

CZĘŚĆ PIERWSZA

JONY, ELEKTRONY I PROMIENIE X

ROZDZIAŁ I

JONIZACJA GAZÓW. POMIARY PRĄDU W GAZACH ZJONIZOWANYCH

§ 1. Prąd przenoszony przez jony.

Przewodnictwo metali i elektrolitów. — Przypomnijmy w krótkości prawa rządzące zachowaniem się elektryczności w metalach i elektrolitach.

Zależność między natężeniem prądu elektrycznego płynącego przez drut metalowy oraz różnicą potencjałów V między końcami drutu wyraża się prawem Ohma, $V = rI$; r oznacza opór drutu, l — długość; mamy przy tym $r = \rho l/s = l/\gamma s$; gdzie s jest to przekrój drutu, ρ opór właściwy danego metalu, γ zaś przewodnictwo właściwe. Jeżeli będziemy posługiwali się pojęciem gęstości prądu: $j = I/s$ i rozważali tylko taką część rurki prądu, w której pole elektryczne h jest jednorodne, prawo Ohma przyjmie postać $j = \gamma h$. W tej postaci prawo wyraża, że w przewodniku metalowym gęstość prądu jest proporcjonalna do natężenia pola elektrycznego w badanym punkcie.

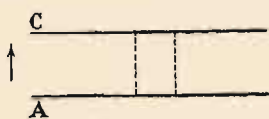
Mechanizm przepływu prądu w metalach nie jest jeszcze dokładnie znany, zakładamy jednak, że polega na przesuwaniu się elektronów wewnątrz metalu pod wpływem pola elektrycznego. Prąd w metalach jest to więc prąd konwekcyjny, elektryczność jest w tym przypadku przenoszona przez cząstki elektryczności ujemnej, które przesuwały się nie unosząc masy w ilości dostrzegalnej.

Zgodnie z teorią Hittorfa i Arrheniusa, prąd w roztworach elektrolitycznych jest to także prąd konwekcyjny, przesuwaniu się elektryczności towarzyszy jednak w tym przypadku przenoszenie materii, w myśl prawa Faraday'a. Prawo Ohma stosuje się do elektrolitów podobnie jak do metali. Nośniki prądu w elektrolitach nazywamy jonami; kationy niosące ładunek dodatni są utworzone z atomów wodoru lub metali, aniony zaś naładowane ujemnie — z atomów metaloidów lub reszt kwa-

sowych. Jony powstają w roztworze i zarazem ulegają rekombinacji. W stanie statecznym istnieje określony stosunek pomiędzy liczbą drobin zjonizowanych i całkowitą liczbę drobin. Stosunek ten nazywamy stopniem dysocjacji. Jeżeli w chwili początkowej stężenie roztworu nie jest jednakowe we wszystkich punktach, roztwór staje się z czasem jednorodny wskutek dyfuzji, spowodowanej ruchami molekularnymi. Zjawisko dyfuzji nie prowadzi do oddzielania się jonów przeciwnego znaku. *Nernst* pokazał, że następstwem elektrycznego przyciągania się różnoimiennych jonów jest powstawanie pewnej wspólnej prędkości dyfuzji: jeżeli warstwa kationów wyprzedza warstwę anionów lub odwrotnie, powstaje w danym miejscu pole elektryczne, które wyrównywa prędkości.

Pole elektryczne wytworzone w elektrolicie za pomocą dwóch elektrod, między którymi istnieje różnica potencjałów V , kieruje jony dodatnie ku elektrodzie ujemnej czyli katodzie, jony zaś ujemne ku elektrodzie dodatniej czyli anodzie. W ten sposób zachodzi przenoszenie się elektryczności, któremu towarzyszy przenoszenie materii w ilości proporcjonalnej do ładunku, zgodnie ze znanymi prawami elektrolizy.

Podstawowy wzór, pozwalający obliczyć gęstość prądu, otrzymamy biorąc pod uwagę rurkę prądu, zawartą pomiędzy dwiema równoległymi płytkami A i C , między którymi istnieje jednostajne pole elektryczne skierowane od A (anody) do C (katody) (rys. 1). Gęstość prądu j jest



Rys. 1.

to ilość elektryczności przechodząca w jednostce czasu przez jednostkę przekroju rurki. W przenoszeniu elektryczności biorą udział zarówno jony dodatnie jak i ujemne przesuwające się w kierunkach przeciwnych; prąd elektryczny pochodzący od anionów dodaje się do prądu wytworzonego przez kationy. Ponieważ ruch jonów zachodzi w środowisku stawiającym opór analogiczny do tarcia płynu, zakładamy, że każdy jon uzyskuje określoną prędkość, proporcjonalną do natężenia h pola elektrycznego. Prędkości u_1 i u_2 anionów i kationów są przeto równe $k_1 h$ i $k_2 h$, gdzie k_1 i k_2 są to stałe współczynniki zwane ruchliwościami. Ilość elektryczności danego znaku, przechodzącej przez jednostkę przekroju w jednostce czasu, jest równa sumie ładunków tego znaku, zawartych wewnątrz cylindra o podstawie 1 cm^2 i wysokości równej prędkości jonów. Jeżeli c oznacza stężenie molekularne w gramodrobinach, d stopień dysocjacji, F ładunek jonu jednowartościowego i v wartościowość, gęstość nałogu elektrycznego każdego znaku przenoszonego przez drobiny dysocjowane wynosi $cdvF$, gęstość prądu wynosi zatem

