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 łączności: radia, telewizji, telefonu i telegrafu, a także większości nowoczesnych przyrządów pomiarowych i urządzeń sterujących.

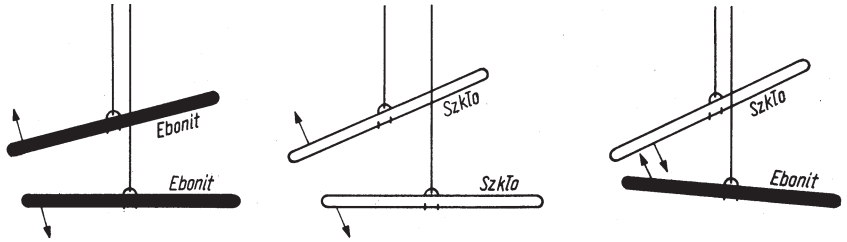
Naukę o elektryczności rozpoczynamy od *elektrostatyki*, opisującej zjawiska wzajemnego oddziaływania ładunków elektrycznych znajdujących się w stanie spoczynku.

Już w starożytności znane były zjawiska, polegające na tym, że niektóre ciała przy pocieraniu nabierają właściwości przyciągania 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 zakończo-

[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

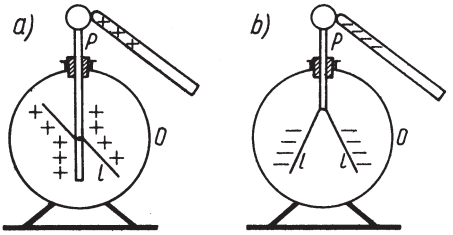
Badając w podobny sposób właściwości elektryzacji różnych ciał, można stwierdzić, że albo elektryzują się one tak jak ebonit potarty futrem, to znaczy odpychają naelektryzowaną pałeczkę ebonitową, albo też tak jak szkło potarte jedwabiem, czyli odpychają naelektryzowaną pałeczkę szklaną. Badania wykazały, 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 jednoimienne (obydwa dodatnie lub obydwa ujemne) *odpychają się, a ładunki różnoimienne* (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, który spełnia rolę wskazówki (rys. 14.2a). W niektórych elektroskopach rolę wskazówki spełniają dwa listki zawieszone na końcu pręta (rys. 14.2b). Po dotknięciu naelektryzowaną pałeczką kuli elektroskopu jego pręt i listek (lub obydwa 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 prętem metalowym, to okaże się, że część ładunku elektrycznego z pierwszego naelektryzowanego elektroskopu przepłynie do drugiego, elektryzując go. Jeśli natomiast połączymy elektroskopy prętem szklanym lub ebonitowym, to ładunek nie przepłynie.

Materiały takie jak metale lub węgiel, przez które mogą swobodnie przepływać ładunki elektryczne[2)], 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, jednakże 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 też 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 się swobodnie poruszać 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 ciało ludzkie i Ziemia.

14.3. Prawo Coulomba. Jednostka ładunku elektrycznego

Poprzednio stwierdziliśmy, że rozchylenie listków elektroskopu jest tym większe, im większy ładunek elektryczny zostanie doprowadzony do jego elektrody (kuli). Należy stąd wnosić, że ładunek elektryczny jest wielkością fizyczną, którą po przyjęciu odpowiedniej jednostki można zmierzyć. Pomiaru tego dokonał po raz pierwszy francuski uczony Coulomb (czyt. kuląb), za pomocą przyrządu zwanego *wagą skręceń*. 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

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

W przypadku gdy ładunki elektryczne q_1 i q_2 mają ten sam znak, tzn. obydwa są dodatnie albo też 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 też prawo Coulomba stosuje się wyłącznie do *ładunków punktowych*[4], a więc do takich ciał, będących nośnikami ładunków, których wymiary są bardzo małe w porównaniu z odległością między nimi, albo też do ciał jednorodnych, w kształcie kuli.

