

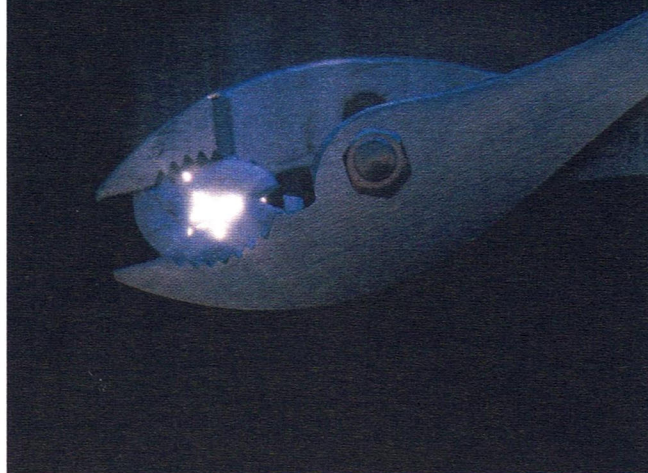
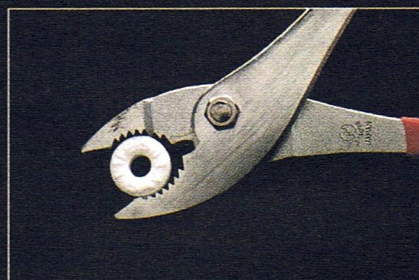
22 Ładunek elektryczny

Jeśli po 15-minutowej adaptacji oczu do ciemności spojrzysz na kolegę jedzącego cukierka wintergrinowego, to po każdym ugryzieniu przez niego cukierka dostrzeżesz w jego ustach słaby błysk niebieskiego światła.

(Aby nie uszkodzić zębów, można ścisnąć cukierka szczypcami, jak na fotografii).

Co jest przyczyną zjawiska, zwanego zwykle „iskrzeniem”?

Odpowiedź znajdziesz w tym rozdziale.



22.1. Elektromagnetyzm

Już starożytni filozofowie greccy wiedzieli, że potarty kawałek bursztynu przyciąga kawałeczki słomy. Ta starodawna obserwacja jest początkiem drogi, prowadzącej do wieku elektroniki, w którym żyjemy. (Dowodem tego związku jest wyraz *elektron*, wywodzący się od greckiego słowa, oznaczającego bursztyn). To również Grecy zaobserwowali, że niektóre, występujące w przyrodzie „kamienie” (minerały zwane dzisiaj magnetytami) przyciągają żelazo.

Z tych skromnych doświadczeń powstała nauka o elektryczności i magnetyzmie, które to dziedziny przez wieki rozwijały się niezależnie, aż do 1820 r., kiedy Hans Christian Oersted znalazł między nimi związek: przepływ prądu elektrycznego w przewodniku może spowodować odchylenie igły magnetycznej kompasu. Warto dodać, że Oersted dokonał tego odkrycia, przygotowując pokaz do wykładu dla studentów fizyki.

Nowa nauka o *elektromagnetyzmie* (opisująca łącznie zjawiska elektryczne i magnetyczne) rozwinęła się dzięki pracy uczonych z wielu krajów. Wśród nich należy wymienić przede wszystkim Michaela Faradaya, prawdziwie utalentowanego eksperymentatora, obdarzonego intuicją fizyczną i wyobraźnią, czego dowodzi fakt, że jego notatki laboratoryjne nie zawierają ani jednego równania. W połowie XIX w. James Clerk Maxwell zapisał idee Faradaya w postaci matematycznej, wprowadzając dodatkowo wiele nowych pomysłów, i stworzył solidne podstawy teoretyczne elektromagnetyzmu.

Podstawowe równania elektromagnetyzmu, zwane obecnie równaniami Maxwella podane są w tabeli 32.1. W najbliższych jedenastu rozdziałach będziemy chcieli je wyprowadzić, lecz już teraz warto spojrzeć na nie, aby zobaczyć, do czego dążymy.

22.2. Ładunek elektryczny

Jeśli przejdziesz po suchym dywanie w czasie ładnej pogody, to po zbliżeniu palca do metalowej klamki możesz zobaczyć iskrę. Reklamy telewizyjne uświadamiają nam problem „statycznego przylegania” odzieży. Wszyscy znamy błyskawice. Każde z tych zjawisk jest drobnym przejawem ogromnych ilości *ładunku elektrycznego*, który jest zmagazynowany w otaczającym nas świecie i nawet w naszych ciałach. **Ładunek elektryczny** jest nieodłączną właściwością cząstek elementarnych, z których składają się wszystkie ciała, czyli właściwością, która stale towarzyszy tym cząstkom.

Ogromne ilości ładunku w każdym ciele są zwykle niewidoczne, gdyż ciało zawiera jednakowe ilości dwóch rodzajów ładunku: *ładunku dodatniego* i *ładunku ujemnego*. Przy takiej równości, czyli *zrównoważeniu* ładunku mówimy o ciele *elektrycznie obojętnym* (*neutralnym*), czyli ciele o zerowym ładunku *wypadkowym*. Jeśli dwa rodzaje ładunku nie równoważą się, to ciało ma niezerowy ładunek wypadkowy. Mówimy, że ciało jest *naładowane*, jeśli ma niezrównoważony ładunek, czyli niezerowy ładunek wypadkowy. Ładunek wypadkowy jest zawsze bardzo mały w porównaniu z ilością ładunku dodatniego i ładunku ujemnego, znajdujących się w ciele.

Ciała naładowane wzajemnie na siebie oddziałują. Możesz to wykazać, elektryzując najpierw szklany pręt przez pocieranie jedwabiem jego jednego końca. W punktach styczności pręta z jedwabiem pewne ilości ładunku przenoszone są z jednego ciała na drugie, naruszając przy tym nieco elektryczną obojętność każdego z nich. (*Pocieramy* pręt jedwabiem, aby zwiększyć liczbę punktów styczności, a stąd i ilość przekazywanego ładunku). Zawieś teraz naładowany pręt na nici, aby go *odizolować elektrycznie* od otoczenia, czyli zapobiec zmianie jego ładunku. Jeśli zbliżamy do niego podobnie naładowany pręt szklany (rys. 22.1a), to obydwa pręty *odpychają się*, czyli każdy pręt doznaje działania siły odpychającej go od drugiego pręta. Jeśli jednak potarty futrem pręt plastikowy zbliżymy do zawieszonego pręta szklanego (rys. 22.1b), to te dwa pręty będą się wzajemnie *przyciągać*, czyli każdy pręt dozna działania siły, przyciągającej go do drugiego pręta.

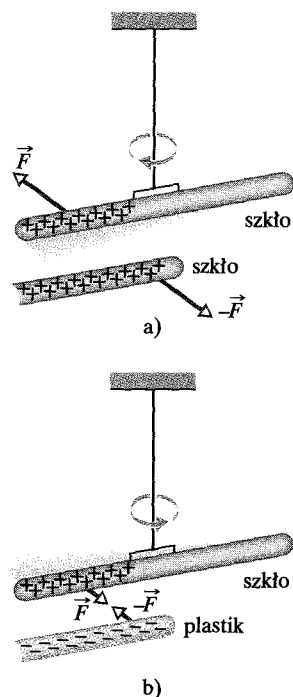
Ideę tych pokazów można wyjaśnić przez wprowadzenie dodatnich i ujemnych ładunków. Gdy szklany pręt pocieramy jedwabiem, szkło traci pewien ujemny ładunek elektryczny i uzyskuje mały, niezerównoważony ładunek dodatni (reprezentowany przez znaki plus na rysunku 22.1a). Gdy plastikowy pręt pocieramy futrem, wówczas pręt uzyskuje pewien niezerównoważony ładunek ujemny (reprezentowany przez znaki minus na rysunku 22.1b). Nasze dwa pokazy można podsumować w następujący sposób:

➤ Ładunki elektryczne o takich samych znakach odpychają się, a ładunki elektryczne o przeciwnych znakach się przyciągają.

