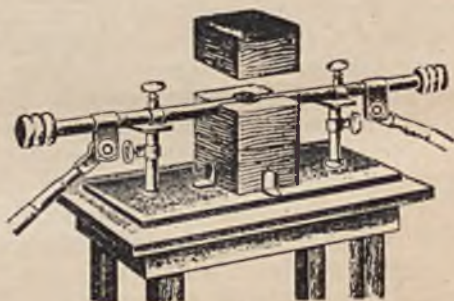
Używając jako elektrod ostrzy metalowych, stwierdzamy (przy świetle przyćmionem) szczególne objawy świetlne, towarzyszące t. zw. wypływowi elektrycznemu z tych ostrzy; gdy ostrze posiada potencjał dodatni, tworzy się na niem coś w rodzaju pędzelka świetlnego, osadzonego na świetlnym pręciku, bezpośrednio stykającym się z ostrzem; gdy potencjał ostrza jest ujemny, widzimy na końcu ostrza punkcik świetlny, który przy badaniu mikroskopowem okazuje się utworzony z dwu warstewek świetlnych, z których jedna bezpośrednio pokrywa ostrze, druga oddzielona jest od pierwszej przestrzenią ciemną. Wypływ z ostrzy w powietrzu o zwykłym ciśnieniu zachodzi, podobnie jak

iskra, przy wysokich napięciach, wynoszących co najmniej tysiące woltów i niejednakowych w przypadku naboju dodatniego i ujemnego ostrzy.

Szczególny też rodzaj prądu elektrycznego, podobny do wyładowania iskrowego, stanowi t. zw. *łuk elektryczny*, odkryty przez Davy'ego *) w r. 1821. Jeżeli dwa pręty węglowe, połączone z biegunami baterji ogniw lub dynamoszyny o sile elektromotorycznej nie mniejszej niż 39 woltów, wprowadzamy w zetknięcie i w ten sposób zamykamy prąd, a następnie oddalamy węgle nieco jeden od drugiego, prąd się nie przerywa, lecz tworzy się między rozżarzonymi do białości końcami węgla świecąca smuga, wyginająca się zazwyczaj łukowato pod wpływem prądu powietrza. Odległość między końcami węgla nie może przekroczyć pewnej granicy, gdyż inaczej łuk gaśnie i prąd się przerywa;



Rys. 959.



Rys. 960.

odległość ta wynosić może kilka, a nawet parę dziesiątków milimetrów, zależnie od natężenia prądu oraz rodzaju prętów węglowych. Jeżeli przed utworzeniem się łuku oba węgle mają końce zaostrome, stopniowo podczas trwania łuku węgiel dodatni zatracą ostry zarys końca, tworzy się przytem na nim wgłębienie, koniec węgla ujemnego zachowuje kształt, przyczem dostrzega się pewien przyrost tego stożka na końcu (rys. 959) — wskazuje to, iż obserwowanemu procesowi towarzyszy przenoszenie się cząsteczek węgla z dodatniej elektrody na ujemną. Sam łuk świeci względnie słabo**), węgle zaś, rozżarzone do biał-

*) Humphrey Davy (1778—1829), znakomity fizyk i chemik angielski.

**) Bywają węgle, wypełnione w części osiowej masą, zawierającą sole poszczególnych metali; wówczas łuk jest bardzo jasny i zabarwiony odpowiednio do zawartości w soli metalu.

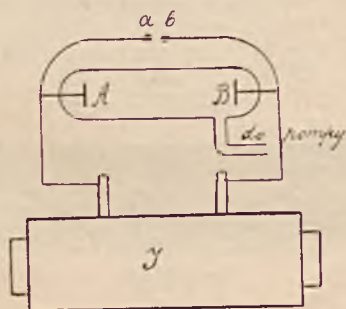
ści, świecą oślepiająco, przyczem głównie świeci węgiel dodatni (temperatura ok. 3700°), słabiej ujemny (temp. ok. 2500°).

Zjawisko łuku elektrycznego zostało wyzyskane, oczywiście, do celów oświetlania (lampy łukowe na ulicach, w wielkich salach, w latarniach projekcyjnych i t. d. — jest to najbardziej ekonomiczne dotychczas światło ze wszystkich źródeł, gdzie wyzyskane jest zjawisko żarzenia się; dziś wszakże konkurują już z lampami łukowymi żarówki-półwałówki. Poza tem zjawisko to wyzyskane również zostało do budowy pieców elektrycznych, przeznaczonych zarówno do celów technicznych jak naukowych; piec taki pomysłu chemika francuskiego Moissana widzimy na rys. 960 — w niewielkiem wydrążeniu, które jest zrobione w bloku szamotowym, otrzymujemy temperaturę ok. 3000° .

Posiadamy dziś wiele urządzeń, w których wyzyskujemy tworzenie się łuku elektrycznego. O różnych tych sposobach i zastosowaniach mówić tu nie będziemy.

370. Prądy elektryczne w gazach rozrzedzonych.

Podczas gdy gazy w zwykłym ciśnieniu atmosferycznym stawiają, jak widzimy, wielki opór przechodzeniu przez nie prądu elektrycznego, rzecz się zmienia, gdy rozbrojenie elektryczne zachodzi w gazach rozrzedzonych. Na rys. 961 widzimy schemat doświadczenia, pozwalają-



Rys. 961.

cego badać wyładowanie elektryczne w gazach o różnym ciśnieniu. *I* oznacza cewkę Ruhankorffa, której bieguny połączone są z elektrodami platynowymi A i B, wtopionymi w końce rury szklanej, z której przy połączeniu jej z pompą można usuwać zawarte w niej powietrze, ewentualnie do której wpuszczać można zamiast powietrza inne gazy. Równolegle do rury włączony jest iskiernik, którego kuleczki *a* i *b* są znacznie bliżej siebie położone, niż elektrody A i B. Gdy w rurze mamy ciśnienie atmosferyczne, rozbrojenie iskrowe cewki zachodzi jedynie między kuleczkami *a* i *b*; gdy jednak uruchomimy pompę i ciśnienie powietrza (albo innego gazu) w rurze zaczyna się zmniejszać,

to przy pewnej jego wartości przestają być iskry między a i b , natomiast wyładowanie odbywa się poprzez gaz w rurze, przyczem, zależnie od tego ciśnienia, zjawisko przebiega rozmaicie, nie tylko budząc w obserwatorze ogromne zainteresowanie, ale i dostarczając mu prawdziwie pięknych wrażeń wzrokowych *).

W pierwszym stadium widzimy w rurze iskrę w postaci świetlnej taśmy, przerzuconej od jednej elektrody do drugiej; iskra ta nie jest jednak tak jaskrawa i ostro zarysowana, ani tak ruchliwa, a zarazem nie daje takiego charakterystycznego trzasku jak w powietrzu; wiję się ona łagodnie (rys. 962a), zabarwiona na kolor liljowo-czerwony,



Rys. 962 a.

o ile rura była wypełniona powietrzem. Stopniowo taśma się prostuje, traci zupełnie swą ruchliwość, a jednocześnie grubieje na całej swej długości. Następnie ta smuga świetlna przerywa się w pobliżu katody; na całej swej długości, poczynając od anody, zachowuje ona (w powietrzu) wskazaną już barwę czerwonawą, między zaś jej końcem a katodą tworzy się niewielka przestrzeń ciemna (t. zw. ciemnia Faraday'a), a na katodzie zjawia się plama świetlna barwy niebieskawej (rys. 962b).



Rys. 962 b.

Gdy ciśnienie w rurze spada do wartości 1-3 mm słupa rtęci, smuga świetlna idąca od anody poszerza się, wypełniając cały przekrój rury (jest to t. zw. *zorca dodatnia*), ciemnia Faraday'a staje się większa, plama zaś na katodzie przybiera postać rozpostartej na niej warstewki. Tej wartości ciśnienie (1—3 mm) mamy w t. zw. rurkach Geisslera **), o których wspominaliśmy w tomie II, w ust. 251; poszczególne gazy, wypełniające rurę, *jarzą się* (nie *żarzą!*) w różnych barwach.

*) Pierwsze badania w tym kierunku przeprowadził we Francji Gassiot w r. 1854, w Niemczech zaś Plücker w r. 1858.

**) Geissler był to słynny szklarz, który sporządzał te rurki dla Plückera; Geissler wykazał przytem wiele pomysłowości i wsławił się tym wyrobem.

W ciśnieniu ok. 1 mm barwa zorzy dodatniej blednie, przechodząc w białawą i występują w niej uwarstwienia (rys. 962c), zwrócone wkleślemi stronami ku anodzie; ciemnia Faraday'a staje się większa, świetlna zaś warstewka na katodzie wyraźnie zarysowuje się jako złożona z dwu części — z warstwy niebieskawej (t. zw. *poświaty ujemnej*), oddzielonej t. zw. *ciemnią Crookes'a* *) od warstewki żółtawej, pokrywającej samą powierzchnię katody.



Rys. 962 c.

Przy dalszem zmniejszaniu ciśnienia (do 0,5 mm) poświata ujemna oddala się od katody, będąc od tej strony ostro odgraniczona, podczas gdy jej koniec przeciwny, zwrócony ku cofającym się przed nią ciemni Faraday'a i zorzy dodatniej, nie jest wyraźnie zarysowany (rys. 962d). Jednocześnie liczba uwarstwień w zorzy dodatniej zmniejsza się, same te warstwy stają się szersze, a odległość między poszczególnymi warstwami rośnie.

Gdy ciśnienie spada mniej więcej do wartości 0,1 mm, uwarstwienia zorzy dodatniej, która stopniowo ustępowała coraz bardziej przed poświatą ujemną, znikają zupełnie, poświata zaś ujemna staje się coraz bardziej nikłą i sięga niemal samej anody; ciemnia Crookes'a przytem rośnie. Wreszcie przy ciśnieniu ok. 0,02 mm znika całkowicie



Rys. 962 d.

poświata ujemna, wewnątrz rury staje się ciemne, jednocześnie zaś występuje nowe zjawisko — oto ściana rury w miejscu, które jest położone naprzeciwko katody, zaczyna fluoryzować (nasze szkło potasowe fluoryzuje w barwie zielonej, ołowiowe szkło angielskie — w barwie niebieskiej).

Dochodzimy tu do nowego etapu zjawiska, zaobserwowanego po raz pierwszy przez niemieckiego fizyka Hittorfa w r. 1869, a ze szczególnym

*) William Crookes (czyt. Kruks), słynny chemik angielski (1832—1919), poświęcił wiele czasu badaniu wyładowania elektrycznego w gazach rozrzedzonych, wzbogacając tem naszą znajomość tego zjawiska. O badaczu tym wspominaliśmy już, mówiąc o radjometrze (t. II, rys. 446).

umiłowaniem badanego przez Crookes'a, skutkiem czego rurki „próżniowe“ o tym stopniu rozrzedzenia w nich gazu nazywają zazwyczaj rurkami Crookes'a. Otóż w rurkach Crookes'a, zwanych też *rurkami katodowymi*, rzecz się ma tak, jakgdyby w tych warunkach katoda stawała się źródłem jakiegoś szczególnego *promieniowania*, zwanego *katodowym*.

Zapoznaniu się z własnościami tych *promieni katodowych* poświęćmy ustęp następny. Tutaj podamy jeszcze na zakończenie jedno doświadczenie, które potwierdzi słuszność poglądu, iż w wyładowaniu iskrowem mamy jedną z postaci prądu elektrycznego. Doświadczenia tego dokonywamy z przyrządem, przedstawionym na rys. 963. Widzi-



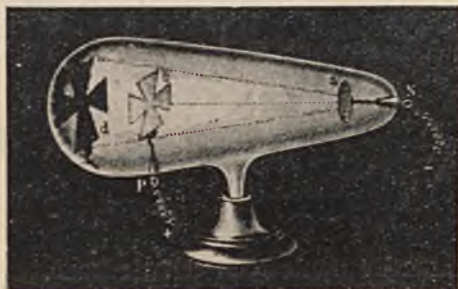
Rys. 963.

my tam elektromagnes *M*, którego rdzeń stanowi pręt żelazny *E*, wystający znacznie ponad zwoje drutu cewki *M*. Na pręt *E* nałożona jest specjalnego kształtu bańka szklana z wtopioną do niej rurką kształtu probówki. Do bańki wtopione są dwie elektrody *a* i *b*; z tych elektrod *b* zakończona jest pierścieniem metalowym, obejmującym wspomnianą rurkę kształtu probówki. Bańka zawiera powietrze rozrzedzone mniej więcej do ciśnienia 30 mm. Gdy elektrody *a* i *b* łączymy z biegunami cewki Ruhmkorffa, tworzy się między elektrodą *a* i pierścieniem, stanowiącym zakończenie elektrody *b*, iskra na podobieństwo tej, którą widzimy na rys. 962a — ma ona kształt wiotkiej świetlnej smugi fioletowo-czerwonej (wyobrażonej na rys. 963 kropkami) o nieznaczej ruchliwości, o ile elektromagnes jest nieczynny. Z chwilą, gdy puszczaemy prąd do elektromagnesu, do czego służą zaciski na podstawie przyrządu (druty od zacisków są poprowadzone pod podstawą), iskra poczyna okrążyć rurkę, w której mieści się rdzeń *E* elektromagnesu. Jeżeli zapomocą przełącznika *K* zmieniamy kierunek prądu w zwoju *M*, a co zatem idzie zmieniamy znak bieguna w rdzeniu *E*, iskra zmienia kierunek ruchu na odwrotny. Iskra w tem doświadczeniu zachowuje się tak, jak ruchomy przewodnik z prądem w polu magnetycznym, np. jak pręcik metalowy, w którym płynie prąd elektryczny w doświadczeniu, przedstawionem na rys. 823. Uzasadnia to nasze wyobrażenie o iskrze, jako o szczególnej postaci prądu elektrycznego.

371. Promienie katodowe.

Jak podaliśmy wyżej, w rurkach Crookes'a, zawierających gaz w ciśnieniu ok. 0,02 mm, te miejsca ich ścian, które przypadają naprzeciwko katody, fluoryzują. Zjawisko zachodzi tak, jakgdyby katoda była źródłem pewnego promieniowania, biegnącego od katody po liniach prostych. Za takim poglądem przemawia następujące doświadczenie. Jeżeli wewnątrz rury na drodze tych promieni, które nazywamy *katodowymi*, umieszczamy krzyż glinowy, jak na rys. 964, na fluoryzującej części ściany tworzy się cień tego krzyża — płytka glinowa tworzy tu, oczywiście, przeszkodę dla biegu tych promieni, nie dopuszczając ich do ściany rurki; doświadczenie to wykazuje prostolinjowe rozchodzenie się promieni katodowych.

Przekonywamy się dalej, iż promienie te biegną od poszczególnych punktów powierzchni katody prostopadle do tej powierzchni (pamiętać należy o możliwej, jakkolwiek nieznacznej, chropowatości tej powierzchni, co może skomplikować zjawi-



Rys. 964.



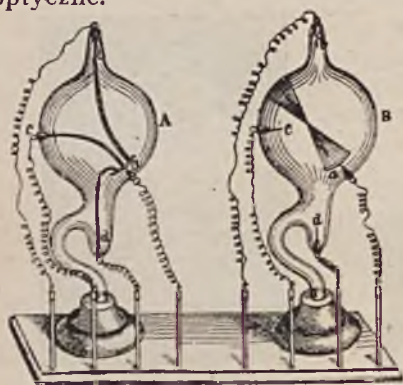
Rys. 965.

sko). Tak więc, gdy używamy katody wklęsłej, jak na rys. 965, otrzymujemy promienie katodowe zbieżne. Jeżeli zaś w miejscu, gdzie się te promienie zbiegają, umieszczamy blaszkę platynową, jak to właśnie mamy na rys. 965, blaszka ta rozżarza się do białości.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż w rurze katodowej takie czy inne położenie anody nie odgrywa roli (wyjątek mamy w przypadku, gdy katodę umieszczamy w środku rury — o tem jeszcze niżej). Przekonywa nas o tem doświadczenie z bańką tej budowy, jaką mamy na rys. 966. W bańce tej blaszka *a* tworzy katodę, elektrody zaś *b*, *c*, *d*, albo wszystkie naraz, albo każda oddzielnie łączą się z biegunem dodatnim źródła wysokiego napięcia, czyli tworzą anodę. Jeżeli w bańce mamy ciśnienie gazu ok. 30 mm (jak w rurze na rys. 962a), powstają między katodą a elektrodami dodatnimi znane nam smugi świetlne (rys. 966A).

Jeżeli jednak ciśnienie gazu w bańce nie przekracza 0,02 mm, t. j. tworzy ona rurę Crookes'a, na miejscu ściany, przypadającym naprzeciw katody, zjawia się plama fluorescencji, jaką dać winien stożek promieni katodowych, biegnących tak, jak to widzimy na rys. 966B, i jest przytem obojętne, która z elektrod *b, c, d* jest anodą, względnie czy dwie z nich lub wszystkie razem połączone są z dodatnim biegunem źródła.

Zauważmy jeszcze, że nietylko szkło fluoryzuje pod działaniem promieni katodowych; własność tę wykazują też różne minerały. Na rys. 967 mamy 2 rury katodowe, z których w jednej mieści się naprzeciwko katody motyl, w drugiej kwiat, ułożone z kawałków różnych minerałów. Z chwilą gdy rury stają się czynne, poszczególne minerały fluoryzują we właściwych im barwach, co składa się na piękne zjawisko optyczne.



Rys. 966.



Rys. 967.

Przechodzimy teraz do niezmiernie doniosłych doświadczeń, które rzucają wyraźne światło na istotę tych zagadkowych narazie dla czytelnika promieni katodowych. Doświadczenia te wykazują, że promienie katodowe ulegają działaniu sił magnetycznych i elektrycznych. Na rys. 966 mamy rurę katodową, w której naprzeciwko katody ustawiona jest płytka glinowa z wąską szparą; w ten sposób w dalszej części rury przebiega tylko wąski snop promieni katodowych, padający na ukośnie do niego ustawioną płytkę*), która jest pokryta substancją fluoryzu-



Rys. 968.

*) O ile spojrzymy z góry, budowa rury przedstawia się tak, jak widać na schematycznym rys. 968, gdzie *AB* oznacza ekran glinowy ze szparą, *BC* zaś płytkę, pokrytą substancją fluoryzującą.

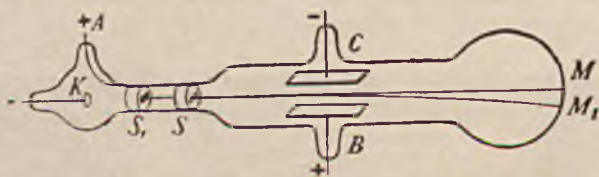
jącą — na płytce tej dzięki fluorescencji snop promieni katodowych znaczy swą drogę w postaci prostej barwnej smugi. Gdy do rury zbliżamy magnes, tak jak to przedstawione jest na rys. 969, promienie katodowe ulegają wyraźnemu odchyleniu, co również widzimy na rysunku. Gdy obrócimy magnes tak, by ten jego biegun, który na rysunku był bliżej nas, stał się dalej położonym i odwrotnie, t. j. gdy zmienimy kierunek linii pola magnetycznego, w obu razach biegnących prostopadłe do płaszczyzny rysunku, odchylenie promieni katodowych nastąpi również, ale tym razem nie ku dołowi, a ku górze.



Rys. 969.

Zauważmy, że kierunek promieni katodowych jest tu prostopadły do kierunku linii pola magnetycznego, kierunek zaś odchylenia (na dół, w górę) jest prostopadły do obu tamtych kierunków. Czy nie przypomina to nam działania, któremu podlega nabój elektryczny, poruszający się w polu magnetycznym (p. rys. 843)? Istotnie, zjawisko obserwowanego odchylenia będzie wytłumaczone, jeżeli założymy, że to, co nazywaliśmy promieniami katodowymi, jest w istocie strumieniem pędzących w murze z pewną prędkością pocisków, obdarzonych nabojami elektrycznymi. Co więcej, z kierunku odchylenia w polu magnetycznym wiadomego kierunku wnosić możemy, czy pociski te obdarzone są nabojami dodatnimi czy ujemnymi. To, że poruszają się one *od katody*, nasuwa odrazu myśl, że są to pociski elektryczne ujemne; obserwacja kierunku odchylenia ich w polu magnetycznym, z uwzględnieniem schematu na rys. 843, potwierdza taki właśnie pogląd. Jeżeli jednak promieniowanie katodowe nie jest właściwie „promieniowaniem“ w tem znaczeniu, jak zwykliśmy rozumieć to słowo z nauki o energii promienistej (t. II naszej książki), jeżeli ta niewłaściwa nazwa pozostała tylko dzięki tradycji, pochodzącej z czasów, gdy istoty tego zjawiska nie znano, w rzeczywistości zaś mamy tu do czynienia ze strumieniami naboju elektrycznych ujemnych, winniśmy przypuszczać, że te t. zw. promienie katodowe muszą również ulegać odchyleniu w polu elektrycznym. Doświadczenie potwierdza najzupełniej to przypuszczenie. Na rys. 970 mamy schematycznie wyobrażoną rurę, potrzebną do takiego doświadczenia. *K* oznacza tu katodę, *A* — anodę; *S*₁ i *S* są to dwie diafragmy z wąskimi szparami, które służą do tego, by puścić wzdłuż dalszej

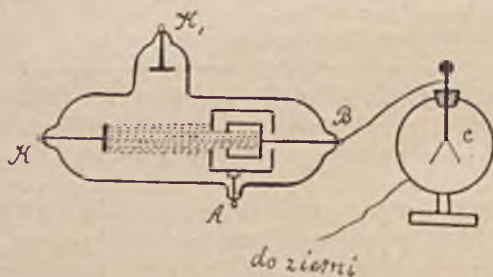
części rury wąski snop promieni katodowych, dający w M plamkę fluorescencji (lepiej nie na samym szkle, ale na umieszczonym tam specjalnie w tym celu niewielkim ekranie fluoryzującym). Snop promieni katodowych przebiega w rurze między dwiema płytami metalowymi B i C , które dają się łączyć z biegunami odpowiedniej baterji ogniw i w ten sposób ładować jedną dodatnio, druga ujemnie. O ile na płytach B i C niema różnicy potencjałów, a więc niema między nimi pola



Rys. 970.

elektrycznego, plamkę fluorescencji obserwujemy, jak już powiedzieliśmy, w M ; z chwilą jednak, gdy między płytami B i C powstaje pole elektryczne, przyczem płyta C staje się ujemnie naelektryzowaną, płyta B — naelektryzowaną dodatnio, plama fluorescencji przesuwa się ku M_1 . Jest to zgodne z przewidywaniem — strumień nabożów ujemnych jest odpychany od płyty ujemnej C , odchyła się zatem w stronę płyty B .

Następujące doświadczenie, które wykonał współczesny fizyk francuski Perrin, w inny sposób potwierdza znakomicie, że owe t. zw. promienie katodowe niosą naboże ujemne. Umieścił on naprzeciwko katody K w rurze katodowej, wyobrażonej schematycznie na rys. 971, pu-



Rys. 971.

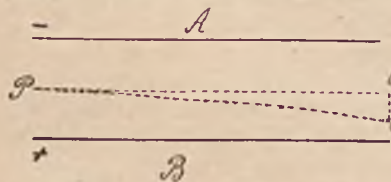
szkę Faradaya, połączoną z elektroskopem (elektrometrem) — gdy poczynaly wpadać do puszkki promienie katodowe, elektrometr wykazywał jej nabój ujemny. Znakomity współczesny fizyk angielski J. J. Thomson zmodyfikował to doświadczenie w sposób, uwidoczniiony na tymże schemacie. Użył on mianowicie jako katody płytki K_1 , a przez to skierował promienie katodowe tak, że nie mogły one trafić do puszkki, złączonej z elektrometrem. Podczas funkcjonowania rury elektrometr nie wykazywał żadnego nabożu; gdy jednak zapomocą magnesu promienie

katodowe zostały odchylone ze swej drogi tak, że się kierowały w stronę puszek, natychmiast elektrometr reagował w podany wyżej sposób.

Ograniczając się do powyższych wiadomości o promieniach katodowych, dodamy tylko jeszcze, że, jakkolwiek w doświadczeniu z cieniem krzyża (rys. 964) stwierdziliśmy, że płytki metalowe są nieprzenikliwe dla tych promieni, to jednak przekonywamy się, że przez bardzo cienkie blaszki promienie te przechodzą. Robiąc w ścianie rury Crookes'a w tem miejscu, na które padają promienie katodowe, małe okienko, przykryte bardzo cienką blaszką glinową, przyczem na szczelności rura nic nie traci i daje się w niej gaz rozrzedzić do pożądanego stopnia, jesteśmy w stanie, że tak powiemy, wypuścić promienie katodowe z rury do otaczającego powietrza. Okazuje się, że są one przez powietrze silnie pochłaniane, tak, że w odległości paru centymetrów od rury już ślad ich wszelki ginie, na tej zaś niewielkiej drodze, którą w powietrzu przebywają, wywołują one w niem zjawisko świecenia.

372. Promienie katodowe (ciąg dalszy).

Skoro zjawisko promieni katodowych daje się we wszystkich jego szczegółach tłumaczyć założeniem, że jest to strumień pędzących od katody nabołów elektrycznych ujemnych, nasuwa się pytanie, czy rzecz nie da się głębiej zbadać i czy nie jest możliwem dowiedzieć się, jakie to mianowicie pociski lecą, jaka jest ich masa oraz nabój elektryczny, wreszcie jaka jest prędkość ich ruchu. Rozwiązanie tych zagadnień zawdzięczamy przedewszystkiem wielkiemu badaczowi angielskiemu J. J. Thomsonowi, o którym już wyżej wspominaliśmy, jakkolwiek dodać trzeba, że śladem jego kroczyło i przyczyniło się do wyświetlenia sprawy wielu jeszcze innych badaczy.



Rys. 972.



Rys. 973.

Zasadniczym punktem wyjścia w tych doświadczeniach jest zużycie zjawiska odchylenia się promieni katodowych w polu elektrycznym i magnetycznym. Wyobraźmy sobie, że między metalowymi płytkami A i B (rys. 972) przebiega jeden z pocisków elektrycznych, stanowiących strumień katodowy, po drodze PQ, o ile między płytkami niema pola elektrycznego. Jeżeli jednak płytka B posiada potencjał dodatni, płytka A — ujemny, drogą pocisku nie będzie już PQ, jeno krzywa PQ'. Zjawisko to przypomina ruch pocisku w polu grawitacyjnym; jeżeli rzucamy np. kamień w kierunku poziomym MN (rys. 973), za

chowalby on ten kierunek, gdyby nań nie działała siła ciężkości; w rzeczywistości pozostaje on pod działaniem tej siły, skierowanej pionowo, t. j. prostopadłe do kierunku początkowej jego prędkości. Kamień zakreśla znaną krzywą balistyczną, zbliżoną do paraboli (p. t. I, ust. 44) — ten ruch po krzywej rozpatrywać możemy jako wypadkowy ruchu jednostajnego z nadaną prędkością v po linii prostej MN i ruchu jednostajnie przyspieszonego z przyspieszeniem g , skierowanego pionowo ku dołowi; jeżeli droga MN' przebyta tu jest w czasie t , na wartości odcinków $MN = a$ i $NN' = l$, napiszemy

$$a = vt; \quad l = \frac{gt^2}{2} \quad \dots \dots \dots (1)$$

Przypuśćmy, iż poruszający się taki pocisk elektryczny, z których składają się promienie katodowe, posiada masę m i nabój elektryczny ε ; przypuśćmy, że pole elektryczne między płytkami A i B (rys. 972) jest jednorodne o natężeniu F_e ; linie pola są tu skierowane prostopadłe do płytek, a zatem na nabój ε działa siła (p. ust. 284, wzór 4)

$$f = \varepsilon F_e, \quad \dots \dots \dots (2)$$

skierowana ku płytce B .

Jeżeli przez w oznaczymy przyspieszenie, nadawane przez siłę f masie m , wówczas na podstawie określenia siły

$$f = m w \quad \dots \dots \dots (3)$$

skąd z uwzględnieniem wzoru (2)

$$w = \frac{f}{m} = \frac{\varepsilon F_e}{m} \quad \dots \dots \dots (4)$$

Przypuśćmy, że czas, w którym pocisk taki przechodzi drogę PQ' , jest t . W takim razie przez analogję do wzoru (1) napiszemy, oznaczając PQ przez a , QQ' przez l , prędkość zaś pocisku przez v

$$a = vt \quad l = \frac{wt^2}{2} = \frac{\varepsilon F_e t^2}{2m} \quad \dots \dots \dots (5)$$

Rugując ze wzorów (5) t , otrzymamy

$$l = \frac{a}{v}, \quad l = \frac{\varepsilon F_e a^2}{2m v^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

i dalej

$$\frac{\varepsilon}{m v^2} = \frac{2l}{F_e a^2} \quad \dots \dots \dots (7)$$

We wzorze (6) l , a , F_e są wielkościami, podlegającymi wymierzeniu, niewiadomych zaś jest trzy: ε , m i v , albo, jeżeli za niewiadomą zechcemy uważać stosunek naboju pocisku do jego masy, t. j. $\frac{\varepsilon}{m}$, mamy tu

dwie niewiadome: $\frac{\varepsilon}{m}$ i v , t. j. ten właśnie stosunek naboju elektrycznego pocisku do jego masy i jego prędkość.

Rozpatrzmy teraz odchylenie się tegoż pocisku w polu magnetycznym, tak jak to widzieliśmy wyobrażone na rys. 969, gdzie linje pola magnetycznego są prostopadłe do płaszczyzny rysunku, siła zaś odchyłająca jest skierowana prostopadłe zarówno do kierunku ruchu promieni, jak do kierunku linii pola. Jak już zaznaczyliśmy przy rozważaniu tamtego doświadczenia, zjawisko zachodzi zgodnie ze schematem (rys. 843), wyobrażającym zasadniczą regułę działań elektrodynamicznych. Mamy tutaj prąd elektryczny konwekcyjny — strumień pędzących nabożów elektrycznych. Przypuśćmy, iż na długości jednego centymetra tego strumienia mieści się n takich pocisków elektrycznych; jeżeli prędkość ich jest v (wyrażona w $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$), to w ciągu sekundy przebiega przez dowolny przekrój, pomyślany gdziekolwiek prostopadłe do strumienia tych nabożów, nabój elektryczny $n \cdot v \cdot \varepsilon$, gdzie przez ε oznaczamy, jak wyżej, nabój każdego takiego pocisku; innymi słowy mamy tu prąd elektryczny o natężeniu

$$i = n \cdot v \cdot \varepsilon \dots \dots \dots (8)$$

Rozważmy odcinek tego prądu długości $= l$; siła elektrodynamiczna, której działaniu ten element prądu podlega, jest skierowana prostopadłe do kierunku prądu i ma wartość (p. ust. 358 wzór 5)

$$i \cdot l \cdot F_m = l \cdot F_m \cdot n \cdot v \cdot \varepsilon, \dots \dots \dots (9)$$

gdzie F_m oznacza natężenie zastosowanego pola magnetycznego.

Jeżeli założymy, że $l = 1 \text{ cm}$, to siła ta będzie

$$F_m n v \varepsilon \dots \dots \dots (10)$$

a zatem każdy pocisk, których mamy tu n w rozważanym elemencie prądu, podlega działaniu siły

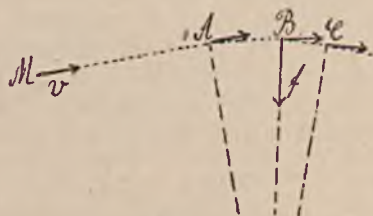
$$f = \frac{F_m n v \varepsilon}{n} = F_m v \varepsilon \dots \dots \dots (11)$$

Przypomnijmy sobie teraz, czegośmy się nauczyli w tomie I (ust. 46 i 50) o działaniu sił, działających na poruszające się ciała w kierunku, prostopadłym do ruchu tych ciał. Siła taka, zwana do-

środkową, warunkuje ruch kołowy tego ciała z przyspieszeniem, skierowanym do środka tego koła; wartość przyspieszenia dośrodkowego wynosi

$$w_n = \frac{v^2}{r}, \dots \dots \dots (12)$$

gdzie v oznacza prędkość ruchu rozważanego ciała — w danym razie rozważanego pocisku elektrycznego, r zaś promień koła, po którym to ciało się porusza — w danym razie promień łuku kołowego *), który zarysowuje się na ekranie fluoryzującym jako droga odchylonych z początkowej swej drogi pocisków elektrycznych (rys. 974). Oznaczając, jak



Rys. 974.

wyżej, przez m masę poszczególnego z pocisków elektrycznych, które tworzą strumień katodowy, napiszemy na wartość siły zgodnie z 2 zasadą Newtona

$$f = m \cdot w_n, \dots \dots \dots (13)$$

czyli z uwzględnieniem (11) i (12)

$$F_m v \varepsilon = \frac{m v^2}{r},$$

po podzieleniu zaś obu części równania przez v

$$F_m \varepsilon = \frac{m v}{r}, \dots \dots \dots (14)$$

*) Czytelnik winien dobrze pomyśleć i zrozumieć, że w przypadku odchylenia poruszających się cząsteczek strumienia katodowego w polu elektrycznym siła, działająca na poszczególną cząsteczkę, ma kierunek stały, prostopadły do powierzchni płyt naelektryzowanych, między którymi cząsteczka się porusza; podobnie ma kierunek, dający się uważać za stały na niewielkiej przestrzeni w danym miejscu, siła grawitacyjna, działająca na ciało rzucone. Stąd analogja, stąd też tor paraboliczny cząsteczki. Co innego w przypadku odchylenia w polu magnetycznym: siła odchylająca zawsze jest skierowana prostopadle do linii pola magnetycznego i do kierunku ruchu cząsteczki, który to kierunek wciąż się zmienia od chwili, gdy cząsteczka wpała w obręb pola magnetycznego (w punkcie A jej toru na rys. 974); stąd ruch po kole i działanie tej siły, jako dośrodkowej, skierowanej ku środkowi tego koła, które jest torem ruchu, jak to jest zaznaczone na rys. 974.

skąd

$$\frac{\varepsilon}{mv} = \frac{1}{F_m r} \dots \dots \dots (15)$$

Otrzymujemy więc znowu równanie, w którym F_m (natężenie stosowanego pola magnetycznego) może być wyznaczone, a także znalezione r z wymierzenia krzywizny drogi odchylonych promieni katodowych. Pozostają znów niewiadome ε , m i v . Otóż, biorąc za niewiadome wspomniane wyżej stosunek $\frac{\varepsilon}{m}$ oraz v , jesteśmy w posiadaniu 2 równań (7) i (15), z których te niewiadome mogą być znalezione.

Poprzestaliśmy na podaniu zasadniczych myśli tego niezmiernie doniosłego badania. Wykonanie pomiarów, z tem związanych, a następnie rozwiązanie tych równań prowadzi nas do niezmiernie ciekawych wniosków.

Jeżeli chodzi o prędkość tych pędzących cząsteczek, wartości wypadają rozmaite, zależnie od panującego w rurze ciśnienia i od różnicy potencjałów na jej elektrodach. W rurach tego rodzaju, o jakich mowa była dotychczas, prędkość ta wynosi kilkadziesiąt tysięcy kilometrów na sekundę, w pewnych razach dochodzi do $180000 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$, t. j. blisko $\frac{2}{3}$

wartości prędkości światła *). Pytanie teraz, czem są te pociski, pędzące z taką olbrzymią prędkością? Odpowiedź na to daje nam druga wiel-

kość, znaleziona z opisanych pomiarów, a mianowicie stosunek $\frac{\varepsilon}{m}$, t. j. stosunek naboju każdego z tych pocisków do jego masy. Otóż okazuje się, że stosunek ten otrzymuje się zawsze ten sam, przy tej samej wartości prędkości v , niezależnie od tego, jakim gazem została wypełniona rura. Ta niezależność stosunku $\frac{\varepsilon}{m}$ od rodzaju gazu, zawartego w rurze, wskazuje, że cząsteczkami temi nie są cząsteczki gazu, chyba że należałoby zrobić całkiem nieuzasadnione przypuszczenie, że nabój tych cząsteczek wzrasta proporcjonalnie do ich masy. Raczej należałoby przypuszczać, że wchodzące tu w grę pociski są czemś takim, co jest zawarte w każdej znanej nam materji i w określonych warunkach z tej materji się wydostaje.

Przypomnijmy sobie, że przy rozważaniu zjawiska elektrolizy doszliśmy do pewnego obrazu, przy którego pomocy zdołaliśmy wytluma-

*) Jeżeli rura katodowa zasilana jest machiną elektrostatyczną o stałej prędkości obrotu, różnica potencjałów na elektrodach rury jest wielkością zupełnie określoną. Jeżeli rurę zasila cewka indukcyjna, to różnica potencjałów nie jest stała (p. rys. 950); otrzymujemy wtedy w rurze promienie katodowe o różnej prędkości tworzących je cząsteczek — w polu magnetycznym, a także elektrycznym, te cząsteczki o różnych prędkościach ulegają różnemu odchyleniu, — cząsteczki o mniejszej prędkości odchylają się więcej, pędzsze mniej i otrzymujemy zjawisko swojego rodzaju rozszczenia — powstaje swojego rodzaju widmo (porówn. zjawisko rozszczenia światła).

czyć sobie to zjawisko, a badania szczegółowe wykazały, że obraz ten nie jest jedynie dobrze zbudowaną fantazją, ale odpowiada istotnemu przebiegowi zjawiska. Poznaliśmy się tam mianowicie ze zjawiskiem jonizacji i z wędrowką jonów, przyczem przez jony określiliśmy atomy, względnie ugrupowania atomów, obdarzone nabojami elektrycznymi. Doszliśmy przytem do poznania elementarnego naboju elektrycznego oraz jonów jedno-, dwu- i wielowartościowych, obdarzonych odpowiednio pojedynczym nabojem elementarnym, podwójnym i t. d. Podaliśmy tam również rachunek, pozwalający na znalezienie tego naboju elementarnego, punktem zaś wyjścia do tego obliczenia było znalezienie t. zw. stałej Faraday'a, t. j. naboju (96494 kulombów = $28,95 \cdot 10^{13}$ jednostek el. st.), oddawanego elektrodzie woltametriu przy wydzielaniu się na niej takiej liczby gramów tej czy innej substancji, ile wynosi jej równoważnik chemiczny. Dla wodoru np. nabój ten wydziela się wraz z masą $1,008$ gr. Cały ten nabój $28,95 \cdot 10^{13}$ jedn. el. st. podzielony jest w równej mierze pomiędzy wszystkie jony, które w sumie mają masę $1,008$ gr, a zatem stosunek $\frac{e}{m}$ naboju jonu wodoru (naboju elementarnego) do jego masy, jest równy

$$\frac{28,95 \cdot 10^{13} \text{ jedn. el. st.}}{1,008 \text{ gr}} = 2,87 \cdot 10^{14} \frac{\text{jedn. el. st.}}{\text{gr}} \quad (16)$$

Pomiary stosunku $\frac{e}{m}$ dla promieni katodowych dają liczbę

$$5,3 \cdot 10^{17} \frac{\text{jedn. el. st.}}{\text{gr}}, \quad (17)$$

co jest ok. 1800 razy większe niż liczba, podana we wzorze (16).