Wartość współczynnika proporcjonalności k_e we wzorze Coulomba zależy od przyjętego układu jednostek i od rodzaju ośrodka, 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 próżni wartość

$$k_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0},$$

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

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N \cdot m^2)}.$$

W obliczeniach technicznych przyjmuje się z wystarczającą dokładnością wartość współczynnika k_e[6]

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

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 $F = 9 \cdot 10^9$ 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

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}. \tag{14.1a}$$

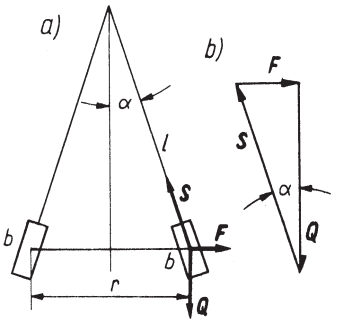
Należy jeszcze zwrócić uwagę Czytelnika na podobieństwo prawa Coulomba, wyrażonego wzorem (14.1) do prawa grawitacji Newtona (wzór (4.1)). Istotna różnica między tymi wzorami polega na tym, że siły grawitacyjne są zawsze siłami przyciągania, natomiast siły oddziaływania ładunków elektrycznych mogą być 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

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}\ \frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N \cdot m^2}} = 8{,}85416 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N \cdot m^2)}.$$

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

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



RYS. 14.3

R o z w i ą z a n i e. Wielkości dane: $l = 5$ cm $= 5 \cdot 10^{-2}$ m, $r = 0{,}3$ cm $= 3 \cdot 10^{-3}$ m, $m = 0{,}02$ g $= 2 \cdot 10^{-5}$ 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 równoważna sile odpychania elektrostatycznego, wyrażonej wzorem (14.1), otrzymujemy

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

skąd

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

14.4. Natura ładunku elektrycznego. Ładunek elementarny

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

Becquerela (czyt. bekerela) oraz Marię Skłodowską-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 radeforda) wykazały, że atomy mają również budowę złożoną. Doświadczenie Rutherforda, polegające na bombardowaniu bardzo cienkiej płytki złota cząstkami α [7)] emitowanymi przez rad, wykazały, że przestrzeń wewnątrz atomów jest prawie pusta, jedynie w ich środkach znajdują się *jądra*, stanowiące przeszkodę dla przenikających atomy cząstek α, a więc mające taką właściwość, jakby w nich skupiała się całkowita masa atomu. Promień najmniejszego jądra w atomie wodoru wynosi $1{,}3 \cdot 10^{-15}$ m, a promień jąder najcięższych pierwiastków (zwłaszcza promieniotwórczych) jest rzędu $8 \cdot 10^{-15}$ m. Natomiast średnica otaczającej jądro powłoki utworzonej z elektronów, będąca średnicą atomu, zmienia się w granicach od $5 \cdot 10^{-11}$ m do $3 \cdot 10^{-10}$ m, czyli jest przeciętnie 20 000 razy większa od średnicy jądra atomowego. Dla uzmysłowienia, jak małe są wymiary jądra atomowego, można sobie wyobrazić, że atom wodoru w 100-miliardowym powiększeniu miałby średnicę około 5 metrów, natomiast jego jądro – średnicę około 0,2 mm.

Jądro atomowe ma dodatni ładunek elektryczny, będący wynikiem oddziaływania elektrycznego zawartych w nim protonów, czyli cząstek elementarnych, z których każdy ma elementarny dodatni ładunek elektryczny (patrz p. 22.1), natomiast otaczająca go powłoka elektronowa ma takiej samej wielkości ładunek ujemny.

Wartość dodatniego ładunku jądra, a tym samym ujemnego ładunku powłoki elektronowej, jest różna dla atomów różnych pierwiastków; szczegółowo będzie o tym mowa w p. 22.2. Stwierdzono, że ładunek elektryczny w atomach różnych pierwiastków nie zmienia się w sposób ciągły, lecz jest zawsze całkowitą wielokrotnością ładunku pojedynczego elektronu, zwanego *ładunkiem elementarnym*, którego wartość wynosi

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

O wielkościach fizycznych, które podobnie jak ładunek elektryczny zmieniają się skokowo, w postaci określonych „porcji", mówimy, że mają *naturę kwantową* lub że są *skwantowane*. Fakt istnienia atomów i cząstek elementarnych, z których są one złożone, oznacza, że również masa jest wielkością skwantowaną, przy czym wyniki badań fizyki współczesnej wskazują na to, że taką samą właściwość ma energia i moment pędu.