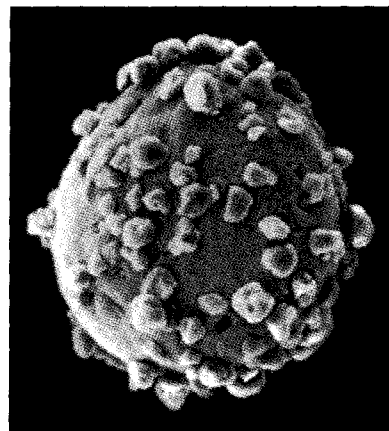
W paragrafie 22.4 zapiszemy tę regułę w postaci ilościowego prawa Coulomba dla *siły elektrostatycznej (elektrycznej)*, działającej między ładunkami. Określenia *elektrostatyczna* używa się dla podkreślenia faktu, że ładunki albo spoczywają, albo poruszają się bardzo wolno.

Określenia „dodatni” i „ujemny”, czyli znaki dla ładunków elektrycznych zostały ustalone umownie przez Benjamina Franklina. Mógł on oczywiście zamienić nawzajem te określenia lub użyć innej pary przeciwnych określeń dla rozróżnienia dwóch rodzajów ładunku. (Franklin był uczonym, cieszącym się międzynarodowym uznaniem. Nawet uważa się, że jego sukcesy dyplomatyczne we Francji podczas amerykańskiej wojny o niepodległość były łatwiejsze do osiągnięcia, a może nawet w ogóle były zasługą tego, że tak bardzo poważano go jako uczonego).

Wzajemne przyciąganie się i odpychanie ciał naładowanych ma wiele zastosowań przemysłowych, m. in.: przy malowaniu elektrostatycznym rozpyloną farbą, napyłaniu warstwy proszku, osadzaniu się popiołów w kominach, bezdotykowym druku atramentowym i kserowaniu. Na rysunku 22.2 przedstawiono drobną kulkę nośnika w kserokopiarce, pokrytą cząstkami czarnego proszku (zwanego *tonerem*), które przylegają do niej z powodu działania sił elektrostatycznych. Ujemnie naładowane cząstki tonera są następnie przyciągane do obracającego się bębna, na którym znajduje się dodatnio naładowany obraz kopiowanego dokumentu. Naładowana kartka papieru przyciąga potem do siebie cząstki tonera z bębna, które na koniec są termicznie utrwalane, tworząc fotokopię.

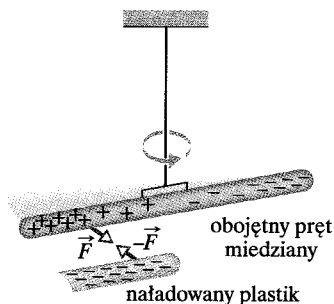


Rys. 22.1. a) Dwa pręty naładowane ładunkami tego samego znaku się odpychają. b) Dwa pręty naładowane ładunkami o przeciwnych znakach się przyciągają. Znaki plus oznaczają wypadkowy ładunek dodatni, a znaki minus — wypadkowy ładunek ujemny



Rys. 22.2. Kulka nośnika z kserokopiarki pokryta jest cząstkami tonera, które do niej przylegają w wyniku przyciągania elektrostatycznego. Średnica kulki wynosi około 0,3 mm

22.3. Przewodniki i izolatory



Rys. 22.3. Obojętny pręt miedziany jest odizolowany elektrycznie od otoczenia, gdyż jest zawieszony na nieprzewodzącej nici. Każdy z końców pręta miedzianego jest przyciągany przez naładowany pręt plastikowy. Elektrony przewodnictwa w pręcie miedzianym są wtedy odpychane do dalszego końca tego pręta przez ujemny ładunek na pręcie plastikowym. Ten ujemny ładunek przyciąga ładunki dodatnie pozostałe na bliższym końcu pręta miedzianego i obraca pręt miedziany tak, aby jego bliższy koniec zbliżył się do pręta plastikowego

W niektórych substancjach, np. metalach, wodzie z kranu i ciele ludzkim, niektóre ładunki ujemne mogą się dość swobodnie poruszać. Takie ośrodki materialne nazywamy **przewodnikami**. W innych substancjach, np. szkłe, chemicznie czystej wodzie i plastiku nie ma ładunków, które mogą poruszać się swobodnie. Takie ośrodki materialne nazywamy **izolatorami**.

Pręta miedzianego, trzymanego w ręku, nie można naładować przez pocieranie wełną, ponieważ ciało ludzkie i pręt są przewodnikami. Pocieranie powoduje pojawienie się niezerównoważonego ładunku na pręcie. Jego nadmiar natychmiast odpływa z pręta przez ciało ludzkie do podłogi (połączonej z powierzchnią Ziemi) i pręt szybko staje się obojętny.

Ustanowienie przewodzącego połączenia między ciałem i powierzchnią Ziemi nazywamy **uziemieniem** ciała, a zobojętnienie ciała (przez pozbycie się niezerównoważonego ładunku dodatniego lub ujemnego) nazywamy **rozładowaniem** ciała. Jeśli natomiast pręt miedziany trzymamy za pomocą izolowanej rączki, to eliminujemy drogę przewodzącą do Ziemi. Pręt można wtedy naładować przez pocieranie, jeśli tylko nie dotkniemy go bezpośrednio ręką.

Właściwości przewodników i izolatorów wynikają z budowy atomów i właściwości elektrycznych ich składników. Atomy zbudowane są z dodatnio naładowanych *protonów*, ujemnie naładowanych *elektronów* i elektrycznie obojętnych *neutronów*. Protony i neutrony są upakowane ściśle w *jądrze* znajdującym się w samym środku atomu.

Ładunek pojedynczego elektronu i ładunek pojedynczego protonu są sobie równe co do wartości bezwzględnej, ale mają przeciwny znak. Elektrycznie obojętny atom składa się więc z takiej samej liczby elektronów i protonów. Elektrony utrzymują się w pobliżu jądra, bo mają przeciwny znak ładunku niż protony w jądrze i dlatego są przyciągane przez jądro.

Gdy atomy przewodnika, np. miedzi, znajdują się blisko siebie, tworząc ciało stałe, niektóre z ich zewnętrznych (czyli najluźniej związanych) elektronów przestają być związane z poszczególnymi atomami i mogą swobodnie wędrować w całym ciele, pozostawiając dodatnio naładowane atomy (czyli *dodatnie jony*). Elektrony swobodne nazywamy *elektronami przewodnictwa*. W izolatorze jest ich bardzo mało lub nie ma ich wcale.

Z doświadczenia przedstawionego na rysunku 22.3 wynika, że w przewodniku istnieją ładunki swobodne. Ujemnie naładowany pręt plastikowy przyciąga którykolwiek koniec izolowanego obojętnego pręta miedzianego, gdyż elektrony przewodnictwa w bliższym końcu pręta miedzianego są odpychane przez ujemny ładunek pręta plastikowego. Przesuwają się one do dalszego końca pręta miedzianego, pozostawiając bliższy koniec bez elektronów, czyli z niezerównoważonym ładunkiem dodatnim. Ładunek dodatni przyciąga ujemny ładunek w pręcie plastikowym. Chociaż pręt miedziany jako całość jest nadal obojętny, to ma *indukowane ładunki*, czyli część dodatnich i ujemnych ładunków pręta ulega rozdzieleniu wskutek obecności naładowanego pręta plastikowego w jego pobliżu.

