

Zbigniew KAMIŃSKI • Wincenty KAMIŃSKI

Fizyka

dla kandydatów
na wyższe uczelnie
techniczne

tom 2



Wydawnictwo WNT

Fizyka

**dla kandydatów
na wyższe uczelnie
techniczne**

Zbigniew KAMIŃSKI • Wincenty KAMIŃSKI

Fizyka

dla kandydatów
na wyższe uczelnie
techniczne

tom 2

Wydanie osiemnaste

Wydawnictwo WNT 

14

ELEKTROSTATYKA

14.1. Elektryzowanie ciał. ładunek elektryczny dodatni i ujemny

Elektryczność znalazła wszechstronne zastosowanie we współczesnej technice i w życiu codziennym. Energia elektryczna wprawia w ruch silniki przemysłowe, służy do ogrzewania, oświetlania, napędza pociągi elektryczne, tramwaje i trolejbusy, jest podstawą działania przyrządów gospodarstwa domowego, takich jak: kuchenki, odkurzacze, pralki, lodówki, miksery, suszarki itp., środków maszynowość: radia, telewizji, telefonu i telegrafu, a także wikszość nowoczesnych przyrządów pomiarowych i urządzeń sterujących.

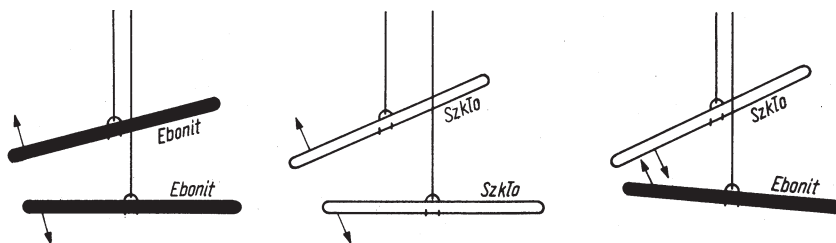
Naukę o elektryczności rozpoczynamy od *elektrostatyki*, opisującej zjawiska wzajemnego oddziaływania ładunków elektrycznych znajdujących się w stanie spoczynku.

Już w starożytności znane były zjawiska, polegające na tym, że niektóre ciała przy pocieraniu nabierają, w zależności od przyciśnięcia innych ciał, na przykład bursztyn pocierany jedwabiem przyciąga małe kawałeczki trawy lub skrawki papieru. Od greckiej nazwy bursztynu „elektron” nadano tym zjawiskom nazwę *elektryzacji*¹⁾.

Wykonajmy następujące doświadczenie. Pałeczki z ebonitu i szkła elektryzujemy przez potarcie (pałeczki ebonitowe – futrem, a pałeczki szklane – jedwabiem), następnie zawieszamy je na jedwabnych nitkach zakończonych

¹⁾ Zjawiska elektryzacji przez pocieranie są dokładniej wyjaśnione w p. 14.5.

nych metalowymi strzemiączkami (rys. 14.1) i badamy ich wzajemne oddziaływanie na siebie. Stwierdzamy, że dwie naelektryzowane pałeczki ebonitowe lub dwie naelektryzowane pałeczki szklane odpychają się, natomiast pałeczka szklana z ebonitową – przyciągają się, wzajemnie.



RYS. 14.1

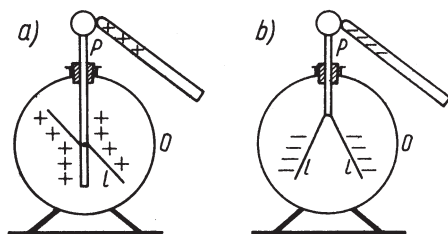
Badając w podobny sposób w kierunku elektryzacji różnych ciał, można stwierdzić, że albo elektryzują się one tak jak ebonit potarty futrem, to znaczy odpychają naelektryzowaną pałeczkę ebonitową, albo tak jak szkło potarte jedwabiem, czyli odpychają naelektryzowaną pałeczkę szklaną. Badania wykazały, że w wyniku pocierania wytworzone zostają na pałeczkach ładunki elektryczne, przy czym ładunki gromadzące się na szkle potartym jedwabiem nazywamy dodatnimi, zaś gromadzące się na ebonicie potartym futrem – ujemnymi.

Z omówionego wyżej doświadczenia wynika, że:

ładunki elektryczne jednoimiennie (obydwa dodatnie lub obydwu ujemne) odpychają się, a ładunki różnoimiennie (jeden dodatni, a drugi ujemny) przyciągają się wzajemnie.