$$j = cdvF(k_1 + k_2)h.$$

Wzór ten wyraża prawo Ohma w elektrolitach i na przewodnictwo γ daje wartość:

$$\gamma = j/h = cdvF(k_1 + k_2).$$

Jak widać, jest to własność *addytywna* obu rodzajów jonów. Doświadczenia, których nie będziemy opisywali, pozwalają obliczyć wartości współczynników k_1 i k_2 . Największą ruchliwość posiada jon wodoru. W rozcieńczonym roztworze kwasu solnego w 18° , $k_1 = 0,0033$ cm/sek. (jon H^+) oraz $k_2 = 0,00068$ cm/sek. (jon Cl^-), jeżeli pole mierzymy w woltach na cm. Jony różnych metali począwszy od potasu ($k_1 = 0,00068$ cm/sek.) posiadają ruchliwości mało różniące się od siebie, o wiele mniejsze od ruchliwości jonu wodorowego. Ruchliwość jonów elektrolitycznych jest na ogół rzędu wielkości 1 cm. na godz.

Wiemy dzisiaj, że te elementarne rozważania teoretyczne zawiodą w przypadku roztworów soli silnych zasad i kwasów, gdyż prowadzą do błędnego wniosku, że dysocjacja tych elektrolitów jest niezupełna. Nowsze prace każą raczej przypuszczać, że w tych roztworach dysocjacja jest zupełna, lecz że przewodnictwo jest ograniczone z powodu istnienia sił elektrostatycznych, które działając na jony hamują ich ruch i zmniejszają zarówno ruchliwość, jak i ciśnienie osmotyczne (*Debye*).

Przewodnictwo gazów. — Gazy np. powietrze zachowują się w normalnych warunkach temperatury i ciśnienia jak izolatory. Elektroskop ze złotym lub glinowym listkiem, którego elektroda jest umocowana wewnątrz metalowego uziemionego pudła w dobrze izolującym korku (parafina, siarka, bursztyn) o bardzo czystej powierzchni, może zachowywać w ciągu wielu godzin a nawet dni bardzo słaby nabój elektryczny powodujący odchylenie listka.

Izolacyjna zdolność powietrza jest ograniczona warunkiem, że różnica potencjałów między dwiema elektrodami oddzielonymi warstwą powietrza nie może przekraczać pewnej wartości krytycznej zwanej potencjałem iskrzenia. Gdy ta wartość zostaje osiągnięta, prąd elektryczny przechodzi nagle w postać wyładowania samoistnego; o tym zjawisku będzie mowa później (§ 12).

Już w pierwszych swoich pracach *Coulomb* stwierdził, że bardzo poważna strata ładunku ciała naelektryzowanego, np. elektroskopu, wynika częściowo z niedoskonałości izolatora, głównie zaś stąd, że zdolność izolacyjna powietrza bynajmniej nie jest doskonała. W zwykłych warunkach powietrze posiada zawsze przewodnictwo elektryczne, co prawda bardzo słabe, lecz w dostatecznym stopniu aby je można było zmierzyć.

Różne okoliczności mogą spowodować, że powietrze uzyskuje przewodnictwo o wiele większe od zwykłego; oto kilka przykładów.

Gdy zbliżamy do elektrody płomień, nawet nie dotykający jej bezpośrednio, następuje szybkie wyładowanie elektroskopu; gazy pochodzące z płomienia są przewodnikami i udzielają swego przewodnictwa powietrzu, w którym się rozchodzą.

Ten sam wynik otrzymamy przybliżając do elektrody drucik metalowy rozżarzony do białości. W okolicy tego drutu powietrze uzyskuje pewne przewodnictwo. Wiele reakcyj chemicznych powoduje w oto-

czeniu wzrost przewodnictwa powietrza; w ten sposób działa np. utlenianie się białego wilgotnego fosforu w obecności powietrza. Jeżeli ta reakcja zachodzi w pobliżu elektrody elektroskopu, elektroskop wyładowuje się.

Możemy również uczynić powietrze przewodnikiem elektryczności posługując się działaniem niektórych rodzajów promieniowania, np. promieni Röntgena lub promieni wysyłanych przez pierwiastki promieniotwórcze (promienie Becquerela). W tym celu wystarcza przepuścić wiązkę promieni X w pobliżu elektrody lub zbliżyć ciało radioaktywne, np. niewielką ilość soli radowej.

We wszystkich wspomnianych przypadkach wyładowanie zachodzi niezależnie od znaku ładunku elektrody. Zwykle światło nie wywołuje dostrzegalnego wzrostu przewodnictwa powietrza. Jeżeli jednak elektroda elektroskopu wyrobiona z cynku zostaje naświetlona światłem nadfioletowym, można zaobserwować szybkie wyładowanie, lecz tylko w przypadku, gdy elektroda jest naładowana ujemnie.