Podobnie, jeśli do jednego z końców obojętnego pręta miedzianego zbliżymy dodatnio naładowany pręt szklany, to elektrony przewodnictwa w pręcie

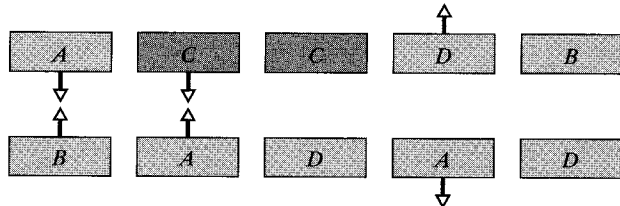
miedzianym zostaną przyciągnięte do tego końca. Ten koniec staje się ujemnie naładowany, a drugi — dodatnio, czyli znów w pręcie pojawiają się ładunki indukowane. Chociaż pręt miedziany jako całość jest nadal obojętny, to pręt ten i pręt szklany się przyciągają. (Na rysunku 22.4 przedstawiono inne doświadczenie ilustrujące istnienie ładunków indukowanych).

Warto podkreślić, że tylko elektrony przewodnictwa, o ujemnych ładunkach, mogą się swobodnie poruszać; dodatnie jony pozostają nieruchome. Ciało staje się więc dodatnio naładowane tylko w wyniku *odpływu ładunków ujemnych*.

Półprzewodniki, np. krzem i german, są materiałami pośrednimi między przewodnikami i izolatorami. Rewolucja mikroelektroniczna, która tak wszechstronnie zmieniła nasze życie, jest oparta na przyrządach, zbudowanych z materiałów półprzewodnikowych.

Na koniec warto dodać, że istnieją także **nadprzewodniki**, których nazwa wiąże się z brakiem oporu przy przepływie w nich ładunku elektrycznego. Gdy ładunek porusza się w ośrodku materialnym, mówimy o istnieniu **prądu elektrycznego** w tym ośrodku. W zwykłych materiałach, nawet w dobrych przewodnikach, występuje opór przy przepływie w nich ładunku. Natomiast w nadprzewodniku opór nie jest po prostu mały — jest dokładnie równy zeru. Gdy w nadprzewodzącym pierścieniu wzbudzimy prąd elektryczny, będzie on płynął „zawsze”, bez potrzeby podtrzymywania go przez jakieś źródło energii.

SPRAWDZIAN 1: Na rysunku przedstawiono pięć par płytek: A, B i D są naładowanymi płytkami plastikowymi, a C jest obojętną elektrycznie płytką miedzianą. Dla trzech par zaznaczono siły elektrostatyczne, działające między nimi. Czy w pozostałych dwóch parach płytki przyciągają się, czy odpychają?

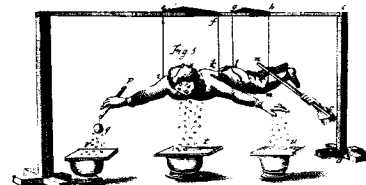


22.4. Prawo Coulomba

Jeśli dwie naładowane cząstki (zwane także *ładunkami punktowymi*) o ładunkach q_1 i q_2 znajdują się w odległości r , to **siła elektrostatyczna** przyciągania lub odpychania między nimi ma wartość:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (\text{prawo Coulomba}), \quad (22.1)$$

gdzie k jest stałą. Każda z cząstek oddziałuje na drugą siłą o tej wartości; te dwie siły spełniają trzecią zasadę dynamiki. Jeśli cząstki *odpychają się*, to siła działająca na każdą cząstkę jest skierowana *od* drugiej cząstki (rys. 22.5a i 22.5b). Jeśli cząstki przyciągają się, to siła działająca na każdą cząstkę jest skierowana *do* drugiej cząstki (rys. 22.5c).



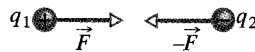
Rys. 22.4. To nie jest pokaz akrobacyjny, ale poważne doświadczenie wykonane w 1774 r., w celu udowodnienia, że ciało ludzkie jest przewodnikiem elektrycznym. Na rycinie przedstawiono osobę, zawieszoną na nieprzewodzących linach, którą ładuje się elektrycznie, używając naładowanego pręta (dotykając zapewne ciała, a nie spodni). Jeśli osoba zbliża twarz, lewą rękę lub przewodzącą kulkę i pręt w prawej ręce do kawałków papieru na płytce, to wskutek indukowania się na papierze ładunku kawałki papieru zaczynają wznosić się do niej w powietrzu



a) odpychanie



b) odpychanie



c) przyciąganie

Rys. 22.5. Dwie naładowane cząstki znajdujące się w odległości r odpychają się, jeśli ich ładunki są: a) obojętne, b) obojętne. c) Cząstki przyciągają się, jeśli ich ładunki mają przeciwne znaki. W każdym z tych trzech przypadków siła działająca na jedną cząstkę jest równa co do wartości sile działającej na drugą cząstkę, lecz jest przeciwnie skierowana

Wzór (22.1) nosi nazwę **prawa Coulomba**, od nazwiska Charlesa Augustina Coulomba, który doświadczalnie w 1785 roku doszedł do tego wzoru. Zauważ, że postać wzoru (22.1) jest taka sama, jak wzoru Newtona dla siły grawitacyjnej, działającej między dwiema cząstkami o masach m_1 i m_2 , znajdującymi się w odległości r :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (22.2)$$

gdzie G jest stałą grawitacyjną.

Stałą k we wzorze (22.1), przez analogię do stałej grawitacyjnej G ze wzoru (22.2), można nazywać *stałą elektrostatyczną*. W obydwu wzorach występuje w mianowniku kwadrat odległości, a w liczniku iloczyn wielkości, charakteryzujących oddziałujące cząstki — mas w jednym przypadku, a ładunków w drugim. Różnica między nimi polega na tym, że siły grawitacyjne są zawsze siłami przyciągania, a siły elektrostatyczne, zależnie od znaków dwóch ładunków, mogą być siłami przyciągania lub odpychania. Różnica wynika stąd, że mamy tylko jeden rodzaj masy, ale dwa rodzaje ładunków (we wzorze (22.1) występują dlatego znaki wartości bezwzględnej, a we wzorze (22.2) nie).

Prawo Coulomba zostało wielokrotnie potwierdzone doświadczalnie i nigdy nie znaleziono od niego odstępstw. Pozostaje ono słuszne nawet dla atomu, opisując poprawnie siłę, działającą między dodatnio naładowanym jądrem i każdym z ujemnie naładowanych elektronów, chociaż w tym przypadku mechanika klasyczna Newtona zawodzi i trzeba ją zastąpić fizyką kwantową. To proste prawo pozwala również poprawnie określić siły wiążące atomy w cząsteczki oraz siły wiążące atomy i cząsteczki w ciała stałe i ciecze.

Ze względów praktycznych (związanych z dokładnością pomiarów) jednostka ładunku elektrycznego w układzie SI jest jednostką pochodną jednostki natężenia prądu elektrycznego, którą jest amper (A). Jednostką ładunku jest **kulomb** (C): *jeden kulomb to ilość ładunku, przepływającego przez przekrój poprzeczny przewodnika w ciągu 1 sekundy, jeśli przez przewodnik płynie prąd o natężeniu 1 ampera*. W paragrafie 30.2 opiszemy, jak doświadczalnie zdefiniowany jest amper. W ogólności możemy napisać:

$$dq = I dt, \quad (22.3)$$

gdzie dq (w kulombach) jest ładunkiem, przenoszonym przez prąd o natężeniu I (w amperach) w przedziale czasu dt (w sekundach).