14.2. Elektroskop. Przewodniki i izolatory

Do badania ładunków elektrycznych służy przyrząd zwany *elektroskopem*. Składa się on z obudowy O , wewnątrz której jest umieszczony odizolowany od niej metalowy pręt P zakończony kulą. W środku pręta jest osadzony obrotowo listek, wykonany z cienkiej blaszki, której spełnia rolę wskazówki (rys. 14.2a). W niektórych elektroskopach rolę wskazówki spełniają dwa listki zawieszony na końcu pręta (rys. 14.2b). Po dotknięciu naelektryzowaną pałeczką kuli elektroskopu jego pręt i listek (lub obydwie listki) elektryzują się, jednoimiennie i wskutek odpychania ładunków jednoimiennych



RYS. 14.2

rozchylają się, tym więcej, im większy jest dostarczony do kuli ładunek elektryczny.

Jeżeli dwa elektroskopy, z których jeden jest naelektryzowany, a drugi nie, połączymy pręt metalowym, to okaże się, że cząstka ładunku elektrycznego z pierwszego naelektryzowanego elektroskopu przepłynie do drugiego, elektryzując go. Jeżeli natomiast połączymy elektroskopy pręt szklanym lub ebonitowym, to ładunek nie przepłynie.

Materiały takie jak metale lub węgiel, przez które mogą swobodnie przepływać ładunki elektryczne²⁾, nazywamy *przewodnikami elektryczności*³⁾, natomiast takie jak szkło i ebonit, w których ładunki elektryczne są unieruchomione, nazywamy *izolatorami* lub *dielektrykami*. W przyrodzie doskonałe izolatory nie występują, jednak niektóre materiały, np. kwarc lub porcelana, mają tak małą przewodność (około 10^{25} razy mniejszą od przewodności miedzi), że praktycznie mogą być stosowane jako izolatory. Ponadto istnieje grupa materiałów, np. krzem i german, o stosunkowo słabym przewodnictwie, zwanych *półprzewodnikami*. Półprzewodniki zajmują, pod względem przewodzenia ładunków elektrycznych miejsce pośrednie między przewodnikami i izolatorami. Ich przewodnictwo można jednak znacznie zwiększyć, przez dodanie niewielkich domieszek innych pierwiastków, np. boru lub arsenu. Dzięki swym właściwościom półprzewodniki są obecnie szeroko stosowane w wielu gałęziach techniki; stały się, te podstawą rozwoju dziedziny nauki, zwanej *fizyką ciała stałego*, której jest poświęcony rozdział 23, natomiast zjawisko przewodnictwa elektrycznego oraz właściwości metali, izolatorów i półprzewodników są wyjaśnione w p. 14.12 oraz 23.4.

²⁾ W podrozdziale 14.5 dowiemy się, że w metalach mogą swobodnie poruszać się tylko ładunki ujemne, natomiast ładunki dodatnie pozostają nieruchome. Natomiast w przewodnikach ciekłych (elektrolitach) poruszają się zarówno ładunki ujemne, jak i dodatnie.

³⁾ Przewodnikami elektryczności są również ciała ludzkie i Ziemia.

14.3. Prawo Coulomba. Jednostka ładunku elektrycznego

Poprzednio stwierdzili,my, że rozchylenie listek, w elektroskopie jest tym większe, im większy ładunek elektryczny zostanie doprowadzony do jego elektrody (kuli). Należy stwierdzić, że ładunek elektryczny jest wielkością fizyczną, którą po przyjęciu odpowiedniej jednostki można zmierzyć. Pomiaru tego dokonał, po raz pierwszy francuski uczyony Coulomb (czyt. kul, b), za pomocą przyrządu zwanego *wagó skróćco*. Sformułował, on również, prawo o wzajemnym oddziaływaniu ładunków elektrycznych, zwane *prawem Coulomba*, które mówi, że:

Wartość siły F wzajemnego oddziaływania (przyciągania lub odpychania) dwóch ładunków elektrycznych jest wprost proporcjonalna do wielkości tych ładunków q_1 i q_2 oraz odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości r między nimi, przy czym jest ona skierowana wzdłuż linii łączącej te ładunki

$$F = k_e \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}. \quad (14.1)$$

W przypadku gdy ładunki elektryczne q_1 i q_2 mają ten sam znak, tzn. obydwa są dodatnie albo te, obydwa są ujemne, ich iloczyn jest dodatni, co oznacza, że siła ich wzajemnego oddziaływania jest *siłą odpychającą*. W przypadku gdy znaki obydwu ładunków są różne, iloczyn ich jest ujemny, co oznacza, że siła F jest *siłą przyciągania* obydwu ładunków.