Szczegółowe badania przewodnictwa uzyskiwanego przez gazy w różnych warunkach doprowadziły do utworzenia ogólnej teorii tych zjawisk. Przewodnictwo gazów, podobnie jak elektrolitów, przypisujemy obecności centrów naładowanych czyli jonów dodatnich i ujemnych. Mówimy że gaz zawierający jony jest *zjonizowany*. Prąd elektryczny w gazie zjonizowanym jest to prąd konwekcyjny, polegający na przesuwaniu się jonów w polu elektrycznym.

Szczególnie dokładne i doniosłe wyniki otrzymano używając, jako czynnika jonizującego, promieni X lub promieni radu działających w podobny sposób; te ostatnie stanowią główny przedmiot tej książki.

Jonizacja w gazach nie polega, jak w przypadku elektrolitów, na rozszczepieniu drobiny na dwie grupy atomowe, ponieważ gazy jednoatomowe: hel, argon, para rtęci, mogą być również zjonizowane podobnie jak gazy wieloatomowe. Zakładamy, że jonizacja jest następstwem oderwania się elektronu od drobiny gazu (§ 9). Uwolniony elektron, którego masa jest około 1800 razy mniejsza od masy atomu wodoru, może pozostawać w stanie swobodnym tylko w gazie bardzo rozrzedzonym; w gazie, którego gęstość jest normalna, elektron łączy się wskutek przyciągania elektrostatycznego z napotkaną obojętną drobiną, tworząc jon ujemny. Drobiną która utraciła elektron tworzy jon dodatni, posiadający taki sam ładunek, lecz znaku przeciwnego. Do takich jonów jednodrobinowych mogą przyłączyć się inne drobiny; wówczas powstają kompleksy jonowe.

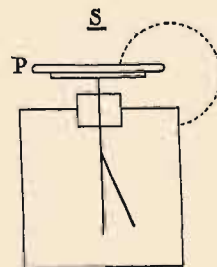
Jony gazowe rozproszone w gazie są to cząsteczki naładowane, biorące udział w ruchach cieplnych; jako takie są posłuszne prawom analogicznym do tych, którym podlegają jony w elektrolitach. Podobnie jak te ostatnie, mogą ulegać rekombinacji w przypadku napotkania jonów o znaku przeciwnym; w ten sposób może wytworzyć się stan rów-

nowagi pomiędzy szybkościami tworzenia się jonów i rekombinacji. Jeżeli koncentracja jonów w gazie nie jest wszędzie jednakowa, jony dyfundują, a ponieważ przestrzenne gęstości ładunków są najczęściej bardzo małe, dyfuzja może doprowadzić do częściowego rozdzielenia jonów dodatnich i ujemnych, na ogół dyfundujących z różną prędkością.

W naczyniu, zawierającym gaz zjonizowany, ścianki naczynia wywierają działania, których następstwem są skierowane ku ściankom ruchy dyfuzyjne. Jon znajdujący się bardzo blisko ścianki jest przyciągany przez nią w ten sposób, jak gdyby źródłem przyciągania był obraz elektryczny, tj. cząsteczka podobna lecz posiadająca ładunek przeciwnego znaku i umieszczona symetrycznie względem jonu z drugiej strony ścianki. Wskutek tego jony osiadają na ściance, która usuwa z gazu jony znajdujące się w jej bezpośrednim sąsiedztwie. Dyfuzja sprawia, że te jony zostają natychmiast zastąpione przez inne.

Działanie ścianek wzrasta wraz z wielkością ich powierzchni, tak np. filtrując gaz poprzez watę można pozbawić go jonów w zupełności.

Przy pomocy prostego doświadczenia można udowodnić istnienie centrów naładowanych w gazie zjonizowanym. W tym celu wystarczy powstrzymać za pomocą izolującej zasłony ruch jonów powstający pod wpływem pola elektrycznego. Taką zasłoną jest np. płytka parafinowa *P* (rys. 2) umieszczona na krążku stanowiącym zewnętrzną część elektrody elektroskopu. Jeżeli do elektroskopu zbliżymy źródło jonizujące *S* w postaci blaszki zawierającej polon, jony o znaku przeciwnym znakowi elektrody, przesuwać się zgodnie z liniami sił pola, skierują się ku niej i osiadą na parafinie; natomiast jony o tym samym znaku, co elektroda, skierują się do ścianki osłony elektroskopu, której oddadzą swój nabój. Jeżeli usuniemy płytkę parafinową przed zupełnym wyładowaniem się elektroskopu, stwierdzimy, że płytka jest naładowana i że znak jej ładunku jest taki, jaki przewidywaliśmy.



Rys. 2.

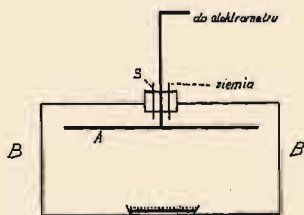
Natężenie prądu w gazie zjonizowanym może zmieniać się w szerokich granicach, co zmusza do używania przyrządów pomiarowych różnych typów.

Prądy przenoszone w samoistnym wyładowaniu np. w postaci iskry mierzy się przy pomocy amperomierzy lub miliamperomierzy. Prądy powstające w gazach zjonizowanych pod działaniem promieniowania posiadają na ogół małe natężenie. Możemy je mierzyć za pomocą galwanometrów, których czułość jest rzędu 10^{-11} amp., najczęściej jednak używa się elektroskopów lub elektrometrów, pozwalających mierzyć prądy o natężeniu od 10^{-10} do 10^{-15} amp. a nawet słabsze.