Żeby wytłumaczyć tę różnicę, należy zrobić jedno z przypuszczeń: albo że cząsteczki katodowe, mając masy takie, jak jony wodorowe, posiadają przytem ok. 1800 razy większe naboje, a w przypadku, gdy są to masy rzędu innych jonów, mają odpowiednio jeszcze większe naboje; albo że naboje tych cząsteczek są nabojami elementarnymi, podobnie jak naboje jonów jednowartościowych, ale masy tych cząsteczek są ok. 1800 razy mniejsze od masy atomu wodoru. Zatrzymaliśmy się na tem drugim przypuszczeniu, wiążącym się doskonale z całokształtem wielu jeszcze innych zjawisk, decydując się jednocześnie na śmiałą myśl, że wbrew temu, co mówiła jeszcze parę dziesiątków lat temu chemja, a mianowicie, że atomy nie dają się dzielić, a w atomie wodoru mamy najmniejszą niepodzielną porcję materji, istnieją masy blisko 2000 razy mniejsze! Drugim śmiałym pomysłem, idącym w parze z pierwszym, było to, że cząsteczki katodowe są to te same elementarne naboje ujemne, czyli elektrony, które, wchodząc w skład wszelkiej materji (a więc i cząsteczek każdego gazu, który mamy w rurze katodowej), mogą w pewnych warunkach, że się tak wyrazimy, wyrwać się

z wiążących je tam więzów i stawać się ciałami, posiadającymi swobodę ruchów.

W ten sposób na pytanie, czemu są promienie katodowe, możemy odpowiedzieć, że są to strumienie pędzących z zawrotną, podaną wyżej prędkością elektronów. Jakikolwiek gaz mamy w rurze, elektrony, tworząc w niej te strumienie, są wszystkie jednakowe jako istotne pierwiastki, z których przy współdziałaniu nieznaney nam jeszcze tak dobrze elektryczności dodatniej, tworzą się wszystkie ciała materialne.

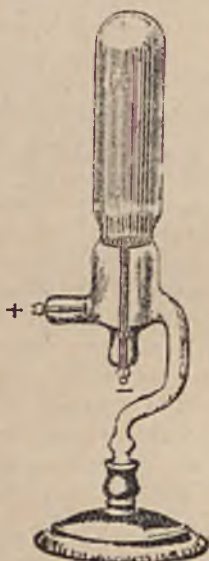
Wszakże napomknęliśmy celowo o tem, że na wartość stosunku $\frac{\epsilon}{m}$ otrzymuje się pewną określoną liczbę przy pewnej określonej prędkości cząsteczek katodowych: a jak teraz już powiemy, elektronów, tworzących strumień katodowy. Istotnie przy różnych wartościach v otrzymuje się na stosunek $\frac{\epsilon}{m}$ wielkości nieco różne. I tu trzeba znowu założyć, że albo przytem ulega zmianie ϵ albo m , wzgl. jedno i drugie. Trzymając się poglądu, który wytrzymuje doskonale wszelką krytykę, że elektron jest atomem elektrycznym, musimy przyjąć, że nabój ϵ jest wielkością określoną i stałą, a zatem pozostaje tylko założenie, że m , t. j. masa elektronu, nie jest wielkością stałą. Jak to się da pomyśleć? Otóż z trudności tej wybrniemy, zakładając, że masa elektronu, a więc wyrażona przez nią ilościowo bezwładność elektronu, posiada charakter elektromagnetyczny. W rzeczy samej, poruszający się elektron tworzy konwekcyjny prąd elektryczny, wytwarza zatem dokoła pole magnetyczne, zakłócenie zaś tego ruchu, a wraz z nim pola magnetycznego, wymaga pracy, tak jakgdyby chodziło przytem o pokonanie pewnego oporu bezwładnego, wyrażającego się tą czy inną wartością masy poruszającego się ciała. Im większa jest prędkość ruchu elektronu, tem większa winna być owa masa — istotnie dla większych v na stosunek $\frac{\epsilon}{m}$ otrzymano mniejsze liczby. Rozumowanie to poza tem rzuca ciekawe, a całkiem nowe światło na pojęcie masy wogóle — pojęcie, którego nie próbowaliśmy głębiej rozważać i analizować.

373. Promienie kanalikowe i anodowe.

Wskazywaliśmy wyżej, że w rurach katodowych nie odgrywa roli położenie anody; wspominaliśmy jednak zarazem, że twierdzenie to wymaga pewnego zastrzeżenia. Jeżeli np. katodę umieścimy w środku rury cylindrycznej w położeniu poprzecznem względem długości rury, to promienie katodowe tworzą się w takiej rurze w tej jej części, gdzie się znajduje anoda. Tak np. w rurze na rys. 975 promienie katodowe skierowane są od katody, umieszczonej w środku rury, na dół (anoda jest u dołu), i wywołują fluorescencję dolnej części rury. Jednak w rurze tej dostrzegamy inne jeszcze zjawisko. Płytką, tworzącą katodę, ma szereg otworków, jak sitko; otóż w górnej części rury obserwujemy

zjawisko świetlne tego rodzaju, jakgdyby z tych otworów przedostawały się ku górze zaznaczone na rysunku snopy światła (barwy różowawo-fioletkowej w powietrzu). Fizyk niemiecki, Goldstein, który odkrył to zjawisko, nazwał ten szczególny twór świetlny *promieniami kanalikowymi*, jako że wydostają się one z kanałów, przewierconych w katodzie. Jak się okazało i promienie kanalikowe są prądami elektrycznymi konwekcyjnymi, jednakowoż w polu magnetycznym i elektrycznym ulegają odchyleniu w stronę wręcz przeciwną, niż promienie katodowe, co wskazuje, że tworzą je *strumienie nabożów dodatnich*.

Powstało wtedy pytanie, czy aby nie są to elektrony dodatnie? Metoda badań J. J. Thomsona, zastosowana do tych promieni, dała na



Rys. 975.



Rys. 976.

to pytanie odpowiedź przeczącą. Okazało się przedewszystkiem, że prędkość ruchu tych pocisków elektrycznych dodatnich jest znacznie mniejsza, niż cząsteczek katodowych, a mianowicie jest rzędu setki $\frac{\text{km}}{\text{sek}}$

na stosunek zaś $\frac{e}{m}$ otrzymano wielkości rzędu tego samego, co dla jonu wodorowego. Promienie kanalikowe są zatem (co potwierdziło dalsze badanie) *strumieniami jonów dodatnich*, utworzonych z cząsteczek tego gazu, który jest zawarty w rurze, a nie elektronów dodatnich, które — powtarzamy raz jeszcze — nie są nam znane i o których istnieniu, jako czegoś, dającego się oddzielić od t. zw. materji, jak to się dzieje z elektronami ujemnymi, możemy poważnie wątpić.

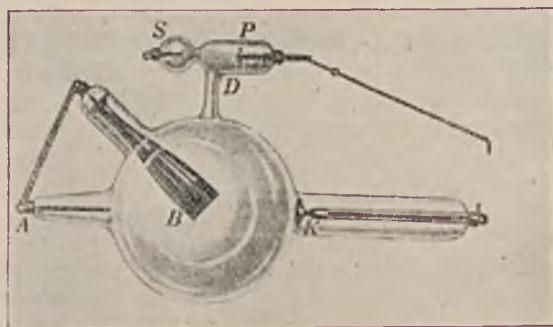
Strumienie jonów dodatnich dają się jeszcze inaczej otrzymać, a mianowicie tak, że źródłem ich jest anoda, skutkiem czego zjawisko nosi nazwę *promieni anodowych*. Na rys. 976 widzimy bańkę próżniową, w której takie promienie powstają. Katoda mieści się tu w górze, z anody wystrzela snop światła, utworzonego z tych promieni anodowych. Źródłem tych promieni, co do których metoda J. J. Thomsona stwierdza, że są to jony dodatnie, są umieszczone na końcu anody sole metali, np. jodek litu, jodek strontu, jodek sodu i t. d. Snop promieni anodowych jest barwny — w przypadku, gdy sól zawiera sód, barwa jest żółta, w przypadku litu — czerwona. Na bliższe szczegóły o tem zjawisku pozwolić sobie ze względu na brak czasu nie możemy.

374. Promienie Röntgena.

W końcu roku 1895 fizyk niemiecki, W. C. Röntgen *), podówczas profesor w Würzburgu, dokonał odkrycia, które nie tylko poruszyło świat cały swoją na owe czasy niezwykłością, ale rozpoczęło nową wielką erę w dziejach fizyki. Pracując nad promieniami katodowymi, Röntgen dostrzegł, że leżący w pobliżu rury katodowej ekran fluoryzujący (płyta, pokryta platynocyjankiem baru), świecił za każdym razem, gdy rura katodowa była czynna (doświadczenia były robione w ciemnym pokoju); co więcej, świecenie ekranu zachodziło i wtedy, gdy rura katodowa była osłonięta czarnym papierem lub tekturą. Będąc badaczem wytrawnym, który do czasu tego odkrycia był już autorem wielu prac wartościowych, Röntgen poznał odrazu, że ma do czynienia ze zjawiskiem nieznanem a ważnem. Poddął on je gruntownemu badaniu, a jak było ono gruntowne, świadczy fakt, że po ogłoszeniu wyników tych badań, mimo iż mnóstwo fizyków niezwłocznie się przeczuciło do pracy w tej dziedzinie, przez lat 20 znajomość nowego zjawiska nie była prawie posunięta naprzód w porównaniu z tem, co o tem zjawisku powiedział sam Röntgen. Później dopiero zjawily się badania, które odkryły olbrzymiej doniosłości nowe szczegóły w zjawisku, podane do naszej wiadomości przez Röntgena. Odkrycie Röntgena odsłoniło przed nami fakt, że ciała, na które padają promienie katodowe i które w ten sposób hamują ruch bombardujących je elektronów, same stają się źródłem innego już promieniowania, nazwanego przez Röntgena promieniami X, zazwyczaj zaś nazywanego promieniami Röntgena. Promienie te wywołują fluorescencję niektórych ciał, działają na płytki fotograficzne i posiadają szereg innych własności, o których jeszcze będziemy mówić. Ściana rury katodowej w tem miejscu, gdzie na nią padają promienie katodowe, a więc gdzie ją bombardują elektrony, fluoryzuje czyli wysyła szczególny rodzaj promieniowania, stanowiący przypadek t. zw. jarzenia się; poza tem

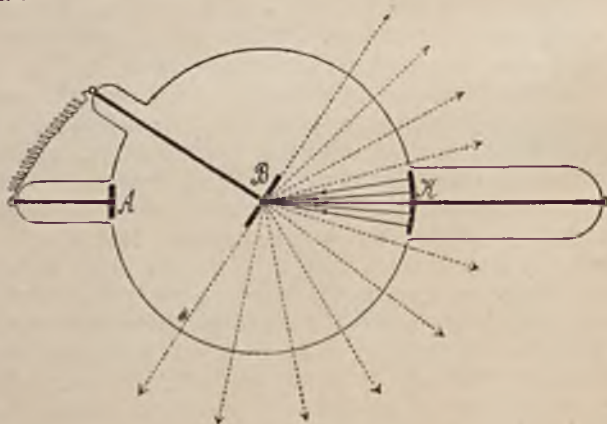
*) Urodził się w r. 1845; był profesorem fizyki najpierw w Giessen, potem w Würzburgu, wreszcie od 1899 do 1920 w Monachjum; zmarł w r. 1923. Był to pierwszy fizyk, który otrzymał nagrodę Nobla (w r. 1901).

jednak te same miejsca rury wysyłają jeszcze owe właśnie promienie X, które bezpośrednio wrażeń świetlnych nie wywołują. To, co zauważył Röntgen, a co stało się punktem wyjścia jego dociekań, było, że promienie X, wysyłane przez szkło rury katodowej, gdy padały na ekran, pokryty platocyjankiem baru, pobudzały ten ekran do fluory-



Rys. 977.

zowania. Co więcej, okazało się, że te promienie przechodzą poprzez ciała, które są nieprzezroczyste dla znanego nam dobrze promieniowania widzialnego, a więc przez papier czarny, przez tekturę, skoro przy osłonięciu rury katodowej temi ciałami, w dalszym ciągu ekran fluoryzował.



Rys. 978.

Nie możemy tu śledzić w porządku historycznym dociekań nad promieniami Röntgena i dlatego odrazu zapoznamy się z budową jednego z dzisiejszych prostszych a zarazem rozpowszechnionych typów rury rentgenowskiej. Mamy ją wyobrażoną na rys. 977, schematycznie zaś na rys. 978. K oznacza tu katodę — robią ją wklęsłą, by dać

snop promieni katodowych zbieżnych, które padają na t. zw. *antikatomę B*; antikatodę tworzy płytka węglowa, platynowa lub wolframowa, osadzona na grubym pręcie metalowym, który jako dobry przewodnik ciepła, odprowadza ciepło, tworzące się w antikatodzie pod działaniem promieni katodowych i w ten sposób chłodzi antikatodę (często takiego prostego urządzenia nie wystarcza i trzeba zastosować specjalne chłodzenie). Antikatoda ładowałaby się przez padające na nią promienie katodowe ujemnie — zapobiega temu połączenie antikatody z anodą (A). Na rys. 977 widzimy jeszcze urządzenie, oznaczone literami S, P, D — służy ono do regulowania ciśnienia gazu w rurze — szczegól ten pominiemy. Otóż, jak to zaznaczone jest na schemacie (rys. 978), pod działaniem bombardowania przez elektrony, pędzące od katody po linjach, zaznaczonych na rysunku w sposób ciągły, antikatoda staje się źródłem promieniowania Röntgena, rozchodzącego się według prostych, zaznaczonych na rys. 978 przez linje kropkowane. Promienie X przechodzą przez szkło, które jest dla nich przezroczyste, i biegną dalej w powietrzu, gdzie mogą być badane i gdzie mogą być stosowane do tego czy innego celu.

A więc przedewszystkiem, co do przezroczystości dla promieni Röntgena, poszczególne ciała mają się inaczej niż w stosunku do t. zw. promieniowania widzialnego. W przybliżeniu można powiedzieć, że ciała są tem mniej przezroczyste dla promieni Röntgena, im większa jest ich gęstość; ściślej mówiąc, nie wchodzi tu w grę gęstość, ale masa atomowa (niewłaściwie nazywana ciężarem atomowym) — im wyższą wartość posiada masa atomowa pewnej substancji, tem mniejsza jest jej przezroczystość dla promieni Röntgena. W ten sposób glin jest znacznie bardziej przezroczysty, niż żelazo; mniej przezroczystymi od żelaza są kolejno nikiel, miedź, cynk, srebro, cyna, platyna, złoto, ołów. Zresztą chodzi tu jeszcze o coś innego. Zależnie od ciśnienia gazu, panującego w rurze Röntgena, dawane przez nią promienie X są w różnym stopniu przenikliwe: rury o większej wartości ciśnienia dają promienie t. zw. *miękkie*, mało przenikliwe; przeciwnie rury o mniejszej wartości ciśnienia dają promienie *twarde*, t. j. bardziej przenikliwe. Twardość promieni X może być wyznaczona np. przez badanie, przez jakiej grubości płytki pewnego metalu (np. względnie przezroczystego glinu albo bardzo mało przezroczystego ołowiu) dane promieniowanie jeszcze przechodzi *).

Jeżeli między ekranem fluoryzującym a rurą rentgenowską umieszczamy jaki przedmiot, którego poszczególne części są niejednakowo przezroczyste dla promieni X, na ekranie zarysowuje się cień, w którym te poszczególne części dają się odróżnić. Używając zamiast ekranu płytki fotograficznej (w zamkniętej kasetce — drzewo jest bardzo przezroczyste dla promieni X), wyzyskujemy działanie promieni X na płytę i po wywołaniu mamy na niej t. zw. *rentgenogram*, t. j. obraz

*) W miarę używania rury rentgenowskiej ciśnienie w niej maleje — zachodzi to skutkiem wchłaniania gazu przez ściany rury, przez co rura staje się „twardsza”. Część S, P, D rury (rys. 977) służy właśnie do „zmiękzania” rury.

cieniowany sfotografowanego przedmiotu — w obrazie tym rozróżniamy poszczególne części niejednakowo przezroczyste dla promieni X. Np. na rys. 979 mamy rentgenogram kilku palców ręki ludzkiej — ślady części mięsistych ledwie są widoczne, podczas gdy kości dają bardzo ostro zarysowane cienie; rys. 980 wyjaśnia, jak dokonywa się zdjęcia rentgenowskiego — rurę zasila cewka Ruhmkorffa; źródło prądu do cewki jest na rysunku pominięte, zaznaczony jest jedynie przerywacz Wehnelta (W).

Promienie Röntgena pozwoliły nam zajrzeć w głąb ciała człowieka żyjącego (fakt ten głównie był powodem wielkiego poruszenia, jakie wywołało odkrycie zaraz po jego ogłoszeniu); stosując właściwej twardości promienie w połączeniu z odpowiednimi zabiegami, jesteśmy w stanie badać przy pomocy promieni Röntgena funkcjonowanie poszczególnych żywych organów, wynajdywać w nich ciała obce lub



Rys. 979.



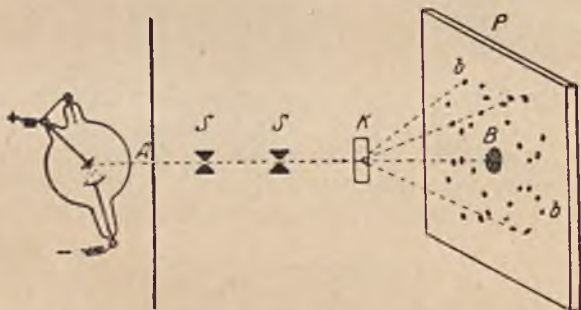
Rys. 980.

nowotwory — ba, dokonywać nawet zdjęć rentgenowskich kinematograficznych — np. ruchów serca człowieka. Działanie szczególne, jakie promienie X wywierają na tkankę żywą, pozwoliło zastosować je do leczenia chorób przedtem nieuleczalnych. Promienie X pozwoliły rozejrzeć się w strukturze najrozmaitszych substancyj, pomogły rozróżniać substancje prawdziwe od fałszowanych, a stąd olbrzymie ich znaczenie dla techniki i przemysłu. Poza tem jednak praktycznem zastosowaniem, jakie znalazły, odegrały one jeszcze większą rolę naukową, rozświetlając w znacznej mierze zagadkę budowy materji — jedną z tych zagadek, które od czasu, gdy człowiek zaczął myśleć, najbardziej go pociągały.

375. Promienie Röntgena (ciąg dalszy).

Promienie Röntgena nie ulegają odchyleniu ani w polu elektrycznym, ani w magnetycznym. Dowodzi to, że promienie te nie są elektrycznymi prądami konwekcyjnymi jak promienie katodowe, anodowe lub kanalikowe. Czemu są w takim razie? Sam Röntgen przypuszczał odrazu, że jest to promieniowanie tego rodzaju, co światło, a nie mogąc otrzymać w zwykły sposób z temi promieniami zjawisk odbicia i załamania, zrobił przypuszczenie, że mogą to być promienie o znacznie krótszej fali, co nadaje im pewne swoiste cechy. W r. 1912 fizyk niemiecki Laue zaprojektował doświadczenie, które powiodło się znakomicie i które wykazało, że ta dawna myśl Röntgena była istotnie słuszna *).

Laue rozumował w sposób następujący: jeżeli promienie Röntgena są falami tego rodzaju, co fale energii promienistej, tylko mniejszej długości; jeżeli przytem długości te są znacznie np. tysiące razy krótsze od najkrótszych znanych nam fal promieniowania nadfioletowego, to długości tych fal rentgenowskich są zbliżone co do rzędu wielkości do



Rys. 981.

odległości międzycząsteczkowych w ciałach. Przypuśćmy więc, że mamy ciało o prawidłowej budowie, gdzie cząsteczki są rozmieszczone w pewien prawidłowy sposób — a według wszelkiego prawdopodobieństwa muszą być tak zbudowane kryształy — to płytki z takich substancyj winny być dla bardzo krótkich fal (rzędu odległości międzycząsteczkowych) czemś podobnym, jak siatki dyfrakcyjne dla fal świetlnych. O ile więc z osłoniętej płytki ołowianej rury Röntgena (rys. 981) puścimy snop promieni X przez wąską szparę A a potem jeszcze przez dwie diafragmy, zrobione w ołowiu (S, S), to snop ten, przechodząc przez płytkę krystaliczną K i padając na płytkę fotograficzną P, da ślad (po wywołaniu płytki fotograficznej) w postaci ciemnej plamy B; wszakże, jeżeli założenie jest słuszne i układ cząsteczek w kryształach z przestrzeniami międzycząsteczkowymi tworzy coś w rodzaju siatki dyfrakcyjnej dla promieni X, to promienie te ulegną ugięciu (dyfrakcji) i oprócz pla-

*) Za doświadczenie to Laue otrzymał nagrodę Nobla.

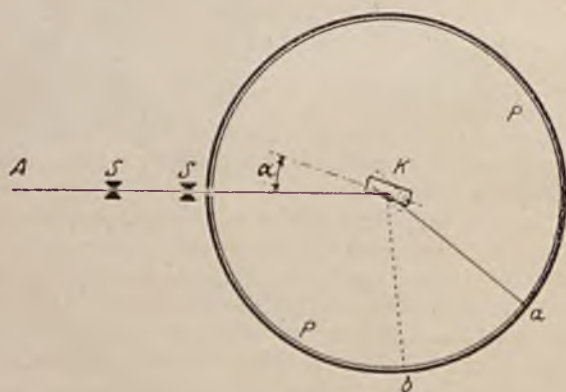
my B powstanie na płytce fotograficznej szereg rozmieszczonych odpowiednio względem B plamek wyższych rzędów, podobnie jak to się dzieje przy uginaniu się światła (ust. 250 w tom. II; w przypadku siatki dyfrakcyjnej po obu stronach prążka centralnego mamy prążki wyższych rzędów, które są utworzone przez promienie ugięte). Jak już powiedzieliśmy, doświadczenie się powiodło, a na rys. 982 widzimy obraz, otrzymany na płytce fotograficznej, całkowicie zgodny z przewidywaniem.



Rys. 982.

Doświadczenie Lauego nie tylko rozstrzyga o tem, czym są promienie Röntgena, ale daje także podstawę z jednej strony do mierzenia ich długości fal (podobnie mierzymy długości fal świetlnych ze zjawiska uginania się), z drugiej strony do badania struktury kryształów, gdyż taki lub inny obraz dyfrakcyjny, otrzymany przy pomocy promieni Röntgena, wyjaśnia nam, jak są w tych czy innych kryształach rozmieszczone ich cząsteczki.

Na tem jednak nie koniec. Rozważanie odbijania się fal tak krótkich, o jakich teraz mowa, od płytek krystalicznych o prawidłowem rozmieszczeniu w nich cząsteczek, ułożonych warstwami, prowadzi do cieka-



Rys. 983.

wego wniosku, którego uzasadnienie pominiemy, a mianowicie, że fale poszczególnych długości odbijają się od takich płytek tylko wtedy, gdy padają pod odpowiednimi kątami.

Wystawmy sobie, że mamy zamknięte metalowe naczynie cylindryczne, którego przekrój widzimy na rys. 983. Wyobraźmy sobie, że

wewnątrz pudła na jego obwodzie umieszczony jest papier fotograficzny (PP), w środku zaś pudła mieści się pionowo ustawiona płytką krystaliczna K, dająca się obracać dokoła osi, przechodzącej przez środek pudła prostopadle do jego podstawy. W ścianie pudła mamy wąską szparę, przez którą kierujemy w stronę płytki krystalicznej wąski snop promieni Röntgena, przepuszczony przez kilka (na rys. dwie) diafragm z ołowiu. Gdybyśmy mieli w miejscu płytki zwykle zwierciadło, na które padałby snop zwykłego światła, otrzymalibyśmy przy każdym kącie padania (przy obracaniu zwierciadła dokoła osi) odpowiednio skierowany snop promieni odbitych. Gdy jednak promienie Röntgena padają na płytkę krystaliczną, grającą rolę zwierciadła, to nie przy każdym położeniu płytki, gdy będziemy ją obracać, zajdzie odbicie, a tylko wtedy, gdy kąt padania będzie we właściwy sposób od-



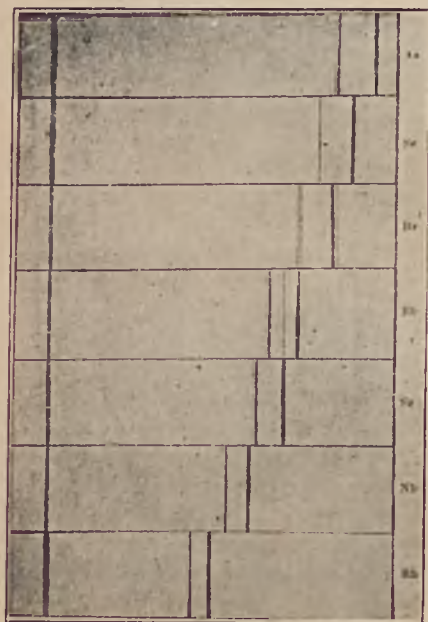
Rys. 984.

powiadał długości fali padającej. Gdyby więc promienie X. wchodzące do wnętrza naszego przyrządu, były jednorodne, t. j. polegałyby na rozchodzeniu się fal jednej tylko określonej długości, to tylko przy określonym położeniu płytki otrzymałoby się odbicie, np. promienie zostałyby skierowane ku α , gdzie działanie fotograficzne tych promieni zaznaczyłoby na papierze lub błonie fotograficznej odpowiedni prążek. Jeżeli jednak to promieniowanie jest niejednorodne, to otrzymamy kilka prążków na papierze (błonie) przy szeregu odpowiednich położzeń płytki krystalicznej. W ten sposób jesteśmy w stanie *rozszcześcić* promieniowanie X, tak jak to czyniliśmy ze światłem lub promieniami podczerwonymi i nadfioletowymi; przyrząd, wyobrażony na rys. 983, jest zatem *spektrografem* dla promieni X — przy jego pomocy otrzymać możemy *widmo rentgenowskie*. Dodajmy dla ścisłości, że widmo tu otrzymane jest tego typu, co widmo dyfrakcyjne, z którym zapoznaliśmy się w ust. 250 tomu II; obracając płytkę krystaliczną, otrzymujemy, podobnie jak tam, widmo 1-go rzędu, potem 2-go i t. d.

Nie wdając się w bliższe szczegóły, zobaczymy, do jakich się tą drogą dochodzi wyników.

Oto przedewszystkiem przyjrzyjmy się, jak wygląda odfotografowane widmo rentgenowskie. Mamy taką fotografię na rys. 984. Widzimy

tam szeroki ciemny pas, poza tem jeszcze kilka wyraźnie zarysowanych linii. Szeroki pas ciemny, to jakgdyby widmo ciągłe — rura rentgenowska wysyła zatem chaos najrozmaitszych drgań (coś, czemu w dziedzinie światła odpowiada światło białe, p. t. II, ust. 237); spektograf rozszczepia te fale i wydobywa z chaosu różnej długości fale, ułożone już w pewnym porządku. Poza tem jednak widzimy tu wyraźnie odrębne linie. Jak się okazuje, linie te są charakterystyczne dla materiału antykathody — linie te są inaczey w widmie położone przy antykathodzie platynowej (rys. 982 odpowiada właśnie temu przypadkowi), inaczey przy antykathodzie wolframowej i t. d. A zatem w dziedzinie widma rentgenowskiego istnieją charakterystyczne układy linii, po których można rozpoznawać materiał antykathody, podobnie jak możliwe jest z widma linjowego, z którym zapoznaliśmy się w nauce o świetle, rozpoznawać poszczególne pierwiastki. Wreszcie jedno jeszcze i to niezmiernie ważne *). Oto te charakterystyczne widma rentgenowskie składają się z tak zw. serj (p. t. II, ust. 252), które są dla poszczególnych pierwiastków zupełnie analogiczne, zajmują jedynie inne miejsca w widmie. Dla przykładu przytaczamy zasadniczą serję (zwaną serją K; są jeszcze inne serje, oznaczane literami L, M, N) widma charakterystycznego (rys. 985) dla szeregu pierwiastków. Widzimy, jak te serje są podobnie zbudowane, tylko (na rys. 985 mamy na osi odciętych odmierzone długości fali) im dalej położony jest pierwiastek w tablicy Mendelejewa, tem krótszych fal zespół on wysyła. Udało się w ten sposób ustalić niesłychanie prostą zależność pomiędzy charakterystycznymi widmami poszczególnych pierwiastków a ich miejscami w tablicy perjodycznego układu pierwiastków i dziś badanie widm rentgenowskich informuje nas jeszcze dokładniej o indywidualnych cechach poszczególnych ciał,



Rys. 985.

aniżeli była w stanie to uczynić przedtem już nam znana analiza widmowa. Co więcej, odkrycie widm rentgenowskich i zrozumienie ich budowy przyczyniły się w ogromnym stopniu do pomyślnych prób rozwikłania zagadki budowy atomów.

*) Doniosły ten szczegół związany jest z pracami młodziutkiego, genialnego fizyka angielskiego G. I. Moseley'a, który jako żołnierz zginął w wojnie światowej.

Na zakończenie powiemy, że wymierzanie długości fal promieni Röntgena prowadzi do wniosku, że są one tysiące, dziesiątki i setki tysięcy razy krótsze niż najkrótsze fale świetlne *).

376. Jonizacja gazów.

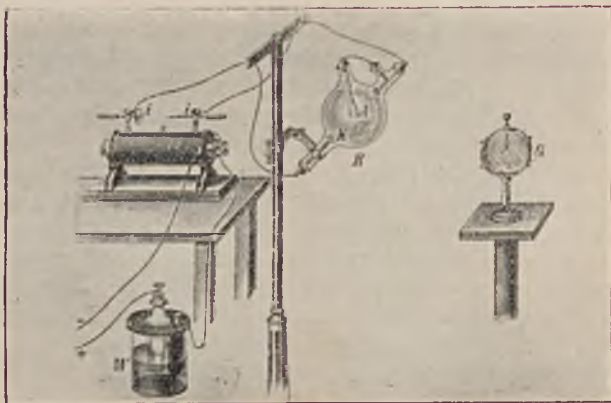
Jeżeli naelektryzujemy i zaopatrzymy w dobrą izolację elektroskop, będzie on z biegiem czasu mimo tę dobrą izolację stopniowo się wyładowywał. Zwracaliśmy już w swoim czasie uwagę, że nie chodzi tu wyłącznie o to, iż to izolowanie naelektryzowanych części elektroskopu od innych jego części nie może być nigdy doskonałe; wchodzi tu w grę jeszcze fakt, że otaczające powietrze, jakkolwiek gazy są naogół dobrymi izolatorami, zawsze jest potrosze przewodnikiem i tą drogą naboż z elektroskopu ucieka. W pewnych przypadkach to przewodnictwo powietrza staje się wyjątkowo znaczne, a między innymi przypadek ten daje się osiągnąć przy pomocy promieni Röntgena. Ustawmy np. w pobliżu rury Röntgena naelektryzowany elektroskop, jak to widzimy na rys. 986. Dopóki rura jest nieczynna, nie dostrzegamy w pewnym niedługim czasie, np. kilkunastu minut, by listki elektroskopu spadały; wystarczy jednak uruchomić cewkę, która zasila rurę Röntgena, a listki elektroskopu w ciągu paru sekund opadają całkowicie.

Po zapoznaniu się w rozdziale o elektrolizie ze zjawiskiem jonizacji, możemy zrozumieć tłumaczenie, jakie jest dawane rozpatrywanemu obecnie zjawisku. Oto powiadamy, a słusność twierdzenia naszego można sprawdzić przez cały szereg odpowiednio przeprowadzonych doświadczeń, że w pewnych warunkach gazy się *jonizują*, t. j. niektóre cząsteczki, początkowo elektrycznie obojętne, tracą zawarte w nich elektrony, a przez to stają się jonami dodatnimi, inne znów obojętne, uchwyciwszy te elektrony, stają się jonami ujemnymi. Jony dodatnie po połączeniu się z elektronami stają się obojętnymi; możliwe jest również łączenie się cząsteczek w ugrupowania, czy to mające naboże, a zatem będące jonami o bardziej złożonej budowie, czy też tworami elektrycznie obojętnymi. Powtarzamy, że obraz nakreślony daje się sprawdzić doświadczalnie w różnych szczegółach; wszystkiego tego omawiać nie będziemy, poprzestając na niektórych tylko wskazówkach.

Otóż znamy cały szereg czynników t. zw. jonizujących. Jednym z nich są promienie Röntgena. Fale promieniowania rentgenowskie-

*) Wyjaśniliśmy więc, że podczas gdy na antykatołę padają pędzące ku niej elektrony, z miejsc, gdzie dalszy ruch ich jest hamowany, rozbiegają się we wszystkie strony fale (niezmiernie krótkie) tegoż rodzaju co fale świetlne — fale te stanowią istotę promieniowania X. Wyobraźmy sobie dla porównania, że rzucamy na powierzchnię stawu raz po raz garść kamyczków — każde miejsce, w które wpada poszczególny kamyczek do wody, staje się źródłem fali, rozbiegającej się na wszystkie strony po powierzchni wody. Niech czytelnik nie bierze tego porównania zbyt dosłownie. Przytaczamy je dla obrazowego przedstawienia tego przekształcenia energii, niesionej przez rój pędzących elektronów w energię swobodnego ruchu falowego.

go, przebiegając przez gaz, potrafią wytrącać z jego cząsteczek elektryony, a w ten sposób warunkują jonizację gazu. Jeżeli dokoła elektroskopu, naelektryzowanego np. dodatnio (rys. 986), tworzy się wiele jonów, rozpoczyna się ich ruch w polu elektrycznym, otaczającym elektroskop, — jony ujemne podążają ku elektroskopowi i oddają mu te elektrony, których mają ponad normę, odpowiadającą stanowi obojętnemu,



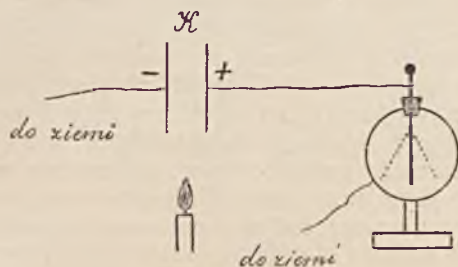
Rys. 986.

przez co same stają się obojętne, zmniejszają zaś stopniowo dodatni nałóg elektroskopu. Czytelnik z łatwością nakreśli sobie obraz tego, w jaki sposób wyładowuje się w tych samych warunkach elektroskop (względnie inne ciało), naelektryzowany ujemnie. Gdy czynnik jonizujący przestaje działać, wytworzone w większej liczbie jony znikają — następuje zubożenie się spotykających się ze sobą jonów dodatnich i ujemnych i gaz powraca powoli do stanu zwykłego. W małej liczbie natomiast jony zawsze się znajdują w powietrzu (dlatego, stanie się to zrozumiałem z dalszego ciągu wykładu); stąd powolne wyładowywanie się elektroskopu o najlepszej nawet izolacji.

Oto inne doświadczenie, które wykazuje, że zjawisko jonizacji pozostaje w ścisłym związku z wyładowaniem iskrowym. Utrzymując ruch maszyny elektrostatycznej w pewnej określonej prędkości, powiększamy stopniowo odległość między kuleczkami, gdzie bije iskra, by to wyładowanie iskrowe już nie zachodziło. Gdy to zostało osiągnięte, uruchomiamy znajdujące się w pobliżu urządzenie rentgenowskie, podobnie jak czyniliśmy to wyżej w stosunku do elektroskopu (rys. 986) (rura może się mieścić w odległości paru a nawet kilku metrów). W tej chwili zaczynają bić iskry między kuleczkami maszyny.

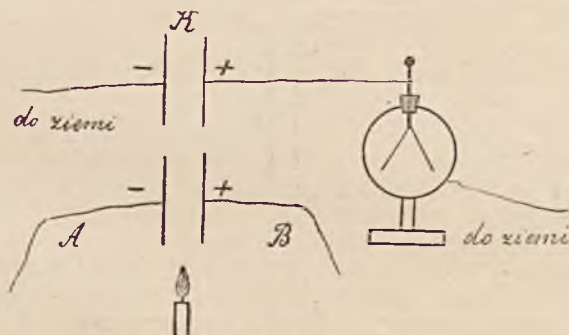
Innym czynnikiem, jonizującym gaz, jest ogrzewanie gazu do wysokiej temperatury, szczególnie jeżeli temu towarzyszy silna reakcja chemiczna. Tak np. produkty gazowe, uchodzące z płomienia, są zjonizowane. Puszczając np. te produkty spalania pomiędzy płyty nala-

dowanego kondensatora powietrznego (rys. 987), stwierdzamy, że kondensator rozbraja się — wpadając w pole elektryczne między płytami, jony dodatnie wędrują ku płycie ujemnej, ujemne ku płycie dodatniej (porówn. rys. 739). Na rzecz słuszności takiego poglądu przemawia do-



Rys. 987.

świadczenie, przedstawione schematycznie na rys. 988. Jeżeli gazowe produkty spalania, zanim wpadną pomiędzy płyty naelektryzowanego kondensatora K , przepuszczamy pomiędzy płytami dostatecznych wymiarów, połączonymi za pomocą przewodników A i B z biegunami czyn-



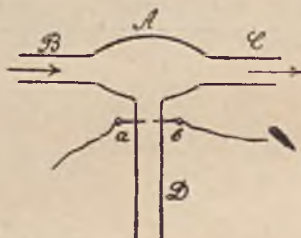
Rys. 988.

nej maszyny elektrostatycznej, kondensator się nie rozbraja — uchodzące do góry pomiędzy płytami jony zostają tu wyłapane, poddając się działaniu pola między temi płytami; pomiędzy płyty kondensatora K nie wpadają już jony, tylko cząsteczki obojętne i wobec tego rozbrojenie kondensatora nie zachodzi.

W następnym rozdziale poznamy bardzo potężny czynnik jonizujący, któremu głównie zawdzięczamy, że powietrze jest zawsze trochę zjonizowane — będziemy tam mówili o ciałach t. zw. promieniotwórczych. Tu nadmienimy jeszcze o jednym czynniku, a mianowicie o promieniach nadfioletowych. Jeżeli na iskiernik, w którym skutkiem pewnego przekroczenia odległości między kuleczkami lub ostrzami istnieje

jąca na nich różnica potencjałów nie wywołuje bicia iskry (podobnie jak w doświadczeniu, opisanem na str. 384) — jeżeli na taki iskiernik skierujemy snop promieni nadfioletowych, iskrzenie się rozpoczyna. Jako źródło promieni nadfioletowych może być przytem użyty łuk elektryczny, bardzo bogaty w te promienie, albo inna iskra elektryczna, zwłaszcza bijąca między pewnemi elektrodami, np. cynkowemi. O tem, że w tym razie chodzi o promienie nadfioletowe, przekonać się można w ten sposób, że osłonięcie źródła tych promieni płytką szklaną albo arkuszem papieru wystarcza, by zjawisko ustało, promienie nadfioletowe bowiem ulegają ogromnie pochłanianiu (nawet powietrze jest dla tych promieni mało przezroczyste, nie można więc zbyt daleko umieszczać źródła promieniowania od obserwowanego iskiernika).

Zasługującym na uwagę jest doświadczenie następujące (rys. 989). Niewielki zbiornik szklany *A* połączony jest z 3 rurkami *B*, *C*, *D*; rurkę *B* łączymy rurką kauczukową z kociołkiem, w którym wrze woda i strumień pary przebiega przez zbiornik, uchodząc rurką *C*; strumień pary porywa przytem powietrze, dopływające od dołu przez rurkę *D*. W rurce *D* mamy wtopione dwa druciki platynowe *a* i *b*, które łączymy z bie-



Rys. 989.