Ładunki elektryczne są, oczywiście, zawsze związane z obiektami fizycznymi (np. ciałami lub atomami), przy czym zarówno masy tych obiektów, jak i nierównomierność rozłożenia na nich ładunków elektrycznych mogą wywierać dodatkowy wpływ na ich wzajemne oddziaływanie. Dlatego te, prawo Coulomba stosuje się, wyłącznie do *ładunków punktowych*⁴⁾, a więc do takich ciał, których nośnikami ładunków, w których wymiary są bardzo małe w porównaniu z odlegościami między nimi, albo te, do ciał jednorodnych, w kształcie kuli.

Wartość współczynnika proporcjonalności k_e we wzorze Coulomba zależy od przyjętego układu jednostek i od rodzaju obrotka, w którym znajdują się ładunki. W układzie SI jednostką ładunku elektrycznego jest *kulomb* (C), czyli *ładunek elektryczny przenoszony w czasie jednej sekundy*

⁴⁾ Ładunkiem punktowym nazywamy ładunek elektryczny znajdujący się w ściśle określonym punkcie przestrzeni.

przez prąd stały o natężeniu jednego ampera. Jest to zatem jednostka wtórna, zdefiniowana za pomocą jednostki podstawowej natężenia prądu elektrycznego (patrz p. 15.2 oraz 16.6) zwanej *amperem* (A).

Występujący we wzorze (14.1) współczynnik proporcjonalności k_e ma dla prądu stałego wartość

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

gdzie ϵ_0 – *przenikalność elektryczna próżni*⁵⁾ (zwana dawniej *stałą dielektryczną*); wynosi ona

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2).$$

W obliczeniach technicznych przyjmuje się, z wystarczającą dokładnością, wartość współczynnika k_e ⁶⁾

$$k_e = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^3/(\text{s}^2 \cdot \text{C}^2).$$

Na podstawie tej wartości można zgodnie ze wzorem (14.1) określić kulomb 1 C jako ładunek elektryczny, który na taki sam ładunek 1 C znajdujący się w próżni w odległości 1 m działa siłą $F = 9 \cdot 10^9 \text{ N}$. Jest to bardzo duża wartość siły, odpowiadająca sile ciężkości, jaką wywiera masa 900 000 Mg, czyli ton.

Korzystając z podanego wyżej wyrażenia określającego wartość współczynnika k_e , możemy zapisać wzór Coulomba (14.1) w postaci

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (14.1a)$$

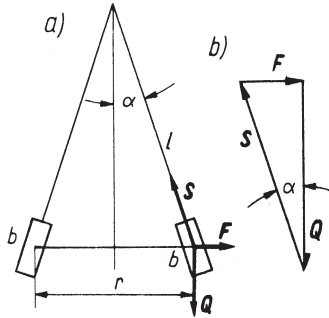
Należy jeszcze zwrócić uwagę, Czytelnika na podobieństwo prawa Coulomba, wyrażonego wzorem (14.1) do prawa grawitacji Newtona (wzór (4.1)). Istotną różnicą między tymi wzorami polega na tym, że siły grawitacyjne są zawsze siłami przyciągania, natomiast siły oddziaływania ładunków elektrycznych mogą być, w zależności od znaku tych ładunków (– lub +) siłami ich wzajemnego przyciągania lub odpychania.

⁵⁾ Wartość przenikalności elektrycznej próżni określa się przez pomiar pojemności i wymiarów geometrycznych kondensatora (patrz p. 14.10 oraz 14.11). Dokładna wartość ϵ_0 wynosi

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} = 8,85416 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2).$$

⁶⁾ Dokładniejsza wartość tego współczynnika wynosi $k_e = 8,98759 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.

PRZYKŁAD 14.1. Dwie małe i bardzo cienkie blaszki aluminiowe b o masie $0,02\text{ g}$ są zawieszono na jedwabnych nitkach o długości 5 cm (rys. 14.3). Po udzieleniu obydwu blaszkom jednakowego ładunku elektrycznego rozsunęły się one na odległość $0,3\text{ cm}$. Oblicz wielkość ładunku znajdującego się na każdej z blaszek.