[7)] Cząstki α stanowią jądra 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 włókno żarówki o mocy 200 W) jest równa $6{,}28 \cdot 10^{18} e$.

Atomy poszczególnych pierwiastków chemicznych różnią się od siebie budową jądra atomowego (patrz p. 22.2) oraz liczbą elektronów tworzących otaczającą je powłokę, 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 część masy najmniejszego atomu, a mianowicie atomu wodoru.

Ponieważ liczba ujemnych ładunków powłoki elektronowej w atomie jest zrównoważona przez ściśle taką samą liczbę dodatnich ładunków elementarnych jądra, 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 którego atomach ładunki jąder 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.

R o z w i ą z a n i e. 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$\cdot$m^2/C^2, $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ N$\cdot$m^2/kg^2 (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

$$F_g = \frac{Gm_e m}{r^2} = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27}}{(5{,}29 \cdot 10^{-11})^2} \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg} \cdot \mathrm{kg}}{\mathrm{kg}^2 \cdot \mathrm{m}^2} =$$
$$= 3{,}6 \cdot 10^{-47}\ \mathrm{N}.$$

W n i o s e k. 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 elektryczności, siły przyciągania działające między jądrem a elektronami znajdującymi się w zewnętrznych częściach powłoki, odległych od jądra, są tak małe, że elektrony tracą swą więź z atomami i poruszają się swobodnie między nimi. Na przykład w miedzi, której atomy mają po 29 elektronów, jeden zewnętrzny elektron w każdym atomie jest swobodny, pozostałe zaś są związane z jądrem, tworząc *jon* lub tzw. *rdzeń 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.

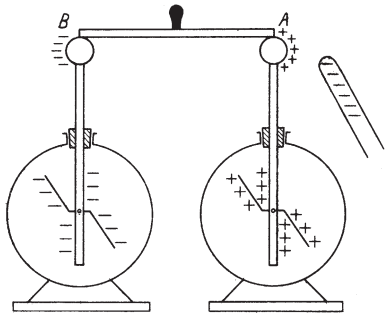
14.5. Zasada zachowania ładunku. Indukcja elektrostatyczna

Doświadczenie wykazuje, że na siłę oddziaływania elektrycznego między dwiema naładowanymi cząstkami nie ma wpływu obecność innych cząstek, co oznacza, że siła oddziaływania układu, złożonego z wielu cząstek naładowanych, na inny układ wielu cząstek naładowanych jest równa wypadkowej sił oddziaływania każdej 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, stanowiący sumę algebraiczną ujemnych ładunków elektronów i równoważących je dodatnich ładunków protonów, jest równy zeru. Badając jedwab, którym pocierana była pałeczka szklana (w doświadczeniu opisanym w p. 14.1), można stwierdzić, że naelektryzował się on ujemnie, natomiast pałeczka uzyskała ładunek dodatni. Podobnie futro, którym pocierano pałeczkę ebonitową, naelektryzowało się dodatnio, pałeczka zaś –

ujemnie. Elektryzacja przez pocieranie nie polega więc na wytwarzaniu, lecz na rozdzielaniu ładunków dodatnich i ujemnych w obojętnych elektrycznie atomach, znajdujących się na powierzchni pocieranych ciał. Dokładne pomiary wykazały, że wartości bezwzględne ładunków powstających na tych ciałach są równe. Wnioski z podobnych doświadczeń pozwoliły na sformułowanie następującej *zasady zachowania ładunku*:

W układzie odosobnionym, który nie wymienia ładunków elektrycznych z otoczeniem, suma algebraiczna tych ładunków nie ulega zmianie[8)].

Potwierdzeniem zasady zachowania ładunku jest zjawisko *indukcji elektrostatycznej*, które ilustruje następujące doświadczenie. Do układu, składającego się z dwóch elektroskopów połączonych metalowym prętem (rys. 14.4), zbliżamy naładowaną ujemnie pałeczkę ebonitową – listki obydwu elektroskopów odchylają się, lecz po odsunięciu pałeczki znów opadają. Gdy jednak przed oddaleniem pałeczki usuniemy (trzymany przez izolowaną rączkę) pręt łączący elektroskopy, wówczas elektroskopy pozostaną nadal naładowane, przy czym na elektroskopie bliższym naelektryzowanej pałeczki powstanie (mówimy, że jest indukowany) ładunek dodatni, a więc o znaku przeciwnym niż na pałeczce, a na bardziej oddalonym – ładunek ujemny, czyli o takim samym znaku, jak na niej.