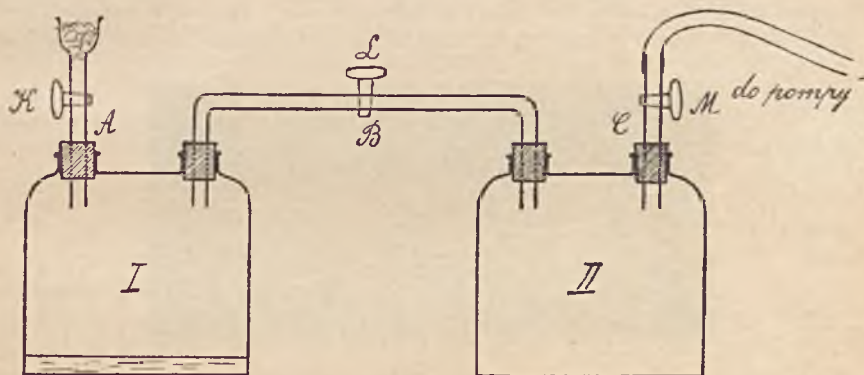
gunami cewki Ruhmkorffa. Gdy puszczaemy strumień pary, z początku ściany rurki i naczynia *A* mętnieją skutkiem skraplania się na nich cieczy, potem jednak ogrzewają się i stają się przezroczyste, strumień zaś pary, uchodzącej z *C*, daje zjawisko kondensacji zaledwie w pewnej odległości od wylotu rury. Gdy jednak cewka zaczyna funkcjonować i między drucikami *a* i *b* zaczyna się iskrzenie, zjawisko się zmienia — z samego wylotu rury *C* bucha biały strumień skondensowanej pary. Ponieważ iskra, jak już wiemy, jest czynnikiem jonizującym, zachodzi, oczywiście, jakiś związek między tworzeniem się jonów w większej ilości a skraplaniem się pary, która się w tem miejscu jonizacji znajduje.

Skraplanie się pary tuż u wylotu rurki *C* może być osiągnięte jeszcze inaczej — a mianowicie przez wdmuchiwanie do strumienia pary w tem miejscu jakiegokolwiek drobnutkiego pyłu, albo — tym razem w grę wchodzi znowu jonizacja — przez oświetlenie wyobrażonego na rys. 989 przyrządu promieniami Röntgena.

Wnosimy z tego, że zjawisku skraplania się pary sprzyja obecność pyłków lub jonów.

W bardziej poprawny sposób rzeczy te mogą być badane, jak następuje (rys. 990).

Bierzemy dwa zbiorniki, z których każdy ma 2 szyjki ze wstawionymi do nich rurkami szklanymi *A*, *B*, *C*. Zbiorniki połączone są ze sobą rurką, na której kurek *L* służy do przerywania, wzgl. ustalania komunikacji między zbiornikami. Rurka *A*, zakończona u góry niewielkiem rozszerzeniem, gdzie tkwi korek z waty, zaopatrzona jest również w kurek *K*. Zbiornik drugi połączony jest z pompą, rurka zaś, prowadząca do pompy, posiada również kurek *M* *). Na dnie zbiornika I mamy warstwę wody, a zatem ponad jej powierzchnią mamy parę nasyconą. Zamykamy kurki *K* i *L*, rozrzedzamy zapomocą pompy powietrze **)



Rys. 990.

w zbiorniku II, poczem zapomocą kurka *M* odłączamy pompę. Wtedy nagle otwieramy kurek *L*: natychmiast dostrzegamy, że w zbiorniku I tworzy się mgła — po otwarciu kurka *L*, powietrze ze zbiornika I szybko podąży do zbiornika II, następuje więc nagle rozprężenie powietrza w I (rozprężenie adiabatyczne p. t. I, ust. 187), obniżenie się temperatury i skroplenie się pary, co daje mgłę. Robimy następnie tak: otwieramy wszystkie kurki *K*, *L*, *M* i przez dłuższy czas ssiemy pompą powietrze przez rurkę *C*; jednocześnie dopływa z zewnątrz powietrze przez rurkę *A*, gdzie tkwiący korek z waty filtruje wchodzące powietrze, tak, że w końcu mamy w zbiorniku I bardzo czyste powietrze, pozbawione wszelkich pyłków. Wtedy powtarzamy wykonane uprzednio doświadczenie i okazuje się, że mgła się w tych samych warunkach nie tworzy. Jeżeli jednak doświadczenie to będzie wtedy powtórzone, ale z jednoczesnym naświetleniem zbiornika I przez promienie *X*, powstanie znowu mgła przy rozprężeniu powietrza w I.

Pierwsza część tych prób wykazuje, że tworzeniu się kropelek rosy, które tworzą mgłę, sprzyja istnienie w powietrzu pyłków, które są tam

*) W braku rurek szklanych z kurkami użyć można do połączeń rurek kauczukowych z zaciskami.

**) Rozrzedzenie to trzeba odpowiednio dobrać i praktyka łatwo tego uczy.

zazwyczaj w dostatecznej ilości i które stają się jakgdyby zarodkami kondensowania się pary. Gdy pyłków tych niema, proces skraplania się jest utrudniony w braku tych właśnie zarodków — tę rolę pyłków przy skraplaniu się pary wykazało wyżej wdmuchiwanie pyłu do strumienia pary, wypływającej ze zbiornika A (rys. 989). Jeżeli jednak przy naświetlaniu promieniami Röntgena skraplanie się znowu następuje, to świadczy, że tworzące się przytem jony odgrywają rolę taką samą, jak owe pyłki, t. j. rolę tych zarodków kondensacji. To samo, oczywiście, tłumaczy doświadczenie, wyobrażone na rys. 989, gdy używamy jako czynnika jonizującego iskry lub promieni Röntgena.

Ustalenie tego faktu ma doniosłe znaczenie w zrozumieniu tworzenia się opadów atmosferycznych, a także w wielu innych przypadkach. Tutaj skorzystamy z niego, by wytłumaczyć pewną metodę badania



Rys. 991.

zjawisk elektrycznych, zachodzących w gazach, której pomysł zawdzięczamy współczesnemu fizykowi angielskiemu C. T. R. Wilsonowi. Zdołał on w zręczny sposób, stosując jonizację, oświetlać i fotografować powstającą mgłę w chwili tworzenia się jej poszczególnych kropelek na jonach. Tą drogą uzyskał on możliwość uwidocznienia zarówno pojedynczych jonów, jak ich kompleksów, jak wreszcie dróg, na których się rozchodzą takie czy inne działania jonizacyjne. Rys. 991 przedstawia otrzymaną w ten sposób fotografię jonizacji przez promienie Röntgena. Promienie X są tu skierowane od strony lewej ku prawej; droga ta zaznaczona jest mgielką, której szczegóły struktury są jasno widoczne. W szczegółach tych zorjentujemy się łatwiej po omówieniu jeszcze pewnych rzeczy, którym poświęcimy ustęp najbliższy.

377. Wiadomości uzupełniające o prądach elektrycznych w gazach.

Z tego, czegośmy się dowiedzieli w ustępie poprzednim, wynika, że prąd elektryczny w gazach może powstać nieinaczej, niż wtedy, gdy gaz ten jest zjonizowany. Jeżeli łączymy iskiernik z biegunami cewki czy maszyny elektrostatycznej i umieszczamy kuleczki czy ostrza, czy wreszcie ostrze i płytkę, tworzące iskiernik, w tej odległości, że przy danej róż-

nicy potencjałów może przeskoczyć w iskierniku iskra, mamy już przedtem — jak już powiedzieliśmy — zawsze pewną niewielką liczbę jonów w powietrzu. Liczba tych jonów wszakże szybko musi wzrosnąć, by zjawisko wyładowania mogło nastąpić. Zakładamy więc, a założenie to w różny sposób się potwierdza, że poruszające się z odpowiednią prędkością jony i elektrony przy spotkaniu z neutralnymi cząsteczkami, że tak powiemy, rozbijają je, tworząc z nich nowe jony. To rozbijanie polega na wytrącaniu z cząsteczek obojętnych gazów zawartych w nich elektronów, przyczem działania tego nie należy rozumieć jako procesu mechanicznego, lecz rozważać elektrycznie — zbliżający się do cząsteczki obojętnej elektron, albo jon ujemny przez odpychanie elektrostatyczne może wytrącić elektron z cząsteczki obojętnej, podobnie jak dodatni jon może uczynić to samo przez tegoż rodzaju przyciąganie. Otóż, już istniejące między biegunami iskiernika jony przy powstaniu pola elektrycznego między temi biegunami, przyczem pola o wielkim spadku potencjału (wysokie napięcie!), zaczynają się poruszać pod działaniem sił pola w odpowiednich kierunkach, przyczem szybkość tego ruchu tak prędko rośnie, że zanim nastąpi spotkanie z najbliższą cząsteczką, już jon zdobył dostateczną ilość energii, by móc być czynnikiem jonizującym. Nowoutworzone jony dołączają się do już istniejących swoim działaniem i proces ten ogarnia niezmiernie szybko coraz większą liczbę cząsteczek, mieszczących się na drodze, na której ostatecznie tworzy się iskra. Dodajmy, że procesowi jonizowania się cząsteczki, który jest swojego rodzaju wstrząsem dla tej cząsteczki, towarzyszy zakłócenie, dające początek fali energii promienistej — stąd towarzyszące temu procesowi świecenie.

W rurkach Geisslera, gdzie ciśnienie jest znacznie mniejsze od atmosferycznego, przy danej odległości między elektrodami potrzebna jest znacznie mniejsza różnica potencjałów na nich niż w powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym dla otrzymania wyładowania. W takich rurkach (p. np. rys. 962b) spadek potencjału na drodze 1 cm jest wobec tego znacznie mniejszy, ale, ponieważ w rurce gaz jest rozrzedzony, cząsteczek gazu zatem w jednakowej objętości jest odpowiednio mniej, każdy jon ma dłuższą znacznie przeciwną drogę do przebycia, zanim spotka na tej drodze inną cząsteczkę, może więc na tej dłuższej drodze pod działaniem mniejszej siły osiągnąć prędkość, potrzebną do tego, by dokonać jonizacji.

Jednakowoż w pewnych przypadkach może nie istnieć w przestrzeni między elektrodami choćby ta minimalna liczba jonów, która jest potrzebna do rozpoczęcia jonizacji na wielką skalę. To też musimy przypuścić, że do czynników jonizujących zaliczyć też należy poczęści i samo wysokie napięcie — wystarczy, by w polu takiego wysokiego napięcia utworzyło się bodaj kilka jonów, a dalszy proces rosnącej lawinowo jonizacji odbywa się tak, jak to wyżej zostało opowiedziane.

W rurze o takim stopniu rozrzedzenia, że się tworzy tam wyładowanie uwarstwione (rys. 962 c, d), proces jonizacji wygląda mniej więcej tak, że jony ujemne, znajdujące się koło katody, poruszają się z co-

raz większą prędkością, oddalając się od katody, i nabierają w pewnej odległości prędkości, potrzebnej do jonizowania, — tam, gdzie ten proces jonizacji zachodzi, tworzy się warstwa poświaty ujemnej, bardziej odległa od katody. Jony dodatnie natomiast pędzą ku katodzie i tam tworzą przez jonizację ową warstwę poświaty ujemnej, która pokrywa samą katodę. Jony ujemne, które się utworzyły w bardziej odległej od katody warstwie poświaty ujemnej, przebiec dalej muszą przez ciemnię Faraday'a, by prędkość ich wzrosła dostatecznie do możności jonizowania. Tam, gdzie się ta jonizacja rozpoczyna, zaczyna się kolumna zorzy dodatniej, albo — zależnie od warunków ciśnienia — pierwsza warstwa tej zorzy; jony w tej pierwszej warstwie utworzone znowu muszą przebiec pewną drogę, zanim nabiorą dostatecznej prędkości, by wytworzyć drugą warstwę zorzy dodatniej i t. d. Oprócz jonów poruszają się tu też elektrony, które jednak przy znacznem jeszcze względnie stłoczeniu cząsteczek gazowych, łączą się szybko z nimi, albo zobjętniając jony dodatnie, albo czyniąc obojętne cząsteczki jonami ujemnymi.

W rurach katodowych cząsteczek gazowych pozostaje już w rurze względnie niewiele, wobec tego elektrony mogą tu się już poruszać ze znaczną swobodą na długich drogach; niemniej i tu zachodzą zderzenia elektronów z cząsteczkami i wytrącanie z nich elektronów, przez co dołączają się nowe elektrony do strumienia już pędzących, a zarazem tworzą się nowe jony dodatnie, które pędzą ku katodzie i ją bombardują, a o ile katoda jest przedziurawiona i jony wpadają do tych otworów, przebiegają na drugą stronę katody, dając zjawisko promieni kanalikowych. Obecność zatem gazu w rurach jest konieczna, jeżeli ma w tych rurach zachodzić rozbrojenie elektryczne. To też, gdy ciśnienie w rurze czynimy tak małym, że praktycznie możemy przestrzeń, przez rurę ograniczoną, uważać za próżnię, wyładowanie ustaje zupełnie.

Jak już powiedzieliśmy wyżej, promienie X jonizują gaz, przez który przechodzą. Te krótkie niezmiernie fale, przebiegając w przestrzeni, gdzie się poruszają cząsteczki gazowe, rozbijają je, wytrącają z nich elektrony i w ten sposób dają początek tworzeniu się jonów. Elektrony, uczynione przez te fale swobodnymi, wybiegają z cząsteczek, w których były zawarte, z pewną prędkością i pędzą, rozbijając inne cząsteczki i jonizując gaz na swej drodze. Piękna fotografia Wilsona (rys. 991) staje się zrozumiałą, gdy powyższe weźmiemy pod uwagę — oto cały szereg zygzakowatych linii, skierowanych przeważnie poprzecznie do kierunku rozchodzenia się promieni X, to uwidocznione w ten genialny sposób drogi tych swobodnych elektronów — drogi, zaznaczone przez kropelki mgły, powstałej na jonach, które tam poruszające się elektrony bezpośrednio i pośrednio wytworzyły.

Ćwiczenia i zadania.

640. W rurze próżniowej, przedstawionej na rys. 992, zachodzi wyładowanie, przyczem pod działaniem pola magnetycznego, wytworzonego przez elektromagnes, obserwowana w rurze smuga świetlna zostaje wygięta ku dołowi, jak to widać na

rysunku. Który biegun (N czy S) przypada na rysunku bliżej patrzącego na rysunek?



Rys. 992.

641. Co się stanie, jeżeli w doświadczeniu, wyobrażonym na rys. 992, zmienimy kierunek prądu, płynącego w zwojach elektromagnesu?

642. Jak można inaczej umieścić elektromagnes, aniżeli to jest podane na rys. 992, w celu otrzymania takiego samego odchylenia, jak wyobrażone jest na rysunku?

643. Czy promienie katodowe ulegną odchyleniu w polu elektrycznym, wzgl. magnetycznym, jeżeli kierunek linii tego pola zgodzić się będzie z kierunkiem rozchodzenia się promieni katodowych? Uzasadnić odpowiedź.

644. W jaki sposób daje się wytłumaczyć grzanie się płytki, na którą padają promienie katodowe (rys. 965)? Jakie wnioski wyciągnąć można z faktu, że np. płytka platynowa grubości 1 mm o powierzchni 1 cm^2 po upływie 1 minuty doprowadzona jest w tych warunkach do temperatury topnienia (1750°)?

645. Wykonywamy doświadczenie z odchyleniem promieni katodowych w polu elektrostatycznym (rys. 970). Prędkość elektronów w strumieniu katodowym wynosi $10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, masa zaś elektronu jest $= 10^{-27} \text{ gr}$; potencjał płyty C wynosi -300 woltów, potencjał płyty B $+300$ woltów. Odległość między płytami jest 2 cm., długość zaś płyt 40 cm. Na jaką odległość od M przesuwa się ku dołowi plamka fluorescencji M', jeżeli M przypada w odległości 40 cm od płaszczyzny, w której kończy się działanie elektrostatyczne na poruszające się elektrony? (Zakładamy dla uproszczenia, że pole elektrostatyczne między płytami B i C jest jednorodne i wszystkie linie pola zawarły się w prostopadłościanie, którego ściany górna i dolną tworzą płyty B i C).

646. Używając promieni Röntgena zbyt twardych, otrzymujemy niewyraźny rentgenogram dłoni ludzkiej. Dlaczego?

647. Pragniemy naładować elektroskop i możliwie długo utrzymać na nim ładunek. Jakie ostrożności należy przedsięwziąć, by osiągnąć pożądany wynik?

ROZDZIAŁ XIII.

PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ.

378. Odkrycie ciał promieniotwórczych.

Odkrycie promieni Röntgena poruszyło, oczywiście, przedewszystkiem świat naukowy. Wskazówki, podane przez samego Röntgena, że promienie X wybiegają z tych miejsc rury katodowej, które fluoryzują, nasuwało pytanie, czy wogóle ciała fluoryzujące i fosforyzujące nie są również źródłami analogicznych promieni. Pierwszy myśl tę wypowiedział zaraz po odkryciu Röntgena znakomity francuski matematyk i fizyk-teoretyk H. Poincaré, francuski zaś fizyk eksperymentator H. Becquerel podjął w tym kierunku badania. Początkowo Becquerel szukał odpowiedzi na pytanie, czy fluoryzujące sole uranowe po poddaniu ich działaniu promieni katodowych nie wysyłają promieni Röntgena, i pozornie znalazł na to pytanie odpowiedź twierdzącą, przedko wszakże spostrzegł, że działanie promieni katodowych jest tu zupełnie zbyteczne i że sole te same przez się wysyłają jakieś promieniowanie, które jonizuje powietrze i działa przy odpowiednio długiej ekspozycji na płytę fotograficzną poprzez osłaniający ją czarny papier; poza tem promieniowanie to przechodzi również przez sukno, tekturę, pewnej grubości płytki z drzewa, glinu, a także wywołuje fluorescencję. Działanie jonizujące tych *promieni Becquerela*, jak je nazwano, stać się mogło i istotnie stało się środkiem ilościowego ich badania, skoro bowiem poszczególne próbki takich ciał *promieniotwórczych*, umieszczone odpowiednio w pobliżu naładowanego elektroskopu (elektrometru), wywołują prędsze lub powolniejsze jego wyładowanie, z obserwacji tej można wnosić o silniejszym lub słabszem ich promieniowaniu.

Z takich badań ilościowych wymikło niebawem, iż istotnem źródłem tego promieniowania jest sam *uran* — działanie różnych próbek soli uranowych okazało się proporcjonalne do ilości zawartego w nich uranu.

Samo przez się, pośpieszono z badaniem, czy inne pierwiastki nie wykazują podobnych właściwości jak uran, i okazało się, że promieniotwórczym jest również *tor*. Ale, co więcej, okazało się, że to promieniowanie uranu i toru jest czemś, nie poddającym się działaniu żadnych znanych czynników fizycznych lub chemicznych — nie wpływa na nie ani zmiana temperatury, ani zmiana ciśnienia, ani działanie tych

czy innych promieni, ani też nie ma znaczenia, czy pierwiastki te są czyste, czy też wchodzą w takie czy inne połączenia chemiczne — słowem, należało przypuścić, co się przez dalsze badanie potwierdziło, że w promieniowaniu tem objawiają się szczególne własności samych atomów uranu i toru.

Z dziejami nauki o promieniotwórczości związana jest sława naszej rodaczki, Marji ze Skłodowskich Curie, która przy współudziale swego męża, znakomitego fizyka francuskiego, Piotra Curie *), odkryła najgłośniejszy dziś z pierwiastków promieniotwórczych *rad*, przedtem zaś jeszcze *polon*, nazwany tak na cześć Polski. W tym samym mniej więcej czasie znaleziony został przez fizyka francuskiego, Debierne'a inny jeszcze pierwiastek promieniotwórczy — *aktyn*. Dziś znamy takich pierwiastków około czterdziestu.

Punktem wyjścia odkryć pani Curie było ustalenie drogą wspomnianej metody elektrycznej faktu, iż niektóre próbki minerałów, zawierających uran, były w silniejszym stopniu promieniotwórcze, aniżeli czysty uran lub tor. Wskazywało to na istnienie w tych ciałach innych nieznanych jeszcze ciał promieniotwórczych, których należało szukać. Drogą niesłychanie subtelnej a zarazem żmudnej pracy, z minerału, zwanego smółką uranową, z której głównie się wydobywa uran, przy czem w odrzucanych resztkach okazało się zawarte to nieznanne ciało, udało się przez stopniowe oddzielanie części czynnych od nieczynnych odkryć nowy pierwiastek *rad* w postaci soli, a mianowicie czy to bromku, czy chlorku radu (później znacznie pani Curie zdołała otrzymać *rad* czysty). O żmudności pracy może zaświadczyć fakt, że z jednej tonny smółki uranowej daje się otrzymać zaledwie ok. 0.1 grama nieczystej jeszcze soli radu.

Całokształt niezwykłych zjawisk, z którymi zapoznało nas odkrycie ciał promieniotwórczych, w szczególności najważniejszego z nich dla nas radu, był już dostatecznym powodem do tego, by na wydobywanie radu zwrócono szczególną uwagę. Gdy okazało się następnie, że poznane tu promieniowanie, odpowiednio zastosowane, oddaje ogromne usługi medycynie, np. jest często skutecznym środkiem leczenia w nieuleczalnych, jak się dotychczas zdawało, chorobach (raka, wilka) **), wydobywanie to znalazło jeszcze większą podnieję. Dotychczas głównie źródłem radu jest, jak już powiedzieliśmy, smółka uranowa z Joachimiowa w Czechach, poza tem minerał ten znajduje się jeszcze w Saksonji, Anglii (Kornwalji), Kolorado i Dakocie (w Ameryce). Koszty produkcji

*) Marja ze Skłodowskich Curie (ur. w r. 1867), laureatka nagrody Nobla, objęła po śmierci męża zajmowaną przez niego katedrę w Sorbonie. Piotr Curie (1859 — 1904), jeden z najwybitniejszych fizyków francuskich, zginął tragiczną śmiercią, zmiażdżony przez wóz ciężarowy.

**) Podobnie znajdują wielkie zastosowanie w lecznictwie, jak już o tem zresztą wspominaliśmy, promienie Röntgena i promienie nadfioletowe. Zauważyć jednak trzeba, że niewłaściwie lub nieostrożnie użyte promienie te, zarówno jak promienie radu, powodują ciężkie zaśląbnienia, a nawet śmierć. Ofiarą tych promieni padło już wiele osób.

są znaczne: 1 mg czystego radu kosztuje dziś ok. 1000 zł. — ciało to jest mniej więcej 30.000 razy droższe od złota.

Nie należy jednak sądzić, że rad znajduje się tylko w pokładach wymienionego minerału. W mniejszych ilościach rozproszony jest niemal wszędzie na całej ziemi.

379. Rad.

Mając kilka miligramów soli radowej w zamkniętej rurce z cienkiego szkła, stwierdzamy bez wielkiego zachodu następujące ciekawe fakty. Oto przedewszystkiem sól ta świeci nikłym wprawdzie, ale nieustannym światłem. W ciemnym pokoju rurka z radem robi wrażenie jakgdyby robaczka świętojańskiego *). Świecenie to nie wymaga podniecania jak w przypadku fosforescencji — przez szereg lat trzymać możemy taki preparat w ciemności i nie przestaje on świecić. To jedno już zwraca uwagę na uderzająco wielkie zasoby energii, zawartej w tem ciele.

Następnie przekonać się możemy, co pierwsi dostrzegli Curie i Laborde, że sól radu ma zawsze temperaturę wyższą, niż otoczenie, a zatem oddaje nieustannie temu otoczeniu ciepło. Jeżeli weźmiemy np. 2 małe zupełnie jednakowe naczynia Dewarowskie (p. t. I, rys. 334), zamkniemy je, wstawivszy przez szyki do środka termometry i umieściwszy w jednym z nich sól radu, przekonamy się, że termometr w naczyniu z radem pokazuje stale w tych samych warunkach zewnętrznych nieco wyższą temperaturę, niż termometr w drugim naczyniu. Niżej powiemy, co właściwie stanowi istotę tego nieustannego wyładowywania energii przez rad; tymczasem poprzestaniemy na uwadze, iż, jak zostało obliczone, w ciągu 1 godziny 1 gr radu oddaje otoczeniu 130 kaloryj gramowych, ogółem zaś z jednego grama radu (wprawdzie w ciągu setek lat) daje się uzyskać tyle energii, ile jej dostarcza spalenie przeszło 150.000 gramów węgla.

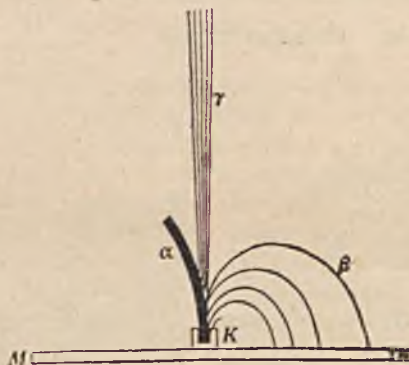
Gdy do główki naelektryzowanego elektroskopu zbliżamy naszą rurkę z radem, elektroskop się wyładowuje, co wykazuje jonizację powietrza przez rad. Podobnie, gdy kuleczki iskiernika, połączonego z biegunami czy to cewki Ruhmkorffa, czy maszyny elektrostatycznej, rozsunniemy tak, by iskry podczas działania cewki, względnie maszyny już nie przeskakiwały, iskrzenie rozpoczyna się, gdy do iskiernika zbliżamy preparat radowy.

Zbliżając do ekranu fluoryzującego (tektury, pokrytej platynocyjanieniem baru) w ciemnym pokoju naszą rurkę, otrzymujemy świecenie tego ekranu w miejscach, przypadających bliżej rurki. Możemy przyłożyć rurkę do tektury z tej strony, gdzie niema substancji fluoryzującej, i przesuwać dowolnymi ruchami rurkę po powierzchni tektury; z przeciwnej strony warstwa fluoryzująca wykazuje te ruchy przez przesuwanie się po niej wyraźnej plamy świetlnej.

*) Nie każdy preparat radowy świeci, ale i nieświejące niektóre próbki można uczynić świecącymi przez rozpущenie w wodzie i późniejsze odparowanie.

Umieszczając na czas odpowiedni rurkę na kliszy fotograficznej, owiniętej w czarny papier, stwierdzimy po wywołaniu kliszy, iż uległa ona działaniu wysyłanego przez sól radu promieniowania.

Wszakże, już wkrótce po odkryciu radu dostrzeżono, że to jego promieniowanie nie jest czemś jednolodnym. Pierwszy fakt ten stwierdził fizyk angielski Rutherford, uczoney, który wyjątkowo zasłużył się nauce swemi genialnemi badaniami nad zjawiskami promieniotwórczości. Rozstrzygającemi w tej mierze były doświadczenia, prowadzone naraz przez wielu badaczy, nad działaniem pola magnetycznego na promieniowanie ciał promieniotwórczych. Okazało się, że jeśli, jak to



Rys. 993.

wyobraża schematycznie rys. 993, umieścimy sól radu w odpowiednim naczynku ołowianem K i skierujemy w ten sposób snop wybiegającego z radu promieniowania do góry, następnie zaś wytworzymy przy pomocy uprzednio przygotowanego elektromagnesu w miejscu, gdzie mieści się naczynko, pole magnetyczne odpowiednio wielkiego natężenia, przyczem linje pola skierujemy prostopadłe do płaszczyzny rysunku, to część promieniowania pozostanie nieodchylona od początkowego kierunku, część będzie bardzo silnie odchylona w jedną stronę, część wreszcie w znacznie słabszym stopniu zostanie odchylona w stronę przeciwną, przyczem kierunki obu odchyleń będą prostopadłe zarówno do kierunku początkowego biegu promieniowania, jak kierunku linii pola. Te trzy rodzaje promieniowania, oznaczone trzema literami alfabetu greckiego α (alfa), β (beta), γ (gamma), po takim ich rozdzieleniu w polu magnetycznym mogą być poddane szczegółowemu badaniu, którego wyniki poniżej streścimy. Zauważmy, że rys. 993 jest schematyczny i odchylenie promieni α jest tu przedstawione nieproporcjonalnie wielkie w stosunku do β — wymagały tego względy rysunkowe.

Ołóż, skoro promieniowanie α i β ulega odchyleniu w polu magnetycznym, nasuwa to odrazu myśl, że mamy tu do czynienia z elektrycznymi prądami konwekcyjnymi, podobnemi do tych, które poznaliśmy

w strumieniach katodowych i kanalikowych, wzg. anodowych. Istotnie, biorąc pod uwagę kierunek tych odchyień, a także ilościową ich stronę, wnosimy, że promieniowanie α — to strumienie jonów dodatnich, a więc zjawisko analogiczne do promieni kanalikowych, promienie zaś β — to strumienie elektronów, a zatem zjawisko toż samo, co promienie katodowe. Nieodchylane w polu magnetycznym promienie γ okazują się promieniowaniem istotnym, podobnie jak promienie Röntgena, o niezmiernie małych długościach fal. Poza temi trzema rodzajami promieniowania wykryte zostało jeszcze t. zw. promieniowanie δ (delta), które również tworzą strumienie elektronów.

380. Promienowanie α , β , γ , δ .

1. *Promienie α* , jak już powiedzieliśmy w ust. poprzednim, ulegają takiemu odchyleniu w polu magnetycznym*), jak to czynią promienie kanalikowe, a z tego wnosić można, iż są to strumienie wyrzucanych przez rad, a podobnie i przez inne ciała promieniotwórcze, pocisków elektrycznych dodatnich, albo, że użyjemy właściwego terminu, jonów dodatnich. Oczywiście, nasuwa się odrazu myśl, że zarówno prędkość ruchu tych cząsteczek jak również stosunek mieszczącego się na nich naboju elektrycznego do masy, jak wreszcie wartości tego naboju i masy mogą być wyznaczone w podobny sposób, jak to się czyni w stosunku do promieni kanalikowych lub anodowych (p. ust. 372). Tak dzieje się istotnie, przyczem okazuje się, iż prędkość tych cząsteczek wynosi ok. $20000 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$ czyli ok. $\frac{1}{15}$ prędkości światła, na

stosunek zaś $\frac{e}{m}$ wypada liczba dwa razy mniejsza, aniżeli dla jonu wodorowego. Ten ostatni fakt wymaga wytłumaczenia, któreby dawało zarazem odpowiedź na pytanie, czem są właściwie te dodatnie jony. Sprawa wyjaśniła się w sposób następujący. Gdybyśmy założyli, że nabój tych nieznanych nam jonów jest taki sam, jak jonu wodorowego, t. j. równy naboju elementarnemu, to z faktu, że na stosunek $\frac{e}{m}$

wypada z pomiarów liczba dwukrotnie mniejsza, niż dla jonu wodorowego, należałoby wnosić, że masa atomowa tego jonu jest dwa razy większa, niż masa atomowa wodoru. Jednakowoż taki pierwiastek jest nam nieznan, natomiast znany jest pierwiastek o masie atomowej = 4. Czy możliwe jest założenie, że właśnie ten pierwiastek, a jest nim *hel***),

*) Pomiarzy te są bardzo trudne i wyniki ilościowe wymagają niezmiernie ścisłej kontroli.

**) O helu była mowa w t. II; w tablicy widm podaliśmy tam również widmo helu. Nazwa tego pierwiastka pochodzi od greckiej nazwy słońca (*hélios*), albowiem najpierw wykryła go analiza widmowa na słońcu, dopiero w 30 lat blisko później został on znaleziony na ziemi (przez słynnego chemika angielskiego, W. Ramsay'a). Dziś produkcja tego gazu odbywa się na taką skalę, że napelniają nim nawet balony [jest to jeden z t. zw. gazów szlachetnych (nieczynnych)] — nie daje on po-

wchodzi tu w grę? Należałoby przypuścić w takim razie, że nabój jonu badanego jest równy dwu nabojom elementarnym, podobnie jak np. nabój jonu miedziowego w roztworze siarczanu miedziowego (ust. 312). Jak zaraz zobaczymy, założenie jedno i drugie potwierdzają się w zupełności i dlatego powiedzieć możemy, że *cząsteczkami α są jony helowe o naboju równym dwu nabojom elementarnym.*

Strumienie cząsteczek α są względnie łatwo hamowane na swej drodze czyli, jak powiadamy, ulegają pochłanianiu. Wystarczy użyć jako osłony płytki glinowej o grubości 0,04 mm, by całkowicie to promieniowanie zatrzymać. W powietrzu cząsteczki α rozchodzą się zaledwie na odległość 7 cm. Zarazem stwierdzamy, że, jeżeli sól radu umieszczona jest w osłonie, nie przepuszczającej tych promieni α , to działanie jonizujące obserwowanego promieniowania spada ogromnie, z czego wnosimy, że w tem działaniu jonizującym rolę główną grają właśnie cząsteczki α , które jako pociski o masie czterokrotnej względem masy



Rys. 994.



Rys. 995.

jonu wodorowego, pędząc z prędkością $20.000 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$ rozbijają na swej drodze spotkane cząsteczki gazu, jonizując je w ten sposób, a jednocześnie same poruszają się przez to z malejącą wciąż prędkością. Zastosowanie metody C. T. R. Wilsona (p. ust. 377) pozwala uwidocznić drogi tych cząsteczek α . Na rys. 994 widzimy fotografię drogi jednej takiej cząsteczki; droga ta przedstawia się jako wyraźnie ciągła linja prosta z charakterystycznym zgięciem na końcu; obraz ten świadczy o olbrzymiej liczbie jonów, wytworzonych na drodze cząsteczki α — kropelki mgły są tak stłoczone, że zlewają się w jednolitą jakgdyby masę. Na rys. 995 widzimy cały snop takich dróg cząsteczek α ; fotografia ta zrobiona jest w mniejszej znacznie skali, aniżeli przedstawiona na rys. 994.

łączeń z innymi pierwiastkami, jest też niepalny; z drugiej strony względnie mała jego gęstość kwalifikuje go do napełniania nim balonów.

W. Crookes obmyślił przyrząd, zwany *spinteroskopem* *), który nie tylko umożliwia obserwowanie przepięknego zjawiska, ale wyjaśnia zasadę niezmiernie ważnego pomiaru, o którym zaraz będziemy mówić. Rys. 996a pokazuje nam urządzenie spinteroskopu. Na dnie cylindrycz-



Rys. 996 a.



Rys. 996 b.

negu naczynia miedzianego, do którego wsadzona jest u góry w przesuwalnej oprawie lupa L, mieści się mały ekranik Z, pokryty siarczkiem cynku; ponad ekranem umocowana jest na końcu strzałki, osadzonej drugim końcem w pobliżu ściany naczynia, okruszyna soli radu (na tej stronie strzałki, która zwrócona jest do ekranu). Gdy w ciemnym pokoju patrzymy przez lupę L do wnętrza naczynka, nastawiając lupę odpowiednio do oka tak, by zarysowywał się wyraźnie kształt strzałki, widzimy, że ekran świeci się w szczególny sposób — oto coraz to w innym miejscu rozbłyskuje na chwilę jasny punkcik, by natychmiast zgasnąć i całość robi wrażenie iskrzącego się w pogodną noc gwiaździstego nieba. Im bliżej okruszyny soli radu, tem gęściej są słoczzone te świetlne punkciki, im dalej — tem łatwiej daje się zaobserwować to ukazywanie się poszczególnych punkcików. Pewne wyobrażenie o tem, co się widzi, daje nam rys. 996b.

Obserwowane zjawisko *scyntytacji* (od francuskiego wyrazu *scintillation* = iskrzenie się) uwarunkowane jest, jak wykazały badania, przez bombardowanie przez cząsteczki α siarczku cynku, pokrywającego ekran — każde miejsce, w które uderza cząsteczka α , staje się pod działaniem tej podniety źródłem fali świetlnej. Ale skoro tak, skoro każda cząsteczka α , wyrzucona przez ciało promieniotwórcze daje w ten sposób znać o sobie, jesteśmy w stanie przez odpowiednie urządzenie doświadczenia rachować jeden z tych pocisków po drugim i istotnie tego rodzaju doświadczenia zostały wykonane **). W ten

*) Nazwa spinteroskopu pochodzi od greckiego słowa spinter = iskra.

***) Są również inne metody rachowania cząsteczek α ; zastosowanie tych metod daje wyniki zgodne z metodą, opartą na zjawisku scyntytacji.

sposób udało się z jednej strony porachować, ile cząsteczek α dany jakiś preparat promieniotwórczy wyrzuca z siebie w ciągu określonego czasu, np. 1 minuty, z drugiej zaś zmierzyć za pomocą odpowiednio zastosowanego elektrometru, jaki jest całkowity nabój dodatni, który za pośrednictwem tych cząsteczek α dany preparat w tym samym czasie oddaje. Dzieliąc ten całkowity nabój przez liczbę cząsteczek, znajdujemy, jakiej wartości nabój niesie ze sobą każda cząsteczka. Okazało się, że tak, jak już powiedzieliśmy wyżej, nabój ten jest dwukrotną wartością naboju elementarnego. Gdy jednak w ten sposób w wartości ułamka $\frac{e}{m}$ wyjaśnia się wartość licznika, potwierdza to

słuszność drugiego założenia, że masa atomowa tego ciała, z którym mamy do czynienia w cząsteczkach α , wynosi 4, czyli, że cząsteczki α są jonami helu. Wniosek ten znajduje, jak zobaczymy, inne jeszcze potwierdzenie w fakcie, że tworzenie się helu towarzyszy zawsze wyrzucaniu przez ciała promieniotwórcze cząsteczek α .

2. *Promienie β* , jak wynika z odchyień, którym ulegają one w polu magnetycznym, są to strumienie elektronów tak samo, jak promienie katodowe. Pomiary analogiczne, jak z promieniami katodowymi, wykazują, że prędkość elektronów w promieniach β jest różna (nie są więc one jednorodne — wyobrażają to różnej krzywizny drogi, zakreślone w polu magnetycznym na rys. 993); naogół jednak stwierdzamy tu znacznie większe prędkości, niż w promieniach katodowych, gdyż dosiegają one niemal wartości prędkości światła (do 0,99 tej prędkości)*).

Co do wartości stosunku $\frac{e}{m}$ wypada ona tegoż rzędu co dla promieni katodowych, przyczem na stosunek ten otrzymuje się liczba mniejsza dla cząsteczek, obdarzonych większą prędkością**). Daje się to zupełnie wystarczająco wytłumaczyć wzrostem wartości pozornej masy elektronów przy większej ich prędkości, o czem mówiliśmy już w ust. 372.

Strumienie elektronów, tworzących promieniowanie β , jonizują również gazy, ale w znacznie słabszym stopniu, niż cząsteczki α . Rys. 997 daje nam fotografię, otrzymaną metodą Wilsona w przypadku jonizacji przez promienie β — niema tu takiej olbrzymiej liczby jonów na drodze poszczególnych cząsteczek, jak w przypadku cząsteczek α .

*) Nie jest wykluczone, że przy zastosowaniu odpowiednich napięć w rurach katodowych da się w nich otrzymać promienie katodowe tegoż rzędu prędkości.

**) Tak np. przy prędkości $100 \cdot 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ (t. j. $\frac{1}{3}$ prędkości światła) na stosunek ten wypada $1,77 \cdot 10^7 \frac{\text{jedn. el. magn.}}{\text{gr.}}$, przy prędkości $248 \cdot 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ na stosunek ten wypada $1,17 \cdot 10^7 \frac{\text{jedn. el. magn.}}{\text{gr.}}$, przy prędkości $283 \cdot 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ na stosunek ten wypada $0,63 \cdot 10^7 \frac{\text{jedn. el. magn.}}{\text{gr.}}$.

(por. rys. 994 — czytelnik z łatwością teraz rozpozna na tym rysunku drogi cząsteczek β).



Rys. 997.

3. *Promienie γ* nie ulegają odchyleniu ani w polu magnetycznym, ani w elektrycznym i, jak już powiedzieliśmy, są identyczne co do istoty z promieniami Röntgena. Towarzyszą one zawsze promieniom β znacznej prędkości. Promienie γ są nadzwyczaj przenikliwe, bardziej przenikliwe, niż najtwardsze promienie Röntgena, otrzymane zapomocą wyżej opisanych sposobów (ust. 374). Przedostają się poprzez warstwę żelaza grubości 30 cm, jeszcze są w stanie jonizować powietrze. Długość fali promieni γ jest jeszcze mniejsza, niż najkrótszych promieni Röntgena, otrzymywanych jak zazwyczaj. Promienie γ dają się rozszczepiać w widmo tak, jak promienie Röntgena; promienie γ ulegają również w kryształach uginaniu się jak promienie Röntgena i pozwalają otrzymywać obrazy dyfrakcyjne, podobne do wyobrażonego na rys. 982.