RYS. 14.3

Rozwiązanie. Wielkości dane: $l = 5\text{ cm} = 5 \cdot 10^{-2}\text{ m}$, $r = 0,3\text{ cm} = 3 \cdot 10^{-3}\text{ m}$, $m = 0,02\text{ g} = 2 \cdot 10^{-5}\text{ kg}$; q – wielkość szukana.

Z warunku równowagi sił działających na blaszkę (rys. 14.3b) mamy $F = Q \operatorname{tg} \alpha = mg \operatorname{tg} \alpha$. Dla małych wartości kątów można w przybliżeniu przyjąć: $\operatorname{tg} \alpha = \sin \alpha$, przy czym z rys. 14.3a widać, że sinus kąta wychylenia wynosi: $\sin \alpha = r/2l$. Podstawiając to wyrażenie do wzoru określającego siłę F oraz uwzględniając, że siła ta jest równoważona sile odpychania elektrostatycznego, wyrażonej wzorem (14.1), otrzymujemy

$$\frac{mgr}{2l} = \frac{k_e q^2}{r^2},$$

skąd

$$q = \sqrt{\frac{mgr^3}{2lk_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 9,81 \cdot (3 \cdot 10^{-3})^3}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{C}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^3}} = 7,7 \cdot 10^{-11}\text{ C}.$$

14.4. Natura ładunku elektrycznego. Ładunek elementarny

Wiemy, że materia korpuskularna jest zbudowana z cząstek i z tworzących te cząstki – atomów. Pierwotnie uważano, że atomy są najmniejszymi, niepodzielnymi elementami materii, jednak, odkrycie przez

Becquerela (czyt. bekerela) oraz Marii Skłodowskiej-Curie (czyt. kiuri) i Piotra Curie zjawiska promieniotwórczości naturalnej, a także badania prowadzone na przełomie XIX i XX wieku przez Thompsona i Rutherforda (czyt. tomsona i radforda) wykazały, że atomy mają rwnie budow, z, o, on. Do, wiadczenie Rutherforda, polegaj, ce na bombardowaniu bardzo cienkiej p, ytki z, ota cz, stkami α ⁷⁾ emitowanymi przez rad, wykaza, y, ,e przestrze, wewn, trz atom, w jest prawie pusta, jedynie w ich ,rodkach znajduj, si, j, ódra, stanowi, ce przeszkod, dla przenikaj, cych atomy cz, stek α , a wi, c maj, ce tak, w, a, ciwo, jakby w nich skupia, a si, ca, kowita masa atomu. Promie, najmniejszego j, dra w atomie wodoru wynosi $1,3 \cdot 10^{-15}$ m, a promie, j, der najci, szych pierwiastk, w (zw, aszcza promieniotw, rczych) jest rz, du $8 \cdot 10^{-15}$ m. Natomiast ,rednica otaczaj, cej j, dro pow, oki utworzonej z elektron, w, b, d, ca ,rednic, atomu, zmienia si, w granicach od $5 \cdot 10^{-11}$ m do $3 \cdot 10^{-10}$ m, czyli jest przeci, tnie 20 000 razy wi, ksza od ,rednicy j, dra atomowego. Dla uzmys, owienia, jak ma, e s, wymiary j, dra atomowego, mo, na sobie wyobrazi, ,e atom wodoru w 100-miliardowym powi, kseniu mia, by ,rednic, oko, o 5 metr, w, natomiast jego j, dro – ,rednic, oko, o 0,2 mm.

Jódro atomowe ma dodatni ładunek elektryczny, bódócy wynikiem oddziaływania elektrycznego zawartych w nim protonów, czyli czóstek elementarnych, z których kaódy ma elementarny dodatni ładunek elektryczny (patrz p. 22.1), natomiast otaczajóca go powóoka elektronowa ma takiej samej wielkości ładunek ujemny.