W urządzeniach przeznaczonych do tego celu należy rozróżnić dwie części główne: aparat pomiarowy, oraz komorę jonizacyjną.

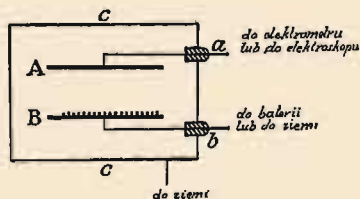
§ 2. Komora jonizacyjna.

Komora jonizacyjna, tj. naczynie zawierające badany gaz zjonizowany składa się najczęściej z metalowego naczynia, w którym znajduje się elektroda osadzona w korku z substancji izolującej. Między naczyniem



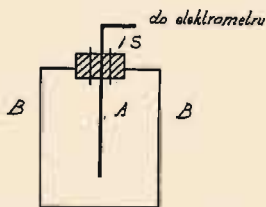
przez ciekłą ściankę stanowiącą dno komory. Można również posługiwać się tą komorą łącząc pudelko B z ziemią, elektrodę A zaś z elektroskopem.

Rys. 3. Komora jonizacyjna, której dwie elektrody są to: pudelko połączone z baterią akumulatorów, oraz płytka A połączona z elektrometrem. Korek izolujący jest zaopatrzony w połączoną z ziemią rurkę ochronną g która uniemożliwia bezpośrednie przewodzenie elektryczności przez powierzchnię izolatora pomiędzy elektrodą A i zbiornikiem B. Źródłem jonizacji jest substancja promieniotwórcza umieszczona wewnątrz komory na krążku spoczywającym na dnie lub umieszczoną na zewnątrz komory. W tym ostatnim przypadku promienie przenikają do komory



Rys. 4. Komora jonizacyjna z dwiema płytkami A i B izolowanymi od osłony c korkami izolującymi a i b. Płytkę A jest połączona z elektrometrem którego potencjał jest zbliżony do potencjału ziemi. Płytkę B jest połączona z jednym z biegunów baterii akumulatorów, której drugi biegun jest połączony z ziemią, wskutek czego powstaje znana różnica potencjałów między elektrodami A i B. Jonizacja jest wytwarzana przez promienie substancji promieniotwórczej umieszczonej na krążku który kładziemy na krążku B.

a elektrodą wytwarza się różnicę potencjałów. Jeżeli gaz zawarty w komorze jest zjonizowany, wówczas może w nim płynąć prąd elektryczny.



Rys. 5. Komora jonizacyjna podobna do poprzedniej lecz z prętem A zamiast płytki.

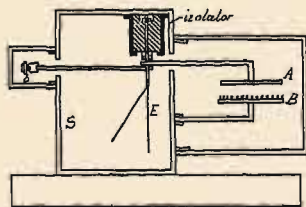
Zamiast jednej elektrody izolowanej naczynie może zawierać dwie, pomiędzy którymi wytwarzamy różnicę potencjałów powodującą powstawanie prądu; naczynie należy wówczas uziemić w celu zrealizowania osłony elektrostatycznej.

Kształt komory i rozmieszczenie elektrod są zależne od rodzaju doświadczenia; typy używanych komór jonizacyjnych są przedstawione na rys. 3, 4, 5.

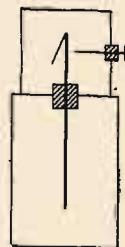
§ 3. Przyrządy elektrostatyczne.

Elektroskopy listkowe i nitkowe.— W większości elektroskopów, przystosowanych do mierzenia jonizacji, izolowana elektroda elektroskopu posiada listek przymocowany do płytki metalowej. Ruch listka obserwuje się za pomocą mikroskopu zaopatrzonego w podziałkę mikrometryczną. Elektroda znajduje się w metalowym naczyniu, zaopatrzonym w okienko dla umożliwienia obserwacji.

Elektroskop jest to bardzo prosty przyrząd pomiarowy. Jego skrzynka metalowa może służyć jako komora jonizacyjna, do której promienie jonizujące przenikają po przez bardzo cienką ściankę. Najczęściej jednak elektroskop składa się z dwóch części, z których jedna służy jako komora jonizacyjna, jak to pokazują rys. 6 i 7. Elektroskop może być również używany w połączeniu z komorą jonizacyjną stanowiącą osobny przyrząd.



Rys. 6. Elektroskop połączony z komorą jonizacyjną z płytkami *A* i *B* z których pierwsza jest połączona z elektrodą *E*, druga zaś z osłoną *F*. Na płytce *B* można umieścić substancję promieniotwórczą. Guzik *b* zabezpieczony przykrywką służy do ładowania elektroskopu.



Rys. 7. Komora jonizacyjna umieszczona bezpośrednio pod elektroskopem. Izolowana elektroda komory stanowi całość z elektrodą elektroskopu i może posiadać kształt pręta lub płytki.