Dla scharakteryzowania przenikliwości promieni α , β , γ podajemy następującą tabelkę:

Promienie	Grubość płytki glinowej, warunkującej po przejściu przez nią promieni zmniejszenie ich natężenia do połowy	Przenikliwość względna
α	0,0005 cm	1
β	0,05 cm	100
γ	8 cm	10000

4. *Promienie δ* , wykryte przez J. J. Thomsona, są również jak promienie β strumieniami elektronów, ale bardzo powolnych. Prędkość ich wynosi mniej więcej ok. $3250 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$, t. j. ok. $\frac{1}{100}$ prędkości światła. Skutkiem tej małej prędkości nie jonizują już one gazu (najmniejsza

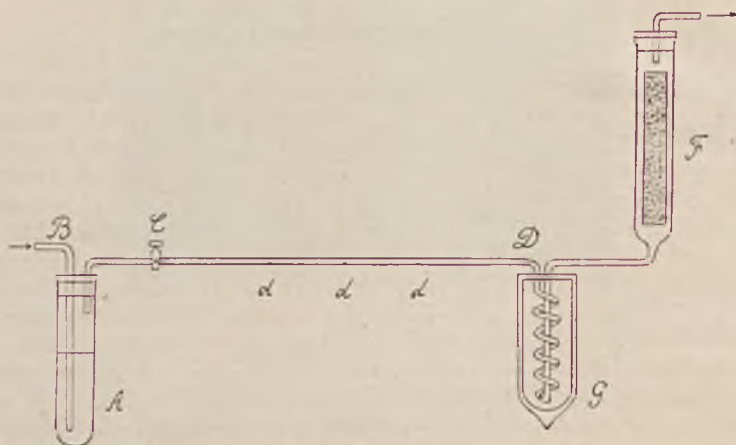
prędkość, którą winny mieć elektrony, by móc jonizować gazy, jest $3600 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$). Thomson wykrył te promienie dzięki obserwacji niesionych przez nie nabożów.

381. Przemiany promieniotwórcze.

Wkrótce po odkryciu ciał promieniotwórczych okazało się, że rad, a podobnie tor i aktyn (jednak ani uran ani polon) mają szczególną własność udzielania znajdującym się w pobliżu nich ciałom przemijającej promieniotwórczości. Jeżeli jednak rad, wzgl. tor lub aktyn, zamknięte są hermetycznie, nie powodują owej *wzbudzonej promieniotwórczości*, mimo iż ściany zawierających je naczyń mogą być dość cienkie, by przez nie przedostawały się nie tylko promienie γ , ale zarówno cząsteczki β i α . Rozwikłanie tej zagadki zawdzięczamy Rutherfordowi który wykazał, że rad, a podobnie tor i aktyn wydzielają z siebie pewną subtelną materję, którą nazwano *emanacją* i która posiada cechy gazu. Emanację możemy zebrać w zamkniętym naczyniu, możemy przeprowadzić przez rurkę z jednego naczynia do drugiego, ale nie jesteśmy w stanie dotychczas jej zważyć ani zmierzyć wywieranego przez nią ciśnienia, zarówno jak nie jesteśmy dotychczas w stanie wykazać, że masa danej próbki radu (toru, aktynu) z biegiem czasu się zmniejsza, co jednak, jak wypada z powiedzianego, powinno zachodzić. Emanacja, jak się przekonano, wyrzuca z siebie cząsteczki α , t. j. jony helu, jonizuje powietrze, z którym się miesza, wywołuje fluorescencję stykających się z nią ciał (ściany naczyń szklanych, w których mieści się emanacja, świecą w ciemności). Cechy gazowe emanacji występują również przy jej oziębianiu. Fizyk angielski Soddy, współpracownik Rutherforda, z którym razem podali oni pierwsi powszechnie dziś przyjęty sposób tłumaczenia zjawiska promieniotwórczości, obmyślił następujące piękne doświadczenie (rys. 998). Probówka *A* zawiera w roztworze wodnym parę miligramów bromku radu; nad powierzchnią roztworu zbiera się emanacja. Lekki prąd powietrza przez rurkę *B* kieruje emanację poprzez rurkę *CD*, stamtąd zaś przez krótką węzownicę, zanurzoną w naczyniu Dewara *G* (p. ust. 176, t. II), wreszcie przez szeroką rurkę *F*. W rurce *CD* mieszczą się skrawki diamentu (*d, d, d*), w rurce *F* długi skrawek miki, pokrytej siarczkiem cynku. Gdy emanacja płynie wskazaną drogą, przyczem naczynie Dewara jest próżne, zarówno skrawki diamentu, jak ekranik w rurce *F* fluoryzują; gdy natomiast nalewany do naczynia *G* ciekłego powietrza, świecenie ekranu w rurce *F* ustaje. Jeżeli po pewnym czasie usuwamy z pod węzownicy naczynie Dewara i węzownica stopniowo się ogrzewa, świecenie ekranu w *F* rozpoczyna się od tego końca, który jest najbliższ węzownicy i stopniowo fluorescencja postępuje coraz dalej. Doświadczenie to wskazuje na to, że emanacja w danych warunkach ulega kondensacji.

Otóż te własności emanacji warunkują wzbudzoną promieniotwórczość — na powierzchni ciał, pozostających w zetknięciu z emanacją,

tworzy się osad promieniotwórczy; gdy ciało, wydzielające emanację, mieści się w rurce zatopionej, albo jakoś inaczej pozostaje w zamknięciu hermetycznym, emanacja nie może się z tej osłony wydostać, a zatem zrozumiałe jest, iż nie stwierdzamy na ciałach otaczających promieniotwórczości wzbudzonej.



Rys. 998.

Błędem byłoby mniemanie, że tu następuje poprostu adsorbcja emanacji przez znajdujące się w pobliżu ciała i że ta promieniotwórczość wzbudzona jest w dalszym ciągu promieniowaniem emanacji. Badając promieniowanie tych ciał, w których została promieniotwórczość wzbudzona, przekonywamy się, że promieniowanie to jest inne, a przytem daje się zauważyć jeszcze jedna poważna różnica.

Zebrawszy w odpowiednim zbiorniku pewną ilość emanacji radowej, możemy się przekonać, że jej działanie jonizujące (a podobnie i inne działania) nie jest czemś stałym. Ścisłe badania tego ważnego szczegółu prowadzą do wniosku, że działanie to spada do połowy początkowej wartości w ciągu niespełna 4 dni (ściśle 3,85 dni). Prowadzone dalej badania wykazują, że po upływie nowych 3,85 dni działanie to spada znowu do połowy, t. j. do $\frac{1}{4}$ wartości początkowej, po upływie następnych 3,85 dni znowu do połowy, t. j. do $\frac{1}{8}$ wartości początkowej i t. d. Podobna rzecz daje się zaobserwować z emanacją toru, tylko, że okres ten, zwany *okresem połowicznego zaniku*, wynosi dla emanacji toru zaledwie 54,5 sekundy, dla emanacji zaś aktynu znaleziono na ten okres wartość = 3,9 sekundy. Okazało się dalej, że wszystkim ciałom promieniotwórczym właściwy jest pewien okres połowicznego zaniku i że okres ten jest tak charakterystyczny, iż według niego można rozpoznawać poszczególne z tych ciał.

Otóż badanie promieniotwórczości wzbudzonej na ciałach, które się zetknęły z emanacją radową, wykazało, że i tu mamy do czynienia z czemś, co stopniowo zanika, ale okres zaniku połowicznego wypada

bynajmniej nie ten, który właściwy jest emanacji radowej. Innemi słowy okazało się, że podobnie jak emanacja powstaje z radu, tak znów z emanacji tworzy się nowa jakaś substancja; co więcej, okazało się, że mamy tu do czynienia kolejno z całym szeregiem nowych substancyj, które możemy zapomocą odpowiednich środków wyodrębnić, podczas gdy początkowo możemy błędnie brać tę mieszaninę za coś jednorodnego. Podnosimy, że każda z tych przemian wiąże się nierozzerwalnie z pewnem promieniowaniem, t. j., że każda z tych substancyj, mających wyraźny charakter pierwiastków chemicznych, promieniuje w sposób swoisty i przez to promieniowanie przeistacza się w inną.

Dochodzimy do zasadniczej myśli, którą wypowiedzieli, jak już wspomnieliśmy, Rutherford i Soddy, a mianowicie do myśli o rozpadzie atomów ciał t. zw. promieniotwórczych. Przyjawszy tę myśl, musieliśmy zerwać z utrwalonym do tego czasu poglądem, że atom jest to coś niepodzielnego, a zarazem wiecznego, i przyjąć pogląd, że atomy posiadają budowę złożoną, przyczem możliwe są przekształcania się atomów jednych w drugie. Odżyła w pewnej mierze idea alchemików, którzy wierzyli w możliwość otrzymania złota z innych substancyj — oczywiście, nie chodzi tu o tę ideę w zastosowaniu do produkcji złota, ale o jej głębsze istotne znaczenie.

A więc wyobrażamy sobie proces promieniotwórczy w radzie w następujący sposób. Poszczególne jego atomy wyrzucają z siebie jony helu (jony te po zubożeniu elektrycznym stają się zwykłemi atomami helu), przyczem każdy atom radu, po wyrzuceniu z siebie tego pocisku, przestaje już być atomem radu, lecz staje się atomem owej substancji gazowej, która nosi nazwę emanacji radu. Podobnie atomy emanacji znów wyrzucają z siebie cząsteczki *alfa*, a każdy atom emanacji, który z siebie taką cząsteczkę wyrzucił, staje się atomem nowego pierwiastka — substancji stałej w zwykłej temperaturze — którą nazwano radem A. Następnie rad A przechodzi w rad B i t. d., przyczem zauważyć należy, że niektórym z tych przemian towarzyszy, jako nierozzerwalnie z tem idący proces, wyrzucanie cząsteczek α , to znów cząsteczek β (elektronów), jak również przy dostatecznych prędkościach cząsteczek β (prędkości tych elektrycznych pocisków bywają rozmaite), promieniowanie γ . Rozpad atomu i związane z nim przemiany trwają nieustannie i, jak powiedzieliśmy, nie jesteśmy w stanie (przynajmniej dotychczas) w żaden sposób na przebieg ten wpłynąć—ani go przyśpieszyć, ani uczynić powolniejszym. Mając zatem jakąkolwiek próbkę soli radu, mamy w niej nie tylko rad, ale i kolejno z niego tworzące się nowe pierwiastki, i to promieniowanie, o którym mówiliśmy w ust. 380, jest sumą promieniowań, wysyłanych przez tę całą mieszaninę ciał. Aby zbadać promieniowanie poszczególnych ciał, tworzących ten szereg promieniotwórczy, należy je odpowiednio wyodrębnić, co się daje uczynić, ale czego tu bliżej opisywać nie będziemy.

Nie wszystkie cząsteczki α , wyrzucane z wnętrza bryłki soli radowej, mogą się wydostać nazewnątrz; wielka ich liczba hamowana jest w ich ruchu wewnątrz tej bryłki — stąd przemiana ich energii kinetycz-

nej na ciepło, stąd nieco wyższa temperatura preparatu radowego w stosunku do otaczającego ośrodka.

Dla każdego ciała, tworzącego szereg promieniotwórczy, wyznaczyć możemy charakterystyczny okres zaniku połowicznego, zarówno jak podać właściwe mu promieniowanie. Zważyć przytem trzeba, że o ile wyrzucenie z atomu cząsteczki β nie zmienia, praktycznie biorąc, masy atomowej tego atomu, z którego elektron został wyrzucony (p. ust. 372, gdzie mowa o masie elektronu), o tyle wyrzucenie cząsteczki α powoduje taką zmianę masy. Masę atomową radu wyznaczyła p. M. Skłodowska-Curie i otrzymała na jej wartość 226. Atom radu po utraceniu atomu helu tworzy atom emanacji; masa zatem atomowa emanacji radowej jest $226 - 4 = 222$. Podobna rzecz daje się powiedzieć o masach atomowych innych pierwiastków promieniotwórczych, tworzących serje.

Niewątpliwie musiała się jeszcze nasunąć myśl, czy rad jest istotnie tym pierwiastkiem, który taki szereg przemian rozpoczyna, czy też jest sam ogniwem w szeregu, zaczynającym się od innego pierwiastka promieniotwórczego. Fakt, że rad się wydobywa z minerałów, zawierających uran, wskazywał na to, że między temi pierwiastkami istnieć musi tego rodzaju związek. Badania potwierdziły to przypuszczenie, tak, że możemy dziś ułożyć szereg pierwiastków promieniotwórczych, na których czele stoi *uran*, z którego poprzez kilka pośrednich innych pierwiastków promieniotwórczych powstaje rad, dający dalej początek pierwiastkom następnym.

Poniższa tabelka zawiera tę grupę uranową pierwiastków promieniotwórczych ze wskazaniem wartości okresu połowicznego zaniku dla każdego z pierwiastków, rodzaju wysyłanego przez nie promieniowania przy przemianie w następny pokolei oraz ich masy atomowe.

Pierwiastek	Promieniowanie	T (okres zaniku połowicznego)	Masa atomowa
Uran.	α	$4,5 \cdot 10^9$ lat	238
Uran X_1	β, γ	10 dni	234
Uran X_2	β, γ	1,2 minuty	234
Uran ₂	α	10^6 lat	234
Jon	α	10^5 lat	230
Rad	α	1690 lat	226
Emanacja radu	α	3,85 dni	222
Rad A	α	3 minuty	218
Rad B	β, γ	26,8 minut	214
Rad C	β, γ	19,5 minut	214
Rad C'	α	10^{-6} sek.	214
Rad D	β, γ	16 lat	210
Rad E	β, γ	5 dni	210
Rad F (Polon)	α	136 dni	210
Ołów	—	—	206

Podobne tabelki układamy również dla grupy aktywności i toru, czego przyłączać tu nie będziemy. Uważne przyjrzenie się podanej tabeli daje nam zadziwiający obraz. Oto mamy istne przegradzanie się szeregu pierwiastków pokolei każdego w następny, a w końcu tego procesu, trwającego miliony lat, jako ostateczna, poniekąd martwa substancja — otrzymuje się ołów. Ołowiem też kończy się szereg aktywności, zarówno jak toru, ale, co jest godne uwagi, masa atomowa ołowiu, który przypada na końcu szeregu torowego jest nie 206 lecz 208. Wypada, że są różne ołowię. To też znane było już dawno, że na masę atomową ołowiu, wyznaczaną zwykłą drogą, otrzymywały się liczby nieco różne, wahające się w pewnych granicach. Ten dziwny fakt nie był zatem wynikiem błędów doświadczalnych, ale pozostaje w związku z pochodzeniem ołowiu.

Poprzestajemy na tych informacjach, dotyczących przemian ciał promieniotwórczych. Chodziło nam o to, by dać czytelnikowi pojęcie o przewrocie myślowym, który się dokonał w ostatnich paru dziesiątkach lat w stosunku do dawniejszego pojęcia atomu. Bliższą znajomość tej niezmiernie doniosłej i ciekawej dziedziny czytelnik zdobędzie później, o ile zechce się poświęcić głębszym studjom fizyki.

Na zakończenie powiemy tu jeszcze o jednym zastosowaniu zdobytych wiadomości o ciałach promieniotwórczych. Oto w wielu minerałach zawarty jest hel. Ponieważ tworzenie się tego ciała związane jest z przemianami promieniotwórczymi, udało się z ilości znalezionej w minerałach helu wnosić o tym czasie, w którym proces tego powstawania trwał, a stąd o wieku danego minerału. Liczby otrzymane tu zostały olbrzymie — miliony i tysiące milionów lat. Cóż to oznacza? Oto rzuca to nam światło na wiek ziemi, skoro bowiem w skorupie ziemskiej zawarte są tak stare substancje, a skorupa ta jest czemś względnie młodem w stosunku do czasu istnienia niezastygłej jeszcze bryły naszego globu, jaką tedy liczbę lat istnienia można przypisać ziemi! Oczywiście, na drodze tej nie można podać wyrażonego określoną liczbą lat istotnego wieku ziemi, ale jesteśmy, bądź co bądź, w stanie z poważnymi dowodami w ręce twierdzić o rzędzie tej wielkości, która nas tak interesuje.

382. Budowa atomów.

Cheąc zdać sobie głębiej sprawę z szeregu zjawisk, związanych z istotą atomu (promieniotwórczość, jonizacja i t. d.), uciekamy się do pewnych założeń, które muszą pozostawać w zgodzie z doświadczeniami. Pierwszy Rutherford, następnie zaś znakomity fizyk duński Niels Bohr nakreślili nam, jak można wyobrazić sobie budowę atomów. Otóż wyobrażamy to sobie tak, iż w każdym atomie istnieje t. zw. *jądro* o naboju dodatnim, dokoła którego krążą, jak planety dokoła słońca, elektrony. W ten sposób cała przestrzeń, którą zajmuje atom, a którą obejmuje tor najdalej od jądra krążącego elektronu, — cała ta

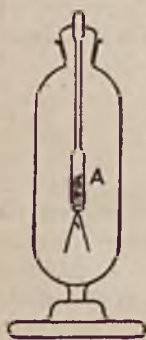
przeźren jest przeważnie pustą, nieznaczną jej część zaledwie zajmuje jądro i elektrony. Co do rozmiarów tych składowych części atomu, wypada założyć, iż jądro jest tworem niezmiernie skupionym, którego wymiary są prawie znikome w porównaniu z wymiarami elektronu. Masa jednak jądra stanowi całą niemal masę atomu; masa elektronów, zawartych w atomie, jest znikoma w porównaniu z masą jądra. Nabój jądra równa się wielokrotnej wartości naboju elementarnego, przyczem liczba elektronów równa się zawsze tej wielokrotności; tak więc np. o ile jądro posiada nabój, równy pięciu nabojom elementarnym, atom zawiera pięć krążących dokoła jądra elektronów. Oczywiście, mowa tu o atomach elektrycznie obojętnych; o ile np. w ten czy inny sposób atom traci jeden lub więcej elektronów, staje się jonom dodatnim.

Wreszcie jeszcze jedno. Jeżeli układamy tabelę pierwiastków tak, jak to uczynił Mendelejew, miejsca porządkowe pierwiastków w tej tabeli znaczą liczby, które wskazują, ilu nabojom elementarnym równa się dodatni nabój jądra. Atomy zatem wodoru, zajmującego pierwsze miejsce w układzie perjodycznym pierwiastków, mają jądro o pojedynczym naboju elementarnym, atomy tlenu, zajmującego ósme miejsce w tablicy, mają nabój, równy ośmiu elementarnym nabojom i t. d.

Poprzestajemy na tym szkicu, by dać wyobrażenie czytelnikowi, do jakich wniosków dochodzi dziś nauka w tak nęcącym nas zagadnieniu, jak rozświetlenie tajemnicy budowy atomów. Pragnęlibyśmy, by uwagi te zachęciły czytelnika do dalszych studjów fizyki w celu bliższego zapoznania się z temi niezmiernie ciekawemi rzeczami.

Ćwiczenia i zadania.

648. Znakomity fizyk angielski Strutt, odznaczony tytułem lorda Rayleigh'a, zbudował przyrząd, wyobrażony schematycznie na rys. 999. Mała rurka A, zawierająca sól radu, zawieszona jest w większem, szczelnie zalutowanem naczyniu szklanem, z którego powietrze jest jak najdokładniej usunięte.



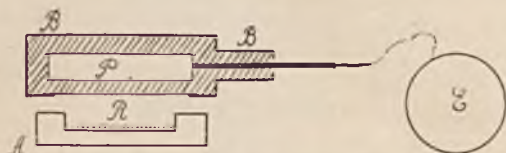
Rys. 999.

Rurkę A utrzymuje włókno kwarcowe, osadzone w zatyczce bursztynowej, która zakorkowuje naczynie. W ten sposób rurka A jest doskonale izolowana. U dołu do rurki A umocowane są dwa listki z pozłotki, jak w elektroskopie. Ściany rurki A są tej grubości, że przepuszczają promienie β , nie przepuszczając zaś promieni α . Stwierdzamy, że listki stopniowo się rozchodzą, zanim dotkną ścianek osłaniającego rurkę naczynia, w chwili dotknięcia do ścianek listki opadają, poczem znowu zaczynają się rozchyłać i t. d. Można wykazać, że listki ładują się zawsze dodatnio. W ten sposób opisany proces zachodzi tak miarowo, że można go użyć do mierzenia czasu, przyczem ten swoisty zegar funkcyjonować może przez setki lat. Wyllumaczyć, co się tutaj dzieje, oraz uzasadnić, że przyrząd ten nie jest bynajmniej perpetuum mobile, t. j. pozostaje w zupełnej zgodzie z zasadą zachowania energii.

649. Na str. 399 podane są wartości stosunku $\frac{e}{m}$ dla promieni β przy użyciu

jednostek elektromagnetycznych. Jak się przedstawiały podane tam liczby, jeżeli od jednostek elektromagnetycznych przejdziemy do elektrostatycznych.

650. Rys. 1000 wyobraża schemat doświadczenia, wykonanego przez Piotra i Marię Curie. Sól radu mieściła się w naczynku A, ponad którym znajdowała się metalowa płytka P, osadzona w warstwie izolatora (ebonit, parafina). Oslaniający płytkę P izo-



Rys. 1000

lator był pokryty warstwą metaliczną, z wyjątkiem tego miejsca od spodu, przez które mogło się przedostawać do płytki P badane promieniowanie, oraz miejsca, przez które przechodził drut, łączący płytkę P z elektrometrem E. Elektrometr wykazywał, że płytka P ładuje się ujemnie. Wytlumaczyć opisane zjawisko.

651. Zapomocą radu daje się otrzymać przy zastosowaniu odpowiednio długiej ekspozycji zdjęcie fotograficzne w rodzaju rentgenowskiego. Rys. 1001 wyobraża



Rys. 1001.

takie zdjęcie, dokonane przez panią M. Curie. Wszakże niesposób jest otrzymać np. takiej fotografji, jak na rys. 979 — kości ludzkie są niemal tak samo przezroczyste dla promieni, jak mięśnie. Czemu się to daje wytłumaczyć?

652. Promienie γ są, jak wiemy, bardzo „twarde”. Jakże to może mieć znaczenie dla celów leczniczych?

653. Co mówią fotografje na rys. 993, 994 i 997 o różnicy w ruchu poprzez gaz cząsteczek α i β .

654. Ziemia, promieniując nieustannie, stygnie. Jaką rolę odgrywa w tym procesie stygnięcia zawartość w ziemi radu?

655. Jaki fakt może nam nasunąć myśl, że rad jest na słońcu?

ROZDZIAŁ XIV.

FALE ELEKTROMAGNETYCZNE.

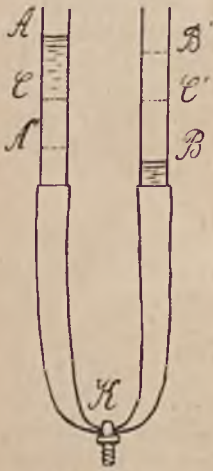
383. Wylądowanie wahadłowe kondensatora.

Dwie szklane rury pionowe łączymy ze sobą przy pomocy rurki gumowej (rys. 1002) i nakładamy na gumową rurkę zacisk K , by móc ustalić względnie przerwać połączenie między rurami A i B . Podczas gdy zacisk K jest zamknięty, wlewamy wody do obu ramion naczynia

tak, by sięgała w nich do różnych wysokości. Z chwilą otworzenia zacisku woda przepływa z ramienia, gdzie stała wyżej, do ramienia, gdzie przypadła niżej, jednak w momencie, gdy poziomy się zrównują (CC'), prąd wody nie ustaje — wznosi się ona dalej w prawem ramieniu B do B' , opada jednocześnie w lewym ramieniu A do A' , skutkiem czego wytwarza się znowu pewna różnica poziomów, powodująca teraz prąd wody w kierunku przeciwnym (z prawego ramienia do lewego). Ten nowy prąd tak samo nie ustaje z chwilą zrównania się poziomów w rurach i tworzy się ponownie różnica poziomów (poziom wyższy w lewym ramieniu, niższy w prawem), mniejsza jednakże niż poprzednio i t. d. Proces ten zachodzi perjodycznie, jak ruch wahadła, które, wychylone z położenia równowagi, wraca doń po szeregu wahań, zanikających na skutek tarcia. I w przypadku rozważanym tarcie wody o ściany rur, a także lepkość wody warunkują

stopniowe zanikanie drgań, które zachodzą w rurach połączonych.

Możemy jednak zauważyć, że jeżeli nie usuniemy zacisku całkowicie, a przez to nie damy wodzie możności przepływania możliwie swobodnie przez rurę gumową; jeżeli np. zlekka tylko zluźnimy zacisk, tak by woda nie mogła z impetem przepływać z jednej rury do drugiej i tylko pomaleńku sączyła się przez mały otworek, nie zaobserwujemy tych drgań — z chwilą dojścia wody do równych poziomów w obu rurach prąd wody ustanie. Podobnie, gdy wahadło, wychylone z położenia rów-



Rys. 1002.

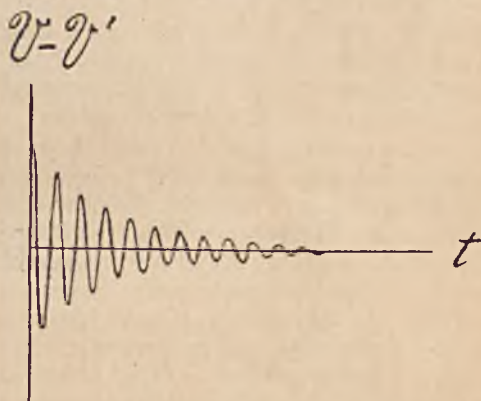
nowagi, poruszać się ma, wracając do równowagi, nie w powietrzu, ale w jakiejś bardzo lepkiej cieczy, stawiającej ruchowi *duży opór* (jak mały otworek w wodzie w doświadczeniu z naczyniami połączonymi), wahać się ruchem powolnym opadnie do położenia równowagi, ale wahań, takich jak w powietrzu, wykonywać nie będzie.

Dostrzegamy, iż warunkiem, niezbędnym do tego, by ruch drgający w powyższych przypadkach mógł zachodzić, jest ten, by drgania nie napotykały zbyt wielkiego oporu — w przeciwnym razie są one nie stopniowo, ale gwałtownie tłumione i praktycznie biorąc, nie zachodzą wcale *).

W r. 1857 fizyk niemiecki Feddersen wykazał, że wyładowanie kondensatora (np. butelki lejdejskiej) nie jest zjawiskiem pojedynczym,



Rys. 1003.



Rys. 1004.

lecz złożonym z szeregu kolejno po sobie następujących wyładowań, przyczem przebieg zjawiska wyrównywania się potencjałów na okładkach kondensatora ma charakter wahadłowy, podobnie jak przebieg zjawiska wyrównywania się poziomów w naczyniach połączonych. Feddersen ustalił ten fakt, obserwując iskrę, otrzymywaną przy wyładowaniu kondensatora, w zwierciadle wirującym (podobnie obserwowaliśmy drgający płomyk w zwierciadle wirującym, T. II, rys. 413), a także fotografując dawany przez wirujące zwierciadło przy zastosowaniu odpowiednio ustawionych soczewek obraz iskrę. Na rys. 1003 widzimy nowsze fotografie, otrzymane tą metodą, odpowiednio udoskonaloną. Jak widać z tych fotografii, iskra nie tworzy się od razu na całej odległości między elektrodami; zjawisko świetlne rozpoczyna się u anody i posuwa się z pewną prędkością **) w stronę katody. Jak widzimy dalej, to

*) Ruch taki, którym wychylone z równowagi ciało wraca do położenia równowagi, ale bez drgań, przypominających ruch wahadła, nazywa się ruchem aperiodycznym.

**) Jak wnosić można z doświadczeń, prędkość ta wynosi kilka kilometrów na sekundę.

jedna to druga elektroda, między którymi przeskakuje iskra, stanowią kolejno anodę, a zatem prąd, który się tworzy w postaci iskry przy rozbrojeniu kondensatora, nie ustaje z chwilą zrównania się potencjałów na okładkach kondensatora, lecz trwa dalej, powodując tem przeładowanie się tych okładek do potencjałów znaków przeciwnych, poczem proces ten perjodycznie się powtarza, stopniowo zanikając. Można się przekonać, że im większy opór stawia obwód, w którym zachodzi rozbrojenie kondensatora, tem bardziej zanikają te *drżania elektryczne*, jak je możemy nazwać, polegające na kolejnym przebieganiu w pewnym rytmie prądu elektrycznego to w jednym, to w przeciwnym kierunku. Przebieg zmian, którym ulega przytem różnica potencjałów na okładkach kondensatora, może być przedstawiony zapomocą krzywej tego typu, jak na rys. 1004. Zanikanie drgań zachodzi przedewszystkiem na skutek tworzenia się w obwodzie ciepła Joule'a, co oczywiście wyczerpuje energję drgającego układu, poza tem jeszcze na skutek utraty tej energii nazewnątrz w postaci pewnego promieniowania, o którym właśnie mamy mówić w tym rozdziale.

Okres drgań, jak wykazały doświadczenia Feddersena, zależy w pewien określony sposób od pojemności elektrycznej kondensatora oraz indukcji własnej obwodu. W obwodach, zawierających większą pojemność i posiadających większą wartość indukcji własnej — okresy drgań są większe, zatem drżania te są powolniejsze i odwrotnie. Zależność ta daje się ująć w prosty wzór, podany przez znakomitego fizyka angielskiego W. Thomsona (Lorda Kelvina), o którym już wspominaliśmy. Dla zrozumienia tego wzoru należy tylko wprowadzić pojęcie *spółczynnika indukcji własnej*. Otóż zgodnie z tem, czego dowiedzieliśmy się o zjawisku indukcji elektromagnetycznej, możemy uważać za rzecz zrozumiałą, iż siła elektromotoryczna indukcji własnej jest proporcjonalna do prędkości zmian natężenia prądu w obwodzie (wszak jest to równoznaczne proporcjonalności względem prędkości zmian w liczbie rurek indukcji, objętych przez obwód, w którym zachodzą zmiany natężenia prądu). Jeżeli zatem w bardzo krótkim czasie Δt zachodzi zmiana natężenia prądu Δi , to wzbudzona siła elektromotoryczna indukcji własnej E w obwodzie wyrazi się wzorem

$$E = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \dots \dots \dots (1)$$

Stosunek $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ oznacza tu prędkość zmiany natężenia prądu, która winna być rozumiana w podobny sposób, jak prędkość rzeczywista ruchu zmiennego (porówn. t. I, ust. 31). Wzór (1) wyraża właśnie, że wartość liczbową siły elektromotorycznej indukcji własnej (jest ona skierowana zawsze przeciwnie względem kierunku zmiany), jest proporcjonalna do prędkości zmiany natężenia prądu; L jest tu pewnym współczynnikiem proporcjonalności i nazywa się *spółczynnikiem indukcji własnej*. L mierzy się w jednostkach, którym nadano nazwę *henry*; założmy, że

we wzorze (1) $\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{1 \text{ amper}}{1 \text{ sek}}$ zaś $E = 1$ wolt; wówczas liczbowo $1 = L \cdot 1$, t. j. $L = 1$. L zatem oznacza taką wartość indukcji własnej obwodu, przy której w obwodzie szybkość zmiany natężenia prądu, wynosząca jeden amper na jedną sekundę, powoduje powstanie siły elektromotorycznej indukcji własnej, równej jednemu woltowi.

Umiemy sporządzać cewki o różnej wartości samoindukcji. Na rys. 1005 widzimy taką cewkę, której współczynnik samoindukcji wynosi właśnie 1 henry.

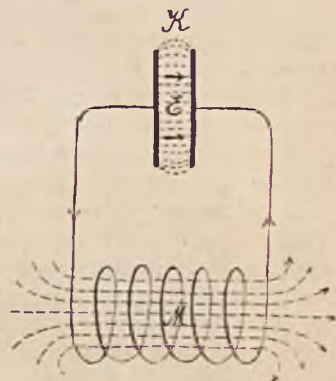
Wzór Kelvina na okres drgań elektrycznych jest

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (2)$$

gdzie C oznacza pojemność kondensatora, zaś L współczynnik indukcji własnej obwodu; wzór ten przypomina nam w pewnej mierze wzór na okres drgań wahadła. Zależnie od wartości pojemności i współczynnika



Rys. 1005.



Rys. 1006.

indukcji własnej daje się otrzymywać przy wyładowaniu kondensatora drgania elektryczne różnej częstości. Aby dać czytelnikowi pojęcie o rzędzie tej wielkości, wystarczy, jeżeli powiemy, że przy rozbiorzeniu takiej baterji butelek lejdejskich, jakimi się zazwyczaj posługujemy w praktyce wykładowej, przytem za pośrednictwem obwodów o niezbyt wielkiej indukcji własnej, częstość drgań wynosi setki tysięcy drgań na sekundę ($N = \frac{1}{T}$).

Przy drganiach wahadła mamy, jak to wyjaśnialiśmy w tomie I, kolejne przemiany energii kinetycznej w potencjalną i odwrotnie. Takie same przemiany zachodzą w przytoczonym wyżej przykładzie (p. rys. 1002) z drganiami słupa wody w naczyniach połączonych (pozostawiamy czytelnikowi zanalizowanie tych przemian). Rozważmy, czy niema również przemian energii przy drganiach elektrycznych, a je-

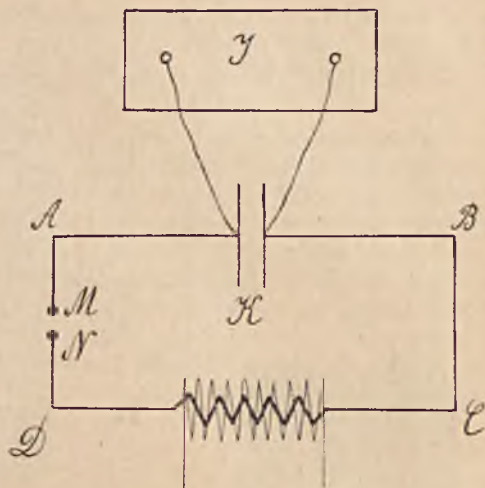
zeli są, to jakiego rodzaju. W tym celu rozpatrzmy rzecz tak, jak to mamy przedstawione schematycznie na rys. 1006.

K oznacza tu kondensator naładowany, który się wyładowuje poprzez zwój drutu. W zwoju tym przebiegają kolejno prądy to w jedną, to w przeciwną stronę, przyczem kondensator za każdym razem się przeładowuje, jak to już zostało wyjaśnione. Otóż kolejno w odpowiednim dla danego układu rytmie (zależnym od pojemności kondensatora i indukcji własnej obwodu) w pewnych momentach prąd w zwoju ustaje, poczem zmienia kierunek: w tych momentach różnica potencjałów na okładkach kondensatora osiąga największą wartość i wówczas mamy do czynienia z określoną ilością energii elektrycznej, zawartej w kondensatorze. W tym samym rytmie, ale z opóźnieniem o $\frac{1}{4}$ okresu natężenie prądu w zwoju osiąga największą wartość — w tych momentach różnica potencjałów na okładkach równa się zeru, natomiast energia pola magnetycznego, wytworzonego przez prąd, osiąga maximum. Gdy po zrównaniu się potencjałów na okładkach kondensatora, a więc po osiągnięciu przez energję pola magnetycznego jego największej wartości, pole magnetyczne zaczyna znikać, warunkuje to właśnie prąd indukcyjny w obwodzie — i to prąd w tym samym dalej kierunku, co prowadzi do przeładowania okładek kondensatora do znaków przeciwnych (a więc na indukcję własną obwodu przypada, jak już tłumaczyliśmy wyżej, rola bezwładności swojego rodzaju). W dowolnych innych czasach na okładkach kondensatora istnieje pewna różnica potencjałów, a więc mamy tam pewnej wartości energję elektryczną, jednocześnie zaś natężenie prądu w obwodzie ma pewną wartość, czemu odpowiada określona wartość energii pola magnetycznego prądu. Z przykładu tego, rozpatrzonego w głównych zarysach a odpowiadającego i wyżej przytoczonemu przypadkowi rozbrojenia iskrowego, widzimy, że drgania, o których teraz mówimy, nazywać należy właściwie elektromagnetycznymi, zachodzi w nich bowiem kolejna przemiana energii pola elektrycznego w energję pola magnetycznego i odwrotnie.

384. Transformator Tesli.

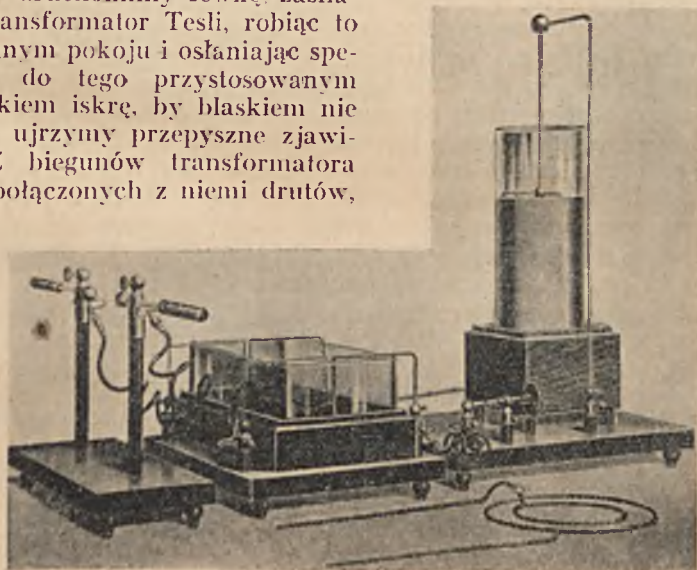
Wybitny inżynier amerykański Nicola Tesla wyzyskał charakter wahadłowy wyładowań kondensatora w celu zbudowania transformatora na bardzo wysokie napięcia (w r. 1890). Urządzenie transformatora Tesli wyjaśnia schematycznie rys. 1007. *K* oznacza tu kondensator (butelka albo baterja lejdejska), *ABCD* tworzy obwód, w którym zachodzą wyładowania poprzez iskrę, bijącą między ustawionymi odpowiednio jedna względem drugiej kuleczkami (odległość paru lub kilku milimetrów). Obwód zawiera zwój o niewielkiej liczbie skrętów (na rysunku między *D* i *C*). Przy wyładowaniu kondensatora przebiegają przez ten zwój prądy przemienne o wielkiej częstotliwości. Kondensator zasilany jest cewką Ruhmkorffa, która ładuje go do wysokiego potencjału, a przez to biją w przerwie między *M* i *N* iskry.

W ten sposób poprzez zwój, umieszczony między *D* i *C*, a grający rolę zwoju głównego transformatora Tesli, przebiegają szybkozmienne prądy wysokiego napięcia o częstotliwości kilku setek tysięcy na sekundę. Ten zwój główny otoczony jest zwojem wtórnym *) o wielkiej liczbie skrętów, w którym, jak to wypływa z tego, czegośmy się nauczyli o transformatorach, powstają prądy znacznie wprawdzie słabsze, ale o jeszcze wyższym napięciu. Prawdziwy wygląd transformatora Tesli niewielkich rozmiarów mamy na rys. 1008; w większych transformatorach używa się baterji lejdejskiej zamiast pojedynczej butelki. Transformator zanurzony jest w oleju parafinowym dla lepszej izolacji.



Rys. 1007.