Warto, dodatniego ,adunku j, dra, a tym samym ujemnego ,adunku pow, oki elektronowej, jest r, na dla atom, w r, nych pierwiastk, w; szczeg, owo b, dzie o tym mowa w p. 22.2. Stwierdzono, ,e ,adunek elektryczny w atomach r, nych pierwiastk, w nie zmienia si, w spos, b ci, g, y, lecz jest zawsze ca, kowit, wielokrotno, ci, ,adunku pojedynczego elektronu, zwanego *ładunkiem elementarnym*, kt, rego warto, wynosi

$$e = 1,60206 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

O wielko, ciach fizycznych, kt, re podobnie jak ,adunek elektryczny zmieniaj, si, skokowo, w postaci okre, lonych „porcji”, m, wimy, ,e maj, naturó kwantowó lub ,e s, skwantowane. Fakt istnienia atom, w i cz, stek elementarnych, z kt, rnych s, one z, o, one, oznacza, ,e r, wnie, masa jest wielko, ci, skwantowan, przy czym wyniki bada, fizyki wsp, ,czesnej wskazuj, na to, ,e tak, sam, w, a, ciwo, ma energia i moment p, du.

⁷⁾ Czóstki α stanowió jódra atomu helu (patrz p. 22.4).

ładunek elementarny e jest jednak tak mały, że jego skokowa zmiana jest niedostrzegalna, bowiem najmniejsze wartości ładunku, z jakim się spotykamy w praktyce, są miliardowymi wielokrotnościami ładunku elementarnego; jednostka ładunku 1 C (która odpowiada ładunkowi przepływającemu w czasie 1 s przez woltomierz o mocy 200 W) jest równa $6,28 \cdot 10^{18} e$.

Atomy poszczególnych pierwiastków w chemicznych związkach, od siebie budują jądra atomowe (patrz p. 22.2) oraz liczby elektronów tworzących otoczenia, które je powokują, natomiast same elektrony w atomach różnych pierwiastków nie wykazują żadnych różnic. Masa elektronu m_e jest bardzo mała w stosunku do masy atomu i wynosi

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg},$$

co stanowi około 1/1836 części masy najmniejszego atomu, a mianowicie atomu wodoru.

Ponieważ liczba ujemnych ładunków powokujej elektronowej w atomie jest zrównoważona przez tyle samo ładunków dodatnich w elementarnych jądrach, więc atom w stanie normalnym jest elektrycznie obojętny. Jednakże w pewnych warunkach, na przykład w wyniku pocierania ciała, atomy znajdujące się na jego powierzchni mogą stracić pewną liczbę elektronów. Równowaga ładunków dodatnich i ujemnych zostaje wówczas naruszona. Ciało, które straciło część elektronów, a więc takie, w którym atomach ładunki jądrowe nie są całkowicie zrównoważone, ma nadmiar ładunków dodatnich, czyli jest dodatnio naelektryzowane.

W innych przypadkach, na przykład wskutek zetknięcia się z ciałem ujemnie naelektryzowanym, atomy mogą uzyskać dodatkowo po jednym lub kilka elektronów i ich równowaga elektryczna także zostaje zakłócona. Ciało, które ma nadmiar elektronów, jest ujemnie naelektryzowane.

PRZYKŁAD 14.2. W modelu atomu wodoru według Bohra (patrz p. 21.1) elektron krąży wokół jądra po torze w przybliżeniu kołowym, którego promień wynosi $5,29 \cdot 10^{-11}$ m. Obliczyć siłę przyciągania elektrostatycznego F_e i grawitacyjnego F_g , z jaką jądro działa na elektron, jeśli masa jądra atomu wodoru wynosi $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

Rozwiązanie. Wielkości dane: ładunek elektronu $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C, ładunek jądra $e = +1,602 \cdot 10^{-19}$ C, masa elektronu $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, masa jądra $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, $k_e = 9,0 \cdot 10^9$ N·m²/C², $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ N·m²/kg² (tabl. 15), $r = 5,29 \cdot 10^{-11}$ m; F_e i F_g – wielkości szukane.

Siła przyciągania elektrostatycznego, zgodnie ze wzorem (14.1), ma wartość

$$F_e = \frac{-k_e e^2}{r^2} = \frac{-9,0 \cdot 10^9 (1,602 \cdot 10^{-19})^2}{(5,29 \cdot 10^{-11})^2} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^2}{\text{C}^2 \cdot \text{m}^2} = -8,3 \cdot 10^{-8} \text{ N},$$

przy czym znak – określa, że F_e jest siłą przyciągającą, a siła przyciągania

grawitacyjnego, zgodnie ze wzorem (4.1) ma wartość

$$F_g = \frac{Gm_e m}{r^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{(5,29 \cdot 10^{-11})^2} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{kg}}{\text{kg}^2 \cdot \text{m}^2} =$$

$$= 3,6 \cdot 10^{-47} \text{ N.}$$

Wniosek. Siła przyciągania elektrostatycznego w atomie wodoru jest około $2 \cdot 10^{39}$ razy większa od siły przyciągania grawitacyjnego.