RYS. 14.4

[8)] Nawet w przypadku anihilacji (czyli przekształcenia w promieniowanie) cząstek elementarnych, w wyniku bombardowania materii strumieniami protonów lub elektronów o bardzo dużej energii (patrz p. 22.12), spełnione jest zawsze prawo zachowania ładunku, co oznacza, że równocześnie z powstaniem cząstki o ładunku dodatnim musi powstać cząstka o ładunku ujemnym. Wynika stąd wniosek, że we wszechświecie liczba cząstek elementarnych o ładunku dodatnim jest równa liczbie cząstek elementarnych o ładunku ujemnym.

Zjawisko to można wytłumaczyć przez wzajemne oddziaływanie ładunków elektrycznych. Wiadomo bowiem, że ładunki dodatnie i ujemne znajdujące się w atomach nienaelektryzowanego przewodnika, np. kuli A elektroskopu, zobojętniają się. Natomiast po zbliżeniu do kuli A (rys. 14.4) ciała 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 położenie wyjściowe i powrót do stanu równowagi. Jeżeli jednak pręt łączący kule A i B zostanie odsunięty, 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 suknem 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.

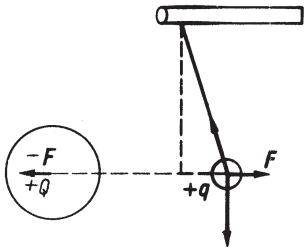
14.6. Pole elektryczne. Natężenie pola

Naładowany elektrycznie przewodnik (np. kula z ładunkiem $+Q$ na rys. 14.5) wywiera wpływ na całą otaczającą go przestrzeń. Można to łatwo sprawdzić, umieszczając w różnych punktach tej przestrzeni wahadło elektryczne, czyli dodatnio naładowaną, małą kulkę o 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), taką 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

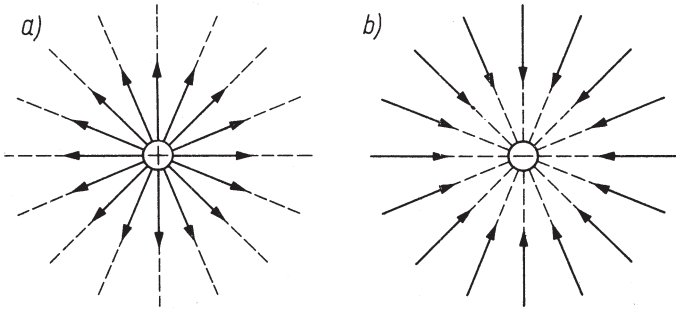
odpychania mają nie tylko określoną wielkość, ale i określony kierunek. Siły elektryczne, podobnie jak siły grawitacyjne, oddziałują również w próżni, czyli bez pośrednictwa jakichkolwiek ciał materialnych.

Zgodnie z trzecią zasadą Newtona oddziaływanie ładunku Q (tzw. źródła pola) w wytworzonym przez niego polu elektrycznym, na znajdujący się w tym polu inny ładunek q, powoduje oczywiście takie samo, lecz przeciwnie skierowane oddziaływanie tego ładunku q na źródło pola Q (rys. 14.5).