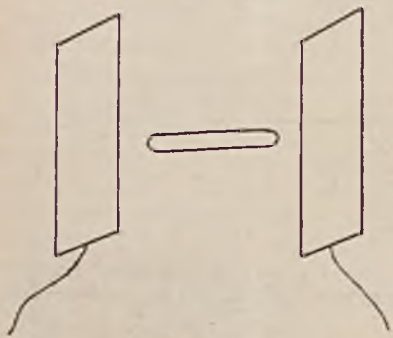
Gdy uruchomimy cewkę zasila-
jącą transformator Tesli, robiąc to
w ciemnym pokoju i osłaniając spe-
cjalnie do tego przystosowanym
kapturkiem iskrę, by blaskiem nie
raziła, ujrzymy przepyszne zjawis-
ko. Z biegunów transformatora
jak z połączonych z nimi drutów,



Rys. 1008.

*) Podobnie jak w cewce Ruhmkorffa; nie można jednak tu użyć rdzenia żelaznego (dlaczego?).

którym nadać możemy różne kształty, tryskają bogate snopy iskier. Wystarczy połączyć rurę, zawierającą rozrzedzony gaz i zaopatrzoną w jedną tylko elektrodę, z jednym



Rys. 1009.

biegunem transformatora, a gaz w rurze świeci. Możemy umieścić rurę bezelektrodową z rozrzedzonym gazem między dwiema płytkami metalowymi (rys. 1009), z których jedna połączona jest z jednym, druga z drugim biegunem transformatora, a rozrzedzony gaz w tem szybkozmiennem polu świeci. Płyty możemy umieścić dość daleko jedną od drugiej, a gdziekolwiek umieszczona między nimi taka „lampa bez drutów“ świeci. Prawda, świecenie jest słabe, niebardzo się jeszcze nadaje do technicznego zastosowania, ale zato przedstawia tę

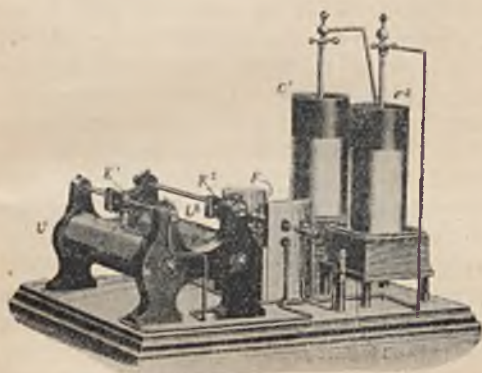
zaletę, że źródło jego pozostaje w niskiej temperaturze — jest to t. zw. światło zimne, w źródle tem nie mamy niepotrzebnej, o ile chodzi o oświetlenie, energii cieplnej w wielkich ilościach. W tem znaczeniu mówi się o tego rodzaju sposobach oświetlania jako o świetle przyszłości.

Gdy się po raz pierwszy obserwuje w transformatorze Tesli te tryskające obficie iskry, ma się wrażenie, że byłoby rzeczą niebezpieczną dotknąć bieguna przyrządu. Otóż nic podobnego. Podczas gdy dotknięcie bieguna cewki Ruhmkorffa, zwłaszcza większej, daje bardzo przykry, a nawet niebezpieczny wstrząs, dotknięcie bieguna transformatora Tesli nie grozi żadnem niebezpieczeństwem. Możemy ująć w jedną rękę lampę bezelektrodową, a drugą ręką dotknąć bieguna — lampa świeci, a więc ciało nasze wprowadzone jest w obręb rozgrywającego się zjawiska, tymczasem żadnego prawie wrażenia nie doznajemy*). Chodzi o to, że mamy tu wszak dwukrotną transformację. Już w cewce Ruhmkorffa zachodzi przekształcenie prądów silnych o niskiem napięciu na słabe o napięciu wysokiem. W transformatorze Tesli raz jeszcze transformujemy te prądy, wzmocnione wprawdzie przez kondensator, ale niemniej względnie słabe, na jeszcze wyższe napięcia, a zatem na jeszcze słabsze. Do tego dołącza się wielka częstość zmian tych prądów, przy której one raczej rozpościerają się po powierzchni ciała i nie mają, że się tak wyrazimy, czasu na przedostanie się głębiej.

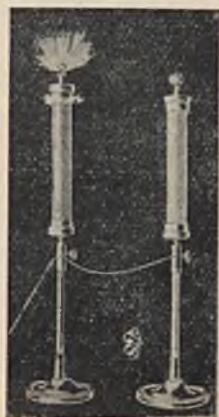
*) W chwili, gdy dotykamy bieguna, przeskakuje między nim a ręką snop iskier, który trochę parzy; dla zmniejszenia tego wrażenia należy czynić to prędkim, zdecydowanym ruchem; lepiej jeszcze dla zupełnego uniknięcia tej przykrości dotykać bieguna nie bezpośrednio ręką, a jakimkolwiek trzymanym w ręku przedmiotem metalowym — iskry między tym przedmiotem a biegunem są już dla nas całkiem obojętne.

385. Rezonans elektryczny.

Na rys. 1010 mamy układ, który winien być na podstawie wyżej opisanego zupełnie zrozumiały. Baterja lejdejska, złożona z dwu butelek C^1 i C^2 , ładuje się przez cewkę indukcyjną, nie wyobrażoną na rysunku (p. schemat na rys. 1007), i wyładowuje się przez obwód, zawierający większą lub mniejszą część zwojów L^1 i L^2 ; ta czy inna liczba skrętów tych zwojów daje się włączyć w obwód przy pomocy suwanych styków K^1 i K^2 (podobnie jak w opornicy technicznej na rys. 875); w F bije iskra. Przy danej pojemności baterji lejdejskiej możemy, regulując odpowiednio indukcję własną zwojów (przez przesuwanie styków K^1



Rys. 1010.



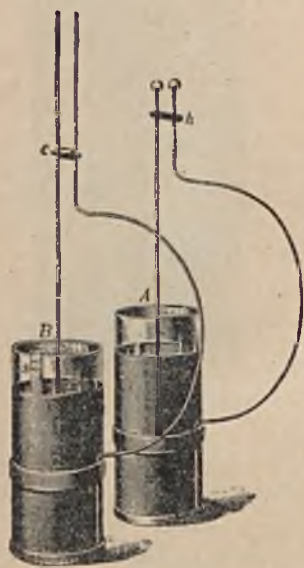
Rys. 1011.

i K^2), otrzymywać w obwodzie drgania elektryczne różnej częstości. Koniec drutu E złączyć możemy z jednym końcem cewek, wyobrażonych na rys. 1011. Każda z tych cewek składa się z szeregu skrętów drutu izolowanego i posiada określoną pojemność i indukcję własną; każdej z tych cewek właściwy jest pewien okres drgań, wyrażający się wzorem $T = 2\pi \cdot \sqrt{LC}$, podobnie jak właściwy jest okres drgań wahadła pewnej długości, lub kamertonu pewnych wymiarów.

Przypomnijmy sobie doświadczenie, opisane w t. II i wyobrażone na rys. 421. Na sznurze, rozpiętym poziomo, zawieszaliśmy tam 3 wahadła, z tych 2 jednakowej długości, 3-cie zaś nieco krótsze. Gdy jedno z wahań równej długości rozkołysaliśmy, wahadło drugie tej samej długości zaczynało się wahać, czyli, jak mówiliśmy, *rezonowało* na drgania pierwszego; krótsze natomiast, niedostrojone do tamtego, nie rezonowało; im większa stawała się obszerność drgań wahadła rezonującego, tem bardziej zmniejszała się obszerność drgań wahadła, wywołującego te drgania — kosztem jego energii tamto wykonywało coraz obszerniejsze

wahania. Jednak moglibyśmy wahania pierwszego wahadła podtrzymywać, popychając je co pewien czas we właściwym kierunku.

Bardzo podobne do tego jest rozważane teraz zjawisko elektryczne. Oto, gdy dokonamy połączeń, jak zostało wskazane, i zaczniemy przez przesuwanie styków K^1 i K^2 regulować samoindukcję naszego obwodu drgającego, jesteśmy w stanie *dostroić* nasz układ do okresu drgań jednej lub drugiej z wyobrażonych na rys. 1011 cewek Seibla (tak się nazywał autor pomysłu tych doświadczeń). I właśnie wtedy, gdy tego dostrojenia dosiegamy, cewka *rezonuje* — ustalają się w niej drgania elektryczne, jej właściwe, przez skręty jej przebiegają w jej właściwym rytmie prądy to w jednym to w drugim kierunku, a na końcach tworzą się prztem wysokie napięcia, uwidoczniające się w pięknym iskrzeniu. Na rys. 1011 widzimy właśnie lewą cewkę w rezonansie; prawa jest niedostrojona. Cewek takich można mieć więcej niż dwie, a przez przesuwanie styków K^1 i K^2 na układzie głównym, dostrajając go pokolei do tych różnych cewek, a przez to wywołując pokolei na każdej z nich świetlne objawy rezonansu.



Rys. 1012.

Inny przykład rezonansu elektrycznego mamy w doświadczeniu, wyobrażonem na rys. 1012. Z dwu butelek lejdejskich jedna (A) zaopatrzona jest w obwód z grubego drutu i wyładowanie butelki zachodzi między kuleczkami, utrzymywanymi w pewnej odległości zapomocą nasadzonego na druty pręcika ebonitowego h . Druga butelka B ma podobnie ukształtowany obwód z grubego drutu, tylko tu druty, idące od okładek wewnętrznej i zewnętrznej, łączone są metalicznie przy pomocy nasadzonego na druty pręcika metalowego e , wyładowanie zaś zachodzić musi w miejscu wąskiej szpary s , zrobionej na pasku cynfolji, naklejonej na powierzchni szkła i łączącej okładki wewnętrzną i zewnętrzną butelki. Ustawiamy butelki niedaleko jedną od drugiej, jak to widzimy na rysunku; druty, prowadzące do

okładek butelki A, łączymy z biegunami cewki i uruchamiamy cewkę. Rozpoczyna się ładowanie raz po raz butelki A i jej wyładowanie, przyczem między kuleczkami bije iskra. Wtedy przesuwamy metalowy pręcik e na obwodzie butelki B, przez co zmieniamy indukcję własną tego obwodu, a więc i częstość drgań własnych tego układu. Przy pewnem położeniu pręcika e rozpoczyna się iskrzenie w szparze s , które ustaje natychmiast, gdy pręcik z tego położenia przesuwamy wyżej lub niżej. Obwód butelki B rezonuje zatem, powstają w nim drgania elektryczne, gdy dostrajamy go do obwodu butelki A, t. j. wtedy, gdy okres jego drgań własnych równa się okresowi drgań obwodu A. Doświadczenie to przypomina nam doświadczenie z dostrojonemi kamertonami, które opisujemy

waliśmy w tomie II (ust. 216). Układ A, w którym wytwarzamy drgania elektryczne, nazywa się *wibratorem*; proces, zachodzący w wibratorze, działa w jakiś sposób na znajdujący się w pewnej odległości od niego (nie połączony z nim metalicznie!) *rezonator*, wywołując w nim powstawanie drgań własnych.

Oczywiście w obu opisanych przypadkach rezonansu energia układu rezonującego otrzymuje się kosztem energii wibratora — gdy przestajemy zasilać wibrator, zjawisko ustaje.

386. Fale elektromagnetyczne.

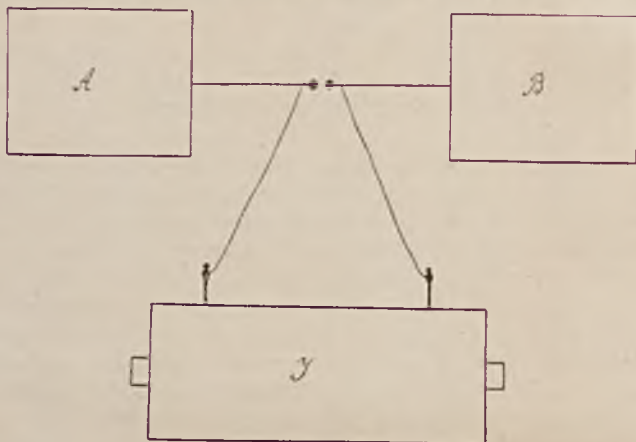
Ostatnie doświadczenie, opisane w ust. poprzednim, nasunąć musi myśl, iż podobnie jak drgający kamerton jest źródłem fal głosowych, które, dochodząc do innego dostrojonego doń kamertonu, wprawiają go w drgania rezonansowe, tak układ, w którym zachodzi rozbrojenie iskrowe, albo wyraźmy się bardziej ogólnie — układ, w którym zachodzą drgania elektryczne, jest źródłem pewnych szczególnych fal, które wywierają działanie analogiczne na dostrojony doń rezonator elektryczny. Zjawisko tych *fal elektromagnetycznych* rozważał w drodze teoretycznej wielki fizyk angielski J. C. Maxwell *) i podał prawa ich tworzenia się i rozchodzenia, zanim jakiegokolwiek doświadczenia to wykazały. Dowiódł on, że fale elektromagnetyczne rozchodzą się w dielektrykach, przyczem podał, że prędkość tego rozchodzenia się największa jest w próżni, równając się tam ściśle znanej już nam prędkości światła t. j. $300.000 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$; wykazał, że metale odbijają te fale i t. d. Niedługo po tych genialnych odkryciach teoretycznych fizyk niemiecki H. Hertz **), wslawił się doświadczeniami, potwierdzającymi całkowicie wypowiedziane przez Maxwella twierdzenia.

Hertz użył do swych doświadczeń wibratorów t. zw. *otwartych*, t. j. nie tworzących obwodów zamkniętych. Na rys. 1013 wyobrażony jest schematycznie ten typ wibratora, połączonego z zasilającą go cewką Ruhmkorffa. Od biegunów cewki druty prowadzą do prętów metalowych, mających u jednego z końców kuleczki, między którymi przeskakuje iskra; drugimi końcami pręty bywają połączone (dla zwiększenia pojemności) z płytami metalowymi, albo innego kształtu przewodnikami (np. cylindrami, kulami). Izolująca podstawa, która jest niezbędna do utrzymania wibratora, nie jest przedstawiona na schemacie. Wibrator tego typu posiada znacznie mniejszą pojemność i indukcyjność własną niż wibratory w rodzaju przedstawionego na rys. 1012. Pozwala to otrzymywać drgania o znacznie większej częstotliwości, albo, gdy-

*) James Clerk Maxwell (czyt. Dżems Klerk Maksuel; 1831—1879) profesor fizyki w Cambridge (czyt. Kembridż), znakomity teoretyk. Ujął on w formy matematyczne genialne myśli i odkrycia M. Faraday'a, tworząc ścisłą teorię zjawisk elektromagnetycznych. Działo się to w latach 1864—1873.

**) Henryk Rudolf Hertz (1857—1894), profesor fizyki najpierw w Karlsruhe, potem w Bonn; jeden z najznakomitszych fizyków świata.

byśmy się chcieli uciec do analogji akustycznej, znacznie wyższe tony w tej dziedzinie fal elektromagnetycznych. Podczas gdy w doświadczeniach, opisanych wyżej, dawały się otrzymać drgania o częstości rzędu setek tysięcy na sekundę, przy pomocy wibratorów Hertza — przez odpowiednie zmniejszenie ich wymiarów, okazało się możliwe otrzymać częstości setek milionów na sekundę i nawet większe *). Prawda, że



Rys. 1013.

temu towarzyszy jeszcze okoliczność, nie pozwalająca posuwać się w pewnych razach zbyt daleko — oto, im mniejsza jest pojemność wibratora, tem mniejsza — przy niezmiennych warunkach ładowania — jego energja, a zatem słabsze jest źródło mających być otrzymanymi fal elektromagnetycznych.

Posługując się przytoczoną już analogją akustyczną, zobaczymy, co jeszcze dało się osiągnąć przez zastosowanie wibratorów Hertza. Przypomnijmy sobie, że w każdym ruchu falowym mamy zasadniczą zależność między częstością drgań źródła, prędkością rozchodzenia się fali, a jej długością. Zależność ta wyraża się znanym wzorem

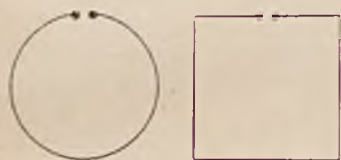
$$v = n \lambda. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

gdzie v oznacza prędkość rozchodzenia się fali, n częstość drgań, zaś λ długości fali. Przyjmując, co doświadczenia Hertza potwierdziły, że prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w powietrzu jest niemal ta sama, co w próżni, t. j. wynosi okragło $300000 \frac{\text{Km}}{\text{sek}} = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ otrzymujemy z tego wzoru dla częstości drgań np. 300 milionów na sekundę, długość fali 1 metra ($3 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sek}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sek}} \cdot \lambda$, skąd $\lambda = 100 \text{ cm}$);

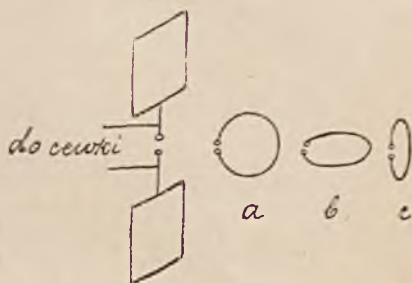
*) Zaznaczyć jednak trzeba, że do otwartego wibratora nie daje się zastosować ściśle wzór W. Thomsona na okres drgań.

większym jeszcze częstościom odpowiadają fale jeszcze krótsze. Dziś umiemy otrzymywać fale elektromagnetyczne, krótsze od 1 mm. Otóż możliwość otrzymywania fal krótkich miała ogromne znaczenie doświadczalne, pozwalając bowiem przy zastosowaniu odpowiednich środków na niewielkiej względnie przestrzeni laboratoryjnej wymierzać te długości i wogóle poddawać otrzymywane fale wielostronnym badaniom.

W celu wykrywania fal elektromagnetycznych, Hertz posługiwał się rezonatorem w postaci zgiętego łukowato albo w kształcie prostokąta (rys. 1014) drutu z niewielką przerwą, gdzie końce drutu były zaopa-



Rys. 1014.

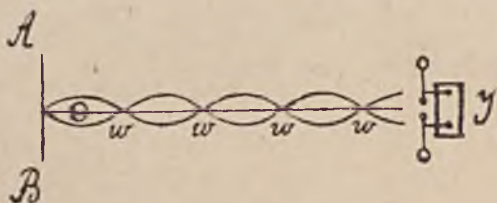


Rys. 1015.

trzone w dobrze odpolerowane kuleczki metalowe. Okres własny drgań takich rezonatorów zależy od ich wymiarów. Jeżeli do takiego rezonatora, właściwie ustawionego, dobiegają fale elektromagnetyczne, wówczas między kuleczkami daje się obserwować iskrzenie — tworzą się zatem niezbędne do tego iskrzenia siły elektromotoryczne. Właściwe ustawienie wyjaśnia rys. 1015 — trzeba, by kierunek iskry w rezonatorze był równoległy do kierunku iskry w vibratorze (w dalszym ciągu wykładu czytelnik zrozumie, dlaczego); zatem rezonator w położeniu *a* i *c* będzie rezonował, natomiast w położeniu *b* (kierunek ewentualnej iskry rezonatora jest tu prostopadły do kierunku iskry w vibratorze) rezonować nie będzie.

Przy pomocy takiego rezonatora Hertz wykonał między innymi następujące znakomite doświadczenie. Rozumował on w ten sposób: skoro vibrator jest źródłem określonych fal, to można oczekiwać zjawiska interferencji tych fal (jak fal wogóle), a więc, w szczególnych warunkach doświadczenia, możliwości otrzymania *fal stojących*. Po tem, co już kilkakrotnie mówiliśmy o falach stojących (t. II, ust. 199, 214, 220—223, 262) czytelnik zrozumie odrazu układ doświadczenia Herta (rys. 1016, porówn. rys. 417 w t. II). *I* oznacza induktor Ruhmkorffa, zasilający vibrator Herta; między kuleczkami *a* i *b* przeskakuje iskra. Równoległe do kierunku iskry ustawiona jest w pewnej odległości ołyta metalowa *AB* (zwierciadło), do której wysyłane przez vibrator fale kierują się prostopadłe, a odbijając się, wracają w tę stronę, z której przyszły, i interferują z falami podążającymi w kierunku zwierciadła. Przy odpowiedniej odległości między źródłem fal a zwierciadłem (podobnie,

jak przy odpowiedniej odległości między źródłem głosu a zwierciadłem w doświadczeniu, wyobrażonem na rys. 417), tworzą się fale stojące elektromagnetyczne, z dostępnem dla obserwacji rozmieszczeniem węzłów. Na płycie metalowej musi oczywiście powstać węzeł, tam bowiem nie może się wytworzyć ani utrzymać różnica potencjałów; przeskakiwanie



Rys. 1016.

iskry przypadnie oczywiście w miejscu największych drgań napięcia elektrycznego *). Umieszczając w różnych punktach na drodze między iskrą a zwierciadłem swój rezonator, jak to wyobrażone jest na rysunku, Hertz wykazał, że istotnie w określonych zupełnie miejscach obserwuje się w nim maximum iskrzenia, natomiast w innych określonych miejscach — w węzłach — iskrzenia tego niema. Nietylko więc w ten sposób zostało potwierdzone przypuszczenie co do możliwości tworzenia się fal elektromagnetycznych stojących, ale dała się zmierzyć odległość między węzłami, t. j. wymierzyć długość $\frac{1}{2}$ fali, a więc i długość fali elektromagnetycznej (λ), danej w doświadczeniu. Ponieważ z drugiej strony dawał się obliczyć okres drgań, z którym miano do czynienia, a więc i częstotliwość drgań (n), zdołano ze wzoru

$$v = n \lambda$$

gdzie n i λ były znane, znaleźć prędkość v rozchodzenia się fal elektromagnetycznych. Okazało się, że istotnie prędkość ta równa się prędkości światła, co zostało jeszcze potwierdzone przez inne doświadczenia, o czem niżej.

Czytelnik zapewne wyczuwa, co pozatem zawiera wynik opisanego doświadczenia. Skoro się potwierdza, że fale elektromagnetyczne rozchodzą się z prędkością światła, powstaje pytanie, czy aby te fale, na których rozchodzeniu się polega istota rozchodzenia się energii promienistej, w szczególności światła, nie są również falami elektromagnetycznymi? Czy zatem zjawisko promieniowania, w szczególności światła, nie jest zjawiskiem elektromagnetycznym? Z dalszego ciągu rozważań czytelnik nabierze przekonania, że odpowiedź na to pytanie, dana — dodajmy — przez Maxwella, nie mogła być inna, jak twierdząca.

*) Zjawisko nie jest tak bardzo proste, jak je tu opisaliśmy: podczas, gdy w analogji akustycznej o długości fali decyduje częstotliwość drgań źródła fal, tutaj ta rola przypada w udziale rezonatorowi. Nie zmienia to wszakże zasadniczej idei doświadczenia.

387. Fale elektromagnetyczne (ciąg dalszy).

Badanie fal elektromagnetycznych mogło być dokonywane tylko przy zastosowaniu przyrządów, któreby pozwalały te fale wykrywać, reagując na nie w ten czy inny sposób. Do tego właśnie celu stosowane były opisane w poprzednim ustępie rezonatory. Ogólnie biorąc, przyrządy takie, a znamy ich dziś mnóstwo, nazywają się *detektorami* (wykrywaczami, jakby można to było przetłumaczyć na polski). W r. 1890 został wynaleziony przez fizyka francuskiego Branly'ego najstarszy z detektorów (po rezonatorach Hertza), zwany *kohererem*. W najprostszej postaci *koherer* tworzy rurka szklana, wypełniona opilkami metalowymi (np. miedzianymi), w której dwa przeciwległe końce wstawione są poprzez korki elektrody (np. zwykle druty miedziane), się-



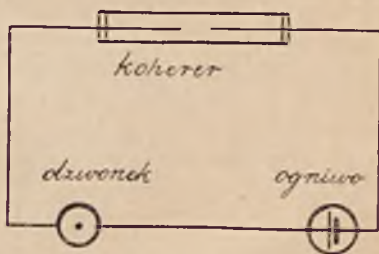
Rys. 1017 a.



Rys. 1017 b.

gające w głąb opilek (rys. 1017a). Na rys. 1017b widzimy koherer bardziej udoskonalony: w zwężonej części zalutowanej rurki szklanej, z której usunięte jest powietrze, mieszczą się dwa niewielkie walce srebrne, do których doprowadzone są z zewnątrz druty; między walcami, mającymi średnice ok. 2 mm i odległymi jeden od drugiego również o jakie 2 mm, mieszczą się drobne opilki niklowe z niewielką domieszką drobnych amalgamowanych bryłek srebra. Długość całej rurki koherera, wyobrażonej na rys. 1017b, wynosi ok. 4 cm.

Koherer ma tę właściwość, iż jego opór elektryczny jest naogół bardzo znaczny, a więc gdy go włączamy np. w obwód, zawierający źródło prądu i dzwonek (rys. 1018), nie otrzymujemy w obwodzie prądu dostatecznie silnego, aby dzwonek dzwonił. Pochodzi to stąd, że opilki metalowe i stykające się z nimi elektrody nie są w dostatecznie ścisłym zetknięciu, nie tworzą zatem jednolitej masy metalicznej, dobrze przewodzącej prąd. Jeśli jednak do koherera dochodzą fale elektromagnetyczne, opór jego ogromnie się zmniejsza (przy obserwacji mikroskopowej widać, że wtedy między poszczególnymi bryłkami opilek przeskakują iskierki, które te bryłki spajają; w ten sposób tworzy się dobre zetknięcie tych bryłek, konieczne dla lepszego przewodnictwa); prąd zaczyna przepływać przez obwód i dzwonek dzwoni. Gdy fale przestają padać na koherer, zachowuje on dalej małą wartość oporu; wystarczy jednak wstrząsnąć go i w ten sposób rozluźnić utworzone kontakty, a opór jego wraca do pierwotnej wielkiej wartości.



Rys. 1018.

Zastosowanie koherera odegrało wielką rolę w badaniu fal elektromagnetycznych i w zastosowaniach technicznych tych fal. Między innymi możemy użyć tego przyrządu do ciekawych doświadczeń wykładowych, zapoznających nas z własnościami fal elektromagnetycznych *).

Fale elektromagnetyczne, jak przepowiedział Maxwell, a sprawdził Hertz, ulegają na powierzchni metalicznych przewodników odbiciu, przy przejściu zaś z jednego dielektryku do innego — załamaniu; dają również, jak każde fale, zjawisko uginania się (dyfrakcji), a poza tem i zjawisko polaryzacji. Wszystko to można wykazać za pomocą następujących doświadczeń.

Przedewszystkiem sporządzamy z blachy zwierciadła paraboliczne, z których w ogniskowej linii jednego umieszczamy wibrator, w ogniskowej linii drugiego — koherer. Na rys. 1020 widzimy te urządzenia,

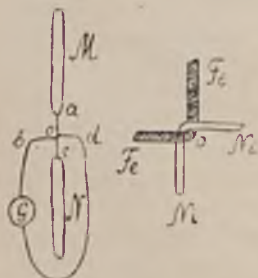


Rys. 1020.

przyczem oczywiście tych otworów w zwierciadłach, przez które widać szczegóły, niema w rzeczywistości. Wibrator, utworzony z dwu prętów metalowych, zasłojonych polerowanymi kuleczkami, zasilany jest przez niewielką cewkę. Stosując do rozważanego przypadku ustaloną już dawniej przez nas dla ruchu falowego terminologję, powiemy, że wibrator „promieniuje“

dookoła; wszakże umieszczony w ognisku zwierciadła parabolicznego, daje możność otrzymania snopa promieni równoległych (fale płaskie), biegnących w kierunku osiowej płaszczyzny głównej zwierciadła **). Temu snopowi promieni równoległych można nadać dowolny kierunek, np. w stronę drugiego zwierciadła parabolicznego, w którego ognisku mieści się koherer — tak właśnie ustawione są naprzeciwko

*) Z pośród różnych detektorów zasługuje na uwagę detektor termoelektryczny, przedstawiony schematycznie na rys. 1019.



Rys. 1019.

Dwa cylindry metalowe M i N złączone są metalicznie przy pomocy spojonych ze sobą dwu drutów żelaznego i niklowego w ten sposób, że drut żelazny aob dotyka niklowego od tyłu — cylindry M i N łączą się zatem w połowie przez drut żelazny ao, w połowie przez drut niklowy oc. Gdy detektor rezonuje na odpowiedni mu drgania (dla tego wymiary cylindrów M i N winny być dobrane odpowiednio do wibratora), przebiegające przez drucik aoc prądy ogrzewają spójnienie dwu różnych metali i w obwodzie obGdo, zawierającym galwanometr, tworzy się prąd termoelektryczny, warunkujący wychylenie galwanometru.

***) P. koniec ust. 231, gdzie była mowa o zwierciadłach parabolicznych.

siebie dwa zwierciadła na rys. 1020 *), gdzie, jak widzimy, koherer C mieści się w obwodzie z dzwonkiem G i ogniwnem E (por. rys. 1018). Ten układ doświadczenia przypomina w zupełności doświadczenie ze zwierciadłami kulistymi, które wykonywaliśmy, rozważając zjawiska głosu i promieniowania (p. rys. 402 w tomie II). Promienie równoległe, padając na drugie zwierciadło (II), zbierają się w ognisku, gdzie mieści się koherer i pobudzają go w opisany sposób do działania — dzwonek wtedy dzwoni **).

Jeżeli między zwierciadłami (I) i (II) umieszczamy prostopadle do kierunku biegu promieni ustawioną blachę dostatecznie wielkich wymiarów i powtarzamy doświadczenie, dzwonek się nie odzywa — promienie (fale), idące od zwierciadła (I) ulegają odbiciu i nie dochodzą skutkiem tego do zwierciadła (II). Jeżeli jednak wymiary blachy nie są dostatecznie wielkie, koherer reaguje, co świadczy, że fale uginają się dookoła ustawionej na ich drodze przeszkody.

Zjawisko odbijania się fal elektromagnetycznych można wykazać jeszcze inaczej, jak to przedstawia rys. 1021, gdzie pominięte są dla uproszczenia rysunku zarówno cewka, jak dzwonek.

Ustawiamy zwierciadła nie jedno naprzeciwko drugiego, jak w doświadczeniu poprzednim, ale ukośnie jedno względem drugiego, tak, by promienie, idące od zwierciadła I, nie mogły iść w kierunku zwierciadła II; wtedy dzwonek oczywiście



Rys. 1021.

nie dzwoni. Ale jeżeli umieścimy blachę M, jak zwierciadło płaskie, tak, jak to widzimy na rysunku, to przy pewnym jego położeniu promienie, odbite od zwierciadła M, kierują się do zwierciadła II i dzwonek zaczyna dzwonić. Możemy sprawdzić, że zachodzi to wtedy, gdy zwierciadło płaskie pochylone jest symetrycznie względem obu zwierciadeł I i II, t. j. że odbicie fal elektromagnetycznych zachodzi zgodnie z prawem, iż *kąt odbicia równa się kątowi padania*.

Zjawisko załamania fal elektromagnetycznych wykazać można tak, jak to wytłumaczone jest na rys. 1022. Zwierciadła I i II ustawiamy znowu tak, by bezpośrednio promienie, idące od zwierciadła I, nie mogły trafić na zwierciadło II. Wtedy na drodze promieni ustawiamy wielki pryzmat P z parafiny albo smoły — przy odpowiednim rozmie-

*) Zwierciadła stoją tu blisko jedno od drugiego, aby nie powiększać zbytnio rysunku, — w rzeczywistości ustawiamy je w odległości kilku lub kilkunastu metrów, o ile tylko na to pozwala sala wykładowa.

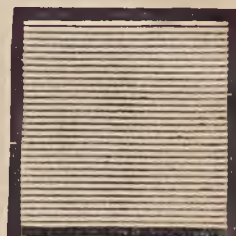
**) Z chwilą przerwania iskrzenia w wibratorze, dzwonek dalej dzwoni, o ile nie wstrząśniemy koherera, stuknąwszy go np. lekko palcem; zazwyczaj robi się tak, że w obwodzie mieści się młoteczek elektryczny, funkcjonujący jak młoteczek dzwonka i uderzający zlekka po kohererze; czyni to wstrząsanie koherera zbyt cichym, gdyż przestaje on automatycznie działać z chwilą, gdy ustaje padanie fal na zwierciadło (II). Szczegółów tych nie uważamy za potrzebne bliżej wyjaśniać.

szczeniu zwierciadeł i pryzmatu promienie, załamane w pryzmacie, padają na zwierciadło II i dzwonek natychmiast daje o tem znać.

Jedno jeszcze doświadczenie ze zwierciadłami godne jest uwagi. Ustawiamy zwierciadła tak, jak w doświadczeniu pierwszym (rys. 1020) i wstawiamy pomiędzy nie wielką ramę drewnianą z rozpiętymi na niej



Rys. 1022.



Rys. 1023.

równoległymi drutami (rys. 1023). Jeżeli rama ustawiona jest tak, iż druty są równoległe do linii osiowej wibratora i koherera (w przypadku, przedstawionym na rysunku, poziomo), układ drutów nie puszcza fal do zwierciadła II, lecz odbija je jak jednolita płyta metalowa. Jeżeli natomiast druty ustawione są pionowo, t. j. prostopadle do linii osiowych wibratora i koherera, dzwonek dzwoni. Dzwonek dzwoni również, jeżeli układ drutów pochylamy pod kątem innym niż 90° względem wymienionych linii osiowych. Wskazuje to, iż rozchodzące się w rozważanem zjawisku drgania posiadają charakter *kierunkowy*. Doświadczenie to przypomina doświadczenie ze spolaryzowanym światłem, gdy je gasimy, ustawiając odpowiednio nikol-analizator, którego rolę w danym razie gra układ równoległych drutów. Możemy więc, nie wdając się narazie w bliższe omawianie sprawy, powiedzieć, że promieniowanie elektromagnetyczne, wysyłane przez wibrator, jest *spolaryzowane*.

388. Fale elektromagnetyczne, kierowane wzdłuż drutów.

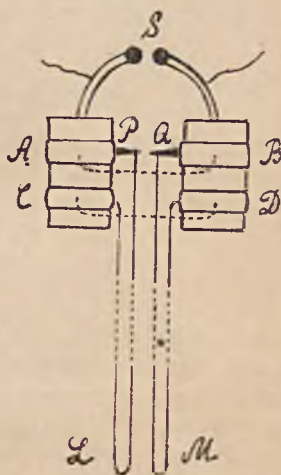
Przypuśćmy, że do izolowanego przewodnika A przymocowany jest również izolowany (np. zawieszony na jedwabnych nitkach) nieograni-



Rys. 1024.

czony długości drut MN (rys. 1024). Przypuśćmy, że przewodnik A posiada określoną wartość potencjału, a zatem tej samej wartości potencjałów mamy na całej długości drutu MN. Wyobraźmy sobie jednak, że

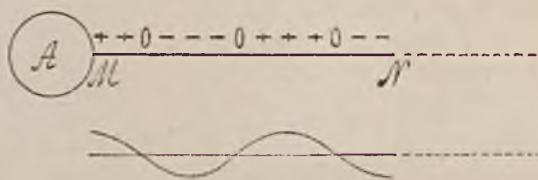
potencjał kuli A nie jest stały, lecz ulega zmianom — jest to np. jedna z kul wibratora, a więc jej potencjał jest to dodatni, to ujemny, przechodząc okresowo przez zawarte między pewnymi granicami wartości. Powstaje pytanie, czy tym zmianom potencjału kuli towarzyszą takie same jednoczesne zmiany potencjału na całej długości drutu we wszystkich punktach, czy też te zmiany tem później zachodzą w różnych punktach drutu, im dalej one są względem A położone? Innymi słowy, chodzi o to, czy dane zakłócenie elektryczne rozchodzi się wzdłuż drutów z nieskończone wielką prędkością, czy też z określoną skończoną prędkością, jakkolwiek zresztą wielką. Doświadczenie wykazało, że tylko ta druga odpowiedź jest słuszna, ale co więcej, okazało się, że prędkość tego rozchodzenia się równa się prędkości światła. Piękne doświadczenie, bezpośrednio rozstrzygające to pytanie, wykonał fizyk francuski R. Blondlot w r. 1893. Schemat doświadczenia jest następujący (rys. 1025). Wewnętrzne strony dwu cylindrów szklanych wyklejone są, jak zwykle w butelkach lejdejskich, cynfolją, zewnętrzne zaś okładki tworzą dwa paski cynfolji A i C na jednej butelce, oraz także paski B i D na drugiej. Paski A i B, a także C i D połączone są półprzewodnikiem — zwilżonym sznurem, oznaczonym na rysunku kropkami. Poza tem paski A i B bezpośrednio są połączone z ostrzami P i Q, paski zaś C i D połączone są również z temi ostrzami za pośrednictwem długich (1000 m—2000 m) drutów. Okładka wewnętrzna jednej butelki łączona jest z jednym biegunem, okładka wewnętrzna drugiej — z drugim biegunem czynnej maszyny elektrostatycznej. Gdy różnica potencjału na tych okładkach osiąga wartość, odpowiadającą biciu iskry w przerwie S między kuleczkami, łączonymi metalicznie z okładkami wewnętrznymi butelek, następuje w S wyładowanie iskrowe. Wszakże, gdy np. wewnętrzna okładka lewej butelki ładuje się dodatnio, prawej zaś ujemnie, to przez indukcję na paskach A i C tworzą się naboje ujemne, na połączonych zaś z nimi półprzewodnikami paskach B i D zjawiają się naboje dodatnie. Z chwilą gdy w S zachodzi wyładowanie, zachodzi również wyładowanie między ostrzami P i Q, przyczem zrównywiają się poprzez iskrę zarówno potencjały pasków A i B jak i pasków C i D (półprzewodnik nie wchodzi wtedy w grę — stawia on zbyt wielki względnie opór zachodzącym przytem drganiom elektrycznym). Obserwując wyładowanie iskrowe między ostrzami P i Q przy pomocy zwierciadła wirującego, Blondlot stwierdził, iż zachodzą tu właściwie dwa wyładowania — wcześniej zrównywiają się potencjały pasków A i B, od których krótkie druty prowadzą do P i Q, później zaś wyrównywiają się potencjały pasków C i D, połączonych z P i Q



Rys. 1025.

długimi drutami. Z danych doświadczenia można było znaleźć, jakie jest opóźnienie drugiego wyładowania iskrowego względem pierwszego, znając zaś długość drutów CLP i DMQ, wzdłuż których winno było przebiec w tym czasie zakłócenie elektryczne, można było obliczyć prędkość tego przebiegu. Okazało się, jak już powiedzieliśmy, że prędkość ta jest równa prędkości światła. Okazało się poza tem, że na prędkość tę otrzymuje się ta sama wartość niezależnie od rodzaju użytych w doświadczeniu drutów — nie mamy tu zatem do czynienia z czemś, co by się przenosiło poprzez druty, ale z czemś, co się porusza w otaczającym drut dielektryku — drut nadaje tu tylko kierunek przebiegającemu w dielektryku procesowi.

W przypadku zatem, który mamy na rys. 1024, zjawisko przebiega tak, że gdy kolejno kula *A* ma potencjał *plus*, potem *zero*, potem *minus*, potem znowu *zero*, znowu *plus*, i t. d., zmiany te przebiegają wzdłuż



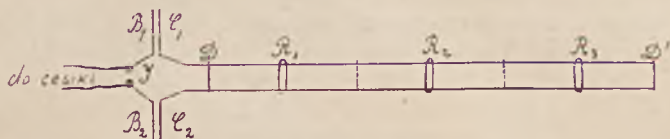
Rys. 1026.

drutu tak, iż w pewnym momencie przypadają w określonych miejscach drutu potencjały dodatnie, w innych ujemne, poprzedzielane miejscami, gdzie potencjał jest równy zero — mniej więc tak, jak to mamy na rys. 1026, gdzie przy założeniu sinusoidalnych zmian potencjału na kuli, rozmieszczenie potencjału na drucie *w pewnym momencie* może być przedstawione zapomocą podanej na rysunku krzywej. Z biegiem czasu *fala* ta przesuwa się wzdłuż drutu z prędkością światła.