Różnica potencjałów między izolowaną elektrodą a osłoną wynosi zazwyczaj kilkaset woltów. Elektroskop można naładować bądź za pomocą ciała naelektryzowanego przez

pocieranie, bądź też za pomocą małej maszyny elektrostatycznej, lub baterii akumulatorów albo ogni. Jeżeli elektroskop jest zaopatrzony w urządzenie pozwalające zmniejszać jego pojemność w odpowiedni sposób, wówczas wystarcza bateria utworzona z kilku ogni.

Natężenie prądu wyładowania nie jest proporcjonalne do prędkości ruchu listka, a to dlatego, że pojemność przyrządu zmienia się wraz ze zmianą położenia listka. Jeżeli jednak porównujemy odstępy czasu pomiędzy chwilami przejścia listka przez dwie raz na zawsze wybrane podziałki, wówczas te odstępy czasu odpowiadają przepływowi tej samej ilości elektryczności q . Średnia wartość prądu w ciągu badanego czasu t wynosi zatem $i = q/t$, co pozwala mierzyć prąd i w jednostkach względnych. Wielkość prądu otrzymana w doświadczeniu powinna być poprawiona drogą odjęcia biegu własnego, tj. prądu obserwowanego w nieobecności badanego czynnika jonizacyjnego.

W celu wyznaczenia bezwzględnej wartości prądu należy aparat wycechować. Czułość elektroskopu może jednak zmieniać się wskutek zniekształcenia listka. Z tego powodu elektroskopy są używane raczej do pomiarów względnych niż do absolutnych.

Niekiedy używa się elektroskopów, których listek znajduje się w próżni. W ten sposób pozbywamy się prądów powietrza w okolicy listka, oraz jonizacji w części elektroskopu zawierającej listek. Dla przykładu przytoczymy, że elektroskop zwykłych rozmiarów, zawierający litr powietrza może posiadać pojemność około 1 cm i że strata ładunku zaobserwowana w normalnym powietrzu jest rzędu wielkości kilku woltów na godzinę, co odpowiada prądowi rzędu wielkości 10^{-15} amp.

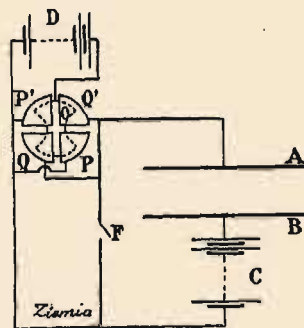
W niektórych elektroskopach ruchomym organem jest zamiast listka bardzo cienka nić przewodząca; w takim elektroskopie używa się bądź jednej nitki, odpychanej od nieruchomego pręta, bądź też układu dwóch nitek połączonych końcami i odpychających się wzajemnie. *Elektrometrem nitkowym* nazywamy przyrząd, w którym nitka jest rozpięta między dwiema blaszkami posiadającymi potencjały jednakowe, lecz znaków przeciwnych (np. ± 100 volt.); nitka wychyla się w kierunku jednej z tych płytek, zależnie od znaku ładunku, jaki otrzymuje.

Elektrometr kwadrantowy.—Najczęściej jest używany elektrometr typu kwadrantowego przystosowany do mierzenia słabych prądów. Przyrząd ten musi być połączony z komorą jonizacyjną. Rys. 8 przedstawia schemat najprostszego urządzenia doświadczalnego.

Jeżeli klucz F jest zamknięty, między kwadrantami nie ma różnicy potencjałów, natomiast pomiędzy płytkami A i B powstaje napięcie w przybliżeniu równe różnicy potencjałów między biegunami baterii C . Jeżeli powietrze między płytkami staje się przewodnikiem, powstaje prąd płynący od A do B . Po otworzeniu klucza F , prąd ten ładuje układ izolowany i zmienia jego potencjał, powodując stopniowe odchylenie się igły. W określonych warunkach prędkość tego ruchu jest proporcjonalna do natężenia prądu i może służyć jako jego miara.

Elementarna teoria elektrometru poncza, że w przypadku gdy między kwadrantami istnieje stała różnica potencjałów ρ mała wobec potencjału igły V , igła otrzymuje stałe odchylenie $\alpha = k\rho$, gdzie k oznacza *czułość napięciową*; wielkość ta jest w pewnych granicach proporcjonalna do potencjału V igły i zmienia się poza tym w stosunku odwrotnym do momentu kierującego, wynikającego ze skręcenia nitki zawieszenia. Można łatwo osiągnąć czułość, której odpowiada odchylenie o 1 metr na 1 volt, na skali umieszczonej w odległości jednego metra od zwierciadła.

Czułość ładunkowa s , określona wzorem $\alpha = sq$, gdzie q jest to ładunek udzielony izolowanym kwadrantom, nie jest proporcjonalna do k . Przypuśćmy, że igła naładowana dodatnio ($V > 0$) skręca się o kąt α w kierunku kwadrantów uziemionych; na kwadrantach izolowanych oswo- badza się wówczas ilość elektryczności ujemnej proporcjonalna do α i do potencjału igły, np. $A \propto V$; wyraz ten należy uwzględnić w obliczaniu po-