RYS. 14.5

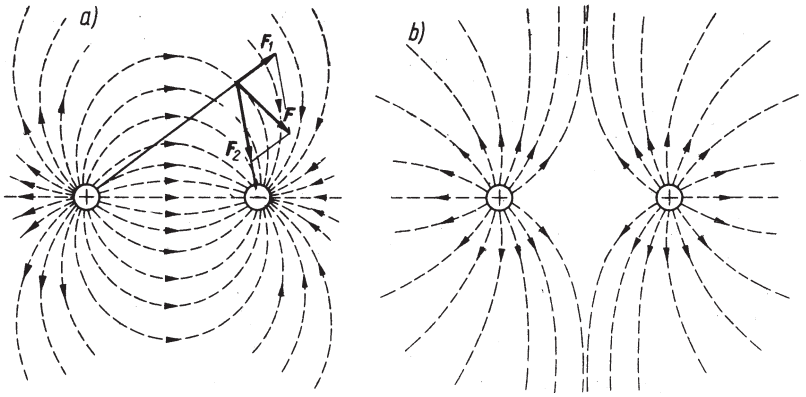
Wygodną formą ilustracji pola elektrycznego są *linie sił pola*, czyli tory, po których poruszałyby się w nim niewielkie ładunki, zwane *ładunkami próbnymi*, pod działaniem sił elektrycznych. Zwrot, który przypisuje się liniom sił, odpowiada kierunkowi ruchu, w jaki zostałby wprawiony dodatni ładunek próbny. W przypadku gdy źródło pola stanowi ładunek dodatni (rys. 14.6a), linie sił rozchodzą się promieniście od niego, gdy zaś pole jest wytwarzane przez ładunek ujemny (rys. 14.6b), linie sił zbiegają się promieniście do tego ładunku. Pole takie nosi nazwę *pola centralnego*.



RYS. 14.6

Jeśli pole elektryczne jest wytwarzane przez dwa lub większą liczbę ładunków, to działające w nim siły są wypadkowymi dwóch lub odpowiednio większej liczby sił elektrycznych, jakimi w danym punkcie pola oddziałują na ładunek próbny wszystkie źródła pola. Kierunek linii sił pola jest wtedy

styczny do działającej na ładunek próbny w rozpatrywanym punkcie pola – siły wypadkowej $\boldsymbol{F}$. Na rysunku 14.7a przedstawiono linie sił pola elektrycznego, wytworzonego przez dwa jednakowej wartości bezwzględnej ładunki elektryczne różnoimienne, a na rys. 14.7b – przez dwa takiej samej wielkości ładunki jednoimienne.



RYS. 14.7

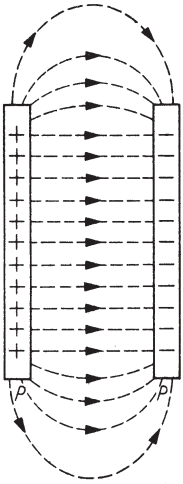
Ilustrując pole elektryczne za pomocą linii sił pola, przyjmuje się zwykle, że liczba linii wychodzących względnie wchodzących do ładunku elektrycznego jest wprost proporcjonalna do wartości tego ładunku. Przy takim założeniu w polu elektrycznym powstałym w wyniku zrównoważonego ładunku elektrycznego, czyli w przypadku gdy całkowity ładunek wytwarzający to pole, równy jest zeru (rys. 14.7a), liczba linii sil pola wchodzących do ładunku ujemnego jest równa liczbie linii sił wychodzących z ładunku dodatniego.

Linie sił pola elektrycznego można uwidocznić, zanurzając w naczyniu z cieczą, będącą dobrym izolatorem, np. olejem parafinowym, elektrody połączone z naładowanym elektroskopem. Po wsypaniu do cieczy nasion trawy ustawią się one szeregowo, jedno za drugim, tworząc wyraźne linie, odpowiadające liniom sił wytworzonego przez elektrody pola elektrycznego[9)].

Szczególny przypadek stanowi *pole elektryczne jednorodne*, którego liniami sił są proste równoległe. Praktycznie pole takie można wytworzyć w przestrzeni między dwiema płaskimi i równoległymi płytkami P przewodnika, mającymi różnoimienne ładunki, jeśli odległość między nimi jest mała w porównaniu z wymiarami płytek (rys. 14.8).

W celu scharakteryzowania właściwości pola grawitacyjnego w p. 4.3 wprowadziliśmy wielkość zwaną natężeniem γ pola grawitacyjnego, definiując ją jako stosunek siły przyciągania grawitacyjnego $\boldsymbol{F}_g$, działającej na

[9)] Przyczyną takiego ustawienia nasion jest zjawisko, zwane polaryzacją dielektryka, wyjaśnione w p. 14.12.