Jeżeli zakłócenie podobne biegnie wzdłuż drutu nie pomyślanego jedynie, ale naprawdę nam danego, a zatem mającego określoną długość, to możemy rzecz tę rozważać tak, że biegnąca wzdłuż drutu fala dochodzi do jego końca, odbija się tam i wraca wzdłuż tegoż drutu, co przy dalszem podążaniu fal od *M* w stronę *N*, dać może przy odpowiednich warunkach poddającą się pomiarowi *falę stojącą*.

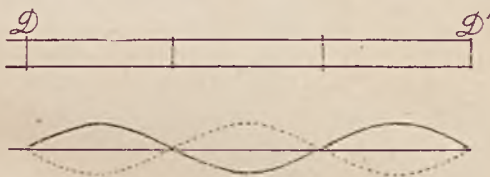
Już Hertz próbował kierować odkryte przez siebie fale elektromagnetyczne wzdłuż drutów. Szczególnie zręczny sposób tego rodzaju doświadczenia podał fizyk niemiecki Lecher (1890), którego metodę tu opiszemy (p. rys. 1027). Zasiłamy przy pomocy cewki *I* wibrator, utworzony z dwu kuleczek, między którymi zachodzi wyładowanie iskrowe, i złączonych z niemi metalicznie dwu płyt metalowych B_1 i B_2 . Naprzeciwko płyt B_1 i B_2 ustawione są w odległości 1 — 2 cm dwie takie same płyty C_1 i C_2 , złączone z biegnącymi równolegle w odległości jakich 10 — 15 cm jeden od drugiego drutów długości kilku metrów. Wibrator ma właściwy mu okres drgań. Indukcyjnie wzbudzają się

drżania w płytach C_1 i C_2 , złączonych w jeden układ zapomocą t. zw. „mostka“ D , którym jest drucik, położony we właściwym miejscu na równoległe rozpiętych drutach. Płyty C_1 i C_2 kolejno przybierają w określonym rytmie potencjały przeciwnych znaków, a wzdłuż drutów biegną jedna za drugą fale elektromagnetyczne, które po dojściu do końca drutów odbijają się tam i wracają w stronę, skąd przyszły, spotykając



Rys. 1027.

się z podążającymi wciąż dalej od C_1 i C_2 falami. Przy odpowiednich warunkach tworzą się tu *fale stojące*, które wykryć można, zawieszając w różnych miejscach na odpowiadających sobie punktach obu drutów rurkę Geisslera, jak to zaznaczone jest na rysunku. Stwierdzamy, że w niektórych miejscach rurka ta jasno świeci, w innych słabiej, jeszcze w innych nie świeci wcale. Oczywiście nie świeci ona tam,

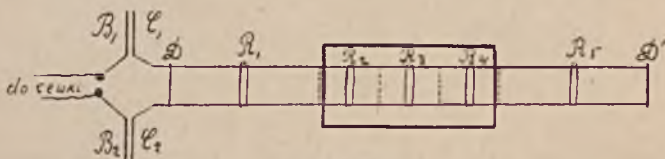


Rys. 1028.

gdzie przypadają *węzły* dla napięć elektrycznych, t. j. gdzie rurka rozpięta jest między takimi miejscami drutów, w których nie zachodzą wcale zmiany potencjału; przeciwnie rurka najjaśniej świeci tam, gdzie te wahania potencjałów zachodzą najsilniej. Przerzucając mostek na końcach drutów (D' na rysunku) czynimy tam przez to węzeł, a przez odpowiednio dobrane położenie pierwszego mostku osiągamy ten skutek, że na całej długości drutów mieści się kilka półfal, których długości się mierzy przez wymierzenie odległości między węzłami, czy też (co jest gorsze), między temi miejscami, gdzie świecenie rurki Geisslera jest najmocniejsze. Na rysunku położenia rurki w środku między kolejnymi węzłami, zaznaczonemi kropkami, wyobrażone są w R_1, R_2, R_3 . Rozmieszczenie wartości potencjału na drutach w pewnym momencie wyobrażać możemy tak, jak to przedstawia rys. 1028. Podczas gdy w węzłach (zaznaczonych kropkami) oraz przypadających tam, gdzie leżą druciki D i D' nie zachodzą wcale wahania potencjału. na częściach drutu, przypadających między węzłami, w odstępach czasu, równych połowie okresu drgań, znaki potencjałów ulegają ko-

lejno zmianom, największa zaś obszerność tych zmian przypada w środku między węzłami.

Doświadczenia według schematu Lechera mają to doniosłe znaczenie, iż druty można umieścić w naczyniu, zawierającym jakikolwiek ciekły dielektryk i badać rozchodzenie się fal elektromagnetycznych w tym dielektryku. Możemy w ten sposób porównywać długości fal danej częstości w powietrzu i innych dielektrykach (p. doświadczenie Kundta z dziedziny zjawisk głosowych w t. II, ust. 214) a stąd wnosić o prędkości rozchodzenia się fal w tych dielektrykach w sto-



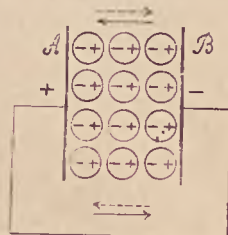
Rys. 1029.

sunku do prędkości ich w powietrzu. Na rys. 1029 mamy właśnie wyobrażone takie doświadczenie z drutami, zanurzonemi częściowo w naczyniu z cieczą. Tą drogą daje się ustalić nie tylko fakt, że w różnych dielektrykach prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych jest różna, ale również fakt, że prędkość w jednym i tym samym ośrodku zależy od długości fali, co przypomina nam znany, analogiczny fakt z dziedziny nauki o promieniowaniu, tłumaczący zjawisko rozszczepienia (dyspersji) przy załamaniu. Że w danym razie, jak już o tem mówiliśmy, mamy do czynienia ze zjawiskiem, odbywającym się w dielektryku, otaczającym druty, które tylko nadają kierunek rozchodzeniu się fal, same zaś innego udziału w zjawisku nie biorą, dowodzi fakt, że na ilościową stronę zjawiska nie wpływa ani materia, użytych do doświadczenia drutów, ani ich grubość.

389. W jaki sposób rozchodzi się fala elektromagnetyczna.

Na końcu ust. 383 rozważaliśmy zjawisko wahadłowego rozbrojenia kondensatora, wskazując na zachodzące przytem przemiany energii elektrycznej kondensatora w energję magnetyczną pola, wytworzonego przez prąd w przewodniku, łączącym okładki kondensatora. Chcieliśmy w ten sposób podkreślić charakter istotny, *elektromagnetyczny* danego zjawiska. Zwróćmy jeszcze uwagę na jeden szczegół niezmiernie ważny, o ile chodzi o ujęcie całokształtu tego zjawiska. Ten sposób ujęcia zawdzięczamy Maxwellowi, według którego prądy elektryczne istnieć mogą jedynie w obwodach zamkniętych. W przypadku np. naładowanego kondensatora, między którego płytami mieści się jakikolwiek dielektryk, mamy w tym ośrodku taki stan rzeczy, który określamy mianem polaryzacji dielektrycznej (p. rys. 649 oraz ust. 300).

Zgruba przedstawia to rys. 1030, gdzie zaznaczone są przesunięcia elektronów w cząsteczkach, które stanowią właśnie o tej dielektrycznej polaryzacji. Z chwilą, gdy łączymy płyty *A* i *B* kondensatora drutem, po drucie podążają elektrony od płyty *B* do *A*, między płytami zaś ze zmianami pola idzie w parze zanikanie polaryzacji dielektrycznej, t. j. towarzyszy temu przesunięcie się elektronów w cząsteczkach w kierunku od płyty *A* do *B*, czyli w kierunku, zgodnym z kierunkiem ruchu elektronów w drucie.



Rys. 1030.

Te przesunięcia elektronów w cząsteczkach traktujemy również jako prąd, a więc mamy tu prąd w całkowicie zamkniętym obwodzie (strzałka kropkowana na rysunku) *).

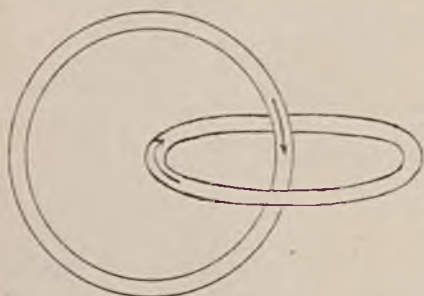
Maxwell posunął się jeszcze dalej i przyjął, że nawet w przypadku kondensatora próżniowego, t. j. gdy niema żadnych cząsteczek materialnych między płytami i nie może być mowy o jakichkolwiek przesunięciach elektronów, samo tworzenie się i znikanie pola elektrycznego między temi płytami równoważne jest prądowi elektrycznemu — są to t. zw. *prądy Maxwella*. W przypadku istnienia ośrodka materialnego między płytami kondensatora (rys. 1030) budowę tego ośrodka wyobrażamy sobie jako określone rozmieszczenie jego cząsteczek w próżni, a zatem i wtedy obok przesunięcia elektronów w cząsteczkach mamy też tworzenie się pola w próżni, czyli powstawanie owych *prądów Maxwella*.

Ujęcie takie z tego powodu jest ważne, iż musimy założyć, co doświadczenie zupełnie potwierdza, iż jakikolwiek mamy prąd elektryczny — czyto konwekcyjny (ruch elektronów w metalu także jest zjawiskiem konwekcyjnym, podobnie jak strumienie elektronów w rurze katodowej), czyto prąd dielektryczny, czy w najczystszej postaci prąd Maxwella — zawsze temu prądowi towarzyszy tworzenie się pola magnetycznego. I odwrotnie, tworzeniu się lub znikaniu pola magnetycznego musi towarzyszyć tworzenie się prądu konwekcyjnego, o ile ma on w czem powstać (np. prąd indukcyjny w zwojach drutów, obejmujących tworzące się lub znikające linie i rurki pola magnetycznego) oraz prądów dielektrycznych wraz z prądami Maxwella, jeżeli ośrodek, gdzie pole magnetyczne znika lub powstaje, jest dielektrykiem, względnie tylko prądów Maxwella, jeżeli zjawisko zachodzi w próżni.

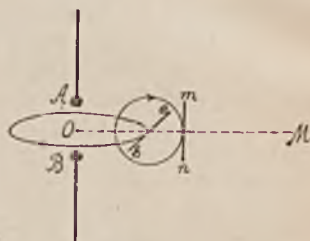
Biorąc to wszystko pod uwagę, przypomnijmy sobie jeszcze, że linie pola magnetycznego, powstającego dokoła obwodu prądu elektrycznego, rozmieszczają się tak, jak to przedstawia rys. 1031 (p. ust. 331) — kierunek natężenia pola magnetycznego jest poprzeczny względem linii

*) Uważając za kierunek prądu w drucie, tak jak to przyjęte jest w technice, kierunek od płyty dodatniej *A* do ujemnej *B*, będziemy musieli za kierunek tego swoistego prądu dielektrycznego przyjąć kierunek od płyty *B* do *A*, t. j. znowu będziemy mieli w jedną stronę skierowany prąd w całym obwodzie zamkniętym (strzałka ciągła na rysunku).

prądu w tym punkcie obwodu, który jest środkiem rozważanej linii pola magnetycznego. Z drugiej strony znajomość zjawiska indukcji prądów oswoiła nas z faktem, że podobnie poprzecznie kierują się linje prądu wzbudzonego (teraz już jest obojętne dla nas, czy mówimy o prądzie konwekcyjnym, dielektrycznym, czy Maxwellowskim) względem



Rys. 1031.

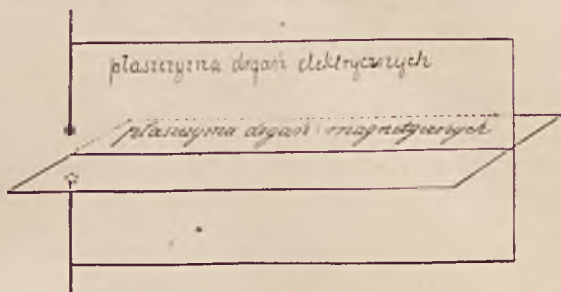


Rys. 1032.

zmieniających się w liczbie linii pola magnetycznego, t. j., że ustosunkowanie się tych kierunków daje się tak samo przedstawić przez schemat, wyobrażony na rys. 1031.

Przypuśćmy więc, iż mamy iskrowe wyładowanie w wibratorze (rys. 1032); w chwili przeskakiwania pierwszej iskry, zatem przejścia prądu — dajmy nato — w kierunku od kulki A do B (w znaczeniu technicznym), tworzą się linje pola magnetycznego, z których jedna jest na rysunku zaznaczona; narastaniu natężenia pola magnetycznego towarzyszy tworzenie się linii prądu (dielektrycznego i Maxwellowskiego), z których znowu jedna (poprzeczna względem tamtej) zaznaczona jest na rysunku. Rosnącemu natężeniu tego pola elektrycznego towarzyszy znów powstawanie linii pola magnetycznego i t. d. Rozpatrując to, co się dzieje w kierunku określonym, np. w kierunku prostej OM, widzimy, że w poszczególnym punkcie tej prostej tworzą się kolejno linje pola elektrycznego i magnetycznego, skierowane do siebie prostopadłe (jak styczne *ab* i *mn* do wyobrażonych na rys. 1033 linii kołowych). Ponieważ zaś w wibratorze proces przebiegania prądu zachodzi okresowo, przeto w kierunku OM biegają jedne za drugimi zakłócenia, tworzące *Jalę elektromagnetyczną*, przyczem zakłócenia te mają zaznaczony charakter kierunkowy — linje pola elektrycznego są równoległe do kierunku iskry, linje pola magnetycznego — prostopadłe do tamtego kierunku (rys. 1033); zauważmy, iż jedne i drugie drgania zachodzą *poprzecznie* względem kierunku rozchodzenia się fali. Na podstawie tego, co wiemy o zjawisku polaryzacji (p. t. II, rozdz. VIII), powiadamy, że obserwowane tu drgania elektryczne są *spolaryzowane*, przyczem płaszczyzny drgań elektrycznych i magnetycznych są do siebie prostopadłe. W ten sposób staje się dla nas zrozumiały wynik doświadczenia z siatką drucianą, opisanego na końcu ust. 387 i wykazującego ową polaryzację. Jeżeli siatka ustawiona jest tak, że druty przypadają równoległe do kierunku iskry, to z kierunkiem tym zgadzają się kierunki linii pola

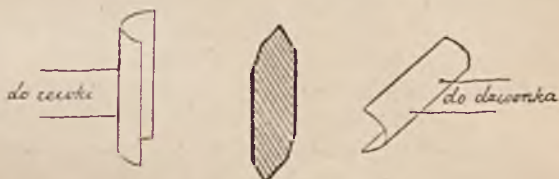
elektrycznego, a ponieważ w przewodniku nie mogą się utrzymać napięcia elektryczne, tworzą się bowiem zaraz prądy, powstaje ciepło Joule'a, a w ten sposób zachodzi pochłanianie energii, dobiegającej do drutów fali, dalsze posuwanie się fali zostaje zahamowane.



Rys. 1033.

Możemy ustawić zwierciadła Hertza tak, że wibrator stanie pionowo, a osi zaś ogniskowa drugiego zwierciadła, gdzie przypada koherer, poziomo (rys. 1034, a); między zwierciadłami umieszczamy ramę z drutami tak, by kierunek ich

przypadał pod kątem 45° względem poziomu. Czytelnik łatwo zrozumie, iż wtedy zajdzie częściowe przechodzenie drgań elektrycznych poprzez siatkę — drgania pionowe rozłożą się na 2 składowe,

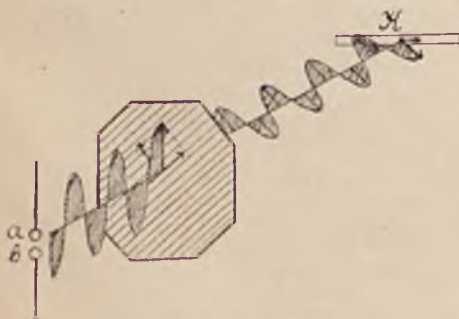


Rys. 1034a.

z których te, które przypadają w kierunku drutów, zostaną pochłonięte, przejdą zaś wyłącznie te, których kierunek jest prostopadły do kierunku drutów (rys. 1034 b). Po dojściu do koherera, w kierunku jego osi będą czynne jedynie drgania, tworzące rzut drgań, biegnących od siatki do koherera, na kierunek poziomy. Wyjaśnia to w zupełności rysunek. Doświadczenie w tej postaci winno przypomnieć czytelnikowi

dawniej rozważane doświadczenia ze spolaryzowanym światłem.

W przypadku fal stojących, wytworzonych metodą Lechera wzdłuż drutów, drgania elektryczne zachodzą w płaszczyźnie drutów prostopadle do ich długości, magnetyczne natomiast w płaszczyźnie do tamtej prostopadłej. Rurka Geisslera reaguje tylko na drgania potencjału elek-



Rys. 1034 b.

trycznego — świeci najjaśniej w miejscach, gdzie obszerność tych drgań jest największa *).

A teraz jeszcze jedno. Na str. 98 i 183 mówiliśmy o wartości energii w poszczególnych punktach pola elektrycznego i magnetycznego. Wi-

dzieliśmy, że o ile pola te wytworzone są w próżni, gęstość energii elektrycznej, względnie magnetycznej, wyraża się wzorem $\frac{F_e^2}{8\pi}$,

względnie $\frac{F_m^2}{8\pi}$, gdzie F_e oznacza natężenie pola elektrycznego, zaś F_m

natężenie pola magnetycznego w rozważanym punkcie pola. O ile pola te wytworzone są w ośrodku o stałej dielektrycznej D i przenikliwości

magnetycznej μ , na wartość gęstości mamy $\frac{DF_e^2}{8\pi}$ i $\frac{\mu F_m^2}{8\pi}$. Otóż, gdy

rozchodzą się fale elektromagnetyczne, w poszczególnych punktach ośrodka, gdzie się to dzieje, wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego ulega perjodycznym zmianom, obszerność zaś tych zmian zmniejsza się wraz z rosnącą odległością od źródła fal elektromagnetycznych. Rozchodzenie się więc fali elektromagnetycznej jest przenoszeniem się energii elektromagnetycznej z jednych miejsc ośrodka do innych, coraz dalej od źródła położonych.

390. Teoria elektromagnetyczna światła.

Zaznaczyliśmy wyżej kilkakrotnie na podstawie podanych faktów, że przypuszczenie Faraday'a o ścisłym związku, zachodzącym między zjawiskami elektromagnetycznymi a zjawiskami promieniowania, w szczególności światła, były zupełnie słuszne. To, co poznaliśmy teraz, wyraźnie wskazuje na istotę tego związku. Oto, krótko mówiąc, fale energii promienistej, w szczególności fale świetlne, to nie innego, jak fale elektromagnetyczne; innymi słowy, zjawisko światła i promieniowania wogóle **) jest to zjawisko elektromagnetyczne. W rzeczy samej w dziedzinie fal elektromagnetycznych, otrzymywanych przy pomocy wibratorów, stwierdzamy te wszystkie fakty, które poznaliśmy w dziedzinie promieniowania. A więc fale elektromagnetyczne ulegają odbijaniu, załamaniu, uginaniu się, interferencji, są spolaryzowane, a zatem poprzeczne, poprzeczność zaś jest cechą charakterystyczną, jak widzieliśmy, fal energii promienistej, w której to dziedzinie również znamy zjawisko polaryzacji; wreszcie prędkość rozchodzenia się fal

*) Zauważyć należy, iż rezonator Hertza reaguje i na drgania elektryczne i na organia magnetyczne — w tym ostatnim przypadku płaszczyzna jego winna leżeć prostopadle do tworzących się linii pola magnetycznego.

**) Mowa tu oczywiście o promieniowaniu w ścisłym znaczeniu tego słowa, jak to ustaliliśmy już wyżej. Jeżeli chodzi o promienie katodowe, kanalikowe lub anodowe, o promienie α lub β , wiemy, że termin „promienie“ użyty jest tu w sensie odmiennym, gdyż mamy tu do czynienia ze strumieniami cząsteczek, obdarzonych nabojami elektrycznymi.

elektromagnetycznych w próżni jest ta sama, co światła. Na czem polega tedy różnica? Jedyne na tem, że częstość drgań oraz ściśle z tem związana długość fal jest różna — podczas gdy wibrator Hertza daje nam fale długości kilku metrów lub centymetrów, podczas gdy stosując odpowiednie środki, umiemy otrzymywać tegoż rodzaju fale elektromagnetyczne długości wielu kilometrów, zarówno jak ułamek milimetra, długość fal świetlnych zawarta jest mniej więcej w granicach 0,76 μ — 0,4 μ . Różnica zatem między falami świetlnymi a falami Hertza jest tegoż rodzaju, co między tonami bardzo wysokimi, a względnie niskimi — różnica ta jest zatem jedynie ilościowa, ale nie jakościowa. Co więcej, jeżeli uwzględnimy, że fale podczerwone są znacznie dłuższe od fal promieniowania widzialnego i zwrócimy uwagę na to, jakie najdłuższe fale promieniowania podczerwonego umiemy dziś otrzymywać i jakie otrzymujemy najkrótsze fale drogą, że tak powiemy, czysto elektryczną, to się okaże, że obie dziedziny schodzą się i wiążą w jedną nieprzerwaną całość — jesteśmy dziś w stanie otrzymywać przy pomocy wibratorów elektrycznych fale tej długości, jakie dają nam źródła promieniowania podczerwonego. Idąc dalej, przechodzimy do dziedziny fal nadfioletkowych, krótszych, niż fale promieniowania widzialnego, a jeszcze dalej wkraczamy w dziedzinę jeszcze krótszych fal promieniowania rentgenowskiego oraz promieniowania γ . W ten sposób granice t. zw. *widma*, które poznaliśmy w t. II (ust. 237), są nadzwyczaj szerokie. Ująć ten piękny wynik można przy pomocy następującej tabelki, gdzie podane są nazwy poszczególnych dziedzin energii promienistej oraz odpowiadające im długości fal.

	Długość fali
Fale elektromagnetyczne otrzymywane przy pomocy wibratorów elektrycznych	10 ⁴ Km — 0,3 mm
Fale promieniowania podczerwonego	0,34 mm — 0,76 μ
„ „ widzialnego	0,76 μ — 0,4 μ
„ „ nadfioletkowego.	0,4 μ — 10 $\mu\mu$
„ „ rentgenowskiego	10 $\mu\mu$ — 10 ⁻² $\mu\mu$
„ „ γ	10 ⁻² $\mu\mu$ — 10 ⁻⁴ $\mu\mu$

Ze szczególnym naciskiem podkreślamy w tej tabelce rzecz, zaznaczoną w pierwszych dwu wierszach, a mianowicie, że przy pomocy wibratorów elektrycznych, udało nam się otrzymać fale krótsze od tych najdłuższych podczerwonych, które dane są w zjawisku promieniowania naturalnego. Przez pojęcie fali elektromagnetycznej obejmujemy zatem olbrzymi zakres zjawisk, zawarty w granicach długości fal od 10.000

kilometrów do $\frac{1}{10000}$ $\mu\mu$. Wszystkie te fale rozchodzą się z jedną i tą samą prędkością w próżni, a mianowicie z prędkością $300.000 \frac{\text{Km}}{\text{sek}}$.

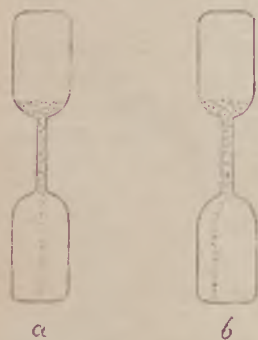
Nie możemy tu omówić całego szeregu ciekawych zależności pomiędzy wielkościami, charakteryzującymi pewne szczegóły ruchu falo-

wego, jak np. prędkość rozchodzenia się tych fal w różnych ośrodkach i wiążące się z różnicą prędkości zjawisko załamania, a właściwościami elektrycznymi i magnetycznymi tych substancyj (wartościami stałej dielektrycznej i przenikliwości magnetycznej). Poznanie tych rzeczy czytelnik musi odłożyć do poważniejszych studjów fizyki. Pozwólmy sobie tylko na dwie wzmianki.

Po pierwsze, czytelnika musi zainteresować pytanie, co jest właściwie źródłem tych fal elektromagnetycznych, które dane są nam w promieniowaniu w zwykłym tego słowa znaczeniu. Jeżeli zapomocą wibratora możemy otrzymywać takie same co do ich istoty fale, jak te, które wysyłają ciała promieniujące, czy nie wskazuje to, że w tych ciałach promieniujących zawarte są również jakieś wibratory? A jeżeli tak, jak mamy sobie wyobrazić ten proces drgań, który jest źródłem fal energii promienistej? Nie mamy możności wdawać się w bliższy opis tego, jak sobie tę rzecz wyobrażamy; przypomnimy tylko czytelnikowi, co mówiliśmy wyżej o budowie atomów. Poszczególne atomy tworzą coś w rodzaju układów planetarnych, w których dokoła jądra o naboju dodatnim krążą jak planety dokoła słońca i to z zawrotną prędkością, której wartości nie będziemy tu podawać, elektrony. Wszakże tory tych elektronów nie są tak stałe jak tory planet, obiegających dokoła słońca — elektrony zmieniają swe tory — z bliższych przeskakują na dalsze, to znów z dalszych na bliższe (o powodach tego nie mówimy). Otóż okazuje się z rozważań odpowiednich, iż dopóki elektron krąży po jakimś określonym torze, nie wywołuje żadnych zakłóceń, które mogłyby się stać źródłem fali elektromagnetycznej; jeżeli natomiast zachodzi zmiana toru, wytwarza to właśnie zakłócenie, wiążące się z wysłaniem takiej fali.

Drugą wzmiankę chcemy uczynić w stosunku do zjawiska, które podobnie jak wiele innych najpierw zostało przewidziane przez teorię, a później dopiero wykryte w doświadczeniu. Mianowicie z rozważań teoretycznych wypadało, że gdy fala elektromagnetyczna pada na jakieś ciało, w którym zachodzi pochłanianie niesionej przez nią energii, gdy np. pada promieniowanie na warstewkę sadzy, pokrywającej powierzchnię ciała, zachodzi działanie, równoważne ciśnieniu na pochłaniającą

powierzchnię. Zawieszając leciuchne blaszki, wyczernione sadzą, w naczyniu, z którego powietrze zostało usunięte, i kierując na te blaszki promienie światła, fizyk rosyjski Lebediew wykazał doświadczalnie istnienie owego *ciśnienia światła*. Obmyślone nawet później zostało doświadczenie wykładowe, które wykazuje to ciśnienie (rys. 1035). Ustawiamy pionowo naczynie szklane, utworzone z dwu szerszych rurek szklanych, połączonych węższą rurką. W naczyniu, z którego niemal dokładnie powietrze zostało usunięte, zawarty jest lekki proszek, który przy takim położeniu naczynia, jak na rys. 1035 a, sypie się z górnej części do



Rys. 1035.

dolnej poprzez wąską rurkę i tworzy w dolnej rurce strumień pionowy. Gdy z boku rzucamy na rurkę snop skoncentrowanego światła, strumień odchyła się od swego kierunku pionowego, jak to jest wyobrażone na rys. 1035 b — zupełnie jakgdyby podlegał ciśnieniu z tej strony, z której pada światło.

Dawno jest znany fakt, że podczas gdy kometa okrąża słońce, „ogon“ jej pozostaje zawsze po stronie przeciwnej niż słońce; to widoczne odchylenie daje się zupełnie dobrze wytłumaczyć ciśnieniem, jakie na subtelną materję, z której jest utworzony ów ogon, wywiera promieniowanie słoneczne.

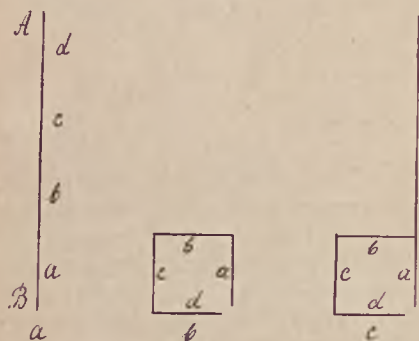
391. Radjotechnika.

Odkrycie Hertza obudziło odrazu myśl o możliwości sygnalizowania elektrycznego bez pomocy drutu, który uważany był do tego czasu za nieodzowny do przenoszenia sygnałów elektrycznych. Jest rzeczą godną uwagi, że sam Hertz co do tego był raczej sceptykiem, nie przewidując zastosowania fal elektromagnetycznych do celów takiej sygnalizacji na szerszą skalę. Tymczasem w r. 1896 inżynier włoski G. Marconi wykonał doświadczenia z zastosowaniem koherera, które wykazały całkowitą techniczną możliwość przystąpienia do realizacji *telegrafu bez drutu* *). Od tego czasu rozpoczął się postęp w tej dziedzinie, który dziś doszedł do tego, że radjotechnika stała się jedną z najpopularniejszych rzeczy, że do najbardziej zapadłych kątów fale elektromagnetyczne donoszą z całego świata dźwięki koncertów, słowa prelegentów, komunikaty prasowe i t. p. Postęp trwa dalej, a przyczyniają się do tego nie tylko fachowi badacze, ale i mnóstwo amatorów, którzy często wpadają na doskonale pomysły.

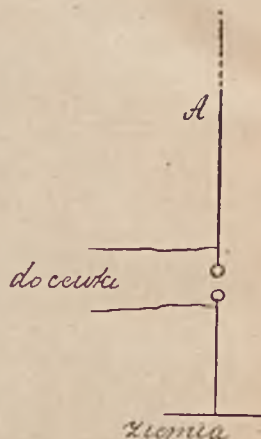
Nie możemy tutaj wdawać się w bliższe szczegóły, dotyczące *radjotechniki*. Ograniczymy się do krótkiego przeglądu rzeczy zasadniczych. Otóż przedewszystkiem musimy podkreślić różnicę w promieniowaniu, t. j. wysyłaniu fal elektromagnetycznych układów drgających otwartych i zamkniętych. Przypuścimy, że w pionowo ustawionym drucie AB (rys. 1036a) wzbudzone są w jakikolwiek sposób drgania elektryczne — prąd o zmiennym kierunku przebiega zgodnie w czterech częściach drutu, na które możemy go sobie w myśli podzielić (a, b, c, d) od góry do dołu i od dołu do góry; prądy te wytwarzają dokoła drutu zmienne pole magnetyczne; zmianom tego pola magnetycznego towarzyszy powstawanie pola elektrycznego i w ten sposób, jak już wyjaśniliśmy wyżej, rozchodzi się fala elektromagnetyczna. Wszakże jeżeli z tegoż drutu zrobimy ramę kwadratową, jak na rys. 1036b i wytworzymy w niej drgania elektryczne, to podczas gdy w boku a prąd będzie biegł

*) O rok wcześniej rosjanin A. Popow obmyślił urządzenie z kohererem, notując z odległości paru kilometrów wyładowania elektryczne, towarzyszące burzom. Popowowi udało się również przysyłać bez drutu sygnały elektryczne; jednakowoż prace jego nie popchnęły jeszcze zagadnienia na właściwą drogę.

do góry, w boku *c* będzie on skierowany na dół; podczas gdy w boku *b* będzie on szedł od strony prawej ku lewej, w boku *d* zajdzie to od lewej ku prawej; słowem pola magnetyczne, wytwarzane przez drgania w tych częściach obwodu (*a* i *c*, *b* i *d*), nie będą się sumowały tu, jak w przypadku poprzednim, ale będą się częściowo znosiły nawzajem — stąd



Rys. 1036.



Rys. 1037.

słabe promieniowanie takiego obwodu zamkniętego. Jeżeli jednak ten obwód zamknięty złączymy z pionowo ustawionym prętem, jak to wyobrażone jest na rys. 1036c, to drgania, zachodzące w obwodzie zamkniętym, wzbudzą też drgania w tym pręcie, który będzie promieniował należycie. Marconi powziął właśnie myśl zużytkowania najpierw pręta pionowego, potem bardziej złożonego układu drutów, jako właściwego radjatora, t. j. urządzenia, wysyłającego fale. Urządzenie takie czy inne tego rodzaju radjatora stanowi t. zw. *antnę*.

Używając vibratorów typu Hertza, można było najprościej, ale zarazem dość niezdarnie, jak na dzisiejsze wymagania, zrobić tak, jak schematycznie zaznaczone jest na rys. 1037, gdzie widzimy jeszcze jeden ważny szczegół. Mianowicie jedno z ramion vibratora Hertza tworzy antnę — pionowo poprowadzony drut, drugie zaś ramię jest zastąpione przez połączenie z ziemią. Zarówno rozważania teoretyczne jak doświadczenia wykazały, że taka połowa vibratora promieniuje wystarczająco, i wysyła fale, biegnące wzdłuż powierzchni ziemi we wszystkie strony, a w ten sposób dosięgające i miejsc, do których zostały przeznaczone.

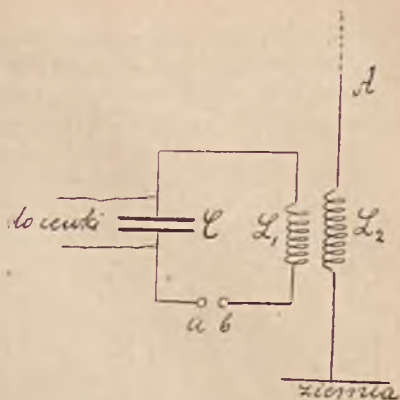
W celu otrzymania fal znacznej długości, a zatem drgań względnie powolnych korzystne było dołączenie do układu drgającego kondensatora. Dało się to uczynić w zupełnie zamkniętym układzie, złączonym indukcyjnie z antną tak, jak to widzimy na rys. 1038. Drgania zachodzą w obwodzie zamkniętym, zasilanym przez cewkę Ruhmkorffa i zawierającym kondensator *C* i samoindukcję L_1 . Antena, jed-

nym końcem złączona z ziemią, zawiera również zwój L_2 , w którym indukcyjnie wzbudzone są drgania przez drgania, zachodzące w zwoju L_1 .

W potężnych stacjach, które pobudowano dla przesyłania depezy na wielkie odległości, np. z Europy do Ameryki, do wytwarzania drgań używano początkowo specjalnego iskiernika, a także specjalnych prądnic, których opisywać nie będziemy. Jako anteny pobudowano szczególnie układy drutów. Jedną z takich anten w kształcie parasola widzimy na rys. 1039 — cały ten układ utrzymuje wieża (izolowana u podstawy), mająca 100 m wysokości. Innego rodzaju antenę widzimy na rys. 1040 — zbudowano ją w Anglii dla przesyłania depezy do Ameryki.

W ten sposób dają się urządzać stacje *nadawcze*, wysyłające sygnały. Dodajmy tylko, że stacje nowoczesne posiadają urządzenia, pozwalające na wysyłanie fal t. zw. niegasnących, t. j. o stałej obszerności drgań. Jak to się osiąga, mówić tu nie będziemy.

Jeżeli chodzi o przesyłanie na odległość mowy ludzkiej, dźwięków muzycznych i t. d., dzieje się to w ten sposób, iż do anteny stacji na-



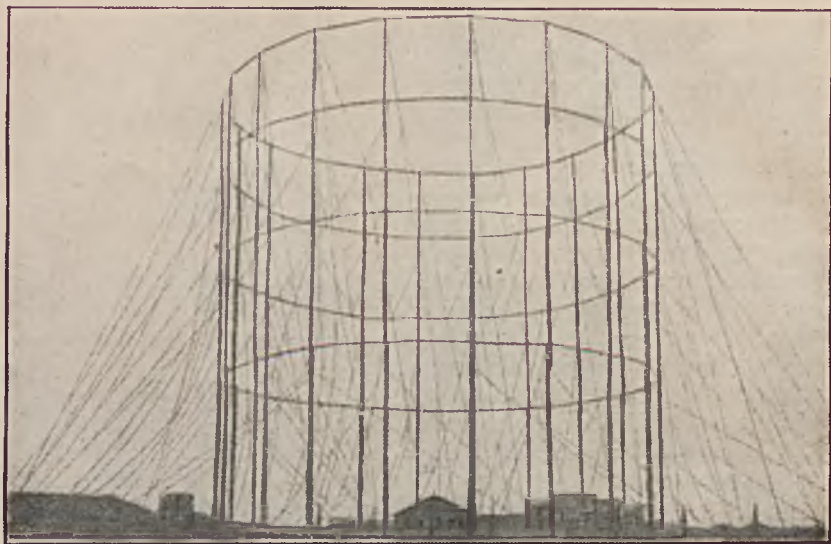
Rys 1038



Rys. 1039.

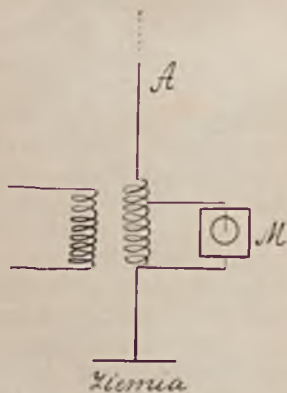
dawczej, wysyłającej fale niegasnące, dostają się prądy z mikrofonu, przed którym się mówi, względnie gra; prądy te nakładają się na zachodzące w antenie drgania i modyfikują je odpowiednio. Rys. 1041 tłumaczy ogólnikowo jeden ze sposobów, w jaki włączony bywa do anteny A mikrofon M; na rysunku pominięto inne szczegóły stacji nadawczej.

Na stacji odbiorczej mamy znów antenę, w której fale dochodzące wytwarzają drgania, a z anteną tą złączony obwód, zawierający koherer K , ogniwo B i np. galwanometr G (rys. 1042); z chwilą pochwycenia fal przez antenę A , koherer działa i galwanometr daje wychylenie. Zamiast galwanometru włączyć możemy w obwód t. zw. *przekaznik* — jest to odpowiednio zbudowany elektromagnes, który z chwilą, gdy staje się czynny, przyciąga sprężynę i zamyka w ten sposób inny obwód,

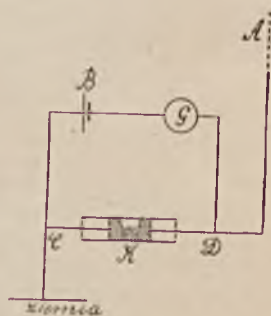


Rys. 1040.

zawierający np. dzwonek albo przyrząd telegraficzny (p. rys. 861) — właśnie w chwili uruchomienia cewki na stacji wysyłającej przez zamknięcie łącznika, dzwonek dłużej lub krócej dzwoni, albo przyrząd



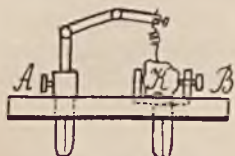
Rys. 1041.



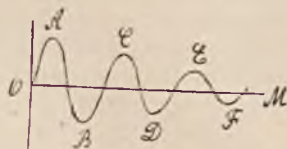
Rys. 1042.

telegraficzny daje dłuższe lub krótsze kreski, zależnie od tego, na jak długo trzymamy zamknięty łącznik w obwodzie cewki (koherer depolaryzuje się przez wstrząsanie młoteczką, jak to wyjaśnialiśmy już wyżej). Krótkie lub długie sygnały dźwiękowe, lub krótsze i dłuższe kreski mogą oznaczać w określonej kombinacji litery alfabetu — stąd możliwość przesyłania drogą iskrową depezy.

Oprócz koherera Branly'ego stosowane były inne koherery. Stopniowo jednak ustąpiły one miejsca detektorom, pozwalającym na skombinowanie ich z telefonem. Bardzo rozpowszechniony jest *detektor kryształkowy*, wyobrażony na rys. 1043, składający się z kryształka *K*

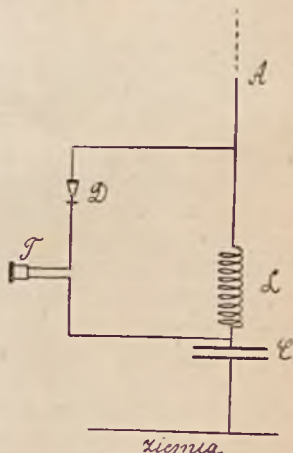


Rys. 1043.