Rys. 8. O — ruchoma igła elektrometru zawieszona na cienkiej wstążce metalowej pomiędzy dwiema parami kwadrantów, P i P' , Q i Q' . A i B — płytki komory jonizacyjnej. Płytką A jest połączona z jedną z par kwadrantów QQ' . Płytką B jest połączona z jednym z biegunów baterii C , której drugi biegun jest uziemiony. Para kwadrantów PP' podobnie jak osłona przyrządu jest uziemiona. Igła O jest połączona z jednym z biegunów baterii D której drugi biegun jest uziemiony. Kwadranty QQ' oraz płytka A tworzą układ który może być bądź odizolowany, bądź połączony z ziemią za pomocą klucza F . Igła jest zaopatrzona w zwierciadełko którego odchylenia są obserwowane na podzielonej skali.

tencjału kwadrantów v . Oznaczając przez c pojemność izolowanego układu, otrzymujemy:

$$v = (q - A \alpha V)/c; s = \alpha/q = k/(c + kAV),$$

skąd wynika, że do pojemności geometrycznej c należy dodać wyraz uzupełniający, mianowicie tzw. «pojemność dodatkową», proporcjonalną do V^2 . Łatwo widzieć, że czułość ładunkowa s wzrasta wraz z potencjałem igły, aż do pewnego maximum, które zostaje osiągnięte, gdy pojemność dodatkowa staje się równa pojemności geometrycznej. W zwykłe używanych elektrometrach, igła jest naładowana do potencjału około 100 woltów i maximum czułości odpowiada potencjałowi, który nieznacznie przekracza tę wartość.

Jeżeli prąd o stałym natężeniu i udziela układowi izolowanemu ładunku q , mamy $q = i t$, gdzie t jest to czas przepływu prądu. Ruch, który uzyskuje igła, zależy od i , jak również od momentu kierującego. Przy odpowiednio dobranym współczynniku tłumienia prędkość igły ustala się dość szybko i przesuwanie obrazu staje się proporcjonalne do czasu. Gdy ten stan zostaje osiągnięty, kątowa prędkość odchylenia ω jest proporcjonalna do i . Otrzymujemy stąd, że czułość na prąd wynosi¹⁾

$$\omega/i = s = k/(c + kAV).$$

Wzór $\omega = si$ pozwala wyznaczyć względną wartość natężenia i . W tym celu wystarcza obserwować przesuwanie się obrazu w tej części skali, w której ruch jest jednostajny. Aby zmierzyć bezwzględną wartość natężenia bez wyznaczenia wszystkich wielkości, które występują we wzorze na s , należy wyrugować c , A i V , używając dodatkowej pojemności C , połączonej z układem izolowanym.

Wskutek zwiększenia się pojemności układu, prędkość ruchu igły zmniejsza się do wartości ω' . Otrzymujemy w ten sposób dwa równania

$$i/\omega = (c + kAV)/k, \quad i'/\omega' = (c + C + kAV)/k,$$

skąd

$$i/\omega - i'/\omega' = c/k.$$

Wartość absolutną i można w ten sposób obliczyć na podstawie znanej pojemności C oraz czułości napięciowej k .

§ 4. Metody kompensacji i stałego odchylenia.

Położenie obrazu na skali może być stale utrzymywane na zerze, jeżeli prąd mierzony jest w każdej chwili kompensowany prądem równym, lecz przeciwnego znaku, dostarczonemu do układu izolowanego przez odpowiednio dobrany przyrząd.

¹⁾ Prawa rządzące ruchem igły znajdują wyraz w równaniu różniczkowym ruchów periodycznych tłumionych. Całkując to równanie, znajdujemy, że prędkość kątowa

$$\omega = da/dt$$

dąży do wartości granicznej si , która zostaje osiągnięta drogą ciągłego wzrastania prędkości, jeżeli układ jest aperiodyczny, lub drogą kolejnego wzrastania i zmniejszania się prędkości w przypadku, gdy tłumienie jest małe. Należy unikać tego ostatniego przypadku, gdyż obserwowanie wahań nie jest dogodne. (zob. *Mme Curie, Radioactivité 1910*, I, § 25).

a) *Kwarc piezoelektryczny* (rys. 9 i 10). Główną częścią tego urządzenia kompensacyjnego jest płytka kwarcowa w postaci równoległościanu długości (l) kilku cm, około 15 mm szerokości i około 0,5 mm grubości (e). Płytką

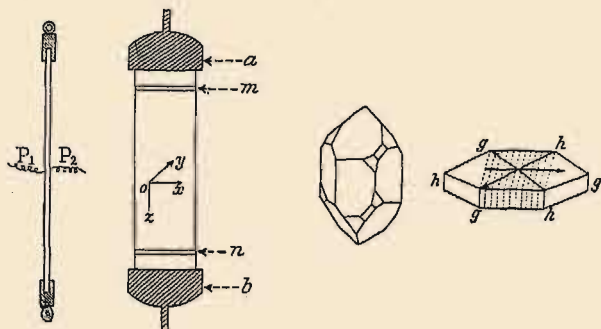
jest wyszlifowana w ten sposób, że oś główna (potrójna) kryształu Ox jest równoległa do szerokości, jedna zaś z trzech osi podwójnych Oy jest równoległa do najmniejszego rozmiaru, tj. do grubości. Płytką jest zaopatrzona w dwie oprawki, z których jedna a służy do zawieszenia, do drugiej zaś b jest przytwierdzona szalka, na której można umieścić odważnik wywierający siłę rozciągającą F w kierunku pionowym Oz ; wskutek polaryzacji na obu ściankach płytki powstają ilości elektryczności q równe i przeciwnego znaku. Jeżeli ścianki są zaopatrzone w metalowe okładki P_1 i P_2 , ograniczone izolującymi szparami m i n , okładki te otrzymują ładunki powstające na płytce wskutek polaryzacji.