Z powodów historycznych (i ze względu na prostszą postać wielu innych wzorów) stałą elektrostatyczną k we wzorze (22.1) zapisuje się jako $1/(4\pi\epsilon_0)$. Wtedy prawo Coulomba przyjmuje postać

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (\text{prawo Coulomba}). \quad (22.4)$$

Stałe we wzorach (22.1) i (22.4) mają wartość

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2. \quad (22.5)$$

Wielkość ϵ_0 , zwana **przenikalnością elektryczną próżni** (stałą elektryczną), występuje nieraz we wzorach samodzielnie i ma wartość:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2). \quad (22.6)$$

Innym jeszcze podobieństwem między siłą grawitacyjną i siłą elektrostatyczną jest to, że obie siły spełniają zasadę superpozycji. Jeśli mamy n cząstek naładowanych, to oddziałują one niezależnie w parach i siła wypadkowa działająca na jakąkolwiek z nich, np. cząstkę 1, jest równa sumie wektorowej:

$$\vec{F}_{1,\text{wyp}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \vec{F}_{15} + \dots + \vec{F}_{1n}, \quad (22.7)$$

gdzie np. $\vec{F}_{14}$ jest siłą oddziaływania cząstki 4 na cząstkę 1. Taki sam wzór jest słuszny dla siły grawitacyjnej.

Na koniec przypomnijmy sobie dwa twierdzenia o powłoce, których używaliśmy przy omawianiu zagadnień związanych z grawitacją, gdyż mają one swoje odpowiedniki w elektrostatyce:

- Jednorodnie naładowana powłoka kulista przyciąga lub odpycha naładowaną cząstkę znajdującą się na zewnątrz powłoki tak, jakby cały ładunek tej powłoki był skupiony w jej środku.
- Jeśli cząstka naładowana znajduje się wewnątrz jednorodnie naładowanej powłoki kulistej, to wypadkowa siła elektrostatyczna oddziaływania powłoki na cząstkę jest równa zeru.

(W pierwszym twierdzeniu należy założyć, że ładunek na powłoce jest dużo większy od ładunku cząstki, gdyż wtedy można zaniedbać zmianę rozkładu ładunku na powłoce, spowodowaną obecnością ładunku cząstki).

Przewodniki kuliste

Nadmiarowy ładunek na kulistej powłoce z materiału przewodzącego rozkłada się jednorodnie na jej (zewnątrznej) powierzchni. Jeśli na przykład umieścimy nadmiarowe elektrony na kulistej powłoce metalowej, to elektrony, odpychając się, starają się od siebie oddalić i rozprzestrzeniają się po dostępnej powierzchni, aż rozłożą się na niej jednorodnie. Rozkład taki maksymalizuje odległości między parami nadmiarowych elektronów. Zgodnie z pierwszym twierdzeniem o powłoce, będzie ona wtedy przyciągać lub odpychać ładunki, znajdujące się na zewnątrz powłoki tak, jakby cały nadmiarowy ładunek był skupiony w jej środku.

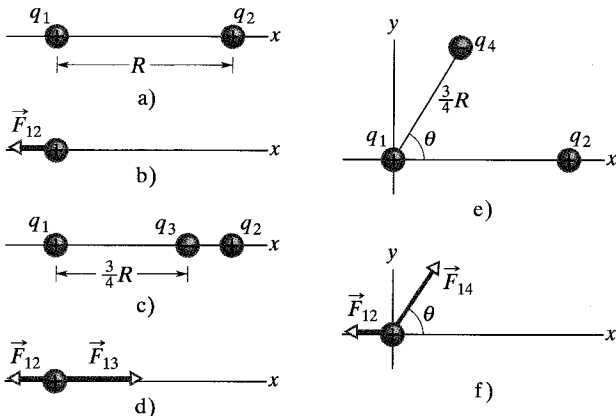
Po usunięciu pewnego ładunku ujemnego z kulistej powłoki metalowej powstały na powłoce ładunek dodatni jest także jednorodnie rozłożony na jej powierzchni. Jeśli np. usuniemy n elektronów, to powstanie n miejsc z ładunkiem dodatnim (miejsc pozbawionych elektronu), rozmieszczonych jednorodnie na powłoce. Zgodnie z pierwszym twierdzeniem o powłoce, będzie ona znów przyciągać lub odpychać ładunek, znajdujący się na zewnątrz powłoki tak, jakby cały niezrównoważony ładunek powłoki znajdował się w jej środku.

SPRAWDZIAN 2: Na rysunku przedstawiono dwa protony (symbol p) i jeden elektron (symbol e), umieszczone na prostej. W jakim kierunku działają: a) siła elektrostatyczna oddziaływania elektronu na środkowy proton, b) siła elektrostatyczna oddziaływania drugiego protonu na środkowy proton, c) wypadkowa siła elektrostatyczna działająca na środkowy proton?



Przykład 22.1

a) Na rysunku 22.6a przedstawiono dwie dodatnio naładowane cząstki, umieszczone na osi x . Ładunki cząstek wynoszą $q_1 = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ i $q_2 = 3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, a odległość cząstek wynosi $R = 0,02 \text{ m}$. Jaka jest wartość i kierunek siły elektrostatycznej $\vec{F}_{12}$ oddziaływania cząstki 2 na cząstkę 1?



Rys. 22.6. Przykład 22.1. a) Dwie naładowane cząstki o ładunkach q_1 i q_2 znajdują się na osi x w odległości R . b) Diagram sił dla cząstki 1 ilustruje działającą na nią siłę elektrostatyczną, pochodzącą od cząstki 2. c) Cząstka 3 znajduje się teraz na osi x , razem z cząstkami 1 i 2. d) Diagram sił dla cząstki 1. e) Cząstka 4 znajduje się na linii, tworzącej kąt θ z osią x , na której nadal znajdują się cząstki 1 i 2. f) Diagram sił dla cząstki 1

ROZWIĄZANIE:

Obydwie cząstki są dodatnio naładowane, dlatego też cząstka 1 jest odpychana przez cząstkę 2, a wartość siły jest określona wzorem (22.4). Stąd też siła $\vec{F}_{12}$, działająca na cząstkę 1, jest skierowana *od* cząstki 2, w ujemnym kierunku osi x (zgodnie z diagramem sił na rysunku 22.6b). Używając wzoru (22.4), po podstawieniu odległości R zamiast r , możemy obliczyć wartość siły F_{12} :

$$\begin{aligned} F_{12} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{R^2} \\ &= (8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(0,02 \text{ m})^2} \\ &= 1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N}. \end{aligned}$$

Stąd siła $\vec{F}_{12}$ ma następującą wartość i kierunek (względem dodatniego kierunku osi x):

$$1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N} \quad \text{i} \quad 180^\circ. \quad (\text{odpowiedź})$$

Możemy także zapisać $\vec{F}_{12}$, używając wektorów jednostkowych:

$$\vec{F}_{12} = -(1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{i}. \quad (\text{odpowiedź})$$

b) Rysunek 22.6c jest identyczny z rysunkiem 22.6a poza tym, że teraz dodatkowo między cząstkami 1 i 2 znajduje się cząstka 3,

o ładunku $q_3 = -3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Znajduje się ona w odległości $\frac{3}{4}R$ od cząstki 1. Ile wynosi wypadkowa siła elektrostatyczna $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$ oddziaływania cząstek 2 i 3 na cząstkę 1?