Rys. 1044.

(karborund, galena), osadzonego w oprawce metalowej, do którego dotyka zlekka delikatna sprężynka; *A* i *B* oznaczają zaciski, przy których pomocy kryształek włącza się w obwód prądu. Kryształek taki ma tę własność, że, znajdując się w obwodzie prądu zmiennego, przepuszcza on ten prąd w jednym tylko kierunku, tłumi zaś niemal całkowicie prąd w kierunku przeciwnym *). W ten sposób kryształek jest, jak się mówi, *wyprostowywaczem* prądu; jeżeli np. w obwodzie, zawierającym kryształek, miałby przebiegać prąd typu, przedstawionego na rys. 1044, to z mających powstać w obwodzie drgań połowa ich (np. wszystkie półfale, przypadające pod prostą *OM* na rysunku) byłaby słumiona i pozostałby tylko prąd przerywany, płynący w jednym kierunku. Prąd przerywany odpowiedniej częstotliwości, skierowany przez telefon, wprawia płytkę telefoniczną w drgania danej częstotliwości i słyszymy określony ton. Właśnie zmodulowane przez udział mikrofonu na stacji nadawczej fale wzbudzają w obwodzie telefonicznym stacji odbiorczej drgania o częstotliwości, odpowiadającej drganiom głosowym **). Rys. 1045 przedstawia schematycznie urządzenie stacji odbiorczej z detektorem kryształkowym *D*; *T* oznacza tu telefon, *L* zwoj o określonej indukcji własnej, *C* kondensator, *A* antenę. Podajemy tu możliwie najprostsze urządzenie dla wytłumaczenia samej zasady jego funkcjonowania. Kto się zainteresuje radjotechniką, zechce poznać więcej szczegółów ze specjalnych tej sztuce poświęconych książek.



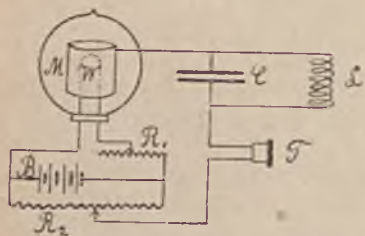
Rys. 1045.

Drugim doskonałym wyprostowywaczem, znajdującym zastosowa-

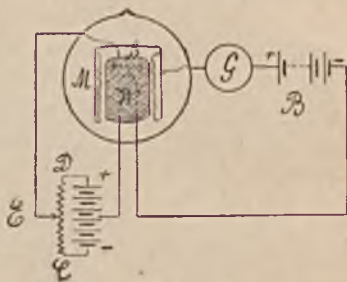
*) Nie każdy kryształek wymienionych substancyj do tego się nadaje, jak również nie w każdym miejscu wskazane jest dotknięcie kryształka sprężyną — należy to miejsce znaleźć przez wypróbowanie.

***) Mowa więc tu nie o drganiach niegasnących, na których, że tak powiemy, tle zachodzi ta modulacja, ale o częstotliwości tej właśnie modulacji.

nie w radjotechnice, jest t. zw. *lampa elektronowa*. Rys. 1046 tłumaczy schematycznie funkcjonowanie takich lamp. Dla zrozumienia urządzenia należy pamiętać, iż ciała rozżarzone wyrzucają z siebie elektrony *). Jeżeli takie żarzące się ciało, np. drucik, ma potencjał elektryczny wyższy od potencjału ciał otaczających, uniemożliwia to oddalanie się od niego elektronów, gdyż w otaczającym drucik polu elektrycznym winny elektrony poruszać się właśnie ku drucikowi. Przeciwny ruch elektronów od drucika ku otaczającym ciałom jest możliwy, jeżeli drucik pozostaje przy potencjale niższym względem potencjału ciał otaczających.



Rys. 1046.



Rys. 1047.

Przypuśćmy więc, że tak, jak to widzimy na rys. 1046, włókno W zarówno otoczone jest przez przewodnik cylindryczny M. Bateria ogniw B**) daje prąd, regulowany przez opornicę R_1 , który służy do żarzenia włókna. Przy ustaleniu się drgań w obwodzie, zawierającym samoindukcję L oraz kondensator C, włókno pozostaje przy zmiennym (w danym rytmie) potencjale, to wyższym od potencjału cylindra M, to niższym. W przypadku gdy potencjał W jest wyższy od potencjału M, elektrony nie poruszają się między W i M, t. j. prąd w obwodzie telefonu jest przerwany; przeciwnie elektrony się poruszają od W do M, gdy potencjał W jest niższy od potencjału M. W obwodzie więc telefonicznym tworzy się prąd przerywany, w jednym kierunku płynący. Lampa elektronowa gra rolę wyprostowywacza podobnie jak detektor kryształkowy. Przerwany prąd, przechodzący przez telefon T, warunkuje, iż słyszemy przez telefon określonej wysokości ton. Opornica R_2 służy do tego, by należycie uregulować wartość różnicy potencjałów na W i M, przy której to wartości wyprostowywanie zachodzi najlepiej.

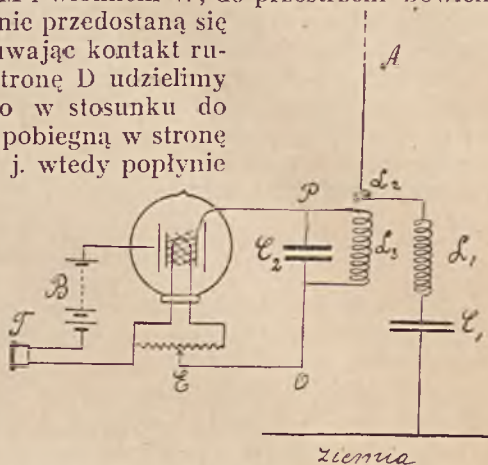
Na rys. 1047 widzimy inny jeszcze schemat urządzenia lampy elektronowej. Jak w przypadku, przedstawionym na rys. 1046, mamy tam takie żarzące się włókno ***) i otaczający je przewodnik cylindryczny M, tylko że między nimi umieszczona jest siatka metaliczna S. W bańce lampy mamy niemal zupełną próżnię, tak że prąd tworzyć mogą jedy-

*) Przez to właśnie są takie żarzące się ciała czynnikami jonizującym.

**) W rzeczywistości używamy tu zawsze dwu baterij ogniw, a nie jednej, jak to dla uproszczenia przedstawione jest na schemacie.

***) Na rysunku nie podane jest źródło prądu, służące do żarzenia lampy.

nie elektrony, które wyrzuci żarzące się włókno. Elektrony te ładują siatkę ujemnie, dzięki czemu przechodzenie ich przez siatkę ustaje; to działanie siatki będzie jeszcze spotęgowane, jeżeli siatce w sposób, uwidoczniony na rysunku, nadamy potencjał ujemny. Wtedy nie będzie płynął prąd między cylindrem M i włóknem W, do przestrzeni bowiem między siatką S i cylindrem M nie przedostaną się elektrony. Jeżeli jednak przesuwać kontakt ruchomy E na opornicy CD w stronę D udzielimy siatce S potencjału dodatniego w stosunku do włókna W, wówczas elektrony pobiegą w stronę siatki i osiągną cylindra M, t. j. wtedy popłynie prąd znacznego natężenia z baterji ogniwi B. Gdyby potencjał siatki ulegał wahaniu, stając się to nieco niższym, to nieco wyższym od potencjału włókna, pierwszym z tych przypadków towarzyszyłoby przerywanie prądu z baterji B, drugiemu — tworzenie się prądu znacznego natężenia. W ten sposób przy pomocy lampy elektronowej słabe nawet drgania elektryczne, wytwarzane w antenie, chwytającej fale, mogą być przekształcane w znacznie silniejsze, przechodzące przez telefon. Rys. 1048 tłumaczy, jak to może być uskutecznione. Drgania w antenie A wywołują przez indukcję drgania w obwodzie kondensatora, zawierającym zwój L_3 ; te ostatnie drgania powodują wahania w różnicy potencjałów między siatką a włóknem w lampie elektronowej, co, jak już zostało wyjaśnione, ma za skutek wytworzenie się spotęgowanego przerywanego okresowo prądu w obwodzie telefonu.



Rys. 1048.

Na rys. 1049 widzimy, jak w rzeczywistości wygląda lampa elektronowa, używana w przyrządach odbiorczych i zbudowana według schematu z rys. 1048. Lampy elektronowe znajdują też dziś wielkie zastosowanie w stacjach nadawczych, nie będziemy jednak tego bliżej omawiali. Nie będziemy też mówili o sposobach dostarczania stacyj nadawczych i odbiorczych, co, oczywiście, jest bardzo ważne, zwłaszcza jeżeli chodzi o przesyłanie fal na wielką odległość.



Rys. 1049.

Jak powiedzieliśmy wyżej, do sygnalizowania elektrycznego na wielkie odległości stosowano fale nagół znacznej długości, wynoszące po parę lub kilka kilometrów, a co najmniej setki metrów. Ostatniemi jednak czasy rozwija się pomyślnie sygnalizacja krótkofalowa, w której używa się fal, wynoszących zaledwie kilka lub parę dziesiątków metrów, a nawet mniej. Dziedziny tej dotykać tu nie będziemy, pozostawiając interesującym się tą sprawą osobom zapoznającym się z tem z literatury specjalnej. Sygnalizacja krótkofalowa ma ogromną przyszłość przed sobą i kto wie, czy niedługo nie stanie się możliwe, by każdy, kto tylko chce, rozporządzał łatwo przenośnym małym przyrządem nadawczym i odbiorczym, przy którego pomocy będzie mógł się porozumiewać z kim przagnie na dowolną odległość.

Ćwiczenia i zadania.

656. O ile kuleczki iskiernika połączone są drutami z okładkami butelki lejdejskiej, wyładowania zachodzą w postaci jaskrawej o głośnym trzasku iskry. Jeżeli jednak zamiast jednego z tych drutów użyjemy wilgotnego sznurka, iskra staje się nikłą i nie daje charakterystycznego trzasku. Co wpływa na zaobserwowaną różnicę?

657. Narysować schemat urządzenia, przy którego pomocy można dojrzeć w wirującym zwierciadle charakter wahadłowy wyładowania iskrowego?

658. W jaki sposób zbudować należy obwody do wyładowywania dwu butelek lejdejskich, jednej o małej i drugiej o znacznie większej pojemności, by w każdym z tych obwodów otrzymać wyładowanie wahadłowe o jednakowym okresie?

659. Na rys. 1050 widzimy zgięty gruby drut miedziany lub mosiężny, od którego cienkie druty prowadzą do włókna złączonej z niemi żarówki. Łącząc końce grubego drutu z biegunami baterji ogniw (z włączeniem opornicy, by nie otrzymać prądu zbyt wielkiego natężenia) nie możemy otrzymać żarzenia się żarówki — w rozgałęzieniu, które tu mamy, opór grubego drutu jest znikomy w porównaniu z oporem żarówki. Jeżeli jednak puścimy w porównaniu z oporem żarówki, żarówka się żarzy. Wchodzi tu w grę zjawisko indukcji własnej. Wytlumaczyć to w sposób wyczerpujący.



Rys. 1050.

660. Pomiar długości stojącej fali elektromagnetycznej daje na nią wartość 3,5 m. Jaka jest częstość odpowiadających tej długości drgań?

661. O ile w kohererze takiego typu, jaki widzimy na rys. 1017a, wsuniemy druciki tak, że będą za bardzo mocno uciskały zawarte między niemi opłki, koherer nie będzie funkcjonował należycie — przez cały czas w zawierającym go obwodzie będzie szedł prąd (np. w urządzeniu, przedstawionem na rys. 1018 dzwonek będzie nieustannie dzwonił). Dlaczego?

662. Ustawiamy blachę pomiędzy zwierciadłami Hertza, przypadającemi jedno nawprost drugiego jak na rys. 1020. Koherer mimo to nie przestaje reagować na fale, wysyłane przez iskiernik. Co może być tego powodem?

663. Zwierciadła Hertza ustawione są jedno naprzeciwko drugiego, jak na rys. 1020 tak, że jedno zwierciadło stoi w jednym pokoju, a drugie w drugim, do którego drzwi z pierwszego pokoju są otwarte. Czy zamknięcie drzwi będzie miało wpływ na doświadczenie?

664. Czy w doświadczeniu, wyobrażonym na rys. 1034, kierunek drutów, ujętych w ramy, koniecznie musi tworzyć kąt 45° względem poziomu. Rozpatrzyć przypadki wszelkich innych możliwych kątów.

665. Zaprojektować najprostsze urządzenie, pozwalające telegrafować „bez drutu“ z jednego pokoju do drugiego.

ROZDZIAŁ XV. ELEKTRYCZNOŚĆ ZIEMSKA.

392. Pole elektryczne w atmosferze.

Najdawniej znanem ludzkości zjawiskiem elektrycznym jest niewątpliwie piorun. Pierwszym, kto zjawisko to w należyty sposób zrozumiał i myśl tę wypowiedział, był Wall (w r. 1698). Jednak zaledwie w połowie XVIII stulecia szeregowi badaczy, głównie zaś B. Franklinowi, o którym mieliśmy już sposobność wyżej wzmiankować, zawdzięczamy ustalenie twierdzenia, że istotnie mamy tu do czynienia ze szczególną, a potężną postacią wyładowania elektrycznego.

Oddawna marynarze dostrzegali na masztach okrętów; to znów widziano na szczytach wież kościelnych lub drzew, zwłaszcza na górach, szczególne zjawisko, znane pod nazwą ogników św. Elma — te małe niby płomyki okazały się przy zbadaniu szczególną postacią wyładowania elektrycznego. Dopiero w ostatnich 30 latach poznano jeszcze cały szereg innych zjawisk elektrycznych, odbywających się zarówno w atmosferze, jak w samej bryle ziemskiej, i powstała specjalna gałąź fizyki, poświęcona zagadnieniom *elektryczności ziemskiej*.

Bardzo proste doświadczenie może nas pouczyć, że wszędzie dokoła ziemi istnieje pole elektryczne. W tym celu wystarczy użyć jakiegokolwiek t. zw. *sondy*, a umieszczając ją w tem czy innym miejscu ponad powierzchnią ziemi, a zarazem łącząc ją z elektrometrem, stwierdzić możemy, iż w danym miejscu w danym momencie istnieje określona wartość potencjału elektrycznego. Na rys. 1051 widzimy najprostszą możliwie sondę. Na składanym pręcie ebonitowym, zaopatrzonym u dołu w metalowe ostrze, by można było je wbić w ziemię, a w ten sposób

ustawić pręt pionowo, mieści się świeca, osłonięta szklanym kłosem przed wiatrem. W płomieniu świecy przypada koniec drucika platynowego, połączonego dalej z nagim drutem miedzianym *) , pro-

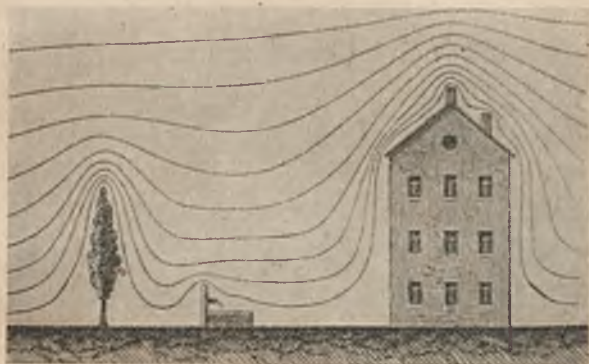


Rys. 1051.

*) Izolacja na drucie czyniłaby go swojego rodzaju kondensatorem.

wadzącym do elektrometru (oczywiście drut nigdzie na swej drodze nie styka się z innymi przewodnikami). Skutkiem jonizacji, wywołanej przez płomień (p. ust. 376), i unoszeniu przez gazowe produkty spalania powstających na nich nabołów elektrycznych wyrównywa się różnica potencjałów, jaka istnieje może w pierwszym momencie między drucikiem, umieszczonym w płomieniu, a tem miejscem w powietrzu, gdzie przypada drucik, elektrometr zaś, który uprzednio musi być odpowiednio wycechowany (może to być elektrometr listkowy ze skalą), wskazuje wartość potencjału drucika, a przez to wartość potencjału badanego miejsca w powietrzu.

Przekonywamy się, że im wyżej umieszczamy sondę, tem wyższy potencjał w stosunku do ziemi wskazuje elektrometr *). Dzieje się tak, jakgdyby kula ziemską była ciałem, naelektryzowanem ujemnie, do-



Rys. 1052.

koła którego przebiegają powierzchnie ekwipotencjalne o coraz wyższej wartości potencjału. Badając rozmieszczenie potencjału na otwartem miejscu, gdzie niema żadnych nierówności na powierzchni ziemi, i zachowując odpowiednie ostrożności przy pomiarze, stwierdzamy, jak zresztą należy oczekiwać, że powierzchnie ekwipotencjalne przebiegają równoległe do powierzchni ziemi. Jeżeli natomiast na ziemi są doliny lub góry, albo mieszczą się różne przedmioty, jak domy, drzewa i t. d., pole elektryczne jest zdeformowane i powierzchnie ekwipotencjalne przebiegają mniej więcej tak, jak to widzimy na rys. 1052 — im bliżej ostrzy, tem gęściej przypadają tam powierzchnie ekwipotencjalne, tem większa jest tam wartość natężenia pola (p. ust. 291); im wyżej i dalej od powierzchni ziemi, tem bardziej wyrównywają się zagięcia na powierzchniach ekwipotencjalnych i tem bardziej dążą one do stania się równoległymi względem powierzchni ziemi. W miejscach tej równoległości powierzchni ekwipotencjalnych, t. j. tam, gdzie niema

*) W ust. 292 mówiliśmy o konieczności uziemiania osłony elektrometru.

zdeformowania ich przez nierówności na powierzchni ziemi, linje pola przebiegają pionowo i natężenie pola skierowane jest od góry ku dołowi.

Zwyczaj podajemy dla charakterystyki pola elektrycznego w atmosferze różnicę potencjałów między punktami, przypadającymi jeden nad drugim w odległości jednego metra. Ten t. zw. *gradjent* potencjału nie jest dla różnych miejscowości jednakowy, ani też dla jednego i tego samego miejsca stały. *Przeciętna* jego wartość dla całej kuli ziemskiej

w pobliżu jej powierzchni wynosi ok. $100 \frac{\text{woltów}}{\text{metr}}$; dla Europy przecięt-

na wartość gradjentu jest ok. $150 \frac{\text{woltów}}{\text{metr}}$, przyczem w zimie jest on

wiekszy (dochodzi przeciętnie do $300 \frac{\text{woltów}}{\text{metr}}$), w lecie zaś jest mniej-

szy — ok. $100 \frac{\text{woltów}}{\text{metr}}$, a nawet mniej: Dodać trzeba, że są to wartości

w pobliżu powierzchni ziemi; im wyżej, tem gradjent staje się mniejszy.

Tak np. na wysokości 1500 m (pomiar w balonach) gradjent stanowi już zaledwie $\frac{1}{4}$ tego, który daje się obserwować w pobliżu powierzchni ziemi; na wysokości 4000 m spada do $\frac{1}{10}$ tej wartości. Wnioskować z tego można o istnieniu i pewnem rozmieszczeniu w atmosferze nabo-
jów elektrycznych — rozmieszczeniu również naogół zmiennem, jak
ziemnym jest gradjent.

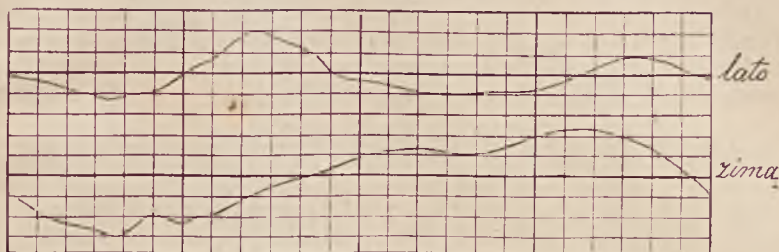
Z rozmieszczenia przeciętnych wartości potencjału w polu elektrycz-
nem ziemskim obliczyć można rozmieszczenie naboju elektrycznego
ujemnego na powierzchni ziemi — nabój ten wynosi ok. — 0,0004 jedn.
el. st. na każdy centymetr kwadratowy. Dla całej powierzchni ziemi
nabój ten jest — $1,6 \cdot 10^{15}$ jedn. el. st.

Jeżeli chodzi o przeciętne zmiany dzienne wartości potencjału atmo-
sferycznego w środkowej Europie, dają o tem wyobrazenie wykresy na
rys. 1053, z których górny odpowiada latu (dwa maxima i dwa mi-
nima w ciągu doby), dolny zimie (jedno wyraźne maximum i jedno
wyraźne minimum); jedna podziałka skali na rysunku oznacza tu

$25 \frac{\text{woltów}}{\text{metr}}$. Zmiany dzienne notowane są zapomocą specjalnych elek-

trometrów samopiszących, podobnie jak to się czyni z notowaniem
zmian pola magnetycznego ziemskiego. Podkreślić należy, że krzywe
przeciętnych zmian dziennych dla poszczególnych miejsc różnią się
wyraźnie; są np. miejsca w Europie, gdzie i w zimie krzywe te zawiera-
ją dwa maxima i dwa minima, są natomiast i takie, gdzie przez cały
rok w zmianach dziennych obserwuje się tylko jedno maximum i jedno
minimum. Na oceanach przebieg zmian dziennych gradjentu jest bezpo-
równania mniej skomplikowany — na krzywych zarysowuje się tylko
jedno minimum i jedno maximum, a co zwraca szczególną uwagę, że
moment tego maximum jest ten sam dla Atlantyku, dla oceanu Spokoj-
nego i oceanu Indyjskiego, a więc zjawisko nje zależy od czasu miej-
scowego. Momentem tym jest chwila przejścia słońca przez południk
tego punktu powierzchni ziemi, gdzie przypada jej biegun magnetyczny

północny. Zmiany gradjentu na lądach skomplikowane są przez warunki miejscowe; nie jest wykluczone, iż po bliższem zbadaniu i wyrugowaniu wpływu tych warunków miejscowych i tu okaże się ta sama niezależność zjawiska od czasu miejscowego.



Rys. 1053.

Od przeciętnego charakteru zmian potencjału elektrycznego w atmosferze różni się bardzo jego istotne zmiany w poszczególnych okolicznościach. Bywa, że gradjent potencjału wzrasta w danem miejscu sto a nawet tysiąckrotnie; to znów zmienia się znak potencjału — linje pola kierują się od dołu ku górze i stan taki trwa godzinami; zdarza się też, że znak ten zmienia się często w prędko po sobie następujących momentach. Zwłaszcza przebieg zmian potencjału jest bardzo różny od przeciętnego podczas opadów, a szczególnie podczas burz.

393. Przewodnictwo elektryczne atmosfery.

Powietrze, jak wiemy, jest naogół dobrym izolatorem, ale bynajmniej nie doskonałym. Obecność w niem jonów czyni je zawsze w pewnej mierze przewodnikiem. Przewodnictwo samej ziemi jest w stosunku do przewodnictwa przypadającego wpobliżu jej powierzchni powietrza mniej więcej milion razy większe, czyli ziemię w stosunku do powietrza nazwać możemy dobrym przewodnikiem elektryczności.

Badanie przewodnictwa powietrza w poszczególnych warstwach, coraz dalej od powierzchni ziemi położonych, prowadzi nas do poznania faktu, iż przewodnictwo atmosfery rośnie, w miarę jak przechodzimy do coraz wyższych jej warstw. Bezpośrednie pomiary tego przewodnictwa mogą być dokonane w balonach do wysokości conajwyżej 10 km; badania przy pomocy t. zw. balonów-sond (balonów, zaopatrzonych w przyrządy samopiszące i spadochrony) dosięga co najwyżej wysokości 30 Km. O przewodnictwie w warstwach wyżej położonych wnosić możemy już tylko pośrednio, posługując się rozważaniem prądów elektrycznych w położonych wyżej warstwach, a objawiających swe działanie w zmianach elementów magnetyzmu ziemskiego, a także z obserwacji rozchodzenia się fal elektromagnetycznych, używanych

w radjotelegrafji (zwłaszcza szczególnych objawów odbijania się tych fal na pewnych wysokościach). Na podstawie danych, zebranych wszystkimi temi sposobami, twierdzić możemy, że na wysokości 80 Km atmosfera nasza posiada przewodnictwo mniej więcej takie samo, jak przewodnictwo ziemi. W ten sposób ziemia i warstwy powietrza, przypadające powyżej 80 Km, gdzie się zaczyna t. zw. warstwa Heaviside'a *) — tworzą jakgdyby okładki wielkiego kondensatora, między którymi mieści się warstwa powietrza o małym w pobliżu ziemi i stopniowo rosnącym ku górze przewodnictwie.

Na podstawie rozważań, których tu podawać nie będziemy, wyliczono, że różnica potencjałów między powierzchnią ziemi a warstwą Heaviside'a wynosi ok. 200.000 woltów. Wobec przewodnictwa powietrza, zawartego między temi niby okładkami kondensatora, płynąć musi nieustannie poprzez to powietrze prąd elektryczny, skierowany od góry ku dołowi, o ile pole to nie jest zakłócone i niema w niem zmiany znaku natężenia. Gęstość tego prądu, jak wypada z obliczeń, wynosi przeciętnie $2,7 \cdot 10^{-16} \frac{\text{amperów}}{\text{cm}^2}$, lub też całkowite natężenie prądu, płynącego poprzez całą atmosferę, zawartą w granicach owych 80 Km odległości między ziemią a warstwą Heaviside'a wynosi 1360 amperów.

Na pytanie, w jaki sposób się podtrzymuje różnica potencjałów, która warunkuje ten nieustannie płynący prąd, nie możemy dziś dać jeszcze odpowiedzi. Natomiast, jeżeli chodzi o jonizację powietrza, które czyni to powietrze przewodzącym prąd, główne czynniki wymienić możemy. Otóż, jeżeli chodzi o powietrze, przypadające w pobliżu ziemi, czynnikiem tym jest promieniowanie ciał promieniotwórczych (radu, toru, uranu, emanacji radu i toru etc.), zawartych w ziemi i w wodach w najdrobniejszych bodaj ilościach; poza tem, jeżeli chodzi o wyższe warstwy (mniej więcej do 1000 m. wysokości), promieniowanie emanacji radu i emanacji toru, zawartych w powietrzu. Do tego dochodzi jeszcze działanie jonizujące szczególnego promieniowania, które wykrył V. E. Hess i które nazywać będziemy promieniowaniem kosmicznem, jako że dochodzi ono do nas od gwiazd, znajdujących się w określonych stadjach rozwojowych. Hess nazwał to promieniowanie „ultragamma“, sądząc, że są to promienie tegoż rodzaju, co promienie γ ciał promieniotwórczych, tylko bardziej przenikliwe, czyli bardziej „twarde“. Co do istoty tego promieniowania nie jeszcze pewnego powiedzieć dziś nie możemy (ostatnio zjawiają się przypuszczenia, że są to strumienie poruszających się z prędkością światła elektronów); niemniej sam fakt istnienia tego promieniowania i jego widocznej roli w tem zjawisku, które omawiamy, nie ulega wątpliwości. Powyżej 1000 m, gdzie już znikają ślady emanacji radu i toru, jonizacja powietrza coraz bardziej jest uwarunkowana przez owo promieniowanie kosmiczne. Dla jeszcze większych wysokości — blisko i powyżej 12 km. — zaczyna się dodawać do tego czynnik inny, a mianowicie działanie promieni nadfioletko-

*) Czyt. Hewisajda — od nazwiska uczonego, który wskazał na ważną rolę tej warstwy.

wych, wysyłanych przez słońce, a także działanie jonizujące strumieni cząsteczek α , wyrzucanych przez słońce i obdarzonych tak wielką prędkością (ok. $\frac{1}{16}$ prędkości światła), że są w stanie przedostać się poprzez wyżej położone warstwy atmosfery do tej, która nas w danej chwili interesuje.

394. Stan elektryczny opadów. Pioruny.

Jak powiedzieliśmy wyżej, istnieje dokoła ziemi w atmosferze pole elektryczne, ulegające wciąż pewnym zmianom i mające różne w różnych miejscach natężenie; opisywaliśmy to pole przez jego cechy przeciętne. Powietrze atmosfery na różnych wysokościach aż do warstwy Heavyside'a posiada różne przewodnictwo; i to również opisywaliśmy, kreśląc obraz przeciętny — przewodnictwo to ulega zmianom i w miejscu i w czasie. Wreszcie powiedzieliśmy, że w atmosferze mamy rozmieszczone naboje elektryczne, ale i co do tego dodać musimy, że gęstość i znak tych naboїв elektrycznych są również zmienne i w miejscu i w czasie.

Weźmy np. przypadek wiatru — rozmieszczenie powietrza ulega zmianie, a i rozmieszczenie naboїв również. Przypuśćmy, że wiatr porywa śnieg, pokrywający pola i tworzą się tumany tego śniegu, albo też wiatr unosi tumany kurzu. Obserwacje, których techniki opisywać nie będziemy, wykazują, że oddzielne pyłki, oddzielne kryształki śniegu ulegają przytem elektryzacji *). Ruch tych okruszyn wraz z mieszczącymi się na nich nabojami warunkują zmiany w rozmieszczeniu naboїв w atmosferze, a zatem i zmiany pola. Podobnie w miejscach, gdzie rozpyła się, jak w wodospadach, woda — rozpryskujące się kropelki, jak wykazać można, są naelektryzowane.

Ale oto jeszcze jedno ważne zjawisko: opady (deszcz, śnieg) zawsze niosą ze sobą naboje elektryczne — w większości przypadków dodatnie, w mniejszej liczbie ujemne; z jednych miejsc chmury padają kropelki o nabojach dodatnich, z innych miejsc tej samej chmury — ujemnych. Elektryzacja kropelki deszczu czy kryształków śniegu daje się wytłumaczyć w pewnych razach tak, jak wyżej elektryzacja śniegu przy zamieci, czasem uciec się należy do innego wyjaśnienia — w szczególności tu wdawać się tutaj nie możemy. Ale chodzi nam tu przedewszystkiem o podkreślenie samego faktu, że opady niosą ze sobą naboje elektryczne (zbierając opady w izolowanych, połączonych z elektrometrami zbiornikach metalowych, stwierdzamy, że się te zbiorniki elektryzują), a wszak przechodzenie poprzez atmosferę tych naboїв elektrycznych winno wpływać na stan pola elektrycznego w atmosferze, może zmieniać i zmienia istotnie wartość potencjału pola w poszczególnych miejscach, może tworzyć zamiast małych gradjentów potencjału

*) Przypuszczają, że zachodzi tu bardzo subtelne zjawisko odrywania się drobniejszych cząsteczek tych bryłek, przytem cząsteczki te elektryzują się ujemnie, pozostaje zaś części bryłek dodatnio.

gradjenty znaczne, a nawet ogromne, tysiące razy większe od tych, które obserwujemy, że tak powiemy, w normalnych warunkach.

W podobnych właśnie okolicznościach tworzą się gradjenty tak wielkie, że staje się możliwą jonizacja przez zderzenie; wtedy następują wyładowania iskrowe, znane nam w postaci błyskawic, czy to przebiegających pomiędzy chmurą a ziemią (iskry dłuższej ok. 2—3 Km), czy to między jedną a drugą chmurą lub nawet częściami jednej i tej samej chmury (długości iskiei nieraz przekraczają 10 Km—notowano nawet 50 Km!).

W iskrze, tworzącej błyskawicę, mamy więc znany już nam przypadek szczególnego prądu w gazach i to prądu o wielkiem natężeniu (rzędu 10000 amperów). Czas trwania tego prądu wynosi naogół ułamek sekundy $\left(\frac{1}{1000} \text{ sek} - \frac{1}{50} \text{ sek} \right)$. Fotografje błyskawicy przy po-

mocy aparatu ruchomego wskazały, iż iskra ta nie jest nigdy pojedyncza, lecz że składa się z szeregu idących jedno po drugim wyładowań, zachodzących po tej samej drodze (ale wyładowania nie o charakterze wahadłowym!). Towarzyszący błyskawicy grzmot pochodzi stąd, że wstrząśnienia powietrza, towarzyszące wyładowaniu i dające początek falam głosowym, nie dochodzą do uszu naszych jednocześnie od różnych miejsc dłużej na parę, kilka lub kilkanaście kilometrów iskry; do tego dodaje się echo, uwarunkowane odbiciem fal głosowych przez ziemię, przedmioty, znajdujące się na ziemi, chmury, warstwy powietrza o innej temperaturze lub ciśnieniu, niż ta, w której fala głosowa powstaje.

Olbrzymia dzielność wyładowania iskrowego, jakie mamy w piorunie, idzie w parze z groźnemi jego skutkami. Usiłując się przed temi skutkami zabezpieczyć, ustawiamy *piorunochrony* — wystające ponad budynek, gdzie mieszkamy, *grube* pręty miedziane lub żelazne, zakończone u góry wyłożonemi ostrzami, a kończące się w głębi ziemi, gdzie przylutowane są do płyt miedzianych cynkowanych o powierzchni co najmniej 1 m², leżących na takiej głębokości, gdzie ziemia jest stale dostatecznie wilgotna. Wyładowanie iskrowe wybiera tu, krótko mówiąc, drogę dla siebie lepszą, o mniejszym oporze — ostrze u góry częściowo przyczynia się do wyładowania w tem miejscu dzięki znacznemu zagęszczeniu przy niem powierzchni ekwipotencjalnych.

Innym sposobem zabezpieczenia domu od pioruna jest osłonięcie go klatką metalową (p. dośw. na rys. 642); w tym celu umieszczamy wzdłuż krawędzi domu i w pewnych między nimi odległościach dość grube pręty metalowe, łączące się ze sobą i tworzące rodzaj klatki, w której mieści się dom.

395. Zorza biegunowa.

W okolicach podbiegunowych, zarówno na północy, jak południu, daje się obserwować szczególne zjawisko świetlne, znane pod nazwą *zorza biegunowej*. W naszych szerokościach zjawisko to jest zupełnie nie-

mal niedostrzegalne — czasem w wyjątkowych okolicznościach pewien ślad zorzy biegunowej daje się obserwować na północnej stronie nieba w nocy na wsi (w mieście przeszkadza oświetlenie ulic) — ślad ten przypomina najczęściej wyglądem łunę bardzo odległego pożaru; czasem daje się nawet obserwować gra barw.



Rys. 1054.

Jeżeli chodzi o wygląd zorzy biegunowej taki, jaki się widuje w okolicach, bliżej biegunów leżących, słabe wyobrażenie o tem dają rys. 1054 i 1055 oraz opis, który przytaczamy dla przykładu:

„Zjawisko to rozpoczyna się z nastaniem zmroku. Na pewnej wysokości tworzy się szeroki białawy pas, łukowato wygięty; nieco później wytryskają z tego pasa jakby obłoki pierzaste, grające w barwach to różowo-czerwonych, to żółtawo-zielonych. Stopniowo rozszerza się ten obszar świetlny, wznosząc się ku zenitowi. Po pewnym czasie tworzy się na tem jasnym tle snop promieni bardziej intensywnych o barwie jaśniejszej. Przedłużenia tych promieni przecinają się w tym punkcie firmamentu, ku któremu wskazuje igła nachylenia. Charakterystyczna jest zmienność blasku w całokształcie świetl-



Rys. 1055.

negu obrazu. Maximum tego blasku przebiega od jednego końca łuku do drugiego i to przeważnie z zachodu na wschód. Promienie to się wydłużają, to kurczą, to bledną aż do zupełnego zniknięcia, to znów ukazują się w całej świetności. Kształtują się wreszcie w postaci t. zw. korony, a tymczasem pozostała część nieba zabarwia się na czerwono, zielono i żółto. Mniej więcej około północy zjawisko zanika. Zaznaczenia godną jest ruchliwość szczegółów, jak również bogactwo kształtów: łuki, włókna, promienie, wstęgi, to znów bogate draperje“.

Zjawisko zorzy biegunowej nie zostało jeszcze w całej pełni poznane i wytłumaczone, jakkolwiek znajomość tego zjawiska opieramy na bardzo poważnym już materiale obserwacyjnym i wielu specjalnie w tym kierunku przeprowadzonych studjach. Nie ulega wątpliwości, że tworzenie się tego zjawiska, którego siedliskiem są górne warstwy atmosfery

ry, poczynając od wspomnianej wyżej warstwy Heaviside'a prawdopodobnie aż do granic atmosfery *), — że tworzenie się to posiada charakter elektryczny. Słońce nie tylko śle we wszystkie strony fale energii promienistej; jest ono również źródłem strumieni nabożów elektrycznych — strumieni elektronów (jak promienie katodowe), oraz jonów dodatnich (jak promienie kanalikowe). Wyrzucanie tych pocisków elektrycznych przez słońce w przestrzeń otaczającą, wiąże się z procesem tworzenia się plam słonecznych, a więc nie jest to zjawisko jakiegoś jednostajne, odbywające się wciąż w jednakowy sposób. Strumienie elektronów, o ile są skierowane w stronę ziemi, dobiegają do niej, wpadają w obręb działania sił magnetycznych pola magnetycznego ziemskiego, same zaś ze swej strony wywołują w tem polu zakłócenia. Tem się tłumaczy, dlaczego zjawisko zorzy biegunowej zachodzi nie wszędzie na powierzchni ziemi, a w okolicach jej biegunów. Tem się też tłumaczy związek, jaki daje się ustalić (ust. 328) między zjawiskiem zorzy biegunowej a burzami magnetycznymi, w szczególności fakt, że w latach, kiedy przypadają maxima w intensywności słonecznej czynności (okres mniej więcej 11-letni), przypadają też maxima burz magnetycznych oraz maxima zórz biegunowych. Przebieganie tych pędzących pocisków elektrycznych poprzez atmosferę pobudza jej cząsteczki do świecenia, podobnie jak to się dzieje w rurkach próżniowych. Podkreślić należy, że badanie widma zorzy biegunowej zarówno jak specjalne w tym celu prowadzone badania widmowe składowych części atmosfery **), dają nam nadzieję nie tylko wyjaśnienia w szczegółach przepięknego zjawiska zorzy biegunowej, ale również poinformowania nas o składzie i własnościach naszej atmosfery na niedostępnych, zdawałoby się, dla obserwacji wysokościach.

396. Prądy ziemskie.

Mówiąc o urządzeniu telegrafu (p. zad. 553 na str. 255), wskazywaaliśmy, iż stacje łączą się ze sobą przy pomocy jednego tylko przewodnika napowietrznego; drugi przewodnik zastępuje ziemia, przyczem połączenie z ziemią na każdej stacji dokonywane jest przy pomocy zakopanej odpowiednio głęboko płyty miedzianej cynkowanej. Otóż wkrótce po pierwszych tego rodzaju instalacjach zauważono, że w przewodnikach, połączonych końcami swemi w ten sposób z ziemią, płynie stale prąd elektryczny, którego natężenie ulega perjodycznym zmianom, osiągając podczas burz magnetycznych tak wielkie wartości, że uniemożliwia to posługiwanie się tym przewodnikiem do przesyłania sygnałów telegraficznych. Oczywiście zatem w ziemi w poszczególnych jej miejscach istnieją jakieś zmieniające się okresowo siły elektromotoryczne, które i w samej ziemi wytwarzają szczególne prądy elektryczne, zwane *prądami ziemskimi*.

*) Bezpośrednie pomiary wysokości dały dla niższych granic zorzy ok. 100 Km, dla wyższych od 200 Km do 1000 Km.