RYS. 14.8

ciało w danym punkcie pola, do masy m tego ciała (patrz wzór (4.3a)). Analogicznie, w celu określenia właściwości pola elektrycznego, wytworzonego w próżni przez punktowy ładunek Q, wprowadzamy charakterystyczną dla danego punktu pola wielkość, zwaną *natężeniem* $\boldsymbol{E}$ *pola elektrycznego*, którego miarą jest *stosunek siły elektrycznej* $\boldsymbol{F}$ *działającej na umieszczony w tym punkcie niewielki dodatni ładunek elektryczny* q (ładunek próbny) *do wartości tego ładunku*. Ponieważ siła $\boldsymbol{F}$ jest wektorem, zatem *natężenie* $\boldsymbol{E}$ *pola elektrycznego jest również wektorem* i ma kierunek siły $\boldsymbol{F}$ działającej na dodatni ładunek próbny, a więc ma kierunek stycznej do linii sił pola elektrycznego w danym jego punkcie, czyli

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q}. \tag{14.2}$$

Jednostką natężenia pola elektrycznego $\boldsymbol{E}$ jest stosunek jednostki siły (N) do jednostki ładunku (C). W układzie SI jest nią $\dfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.

Wartość siły przyciągania lub odpychania elektrycznego F, której działaniu podlega ładunek próbny q w polu elektrycznym wytworzonym przez punktowy ładunek, Q, wyraża zgodnie z prawem Coulomba wzór: $F = k_e \dfrac{Qq}{r^2}$. Zatem wartość natężenia E pola elektrycznego wyraża wzór

$$E = k_e \frac{Q}{r^2}, \tag{14.2a}$$

gdzie r jest odległością rozpatrywanego punktu pola od źródła pola Q.

Uwzględniając wartość współczynnika k_e dla próżni (patrz p. 14.3), mamy

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}. \tag{14.2b}$$

W dalszym ciągu rozdziału 14 będziemy rozpatrywali pola elektrostatyczne, czyli takie, których natężenie w poszczególnych punktach pola nie zmienia się z czasem.

PRZYKŁAD 14.3. Obliczyć natężenie pola elektrostatycznego wytworzonego przez ładunek jądra atomu wodoru na pierwszej orbicie, na której według modelu Bohra znajduje się elektron (w stanie niewzbudzonym atomu – patrz p. 21.2), czyli w odległości $5{,}29 \cdot 10^{-11}$ m od środka jądra. Korzystając z otrzymanego wyniku, obliczyć elektryczną siłę wzajemnego przyciągania jądra i elektronu.

Rozwiązanie. Wielkości dane: $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C, $r = 5{,}29 \cdot 10^{-11}$ m, $k_e = 9 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m^2/C^2; E, F – wielkości szukane.

Stosując wzór (14.2a), mamy

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

Wartość siły wzajemnego oddziaływania jądra i elektronu, zgodnie ze wzorem (14.2), wynosi

$$F = E \cdot e = 5{,}2 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} \ \frac{\text{N} \cdot \text{C}}{\text{C}} = 8{,}3 \cdot 10^{-8} \text{ N}.$$

Ponieważ ładunki jądra i elektronu są różnoimienne, więc siła F jest siłą przyciągającą.

Jeżeli pole elektryczne jest wytwarzane przez kilka ładunków punktowych, to siły ich oddziaływania na ładunek próbny, znajdujący się w określonym punkcie pola, sumują się geometrycznie (jako wektory). Zatem i natężenie pola elektrycznego $\boldsymbol{E}$ w tym punkcie jest sumą geometryczną natężeń $\boldsymbol{E}_1, \boldsymbol{E}_2, \ldots, \boldsymbol{E}_n$ pól wytwarzanych przez poszczególne ładunki (źródła pola), a więc

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_1 + \boldsymbol{E}_2 + \cdots + \boldsymbol{E}_n.$$

Szczególne właściwości wykazuje pole elektryczne wytworzone przez *dipol elektryczny*, czyli układ dwóch ładunków punktowych, różnoimiennych, o jednakowych wartościach bezwzględnych, znajdujących się w określonej od siebie odległości, co wyjaśni poniższy przykład.