ROZWIĄZANIE:

1. Obecność cząstki 3 nie zmienia siły elektrostatycznej oddziaływania cząstki 2 na cząstkę 1. Stąd siła $\vec{F}_{12}$ nadal działa na cząstkę 1. Podobnie siła $\vec{F}_{13}$ oddziaływania cząstki 3 na cząstkę 1 nie zmienia się wskutek obecności cząstki 2. Cząstki 1 i 3 mają ładunki o przeciwnym znaku, dlatego też cząstka 1 jest przyciągana przez cząstkę 3. Stąd siła $\vec{F}_{13}$ jest skierowana *do* cząstki 3 (zgodnie z diagramem sił na rysunku 22.6d).

Aby znaleźć wartość siły $\vec{F}_{13}$, przepisujemy wzór (22.4) w postaci:

$$\begin{aligned} F_{13} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_3|}{(\frac{3}{4}R)^2} \\ &= (8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(\frac{3}{4})^2(0,02 \text{ m})^2} \\ &= 2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N}. \end{aligned}$$

Możemy także zapisać $\vec{F}_{13}$ za pomocą wektorów jednostkowych:

$$\vec{F}_{13} = (2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{i}.$$

2. Siła wypadkowa $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$, działająca na cząstkę 1 jest sumą wektorową sił $\vec{F}_{12}$ i $\vec{F}_{13}$, czyli zgodnie ze wzorem (22.7) siłę wypadkową $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$ działającą na cząstkę 1 możemy zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{1,\text{wyp}} &= \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} \\ &= -(1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{i} + (2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{i} \\ &= (9 \cdot 10^{-25} \text{ N})\hat{i}. \quad (\text{odpowiedź}) \end{aligned}$$

Stąd $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$ ma następującą wartość i kierunek (względem dodatniego kierunku osi x):

$$9 \cdot 10^{-25} \text{ N} \quad \text{i} \quad 0^\circ. \quad (\text{odpowiedź})$$

c) Rysunek 22.6e jest identyczny z rysunkiem 22.6a poza tym, że teraz dodatkowo dodano w zaznaczonym miejscu cząstkę 4 o ładunku $q_4 = -3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Znajduje się ona w odległości $\frac{3}{4}R$ od cząstki 1, na linii tworzącej kąt $\theta = 60^\circ$ z osią x . Ile wynosi wypadkowa siła elektrostatyczna $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$ oddziaływania cząstek 2 i 4 na cząstkę 1?

ROZWIĄZANIE:

1. Siła wypadkowa $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$ jest sumą wektorową siły $\vec{F}_{12}$ i nowej siły $\vec{F}_{14}$ oddziaływania cząstki 4 na cząstkę 1. Cząstki 1 i 4 mają ładunki przeciwnego znaku, dlatego też cząstka 1 jest przyciągana do cząstki 4. Stąd siła $\vec{F}_{14}$, działająca na cząstkę 1, jest skierowana *do* cząstki 4 pod kątem $\theta = 60^\circ$ (zgodnie z diagramem sił na rysunku 22.6f).

Aby znaleźć wartość siły $\vec{F}_{14}$, przepisujemy wzór (22.4) w postaci:

$$\begin{aligned} F_{14} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_4|}{(\frac{3}{4}R)^2} \\ &= (8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(\frac{3}{4})^2(0,02 \text{ m})^2} \\ &= 2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N}. \end{aligned}$$

Stąd na podstawie wzoru (22.7) możemy zapisać siłę wypadkową $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$ działającą na cząstkę 1 w postaci

$$\vec{F}_{1,\text{wyp}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{14}.$$

2. Siły $\vec{F}_{12}$ i $\vec{F}_{14}$ nie są skierowane wzdłuż tej samej osi, więc *nie możemy* ich zsumować przez proste dodanie ich wartości. Musimy je dodawać jak wektory, stosując jedną z następujących metod.

Metoda 1

Dodawanie przy zastosowaniu wektorów jednostkowych. Najpierw musimy zapisać $\vec{F}_{14}$ w postaci:

$$\vec{F}_{14} = (F_{14} \cos \theta)\hat{i} + (F_{14} \sin \theta)\hat{j}.$$

Podstawiając $2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N}$ za F_{14} i 60° za θ otrzymujemy:

$$\vec{F}_{14} = (1,025 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{i} + (1,775 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{j}.$$

Następnie dodajemy:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{1,\text{wyp}} &= \vec{F}_{12} + \vec{F}_{14} \\ &= -(1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{i} + (1,025 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{i} \\ &\quad + (1,775 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{j} \\ &\approx (-1,25 \cdot 10^{-25} \text{ N})\hat{i} \\ &\quad + (1,78 \cdot 10^{-24} \text{ N})\hat{j}. \end{aligned} \quad (\text{odpowiedź})$$

Metoda 2

Sumowanie składowych sił. Suma składowych x wynosi

$$\begin{aligned} F_{1,\text{wyp},x} &= F_{12,x} + F_{14,x} = F_{12} + F_{14} \cos 60^\circ \\ &= -1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N} + (2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N})(\cos 60^\circ) \\ &= -1,25 \cdot 10^{-25} \text{ N}. \end{aligned}$$

Suma składowych y wynosi:

$$\begin{aligned} F_{1,\text{wyp},y} &= F_{12,y} + F_{14,y} = 0 + F_{14} \sin 60^\circ \\ &= (2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N})(\sin 60^\circ) = 1,78 \cdot 10^{-24} \text{ N}. \end{aligned}$$

Siła wypadkowa $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$ ma więc wartość

$$\begin{aligned} F_{1,\text{wyp}} &= \sqrt{F_{1,\text{wyp},x}^2 + F_{1,\text{wyp},y}^2} \\ &= 1,78 \cdot 10^{-24} \text{ N}. \end{aligned} \quad (\text{odpowiedź})$$

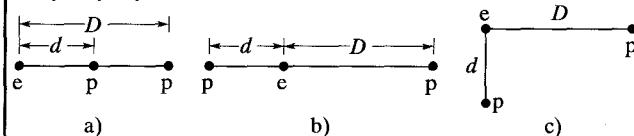
Aby znaleźć kierunek siły $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$, obliczamy:

$$\theta = \arctg \frac{F_{1,\text{wyp},y}}{F_{1,\text{wyp},x}} = -86^\circ.$$

Jest to jednak wynik niezgodny z warunkami zadania, gdyż siła $\vec{F}_{1,\text{wyp}}$ musi mieć kierunek, mieszczący się między kierunkami sił $\vec{F}_{12}$ i $\vec{F}_{14}$. Aby otrzymać taką wartość θ , dodajemy 180° i otrzymujemy

$$-86^\circ + 180^\circ = 94^\circ. \quad (\text{odpowiedź})$$

SPRAWDZIAN 3: Na rysunku przedstawiono trzy układy złożone z elektronu e i dwóch protonów p . a) Uszereguj układy zgodnie z wartością wypadkowej siły elektrostatycznej oddziaływania protonów na elektron, zaczynając od wartości największej. b) Czy dla układu (c) kąt między wypadkową siłą, działającą na elektron i prostą, oznaczoną przez (d), jest mniejszy, czy większy od 45° ?