***) Ciekawe są tu zwłaszcza badania widmowe azotu w fazie jego stałej.

Zjawisko prądów ziemskich nie znalazło dotychczas całkowitego wyjaśnienia, zwłaszcza, że brak dostatecznie wielkiej liczby planowo w tym kierunku przeprowadzonych obserwacji; można wszakże wskazać jako źródło tych sił elektromotorycznych zarówno zjawiska kontaktowe, analogiczne do tych, z którymi mamy do czynienia w ogniwach, jak zjawiska termoelektryczne, jak zjawiska prądów indukcyjnych, wywołanych przez zmiany ziemskiego pola magnetycznego, jak wreszcie powstawanie różnic potencjału na skutek zachodzących w atmosferze zjawisk elektrycznych, w szczególności naboju elektrycznych, niesionych przez opady. Dotychczasowe badania wykazały niewątpliwie, że, powstając w zależności od zmian pola magnetycznego ziemskiego, prądy ziemskie ze swej strony przyczyniają się w części do zmian pola magnetycznego; że istnieje pewien związek między zmianami dziennymi i rocznymi w tych prądach a zmianami gradientu potencjału elektrycznego w atmosferze; że wzmocnionej czynności słonecznej, wyrażającej się w zmianach, względnie tworzeniu się plam słonecznych, towarzyszą zmiany w tych siłach elektromotorycznych, które warunkują powstawanie prądów ziemskich.

Na tej krótkiej wzmiance poprzestajemy, pragnąc jedynie poinformować czytelnika o istnieniu tego ciekawego, a jeszcze niezbadanego dokładnie zjawiska.

ĆWICZENIA I ZADANIA.

666. Jeżeli chcemy dokonać pomiaru gradientu potencjału w elektrycznym polu atmosferycznym na terenie równym i niezabudowanym, co będzie nam w sposób nieunikniony utrudniało ten pomiar?

667. Dlaczego do robienia piorunochronów używamy drutów grubych, nie cienkich?

668. Czy piwnica jest dobrym miejscem do robienia pomiarów elektrostatycznych?

669. Mając w otaczającej nas atmosferze znaczne różnice potencjałów, moglibyśmy, jakby się zdawało, zużytkować te różnice do zbudowania przyrządów, któreby dostarczały nam prądów elektrycznych bezpośrednio z atmosfery. Wiele prób w tym kierunku zawiodło. Gdzie tkwi główna przeszkoda w realizacji podobnego urządzenia?



ODPOWIEDZI NA ZADANIA.

409. $f = 0,6$ dyn. Siła skierowana ku kuleczce o ładunku $= -5$ jedn. el. st.
410. W odległości 60 cm poza nabojem $= -18$ jedn. el. st.
411. $f_1 = 0,4$ dyn, $f_2 = 0,28$ dyn, $f_3 = 0,04$ dyn.
412. $f = 5$ dyn.
413. $f = 9 \cdot 10^8$ dyn.
414. $e = 176,58$ jed. el. st.
415. $e = 50$ jedn. el. st.
425. $F_1 = 4 \frac{gr^{\frac{1}{2}}}{cm^{\frac{1}{2}} \text{ sek}}$,
 $F_2 = 1 \frac{gr^{\frac{1}{2}}}{cm^{\frac{1}{2}} \text{ sek}}$,
 $F_3 = 0,25 \frac{gr^{\frac{1}{2}}}{cm^{\frac{1}{2}} \text{ sek}}$.
428. $v = 10$ jedn. el. st. $= 3000$ wolt.
441. Z dokładnością do 0,1 jedn. el. st.
443. $v = 8^{1/3}$ jedn. el. st. $= 2500$ wolt.
445. $v = 180$ jedn. el. st. $= 54000$ wolt.
446. Potencjał kuleczki $v = 180$ (dokł. $179^{4/7}$) jedn. el. st., potencjał kuli $= 6$ jedn. el. st. $= 1800$ wolt.
447. $v = 173^{4/7}$ jedn. el. st. $= 52071$ wolt.
448. $e = 7065$ jedn. el. st., $v = 942$ jedn. el. st. $= 282600$ wolt.
449. Przed dotknięciem $v_1 = 4$ jedn. el. st. $= 1200$ wolt, $v_2 = 6,25$ jedn. el. st. $= 1875$ wolt; po dotknięciu $v = 5^{5/13}$ jedn. el. st. $= 1615^{5/13}$ wolt.
450. Przed dotknięciem $v_1 = 6$ jedn. el. st. $= 1800$ wolt, $v_2 = -6,25$ jedn. el. st. $= -1875$ wolt; po dotknięciu $v = -1^{7/13}$ jedn. el. st. $= -461^{7/13}$ wolt.
451. $v = 10000$ wolt.
452. $v = 7143$ wolt.
454. $f = 5^{5/9}$ dyn.
455. $1/31$.
456. $e = 42392,35$ jedn. el. st. w 1 sek.
457. $v = 10^7$ wolt.
458. $E = 225 \cdot 10^8$ dżul.
464. $c = 2583$ cm. $= 0,003 MF$; $n = 333$ butel., $E = 143,5 \cdot 10^4$ erg., $e = 86100$ jedn. el. st.
465. 318 arkuszy. Biorąc cynfolję takiej grubości jak papier, otrzymamy kondensator grubości 6,35 cm. Wymiary wewnętrzne skrzynki wyniosą w przybliżeniu $25 \cdot 15 \cdot 7$ cm³.
466. $E = 28125$ erg.
467. $Q = 0,29 \frac{\text{kal}}{\text{gr}}$.
468. $D = 2,5$.
469. $55,26 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$.
470. $C = \frac{c}{2}$.
473. $e = 0,0000564$ kulomb.
479. $i = 1$ amp.
480. $i = 1,16$ amp., t. j. słabszy o 0,04 amp.
482. $i = 185$ amp.
483. $t = 31^{\text{st}} 31^{\text{m}} 20^{\text{s}}$.
484. 1,36 gr.
485. 0,00174 cm³.

487. $i = 2,15$ amp.
488. $v = 27$ volt, $t = 13$ godz.
489. Nie zależy.
490. Nie byłoby wskazane.
500. Zgodny $m = 154,62 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$.
501. $m_1 = 146,7 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$,
 $m_2 = 160,5 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$.
505. 1) $F_1 = 0,768$ gausów, $F_2 = 0,339$ gausów, $F_3 = 0,086$ gausów. Kierunek jest równoległy do osi magnesu.
 2) $F = 0,506$ gausów pod kątem $101^{\circ}34'$ względem tego promienia w dwu punktach symetrycznych względem osi, a w dwu pod kątem $131^{\circ}34'$.
506. 1) $V = 0$, 2) w 2 punktach $V = 0,04$ jedn. pot. magn. i w dwu $V = -0,04$ jedn. pot. magn.
507. 1) W rogach kwadratu $F = 0,616$ gausów, $V = 0$, w środku $F = 0$ i $V = 0$.
 2) w 2-ch rogach kwadratu $F = 0,59$ gausów i $V = 3$ jedn. pot. mag., w dwu zaś $F = -0,59$ gausów i $V = -3$ jedn. pot. magn., w środku $F = 0$ i $V = 0$.
508. $F = 6,52$ gausów, $V = 7,4$ jedn. pot. magn.
 2) $F = 0$, $V = 32,6$ jedn. pot. magn., jeżeli pręty są dość długie, żeby można było zaniedbać wpływ pozostałych biegunów.
509. 45 rurek.
510. $f = 375$ dyn.
522. $m = 723 \frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}}$.
524. $F = 0,4734$ gausów.
533. 1) $F = 4,52$ gausów.
 2) $F = 0,00013$ gausów.
534. $i = 0,48$ amp. = 4,8 weber.
535. $i = 5,1$ amp. = 0,51 weber.
536. $n : n_1 = 5 : 3$.
537. Od 0,023 web. = 0,23 amp. do 0,076 web. = 0,76 amp., zakładając $H = 0,185$ G.
538. $i_1 = 2,89$ amp., $i_2 = 8,66$ amp.
539. $2r = 65,4$ cm, jeżeli i jest wyrażone w jedn. el. magn.;
 $2r = 6,54$ cm, jeżeli i jest wyrażone w jedn. el. st.
540. $C = 2,8$ dla jedn. el. st. i 0,28 dla jedn. el. magn.
541. 1) $i = 2,33$ amp. 2) $C = 4,4$, 3) $i = 4,4$ amp.
542. $H = 0,2$ G.
543. $i = 0,0092$ web. = 0,092 amp.
545. 1) $F = 0,1256$ G,
 2) $\alpha = 3^{\circ}36'$, 3) $\alpha = 62^{\circ}3'$.
550. Wymiar C w jednost. el. st. $\frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{sek}^2}$, w jedn. el. magn. $\frac{\text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{sek}}$.
554. $R_1 = 32,5$ om., $R_2 = 181,5$ om.
555. $V_1 = 13$ volt, $V_2 = 72,6$ volt.
556. $R = 0,53$ om.
557. $R = 0,79$ om.
558. 1) 18,7 cm, 37,4 cm, 93,5 cm;
 2) 46,75 cm, 93,5 cm, 233,75 cm;
 3) 74,8 cm, 149,6 cm, 374 cm;
 4) 187 cm, 374 cm, 935 cm.
559. $2R = 18,7$ cm.
564. $R = 1,66$ om.
565. $E = 188,76$ volt, $i = 15$ amp.,
 $r = 12,77$ om.
566. n^2 razy.
567. $R = 2 \frac{8}{11}$ oma.
568. $i_1 = 1 \frac{7}{11}$ amp., $i_2 = \frac{6}{11}$ amp.,
 $i_3 = \frac{1}{11}$ amp.
569. $r = 210$ om.
570. $4,9 \cdot 10^{-6}$ om/cm.
571. $i_1 = 0,6$ amp., $i_2 = 0,75$ amp.,
 $i_3 = 0,6$ amp.
572. $i = 1 \frac{21}{11}$ om., $i_1 = \frac{20}{11}$ om.,
 $i_2 = \frac{10}{11}$ om.

573. a) $i = 0,48$ amp., b) $i = 0,04$ amp.
574. 28 om.
575. $4 \frac{1}{11}$ wolt.
576. Opór wewnętrzny baterji = 6 om.
577. 1) $i = 1,94$ amp., $i_1 = 1,39$ amp., $i_2 = 0,55$ amp.
2) $i = 0,8$ amp., $i_1 = 0,6$ amp., $i_2 = 0,2$ amp.
3) $i = 2,3$ amp., $i_1 = 1,6$ amp., $i_2 = 0,7$ amp.
578. Po 4 równolegle i po 3 w szereg., $i = 18$ amp.
579. Po 2 ogniwa równolegle i po 4 w szereg.; $i = 1,7$ amp.
580. 48 ogniw, po 3 równolegle i po 16 w szereg.
581. $R = 3,2$ om., $E = 29,6$ wolt, $r_1 = 6,67$ om., $r_2 = 4,2$ om.
586. $i = 0,000005$ amp.
587. $i = 0,0000006$ amp.
588. Upust o oporze 9999 razy mniejszym od oporu galwanometru.
589. Upust o oporze 9999999 razy mniejszym od oporu galwanometru.
590. $r_1 = \text{ok. } 0,7$ om., $r_2 = \text{ok. } 7,3$ om.
591. W zwoju manganin. $i_1 = 0,77$ amp., w zwoju miedzianym $i_2 = 1,23$ amp.
593. $i = 20$ amp.
594. Opór zewnętrzny zmniejszyć do 10 omów.
595. $Q = 6,39$ kal./gr.
596. $Q = 26,29$ kal./gr.
597. $r = 5,7$ om.
599. $Q_1 : Q_2 = 68 : 285$.
600. $t = 2^{m} 4^s$, 7, jeżeli drut jest miedziany.
601. Dzielność prądu = 0,125 wat.; praca w części wewnętrznej 0,05 dżul, w zewnętrznej 0,075 dżul w ciągu 1 sek.
603. Przy połączeniu równoległym grzanie będzie mniejsze.
605. $Q = 9464,4$ kal./kg, dzielność 11 kilowat.
606. 6,75 zł.
607. 11,14 zł.
610. Przy napięciu instalacji 110 V pojemność baterji winna wynosić 55,2 amperogodzin.
611. $i_1 = 0,55$ amp., $i = 44$ amp., $r = 2,5$ om.
612. 1) Dzielność całk. = 1700 wat., 2) $E = 50$ wolt, 3) dzielność użyt. 500 wat.; 4) współczynnik użyt. wydajności $\frac{6}{17} = 29\%$.
613. 14478,75 kilowat/godz.
619. Ilość rurek zwiększy się o 0,000044 części.
620. 1) 28 rur., 2) 1,4 gaus.
631. $136 \cdot 10^{-7}$ woltów.
632. 1) 112,24 woltów, 2) 6,1 amp.
633. 1) 35,84 KW., 2) 65%.
634. 1) 131,3 KW., 2) 92%.
635. 1) 4675 A., 2) 52431 kal.
636. 1,2 KW.
638. Ok. 0,0003 A.
645. Odchylenie otrzymuje się zbyt wielkie i plamka znika zupełnie.
660. $n = 8,57 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{sek}}$.

SKOROWIDZ

- Agona** 210.
Akumulator (ogniwo wtórne) 154, ładowanie 155, 298, procesy chemiczne przy wyładowywaniu i ładowaniu 156, siła elektromotoryczna 157, pojemność 157.
Amalgamowanie cynku 117.
Ampère A. M. 125, reguła 218.
Amper 125, 248, 252.
Ampermetr 126, 285, cechowanie 136, termiczny 126.
Amperogodzina 157.
Anoda 128.
Anodowe promienie 373, 374.
Anomalja magnetyczna lokalna 199, 210.
Antena 436, 437.
Antykatoda 377.
Arrheniusa hipoteza 138.
Astatyczna igła 219.
Atom elektryczności (elektron) 27, gramowy 142, budowa 405, rozpad 403.
Azymut miry 194.
Badanie pola elektrostatycznego sposobem doświadczalnym 37.
Bateria butelek lejdejskich 85, spięcie równoległe 85, spięcie szeregowo 110; ogniwi 121, połączenie równoległe 121, 277, szeregowo 121, 277, mieszane 277, napięcie el. 121.
Bezpiecznik 283.
Bezładności magnesu moment 202.
Biegunowa zorza 208, 450, 452.
Bieguny maszyny elektrostatycznej 107, ogniwa 118, magnesu 161, północny (dodatni) i południowy (ujemny) 161, 165, 170, działanie wzajemne 162, pole pojedynczego 179, pole dwu biegunów 180, magnetyczne ziemi 198, masa bieguna magnetycznego 175, 199.
Biot 241.
Blondłota doświadczenie 425.
Bohr Niels 405.
Budowa atomów 405.
Budowa ogniw galwanicznych 144, magnesów 167.
Burza magnetyczna 189, 207.
Busola 161, 195; stycznych 245, wzór 247, spóliczynnik redukcyjny 249.
Butelka lejdejska 79, bateria 85, 110, Lane'go 111.
Carnegie 213.
Cechowanie ampermetru i woltametru 136.
Cewka Ruhmkorffa 347-351.
Le Chatelier'a ogniwo termoelektryczne 298.
Chemiczne zjawiska w ogniwie 119.
Chlorowodoru elektroliza 130.
Ciała naelektryzowane 1, przyciąganie się 1, odpychanie 2, przewodzące metalicznie 120, paramagnetyczne 300, 305, diamagnetyczne 300, 305, ferromagnetyczne 303.
Ciepło w obwodzie prądu 281, Joule'a 281, Peltiera 296.
Ciśnienie elektrostatyczne 56, 104.
Ciśnienie światła 434.
Coulomb 11, prawo 12, 42, 93, 171, 307, dowód 42, wzór w postaci ogólnej 93, 171.
Crookes'a rurki 361.
Curie odkrycie 392.
Cynku amalgamowanie 117.
Czasu wpływ na magnesy 169.
Ćwiczenia i zadania 29, 68, 108, 158, 185, 214, 253, 286, 299, 314, 354, 390, 406, 442, 453.
Daniella ogniwo 146, 152.
Deklinator 194.
Depolaryzator 147.
Detektor 421, kryształkowy 439, termoelektryczny 422.
Diamagnetyczne ciała 300, 305.
Dielektryki (złe przewodniki) 6, 42, 92, 97; wpływ na działanie wzajemne nabojeów elektrycznych 92, napięcie 47, 96, polaryzacja 28.
Dielektryczna stała 81.
Dielektryczny prąd 429.
Doświadczenia z elektroskopem 8, Volty 120, Faradaya 222, Rowlanda 232.
Dowód prawa Coulomba 42.
Dynamomaszyna 337.
Dysocjacja 138.
Dyspersja fal elektromagnetycznych 428.

- Działanie płomienia 1, 7, ostrzy 25, wtórne prądu 140, wzajemne biegunów magnetycznych 162, pomoderomotoryczne pomiędzy przewodnikami, w których płyną prądy elektryczne 230, pola magnetycznego na promieniowanie 313.
- Działań elektromagnetycznych reguła zasadnicza 234.
- Dzielnosc prądu 279.
- Dzwonek elektryczny 255.
- Edison T. 282.
- Elektrody 128, polaryzacja 145.
- Elektrodynamometr 238.
- Elektrofor 112.
- Elektrolyty 121, 128, opór właściwy 269.
- Elektroliza 127, wody 128, chlorowodoru 130, 1-sze prawo Faradaya 132, 2-ie prawo Faradaya 138, 141, mechanizm 138, wyznaczenie wartości naboju elementarnego 142.
- Elektromagnesy 228, okowy 301.
- Elektromagnetyczna teoria światła 432.
- Elektromagnetyczne fale 417 i dalsze.
- Elektrometr 64, bezwzględny W. Thomsona 64.
- Elektromotoryczna siła indukcji 326.
- Elektron (atom elektryczności) 27.
- Elektronowa lampa 440, 441.
- Elektroskop 7, 60, wskazania 60, doświadczenia 8.
- Elektrostatyka 15.
- Elektryczność 1, dodatnia i ujemna 3, atomy 27.
- Elektryczność ziemiska 444 -453.
- Elektryzowanie przez potarcie 1, przez dotykane ciałem naelektryzowanym 4, indukcyjne 15, mechanizm 26.
- Elementy magnetyzmu ziemskiego 192, zmiany 205, wartości średnie 206.
- Emanacja radu 401.
- Energja naelektryzowanego ciała 86, przemiany 87, 88, wartość 88, wzory 90, 91, gęstość 97, 98.
- Eter wszechświatowy 48, 104.
- Fale elektromagnetyczne 417 i dalsze, stojące 419; wzdłuż drutów 424.
- Farad (jedn. prakt. pojemności) 44.
- Faraday M. 20, puszka 20, 92; doświadczenia 222, 313, konduktor kulisty 82, 1-sze prawo elektrolizy 132, 2-ie prawo elektrolizy 138, 141, stała 143.
- Feddersena doświadczenie 409.
- Ferromagnetyczne ciała 303.
- Foucaulta prądy 330.
- Franklin B. 26, młynek 25.
- Galvani A. 126.
- Galwanometr 125, 236; z ruchomą cewką 237, bez magnesu 237, bezwzględny 245, opancerzoły 304.
- Galwanoplastyka 132.
- Galwanoskop 125, 236.
- Galwanostegja 132.
- Gaus 177.
- Gauss K. F. 177, metoda 205.
- Geisslera rurki 360.
- Gęstość elektryczności 24, energii elektr. 97, 98, prądu 158.
- Gilbert W. 26, 162.
- Gradjont elektryczny 443.
- Gramme'a pierścień 335.
- Greneta ogniwo 117, 145.
- Grothius 138.
- Grzanie się przewodników i zastosowanie praktyczne 282.
- Gülchera termobateria 298.
- Heaviside'a warstwa 448.
- Helfnera-Altenecka twórnik 335.
- Henry 411.
- H. Hertz 417.
- Hessa odkrycie 448.
- Hipoteza Arrheniusa 138.
- Histeresa 311.
- Hittorfa rurki 361.
- Igiełka magnezowa 161 próbna 37, magnezowa astatyczna 219.
- Indukcja elektromagnetyczna 15, 104, 309, magnetyczna 163, 306, 309, elektromagnetyczna 316, 317, własna 331, linje 307, rurki 307, siła elektromotoryczna 326.
- Indukcyjny prąd 317, 319.
- Inklinator 196.
- Inwersja 293.
- Iskra elektryczna 79, 357.
- Istnienie naboju na powierzchni 18.
- Izodynamy 212.
- Izogony 210.
- Izokliny 211.
- Izolowanie G.
- Jednostka C G S naboju elektrycznego 13, wymiar 13, praktyczna (kulomb) 15, C G S natężenia pola 34; C G S potencjału 51; praktyczna na potencjału 52, C G S pojemności elektrycznej 72, jej wymiar 72, praktyczna pojemności 74; C G S natężenia prądu 124, praktyczna natężenia prądu 125, 248, masy magnetycznej 172, wymiar 172; natężenia pola magnetycznego 177; potencjału magnetycznego 183, elektromagnetyczna natężenia prądu 243; elektromagnetyczna naboju 173, 244, oporu 261, praktyczna (om) 261, układ elektrost. 173, elektromagn. 173.
- Jednostek elektrost. i elektromagn. natężenia prądu stosunek 250.
- Jonizacja gazów 383; przez zderzenie 389.
- Jonizujące działanie promieni Röntgena 384, nadfioletowych 386, ciał promieniotwórczych 397.
- Jony 138, 139.
- Joule'a ciepło 281, prawo 282.
- Kabel podmorski 255.
- Kalorymetr elektryczny 282.

Kanalikowe promienie 373.
Katoda 128.
Katodowe promienie 363.
Kelvina wzór 411.
Kierunek prądu elektrycznego 114; prądu polaryzacyjnego 155; południka astronomicznego, jego wyznaczenie 192.
Koercja 311.
Koherer 421.
Kompas (busola) 161.
Kondensator 75, płaski 76, 118, okładki 77; rozbicie 79; pomiar pojemności 80; kulisty Faraday'a 82; płaskiego pojemność 82; mikowy 86, zastosowanie 91.
Konwekcja 142.
Kosmiczne promieniowanie 448.
Kraźek próbny 23.
Krótkofalowa sygnalizacja 442.
Kryształkowy detektor 439.
Kuleczka próbna 18.
Kuli pojemność elektryczna 72.
Kulomb 15, 249.

Lampa elektronowa 441.
Lane'go butelka 111.
Lane'go doświadczenie 379.
Lechera doświadczenia 426.
Leclanché'go ogniwo 147.
Lenza reguła 324.
Linje sił (pola elektrostatycznego) 35, przebieg 39, 182, zmiana kierunku na granicy dwu dielektryków 100; pola magnetycznego 178, izomagnetyczne 212, indukcji 307.

Ładowanie akumulatorów 155, 298.
Ładunek (nabój) elektr. 3, jednostka 13.
Łuk elektryczny (Volty) 358.

Machiny elektrostatyczne 106, z tarciami 106, 112, indukcyjne 78, 106, bieguny 107.
Magnes naturalny 160, sztuczny 160, pas obo-

jętny 160, bieguny 161, ruch obrotowy 161, podział mechaniczny 166, budowa 167; wpływ temperatury 169; wstrząśnień mechanicznych 169, czasu 169; moment magnetyczny 200; okres wahań 201; moment bezwładności 202.
Magnezowanie przez pocieranie 166. indukcyjne 163, nasycenie 168, przez prąd elektryczny 227.
Magnetometr 202, 205.
Magnetyzm ziemski 188, elementy 192, zmiany 205, średnie wartości 206.
Manganin 262.
Mapy magnetyczne 209, zbieżności magnetycznych 196.
Masa magnetyczna biegunów 170, jednostka 172, wyznaczenie wartości 173.
Materji zagadnienie 139.
Maxwell J. Clerk 103, 417; prąd 429.
Mechanizm elektryzowania 25; elektrolizy 138.
Metal dodatni i ujemny 294.
Metoda sprzężonych wysockości 194, Gaussa 205; podstawiania (mierzenie oporu) 275; J. J. Thomsona wyznaczenia v i $\frac{e}{m}$ dla strumieni nabo-
jów 367.
Mierzenie nabo-
jów elektrycznych 10, 14, potencjału 63, pojemności elektrycznej 72, składowej poziomej magnetyzmu ziemskiego 199, natężenia prądu 136, oporów 270.
Miękkie rurki Röntgena 377.
Mikrofarad 74.
Mikrofon 353.
Miliwoltmetr 283.
Mira 193, azymut 194.
Młotek Neefa 255.
Młynek Franklina 25.
Model budowy magnesu 168.

Moissana piec elektryczny 358.
Moseley'a odkrycie 382.
Mostek Wheatstone'a 270
Motor elektryczny 344.

Nabój elektryczny (ładunek) 3, mierzenie 10, jednostka 13, jednostka elektromagnetyczna 173, 244; rozpoznanie znaku 18, znak indukowanego 18, istnienie na powierzchni 18, powstawanie jednoczesne dodatniego i ujemnego 22, rozmieszczenie na przewodniku 23; próbny 34; elementarny 15, wyznaczanie jego wartości za pomocą elektrolizy 142; magnetyczny 170.
Naczylenie magnetyczne 189, dodatnie i ujemne 190, zmiany 190, wyznaczenie 196.
Napięcie rurek w dielektryku (Faraday) 47, 67, 96, 98, wyładowanie iskrowe 107; ogniwa (siła elektromotoryczna) 119, 148; akumulatora 148, baterji 121.
Nasycenie magnesowania 168.
Natężenie pola 32, 95; jednostka 34, wymiar jednostki 33; wypadkowe 34; związek z potencjałem 57; prądu 122, jednostka 124, CGS-owa 125, średnia 124, praktyczna 125, 247, mierzenie 136; pola magnetycznego 176, 308, ziemskiego 190; jednostka 177; składowa pozioma pola ziemskiego 191, składowa pionowa 191, pola magnetycznego w przestrzeni, otaczającej prąd prostoliniowy 241; w środku prądu kołowego 242; jednostka elektromagn. natężenia prądu 243; stosunek jednostki elektrost. i elektromagnetycznej 250.
Neefa młotek 255.
Nobili'ego termobaterja 297

Obserwacja odchylen 202, wahań 201.
Obserwatorja magnetyczna 213.
Obwód (pierścien) z kilku przewodników metalicznych 149, z elektrolitem 152.
Odształcenia elektryczne 104.
Odpychanie się ciał naelektryzowanych 2.
Oersteda odkrycie 217.
Ogniwo (voltaiczne) 117, Greneta 117, 145; różnica potencjałów 118; siła elektromotoryczna (napięcie) 119; zjawiska chemiczne 119; połączenie równoległe i szeregowo 121; budowa 144; Volty 144, 152; Daniell'a 146, 152, Leclanché'go 147; suche 147; normalne 147; Westona 147; zamknięte lub otwarte i różnica potencjałów jego biegunów 153; wtórne (akumulator) 159; termoelektryczne (termoelement) 293, jego praktyczne zastosowanie 297, Le Chateliera 298
Ohm J. S. 261, prawo 258, 261.
Okładki kondensatora 77.
Okowy elektromagnes 301, magnetyczne 312.
Okres drgań elektromagnetycznych 411.
Okres połowicznego zaniku 402.
Okres wahań magnesu 201.
Om międzynarodowy 262, wzorzec 262.
Opadów stan elektryczny 449.
Opór elektryczny 257, 261, zewnętrzny i wewnętrzny 258; jednostka 261, praktyczna (om) 261, przewodników złączonych w szereg 263, złączonych równoległe 265; opór i rozmiary przewodnika 267, właściwy 268, tabelka oporów właściwych metali 268; opór i temperatura 269; elektrolitów 269, złych prze-

wodników 269; mierzenie 270; mierzenie metodą podstawiania 275.
Opornica 273, korbowa 274; suwakowa 274.
Osłona elektryczna 40, 93, magnetyczna 304.
Ostrzy działanie 25.
Otrzymywanie małych różnic potencjałów 275.

Paramagnetyczne ciała 300, 305.
Pas obojętny przewodnika 26, magnesu 160.
Peltiera zjawisko 295, ciepło 296.
Perrina rurka 366.
Piec elektryczny 282, Moissana 358.
Pierścien (obwód) kilku przewodników metalicznych 149; Gramme'a 335.
Pionowa składowa natężenia magnetyzmu ziemskiego 192, zmiany 205.
Pioruny 450, piorunochrony 450.
Piometr elektryczny 299.
Plamy słoneczne 208.
Plückera rurki 360.
Płomienia działanie 1, 7.
Podział mechaniczny magnesu 166.
Pojemność elektryczna 70, jednostka elektrostat. 72, wymiar 72, mierzenie 72, elektrostat. kuli 73, jednostka praktyczna 74; kilku przewodników 75; pomiar pojemności kondensatora 80, kondensatora płaskiego 82; akumulatora 157.
Polaryzacja dielektryczna 28, 97, 104; elektrod 145, 155; magnetyczna 170, 184, promieniowania elektromagnetycznego 424, 430.
Pole elektrostatyczne 32, 49, natężenie 32, 95, wypadkowe 34, linje sił 35; badanie sposobem doświadczalnym 37, jednorodne 39, 57, 182, niejednorodne 59, uwarunkowane przez dwa naboje różne 54, w różnych dielektrykach 99.

Pole magnetyczne (magnetostryczne) 175, natężenie 176, wartość siły 177, linje 178, pole pojedynczego bieguna 179, dwu biegunów magn. 180, ziemskie 189, dookoła przewodnika prostolinjowego, w którym płynie prąd 218, kołowego 223, solenoidu 225; wytworzone przez prąd konwekcyjny naboju elektrycznych 231; działanie na promieniowanie 313.
Połączenie ogniw równoległe 121, szeregowo 121.
Połowicznego zaniku okres 402.
Południk magnetyczny 189, astronomiczny, wyznaczanie kierunku 192.
Pomiary magnetyczne, redukcja rezultatów 209.
Postać ogólna wzoru Coulomba 93.
Potencjał elektryczny 48, 51, 95, jednostka 51, jednostka praktyczna 52, na powierzchni przewodnika 55, wewnątrz przewodnika 57, związek z natężeniem pola 57, spad 58, 115; zerowy (ziemi) 61; mierzenie 66; różnica potencjałów w ogniwie 118; skok przy zetknięciu różnorodnych ciał 149.
Potencjał magnetyczny 183, jednostka 183.
Potencjał, otrzymywanie małych różnic 275.
Powierzchnia ekwipotencjalna 53, 183.
Powstawanie jednoczesne naboju dodatnich i ujemnych 22.
Pozioma składowa magnetyzmu ziemskiego 192, zmiany 205, mierzenie 199, wyznaczanie 202.
Pozostałość magnetyczna 311.
Praca w polu elektrostatycznym 49; przeniesienie naboju 52, w obwodzie prądu 279.
Prawo Coulomba 12, 42,

- 93; dowód 42; 1-sze elektrolizy Faraday'a 132, 2-gie elektrolizy Faraday'a 138, 141; Ohma 258, 261; Joule'a 282.
- Prąd elektryczny 63, 114; dielektryczny 429; Foucaulta 330; indukcyjny 317; konwekcyjny 142; Maxwella 429; polaryzacyjny 155; przewodzony 142; stały 123; termoelektryczny 151, 293, 296; zmienny 123, 239; prądy ziemskie 452; kierunek 114, warunek istnienia 116; źródła 125; natężenie 122, jednostka 124, mierzenie 136; gęstość 158; działanie wtórne 140; jednostka elektromagnetyczna natężenia 243; praca 279; dzielność 279.
- Prądnicą prądu stałego 333; przemienne 339.
- Prędkość rozchodzenia się zmian elektrycznych 105.
- Procesy chemiczne przy wyładowywaniu i ładowaniu akumulatorów 156.
- Promienie anodowe 373, 374; kanalikowe 373, 374; katodowe 363-373; Röntgena 375, ugięcie 379, odbijanie się od płytek krystalicznych 380; α 396; β 399; γ 400; δ 400.
- Promieniotwórczość: odkrycie 392; wzbudzona 401; przemiany 401.
- Promieniowanie kosmiczne 448.
- Próżnia 48.
- Przebieg linii pola elektrostycznego 39, 182, magnetycznego 184.
- Przełącznik 153, 218.
- Przemiany energii elektrycznej 87; promieniotwórcze 401.
- Przenikliwość magnetyczna 303, 306.
- Przerywacz Wehnelta 350.
- Przewodnictwo ciepłe 142; elektryczne 268, elektryczne powietrza 447.
- Przewodniki elektryczne 5.
- Przewodzenie elektrolytyczne 128.
- Przyciąganie się ciał naelektryzowanych i nie-naelektryzowanych 1, 3.
- Pudło oporowe 272.
- Puszka Faraday'a 20, 92.
- Rad 394.
- Kadłotechnika 435-442.
- Redukcja rezultatów pomiarów magnetycznych 209.
- Reguła Ampère'a 218; Lenza 324; zasadnicza działań elektromagnetycznych i elektrodynamicznych 234.
- Rentgenogram 377.
- Rentgenowskie widmo 381.
- Rezonans elektryczny 415, 416.
- Rezonator 417; Hertza 419.
- Rowlanda doświadczenie i wnioski 232.
- Rozbrajacz 79.
- Rozbrojenie kondensatora 79.
- Rozmieszczenie naboju elektrycznego na przewodniku 23.
- Rozpad atomów 403.
- Rozpoznawanie znaku naboju elektrycznego 16.
- Rozszczepianie się promieniowania 314.
- Röntgena odkrycie 375, promienie 375; rurki miękkie 377, twarde 377.
- Równnik magnetyczny 198, 211.
- Równoważnik elektrochemiczny 134; tabelka 136, chemiczny 137.
- Różnica potencjałów na biegunach ogniwa 118; ogniwa zamkniętego i otwartego 153.
- Ruch obrotowy magnesu 161.
- Ruhmkorffa cewka 347-351.
- Rurki siły (pola elektrycznego) 44, 96, (napięcie) pola 47, 96, 182, indukcji 307, rurki próżniowe 359, Geisslera 360, Plücker'a 360, katodowe 363, Röntgena miękkie 377, twarde 377.
- Rutherford 401.
- Samoindukcja 331.
- Savart 241.
- Seebeck T. 293.
- Siła, linje 35; rurki 44, 96; elektromotoryczna (napięcie) ogniwa 119, 148, tabelka napięć 148, zależność napięć od własności chemicznych i stanu fizycznego ogniwa 148, elektromotoryczna akumulatora 157, elektromotoryczna indukcji 351, elektryczna (prawo Coulomba) 12, magnetyczna 171, 177, para 171, moment pary 260; elektrodynamiczna i elektromagnetyczna 233, magnetoelektryczna 233.
- Składowa pozioma i pionowa natężenia magnetyzmu ziemskiego 191, zmiany 192.
- Skok potencjału przy zekłnięciu różnorodnych ciał 149.
- Skrećeni waga 11.
- Soddy 401.
- Solenoid 167, 224, pole 225.
- Sonda elektryczna 442.
- Spad potencjału 58, 115.
- Spięcie równoległe butelek lejdjskich 85, szeregowo 110.
- Spinteroskop 398.
- Spółczynnik redukcyjny busoli stycznych 249.
- Stacja nadawcza 436, odbiorcza 437.
- Stafa dielektryczna 81, Faraday'a 143.
- Stan obojętny ciała 1.
- Stojące fale elektromagnetyczne 419.
- Stosunek jednostki elektromagnetycznej do jednostki elektrostatycznej natężenia prądu 250.
- Stycznych busola 245.
- Symmer 26.
- Szereg termoelektryczny 294.
- Światła ciśnienie 434; teoria elektromagnetyczna 432.
- Świder 214.

Tabela równowazników elektrochemicznych 136, sił elektromotorycznych ogni 148, oporów właściwych metali 268, okresu zaniku połowicznego 404, przemian promieniotwórczych 404.
Telefon 351.
Telegrafelektromagnetyczny 255, bez drutu 435.
Temperatury wpływ na magnes 169, na opór właściwy 269.
Temperatury wysokich wyznaczenie 298.
Teodolit 192, magnetyczny 195.
Teorja unitarna (Franklina) 26, dualistyczna (Symmera) 26, elektromagnetyczna światła 432.
Termobateria Nobili'ego 297, Gülchera 298.
Termoelement (ogniwo termoelektryczne) 293.
Temoelektryczny detektor 422.
Termograf 208.
Tesli transformator 412.
Thomson W (lord Kelvin) 410, elektrometr bezwzględny 64.
Thomsona J. J. metoda wyznaczania v i $\frac{e}{m}$ dla strumieni nabojów 367.
Transformator 345, Tesli 412.
Twarderurki Röntgena 377.
Twornik Heffnera-Altenacka 335.
Uginanie się promieni Röntgena 379.
Układ elektrostatyczny jednostek 173; elektromagnetyczny 173.
Upust 285.
Uziemianie 6.
Volta A 117, 126, doświadczania 120, ogniwo 144, 152, żuk 358.
Waga skręceń 11, 171.
Wahadełko elektryczne 4, wahadłowe wyładowanie 408.
Wahań magnesu okres 201, obserwacja 210.

Warjometr 205.
Wartości energii elektrycznej 88, wzory 90, 91, siły w polu magnetycznym 177, średnie elementów magnetyzmu ziemskiego 206.
Wartościowość pierwiastków 137.
Warunek istnienia prądu 116.
Weber W. E. 244.
Weber 244, 252.
Westona ogniwo 147.
Wheatstone'a mostek 270.
Wibrator 417.
Widmo magnetyczne 181, 220, rentgenowskie 381.
Wnioski z doświadczeń Rowlanda 232.
Wody elektroliza 128.
Wolt 52.
Woltometr 128, srebrowy 130, miedzioy 131.
Woltmetr 128, 153, 283, 285, cechowanie 136.
Wpływ dielektryku na działanie wzajemne nabojów elektrycznych 92, temperatury na magnesy 169, wstrząśnień mechanicznych na magnesy 169, czasu na magnesy 169.
Wskazania elektroskopu 60.
Wyładowanie 6, iskrowe i napięcie 108, wahadłowe 408.
Wymiar jednostki naboju elektrycznego 13, natężenie pola 33, pojemności elektrycznej 72.
Wysokości sprzężonych metoda 194.
Wyznaczanie wartości naboju elementarnego na podstawie elektrolizy 142, wartości masy magnetycznej 173, kierunku południka astronomicznego 192, zбочenia magnetycznego 192, 194, nachylenia magnetycznego 196, poziomej składowej natężenia magnetyzmu ziemskiego 202, wysokich temperatur 295.
Wzorzec Oma 262.

Wzór Coulomba (postać ogólna) 93, 171, dla busoli stycznych 247, 248.

Zadania i ćwiczenia 29, 68, 108, 158, 185, 214, 253, 286, 299, 314, 354, 390, 406, 442, 453.
Zagadnienie materji 139.
Zależność natężenia pola magnetycznego od natężenia prądu w przewodniku prostoliniowym 240, w przewodniku kołowym 242.
Zastosowania praktyczne grzania się przewodników 287, ogniwi termoelektrycznych 297.
Zбочenie magnetyczne (wschodnie i zachodnie) 189, wyznaczanie 192, 194, mapa 196.
Zeemana P. zjawisko 314.
Zetknięcia ciał różnorodnych (skok potencjału) 149.
Ziemi bieguny magnetyczne 198.
Ziemska elektryczność 442 prądu 452.
Zjawisko Peltiera 295, Zeemana 314.
Zmiany zбочenia 189, 206, składowej poziomej natężenia magnetyzmu ziemskiego 192, 206, elementów magnetyzmu ziemskiego 205.
Znaczenie praktyczne znacomości wartości zбочenia magnetycznego 196.
Zorza biegunowa 208, 450.
Zredukowanie elementów magnetyzmu ziemskiego do określonego czasu 212.
Zwory magnetyczne 312.
Źródła prądu 125.
Źwierciadła paraboliczne do doświadczeń z falami elektromagnetycznymi 422.
Żarówki 282.