Znaleziono, że:

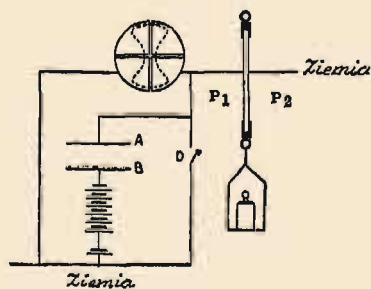
$$q = 0,068 \cdot Fl/e,$$

gdzie q jest wyrażone w j.es. i F w kilogramach.

W celu skompensowania prądu jonizacyjnego należy unosić stopniowo odważnik umieszczony na szalce, tak, aby ładunek q na kryształ wyzwał się w sposób ciągły i aby obraz lusterka elektrometru stale pozostawał na zerze¹⁾. Jako wartość natężenia prądu i otrzymujemy wówczas $i = q/t$, gdzie t oznacza czas trwania kompensacji; na podstawie tych danych można zatem obliczyć wartość bezwzględną i .



Rys. 9. Rysunek przedstawia płytke widzianą z przodu i z boku wraz z okładkami oraz ustawienie płytki względem sześciokątnego przekroju kryształu kwarcu w płaszczyźnie prostopadłej do głównej osi. Długość płytki jest prostopadła do dwóch boków sześciokąta, szerokość prostopadła do płaszczyzny sześciokąta. Kierunek grubości jest taki sam jak kierunek linii łączącej dwa przeciwne wierzchołki sześciokąta g i h (kierunek jednej z osi podwójnych).



Rys. 10. Rysunek przedstawia schemat aparatury doświadczalnej, schemat ten jest analogiczny do schematu na rys. 8 i różni się tylko dodaniem kwarcu. Jedną oprawkę P_1 jest połączona z układem izolowanym, druga zaś P_2 z ziemią.

¹⁾ Przyrząd ten jest w ciągłym użyciu w Paryskim Instytucie Radowym i służy do otrzymywania małych ładunków elektrycznych, których wartość jest znana; został wynaleziony przez *P. i J. Curie* i stanowi zastosowanie odkrytego przez tych uczonych zjawiska piezoelektryczności występującego we wszystkich kryształach bez środka symetrii, między innymi w kwarcu, substancji bardzo dogodnej dla badań tego rodzaju. Przydatność kwarcu jako absolutnego wzorca elektryczności zależy od oszlifowania i dobroci kryształów. Dla kontroli tych warunków mierzy się bezpośrednio w jednostkach bezwzględnych ładunek wyzwolony przez znany ciężar.

Płytki zwykle używane wyzwalają od 5 do 10 j.es. na kilogram i pozwalają mierzyć prądy od 10^{-9} do 10^{-13} amp. *Przykład.* Ładunek wyzwany przez płytkę: 6 j.es. na kilogram

$$F = 200 \text{ g}; \quad t = 30 \text{ sek.}$$

$$i = 0,2 \times 6/30 = 0,04 \text{ j.es.} = 1,3 \times 10^{-11} \text{ amp.}$$

b) *Zmiana ładunku kondensatora.* Prąd kompensacyjny jest dostarczany drogą stopniowego ładowania kondensatora o znanej pojemności C , aż do znanego potencjału V , lub też drogą postępowania odwrotnego: Jeżeli czas trwania kompensacji wynosi t , natężenie i prądu posiada wartość bezwzględną $i = CV/t$.

Schemat aparatury jest przedstawiony na rys. 11. Schemat ten jest powtórzeniem rys. 8 z dodaniem kompensatora.

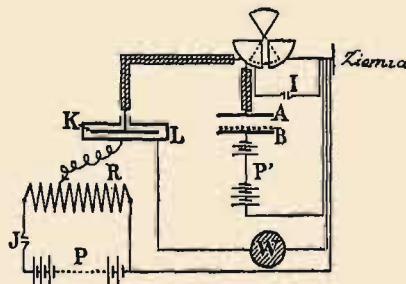
Przykład:

$$C = 30 \text{ j.es.},$$

$$V = 10 \text{ volt} = \frac{10}{300} \text{ j.es.} \quad t = 20 \text{ sek.}$$

$$i = \frac{30 \times 10}{300 \times 20} = 0,05 \text{ j.es.} = 1,7 \times 10^{-11} \text{ amp.}$$

c) Mierzony prąd jonizacyjny można również skompensować prądem przeciwnego znaku, dostarczonym przez inną komorę jonizacyjną, która służy jako wzorzec porównawczy. Pomiar taki na ogół nie daje absolutnych wartości; można je jednak otrzymać w przypadku, gdy kondensator został uprzednio wycelowany.