Jak wynika z powyższego przykładu, na elektrony znajdujące się w pobliżu jądra atomu działają bardzo duże siły elektrostatyczne, wiążące je z jądrem. Okazało się jednak, że na elektrony w zewnętrznej części powłoki, a więc znajdujące się dalej od jądra, działają siły wielokrotnie mniejsze.

W metalach, które są dobrymi przewodnikami elektrycznymi, siły przyciągania działające między jądrem a elektronami znajdującymi się w zewnętrznych częściach powłoki, odległych od jądra, są tak małe, że elektrony tracą swobodę, wiążąc się z atomami i poruszają swobodnie między nimi. Na przykład w miedzi, której atomy mają po 29 elektronów, jeden zewnętrzny elektron w każdym atomie jest swobodny, pozostaje zaś związane z jądrem, tworząc jon lub tzw. rdzeczony jonowy. Elektrony swobodne w miedzi poruszają się ruchem chaotycznym ze średnią prędkością wynoszącą $1,6 \cdot 10^6$ m/s, przy czym w czasie tego ruchu zderzają się z jonami, wskutek czego zarówno wartość, jak i kierunek ich prędkości ulega ciągłym zmianom.

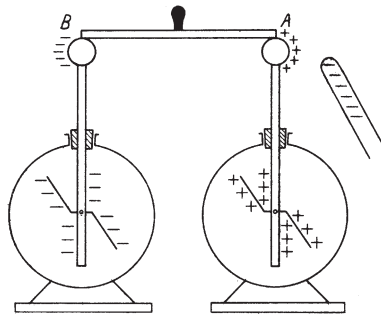
14.5. Zasada zachowania ładunku. Indukcja elektrostatyczna

Doświadczenie wykazuje, że na siły oddziaływania elektrycznego między dwiema naładowanymi cząstkami nie ma wpływu obecność innych cząstek, co oznacza, że siły oddziaływania układu, z którego jednego z wielu naładowanych, na inny układ wielu cząstek naładowanych jest równa wypadkowej siły oddziaływania każdego z naładowanych cząstek pierwszego układu ze wszystkimi cząstkami naładowanymi drugiego układu. Jest to tzw. zasada superpozycji, z której wynika, że ładunek elektryczny ciała, które nie jest naelektryzowane, stanowi sumę algebraiczną ujemnych ładunków elektronów i równoważących je dodatnich ładunków protonów, jest równe zeru. Badając jedwab, którym pocierano byłą pałeczka szklana (w doświadczeniu opisanym w p. 14.1), można stwierdzić, że naelektryzowana, ona ujemnie, natomiast pałeczka uzyskała ładunek dodatni. Podobnie futro, którym pocierano pałeczki ebonitowe, naelektryzowała się dodatnio, pałeczka zaś –

ujemnie. Elektryzacja przez pocieranie nie polega wi„c na wytwarzaniu, lecz na rozdzielaniu „adunk„w dodatnich i ujemnych w oboj„tnych elektrycznie atomach, znajduj„cych si„ na powierzchni pocieranych cia„. Dok„adne pomiary wykaza„y, „e warto„ci bezwzgl„dne „adunk„w powstaj„cych na tych cia„ach s„, r„wne. Wnioski z podobnych do„wiadcze„, pozwoli„y na sformu„owanie nast„puj„cej *zasady zachowania „adunku*:

W uk„adzie odosobnionym, kt„ory nie wymienia „adunk„w elektrycznych z otoczeniem, suma algebraiczna tych „adunk„w nie ulega zmianie⁸⁾.

Potwierdzeniem zasady zachowania „adunku jest zjawisko *indukcji elektrostatycznej*, kt„ore ilustruje nast„puj„ce do„wiadczenie. Do uk„adu, sk„adaj„cego si„ z dw„ch elektroskop„w po„moczonych metalowym pr„tem (rys. 14.4), zbli„amy na„adowan„ ujemnie pa„eczk„, ebonitow„ – listki obydwu elektroskop„w odchyla„j si„, lecz po odsuni„ciu pa„eczki zn„w opadaj„. Gdy jednak przed oddaleniem pa„eczki usuniemy (trzymany przez izolowan„ r„czk„) pr„t „mzcz„cy elektroskopy, w„czas elektroskopy pozostan„ nadal na„adowane, przy czym na elektroskopie bli„szym naelektryzowanej pa„eczki powstanie (m„wimy, „e jest indukowany) „adunek dodatni, a wi„c o znaku przeciwnym ni„, na pa„eczce, a na bardziej oddalonym – „adunek ujemny, czyli o takim samym znaku, jak na niej.