Sztuka rozwiązywania zadań

Porada 1: Symbole oznaczające ładunek

Oto ogólny przewodnik po symbolach, oznaczających ładunek. Jeśli w zdaniu użyto symbolu q , ze wskaźnikiem lub bez, i nie podano żadnego znaku ładunku, to ładunek może być albo dodatni, albo ujemny. Znak ładunku jest nieraz wskazany bezpośrednio, przez użycie notacji $+q$ lub $-q$.

Gdy rozważamy więcej niż jedno ciało naładowane, ładunki mogą być określone jako wielokrotności wartości pewnego ładunku, na przykład $+2q$ oznacza dodatni ładunek o wartości dwa razy większej od pewnej wartości ładunku odniesienia q , a $-3q$ oznacza ujemny ładunek o wartości trzy razy większej od wartości ładunku odniesienia q .

Przykład 22.2

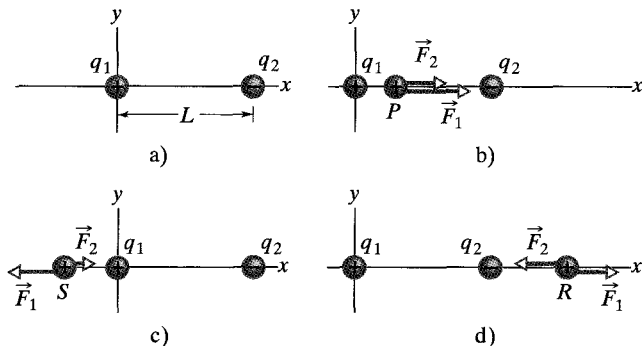
Na rysunku 22.7a przedstawiono dwie cząstki: cząstkę o ładunku $q_1 = +8q$, umieszczoną w początku układu, i cząstkę o ładunku $q_2 = -2q$, umieszczoną w punkcie o współrzędnej $x = L$. W którym punkcie (poza nieskończenie odległymi) należy umieścić proton, aby znalazł się w stanie *równowagi* (tzn. aby wypadkowa siła, działająca na proton, była równa zeru)? Czy jest to stan równowagi *trwałej*, czy *nietrwałej*?

ROZWIĄZANIE:

Jeśli $\vec{F}_1$ jest siłą oddziaływania ładunku q_1 na proton i $\vec{F}_2$ jest siłą oddziaływania ładunku q_2 na proton, to szukamy punktu, w którym $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$. Warunek ten wymaga, aby:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (22.8)$$

Oznacza to, że w poszukiwanym punkcie siły oddziaływania na proton dwóch innych cząstek muszą być przeciwnie skierowane



Rys. 22.7. Przykład 22.2. a) Dwie cząstki o ładunkach q_1 i q_2 znajdują się na osi x w odległości L . b)–d) Trzy możliwe położenia P , S i R protonu. W każdym położeniu $\vec{F}_1$ jest siłą oddziaływania cząstki 1 na proton, a $\vec{F}_2$ jest siłą oddziaływania cząstki 2 na proton

i mieć równe wartości:

$$F_1 = F_2. \quad (22.9)$$

Proton ma ładunek dodatni. Proton i cząstka o ładunku q_1 mają więc ten sam znak i siła $\vec{F}_1$ musi być skierowana od q_1 . Natomiast proton i cząstka o ładunku q_2 mają przeciwne znaki i siła $\vec{F}_2$, działająca na proton musi być skierowana do q_2 . Siły „od q_1 ” i „do q_2 ” mogą być skierowane w przeciwnych kierunkach tylko wtedy, gdy proton znajduje się na osi x .

Jeśli proton umieszczony jest na osi x w którymkolwiek punkcie między q_1 i q_2 , np. w punkcie P na rysunku 22.7b, to $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ są skierowane w tę samą stronę, a nie w przeciwną, jak potrzeba. Jeśli proton jest umieszczony w którymkolwiek punkcie na osi x na lewo od q_1 , np. w punkcie S na rysunku 22.7c, to $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ są skierowane przeciwnie. Ale ze wzoru (22.4) wynika, że $\vec{F}_1$

i $\vec{F}_2$ nie mogą mieć tam równych wartości: wartość F_1 musi być większa od wartości F_2 , bo F_1 odpowiada bliższemu ładunkowi (o mniejszym r) o większej wartości ($8q$ w porównaniu z $2q$).

Na koniec, jeśli proton umieszczony jest w którymkolwiek punkcie na osi x na prawo od q_2 , na przykład w punkcie R na rysunku 22.7d, to $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ są także przeciwne skierowane. Jednak, ponieważ teraz ładunek o większej wartości (q_1) jest umieszczony dalej od protonu niż ładunek o mniejszej wartości, to istnieje punkt, w którym wartość F_1 jest równa F_2 . Jeśli x jest współrzędną tego punktu i q_p jest ładunkiem protonu, to korzystając ze wzoru (22.4) możemy wzór (22.9) zapisać w postaci:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{8qq_p}{x^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2qq_p}{(x-L)^2}. \quad (22.10)$$

(Zauważ, że we wzorze (22.10) występują tylko wartości ładunków). Po przekształceniu wzoru (22.10) otrzymujemy:

$$\left(\frac{x-L}{x}\right)^2 = \frac{1}{4}.$$

Wyciągając pierwiastek z obydwu stron pierwszego równania otrzymujemy:

$$\frac{x-L}{x} = \frac{1}{2},$$

co daje nam ostatecznie:

$$x = 2L. \quad (\text{odpowiedź})$$

Równowaga w punkcie $x = 2L$ jest nietrwała. Jeśli proton przesuniemy w lewo od punktu R , to F_1 i F_2 wzrastają, ale F_2 wzrasta bardziej (ponieważ q_2 jest bliżej niż q_1) i siła wypadkowa będzie przesuwać proton jeszcze bardziej w lewo. Jeśli proton przesuniemy w prawo, to F_1 i F_2 zmniejszają, ale F_2 zmniejsza się bardziej i siła wypadkowa będzie przesuwać proton jeszcze bardziej w prawo. W stanie równowagi trwałej, przy małym przesunięciu proton powracałby z powrotem do położenia równowagi.

Sztuka rozwiązywania zadań

Porada 2: Rysowanie wektorów siły elektrostatycznej

Gdy mając dany rysunek, na którym przedstawiono cząstki naładowane, na przykład rysunek 22.6a, masz znaleźć wypadkową siłę elektrostatyczną, działającą na jedną z nich, zwykle trzeba narysować diagram sił, na którym naniesiesz tylko wybraną cząstkę i siły, jakie na nią działają (jak np. na rys. 22.6b). Gdy chcesz nanieść te siły na rysunek, na którym przedstawiono wszystkie

cząstki, musisz pamiętać, aby narysować wektory siły w ten sposób, żeby początek wektora (lepiej wybór) lub jego koniec były umieszczone na wybranej cząstce. Narysowanie tych wektorów w innym miejscu na rysunku prowadzi do nieporozumień — nieporozumienie jest pewne, jeśli narysujesz wektory przy cząstkach, które *przyczyniają się* do powstania sił działających na wybraną cząstkę.