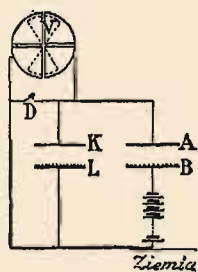


Rys. 11. Wewnętrzna okładka K kondensatora jest połączona z układem izolowanym, okładka zewnętrzna L z suwakiem ruchomym wzdłuż wielkiego oporu R włączonego w obwód ogniwa P którego jeden z biegunów jest uziemiony. Zmieniając położenie suwaka zmieniamy potencjał L od 0 do V , potencjał ten mierzymy za pomocą woltmetru W .

Metoda stałego odchylenia. — W niektórych przypadkach jest rzeczą pożyteczną posługiwać się metodą pomiarów elektrometrycznych, w której, podobnie jak w metodzie galwanometrycznej, danemu prądowi odpowiada stałe odchylenie. W tym celu od układu izolowanego odprowadzamy odgałęzienie do ziemi po przez duży opór ρ , w którym przepływ prądu odbywa się zgodnie z prawem Ohma (opór omowy). Potencjał układu izolowanego będzie wówczas wzrastał aż do chwili, gdy upływność przez opór ρ skompensuje prąd jonizacyjny i . Mierzony prąd jest proporcjonalny do końcowej wartości potencjału $V = \rho i$, a zatem również do odchylenia elektrometru.

Trudność tej metody polega na doborze oporu ρ . Chcąc zmierzyć prąd rzędu 10^{-10} do 10^{-12} amp. musimy użyć oporu od 10^9 do 10^{11} omów, aby potencjał V osiągnął wartość 0,1 wolta. Nie jest rzeczą łatwą sporządzenie takiego wielkiego oporu z metali lub z cieczy. Posługujemy się przeto gazem zjonizowanym, który w pewnych warunkach zachowuje się jak opór omowy (patrz § 5). Opór taki jest przedstawiony na

rys. 12 w postaci komory jonizacyjnej, której jedna elektroda K jest połączona z układem izolowanym, druga L z ziemią. Powietrze zawarte w komorze jest zjonizowane działaniem odpowiednio dobranej promieniowania. Obie elektrody powinny być wykonane z tego samego



Rys. 12.

metal; jeżeli na jednej z nich jest umieszczony preparat radioaktywny, należy ją osłonić siatką metalową; taka sama siatka metalowa powinna również pokrywać drugą elektrodę. W ten sposób zaradza się skutkom różnic potencjału zwanych kontaktowymi, których istnienie ujawnia się w przepływie prądu w zjonizowanym powietrzu, aż do chwili gdy wskutek naładowania się elektrod ustali się różnica potencjałów przeciwnego znaku.

Szczegóły aparatury. Dobroć izolacji aparatu jest najistotniejszym warunkiem pomiaru słabych prądów. Zwłaszcza doskonałą izolację musi posiadać układ izolowany w ściślejszym znaczeniu, czyli elektrody elektroskopów, kwadranty elektrometrów, oraz wszystkie elektrody z nimi połączone. Najlepszą izolację daje bursztyn lub tzw. ambroid otrzymywany z bursztynu prasowanego, substancja, którą można toczyć i polerować i która izoluje również w wilgotnym powietrzu. Izolatory mniej doskonałe, jak np. ebonit, mogą być używane do obsadzania elektrod połączonych z bateriami, lecz nie stanowiących części układu izolowanego.

Jeżeli promieniowanie izolujące jest bardzo przenikliwe, to działa nie tylko na powietrze zawarte w komorze jonizacyjnej, lecz również powoduje powstawanie prądów pasożytniczych *na zewnątrz komory*. Z tego powodu aparaty łączymy często drutami przeciągniętymi w rurkach metalowych wypełnionych stałym dielektrykiem lub uszczelnionych i opróżnionych. Te rury połączone z ziemią tworzą elektrostatyczną osłonę układu izolowanego. Dwie takie rury są przedstawione na rysunku 11. Należy zmniejszyć do minimum objętość tych części aparatury, np. elektrometrów, w których chcemy unikać jonizacji; najkorzystniej jest, aby w tych częściach była próżnia. Nieodzownym warunkiem dobrych pomiarów elektrometrycznych jest przestrzeganie stałości potencjału wszystkich części aparatury. Zazwyczaj obieramy, jako potencjał odniesienia czyli zerowy, potencjał ziemi, ustalony przy pomocy kontaktu z siecią kanalizacji wodnej. Wszystkie elektrody układu powinny być połączone bądź z ziemią, bądź też z jednym z biegunów baterii, której drugi biegun jest uziemiony. Osłony połączone z ziemią pozwalają usuwać wszelkie bezużyteczne pola elektryczne w przestrzeni zajętej przez aparaturę.

Do pomiarów prądu jonizacyjnego używa się często potencjałów rzędu kilkuset woltów, napięcie tych dostarczają baterie zbudowane z ogniw lub akumulatorów małej pojemności¹⁾.

Ponieważ wszystkie jony wytworzone w komorze jonizacyjnej są zdolne do przenoszenia prądu, jest rzeczą ważną, aby przestrzeń zjonizowana nie zawierała «przestrzeni szkodliwych» gdzie natężenie pola elektrycznego jest stosunkowo małe.

¹⁾ W ostatnich czasach używa się w tym celu często prostowników zaopatrzonych w urządzenia do wyrównywania wahań prądu zmiennego i stabilizacji napięcia (przypisek tłumacza).