RYŚ. 14.4

⁸⁾ Nawet w przypadku anihilacji (czyli przekształcenia w promieniowanie) cz„stek elementarnych, w wyniku bombardowania materii strumieniami proton„w lub elektron„w o bardzo du„zej energii (patrz p. 22.12), spe„nione jest zawsze prawo zachowania „adunku, co oznacza, „e r„wnocze„nie z powstaniem cz„stki o „adunku dodatnim musi powsta„ cz„stka o „adunku ujemnym. Wynika st„d wniosek, „e we wszech„wiecie liczba cz„stek elementarnych o „adunku dodatnim jest r„wna liczbie cz„stek elementarnych o „adunku ujemnym.

Zjawisko to można wytłumaczyć, przez wzajemne oddziaływanie ładunków w elektrycznych. Wiadomo bowiem, że ładunki dodatnie i ujemne znajdują się w atomach nienaelektryzowanego przewodnika, np. kuli A elektroskopu, zobowiązują się. Natomiast po zbliżeniu do kuli A (rys. 14.4) ciało ujemnie naelektryzowanego jego ładunek oddziałuje odpychająco na znajdujące się na kuli elektrony swobodne, powodując ich przesunięcie wzdłuż metalowego pręta do kuli B drugiego elektroskopu. Wskutek tego na kuli B powstaje nadmiar ładunków ujemnych, a na kuli A – nadmiar niezrównoważonych ładunków dodatnich, czyli jonów.

Po zbliżeniu do kuli A pałeczki dodatnio naładowanej oddziaływanie sił elektrycznych spowoduje przyciąganie elektronów swobodnych, powstanie zatem na niej nadmiar ładunków ujemnych. Po odsunięciu naelektryzowanej pałeczki oddziaływanie elektryczne ładunków przeciwnego znaku, znajdujących się na kulach A i B , spowoduje ponowne przesunięcie ich w przeciwnym kierunku i powrót do stanu równowagi. Jeżeli jednak przyciągnięte kule A i B zostanie odsunięte, to po oddaleniu naelektryzowanej pałeczki elektrony nie będą mogły przepłynąć między kulami i elektroskopy pozostaną naładowane. Tak więc dzięki indukcji można naładować wiele elektroskopów, nie tracąc pierwotnego ładunku na pałeczce.

W podobny sposób można wytłumaczyć przyciąganie skrawków papieru przez potarty sukniem naelektryzowany bursztyn. W części papieru zbliżonej do powierzchni bursztynu powstaje ładunek przeciwnego znaku, który, znajdując się blisko niej, jest silnie przyciągany, natomiast pozostający w bardziej oddalonej części papieru ładunek tego samego znaku co na bursztynie jest wskutek większej odległości słabiej odpychany. Wypadkowa obydwu sił elektrycznych jest więc skierowana w kierunku do bursztynu, powodując przyciąganie skrawków papieru.

14.6. Pole elektryczne. Natężenie pola

Naładowany elektrycznie przewodnik (np. kula z ładunkiem $+Q$ na rys. 14.5) wywiera wpływ na całość otaczającego przestrzeni. Można to łatwo sprawdzić, umieszczając w różnych punktach tej przestrzeni wahadło elektryczne, czyli dodatnio naładowaną małą kulko ładunku $+q$, zawieszoną na cienkiej jedwabnej nitce i ulegającą wychyleniom, spowodowanym siłami przyciągania lub odpychania elektrycznego.

Podobnie jak przestrzeń otaczającą Ziemię, w której występuje działanie sił przyciągania grawitacyjnego, nazywamy polem grawitacyjnym (patrz p. 4.3), tak, przestrzeń, w której występuje działanie sił elektrycznych, nazywamy *polem elektrycznym* . Jest ono, tak jak i pole grawitacyjne, *polem wektorowym* , gdyż działające w każdym jego punkcie siły przyciągania lub