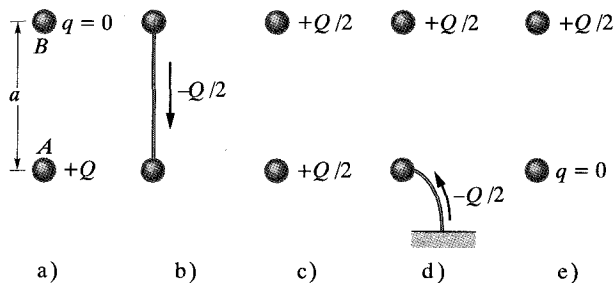
Przykład 22.3

Na rysunku 22.8a dwie identyczne, elektrycznie izolowane przewodzące kule A i B znajdują się w odległości a , dużej w porównaniu z promieniem kul (odległość mierzymy między środkami kul). Kula A ma ładunek dodatni $+Q$, a kula B jest elektrycznie obojętna. Początkowo siła elektrostatyczna działająca między kulami wynosi zero. (Zakładamy, że na powierzchniach kul nie indukuje się ładunek, bo znajdują się one w dużej odległości od siebie).

a) Załóżmy, że kule połączono na chwilę przewodnikiem. Jest on na tyle cienki, że można pominąć jakikolwiek wypadkowy ładunek na nim. Ile wynosić będzie siła elektrostatyczna oddziaływania kul po usunięciu przewodnika?

ROZWIĄZANIE:

➡ 1. Gdy kule połączymy przewodnikiem, to (ujemne) elektrony przewodnictwa na kuli B , które zawsze się odpychają, mogą się oddalić od siebie (wzdłuż przewodnika do dodatnio naładowa-



Rys. 22.8. Przykład 22.3. Dwie małe przewodzące kule A i B. a) Na początku kula A jest naładowana dodatnio. b) Między kulami przez łączący je przewód zostaje przekazany ładunek ujemny. c) Obie kule są teraz naładowane dodatnio. d) Ujemny ładunek zostaje przekazany kuli A przez uziemiający przewód. e) Kula A jest teraz obojętna

nej kuli A, która je przyciąga) (zob. rys. 22.8b). Kula B traci ładunek ujemny i ładuje się dodatnio, a kula A zyskuje ładunek ujemny i staje się *mniej* naładowana dodatnio.

➡ 2. Kule ostatecznie będą mieć takie same ładunki, ponieważ są identyczne. Przepływ ładunku kończy się więc, gdy ładunek na kuli B osiągnie wartość $+Q/2$, a na kuli A zmaleje do $+Q/2$. Warunek ten zostaje osiągnięty, gdy przepłynie ładunek $-Q/2$.

Po usunięciu przewodnika (rys. 22.8c) możemy założyć, że ładunek na żadnej z kul nie zakłóca jednorodności rozkładu ładunku na drugiej kuli, bo promienie kul są małe w porównaniu z odległością między nimi. Możemy więc zastosować pierwsze twierdzenie o powłoce do każdej z kul. Ze wzoru (22.4), po podstawieniu $q_1 = q_2 = Q/2$ i $r = a$, otrzymujemy wartość siły elektrostatycznej oddziaływania kul:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Q/2)(Q/2)}{a^2} = \frac{1}{16\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{a}\right)^2. \quad (\text{odpowiedź})$$

Kule, obecnie naładowane dodatnio, się odpychają.

b) Załóżmy teraz, że kula A zostanie na chwilę uziemiona, a następnie połączenie uziemiające zostanie usunięte. Ile wynosić będzie teraz siła elektrostatyczna, działająca między kulami?

ROZWIĄZANIE:

➡ Połączenie uziemiające pozwala elektronom o całkowitym ładunku $-Q/2$ przesunąć się z ziemi do kuli A (rys. 22.8d), w wyniku czego kula stanie się obojętna (rys. 22.8e). Pod nieobecność ładunku na kuli A siła elektrostatyczna oddziaływania dwóch kul (podobnie, jak na początku, rys. 22.8a) będzie równa zero.

22.5. Ładunek jest skwantowany

W czasach Benjamina Franklina ładunek elektryczny uważano za ciągły płyn, co w wielu przypadkach było ideą przydatną. Obecnie wiemy, że materialne płyny, np. powietrze i woda, nie są ciągłe, bo są złożone z atomów i cząsteczek, a materia jest nieciągła (dyskretna). Z doświadczenia wynika, że „płyn elektryczny” także nie jest ciągły, a przyjmuje wartości będące wielokrotnością pewnego ładunku elementarnego. Każdy ładunek q , dodatni lub ujemny, można zapisać w postaci:

$$q = ne, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (22.11)$$

gdzie **ładunek elementarny** e ma wartość

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}. \quad (22.12)$$

Ładunek elementarny e jest jedną z ważnych stałych fizycznych. Elektron i proton mają ładunek o wartości bezwzględnej e (tabela 22.1). (Kwarki, czyli cząstki, z których zbudowane są protony i neutrony, mają ładunki $\pm e/3$ lub $\pm 2e/3$, ale są one zawsze uwięzione, tzn. nie mogą być indywidualnie obserwowane. Z tego powodu, a także ze względów historycznych, ich ładunków nie traktuje się jako ładunku elementarnego).

Często spotykamy się ze stwierdzeniami, np. „ładunek na kuli”, „przekazany ładunek”, „ładunek niesiony przez elektron”, które mogłyby sugerować, że ładunek jest substancją. (Faktycznie, takie zdania pojawiały się także w tym rozdziale). Powinniśmy jednak pamiętać, jaki był zamierzony sens tych stwierdzeń: substancją są *cząstki*, a ładunek jest jedynie jedną z ich właściwości, jaką jest na przykład masa.

Tabela 22.1. Ładunki cząstek

Cząstka	Symbol	Ładunek
Elektron	e lub e^-	$-e$
Proton	p	$+e$
Neutron	n	0

Jeśli wielkość fizyczna, jak na przykład ładunek elektryczny, może przyjmować tylko wartości z dyskretnego zbioru, a nie dowolne, to mówimy, że ta wielkość jest **skwantowana**. Można na przykład znaleźć cząstkę, która wcale nie ma ładunku, albo ma ładunek $+10e$ lub $-6e$, ale nie cząstkę z ładunkiem, powiedzmy, $3,57e$.

Kwant ładunku jest mały, na przykład przez włókno zwykłej żarówki o mocy 100 W w każdej sekundzie przepływa około 10^{19} ładunków elementarnych. Ziarnistość ładunku elektrycznego nie ujawnia się więc w takich zjawiskach makroskopowych (żarówka nie mruga, gdy przepływają przez nią kolejne elektrony), podobnie jak nie można wyczuć ręką pojedynczych cząsteczek wody.

Ziarnistość ładunku elektrycznego jest odpowiedzialna za niebieską poświatę, wysyłaną przez cukierek wintergrinowy przy jego ściskaniu. Gdy w cukierku kruszone są kryształy cukru (sacharozy), jedna część każdego pękniętego kryształu ma nadmiar elektronów, a druga nadmiar jonów dodatnich. Elektrony prawie natychmiast przeskakują przez szczelinę pęknięcia, aby zobojętnić obie strony. Podczas przeskoków elektrony zderzają się wtedy z cząsteczkami azotu w powietrzu, które dostało się do szczeliny.

Zderzenia powodują, że azot wysyła promieniowanie nadfioletowe, którego nie widzimy, i światło niebieskie (z widzialnego zakresu widma), które jest jednak za słabe, aby je zaobserwować. Olejek wintergrinowy w kryształach pochłania promieniowanie nadfioletowe i natychmiast wysyła niebieskie światło, które powoduje poświatę w ustach lub szczypcach. Pokaz nie udaje się jednak, jeśli cukierek jest zwilżony śliną, gdyż przewodząca ślina zobojętnia obie części pękniętego kryształu, zanim pojawi się iskrzenie.



SPRAWDZIAN 4: Początkowo kula A ma ładunek $-50e$, a kula B ładunek $20e$. Kule są wykonane z materiału przewodzącego i mają identyczne rozmiary. Jaki będzie końcowy ładunek na kuli A po zetknięciu się kul?

Przykład 22.4

Jądro w atomie żelaza ma promień około $4 \cdot 10^{-15}$ m i zawiera 26 protonów.

a) Jaka jest wartość odpychającej siły elektrostatycznej, działającej między dwoma protonami, jeśli znajdują się one w odległości $4 \cdot 10^{-15}$ m?

ROZWIĄZANIE:

☛ Protony można traktować jako cząstki naładowane, a więc wartość siły elektrostatycznej oddziaływania jednego protonu na drugi możesz obliczyć, korzystając z prawa Coulomba. Z tabeli 22.1 wynika, że ładunek protonu wynosi $+e$. Ze wzoru (22.4) otrzymujemy:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{(8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(4 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2} = 14 \text{ N.}$$

(odpowiedź)

Byłaby to mała siła, gdyby działała na obiekt makroskopowy, na przykład melon, ale jest ogromną siłą w odniesieniu do protonu. Takie siły powinny być wystarczające, aby rozbić jądro dowolnego

pierwiastka poza wodorem (którego jądro ma tylko jeden proton). Tak się jednak nie dzieje nawet w jądrach o bardzo dużej liczbie protonów. Musi więc istnieć jakaś ogromna siła przyciągająca, przeciwstawiająca się ogromnej odpychającej sile elektrostatycznej.

b) Jaka jest wartość siły grawitacyjnej działającej między tymi dwoma protonami?

ROZWIĄZANIE:

☛ Protony są cząstkami, a więc wartość siły grawitacyjnej ich wzajemnego oddziaływania możesz obliczyć ze wzoru Newtona (22.2). Podstawiając masę protonu $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, mamy:

$$F = G \frac{m_p^2}{r^2} = \frac{(6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg})^2}{(4 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2} = 1,2 \cdot 10^{-35} \text{ N.}$$

(odpowiedź)

Wynik ten świadczy o tym, że (przyciągająca) siła grawitacyjna jest zbyt słaba, aby przeciwstawić się odpychającym siłom elektrostatycznym między protonami w jądrze. Protony są w rzeczywistości związane ogromną siłą. Oddziaływanie cząstek w jądrze

nazywamy (trafnie) *oddziaływaniem silnym*. Jest to oddziaływanie między protonami (i neutronami), gdy są one blisko siebie, jak w jądrze.

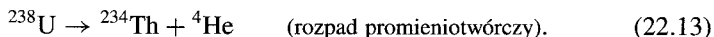
Chociaż siła grawitacyjna jest o wiele rzędów wielkości słabsza od siły elektrostatycznej, to jest ważniejsza w zjawiskach makroskopowych, ponieważ jest zawsze siłą przyciągania. Oznacza

to, że może ona skupić wiele małych ciał w ogromne ciała o wielkich masach (jak np. planety i gwiazdy), które mogą oddziaływać dużymi siłami grawitacyjnymi. Natomiast siła elektrostatyczna jest siłą odpychającą dla ładunków o tym samym znaku i dlatego nie można skupić dużych ilości dodatniego czy ujemnego ładunku, aby mogły pojawić się duże siły elektrostatyczne.

22.6. Ładunek jest zachowany

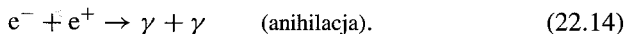
Przy pocieraniu pręta szklanego jedwabiem, na pręcie pojawia się ładunek dodatni. Pomiar wykazuje, że ujemny ładunek o takiej samej wartości bezwzględnej pojawia się na jedwabiu. Oznacza to, że przy pocieraniu ładunek nie jest wytwarzany, lecz tylko przekazywany z jednego ciała do drugiego, co narusza obojętność elektryczną każdego z nich. Tę hipotezę **zachowania ładunku** jako pierwszy postawił Benjamin Franklin. Została ona potwierdzona dokładnymi badaniami zarówno dla dużych ciał naładowanych, jak i dla atomów, jąder i cząstek elementarnych. Nigdy nie znaleziono wyjątków. Dodajemy więc ładunek elektryczny do naszej listy wielkości (zawierającej energię, pęd i moment pędu), które spełniają zasadę zachowania.

Rozpad promieniotwórczy jądra, w którym samorzutnie przekształca się ono w inne jądra, dostarcza nam wielu przykładów zachowania ładunku w zjawiskach jądrowych. Na przykład uran-238 (^{238}U), występujący w naturalnej rudzie uranu, może rozpadać się przez emisję cząstki α (która jest jądrem helu ^4He), przekształcając się w tor ^{234}Th :



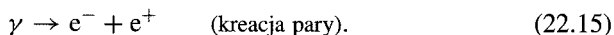
Liczba atomowa Z promieniotwórczego jądra *macierzystego* ^{238}U wynosi 92, co oznacza, że jądro zawiera 92 protony i ma ładunek $92e$. Emitowana cząstka α ma $Z = 2$, a jądro *pochodne* ^{234}Th ma $Z = 90$. Ilość ładunku przed rozpadem, $92e$, jest więc równa całkowitemu ładunkowi po rozpadzie, $90e + 2e$. Ładunek elektryczny jest zachowany.

Innym przykładem zachowania ładunku jest *proces anihilacji* elektronu e^- (o ładunku $-e$) i jego antycząstki, pozytonu e^+ (o ładunku $+e$), w którym cząstki te przekształcają się w dwa kwanty γ (promieniowania elektromagnetycznego o wielkiej energii):

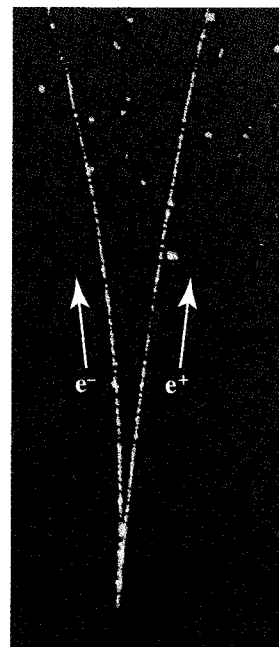


Stosując zasadę zachowania ładunku, musimy ładunki dodawać algebraicznie, uwzględniając ich znaki. W procesie anihilacji (22.14) wypadkowy ładunek układu jest równy zeru zarówno przed, jak i po anihilacji. Ładunek elektryczny jest więc zachowany.

W procesie *kreacji pary*, odwrotnym do anihilacji, ładunek jest także zachowany. W tym procesie kwant γ przekształca się w elektron i pozyton:



Na rysunku 22.9 przedstawiono proces kreacji pary w komorze pęcherzykowej. Kwant γ wpadł do komory z dołu i w pewnym punkcie przekształcił się



Rys. 22.9. Fotografia śladów, pozostawionych przez elektron i pozyton w postaci pęcherzyków w komorze pęcherzykowej. Para cząstek została wytworzona, w wyniku procesu kreacji, z kwantu γ , który wpadł do komory z dołu. Obojętny elektrycznie kwant γ nie pozostawił śladu z pęcherzyków wzdłuż swej drogi, tak jak zrobiły to elektron i pozyton

w elektron i pozyton. Nowe cząstki były naładowane, a więc podczas ruchu każda z nich zostawiła ślad z drobnych pęcherzyków. (Ślady są zakrzywione, bo w komorze włączono pole magnetyczne). Kwant γ , będąc elektrycznie obojętny, nie pozostawił śladu. Można jednak dokładnie powiedzieć, gdzie nastąpiła kreacja pary, a mianowicie w punkcie, w którym zaczynają się ślady elektronu i pozytonu.

Podsumowanie

Ładunek elektryczny Wielkość oddziaływania elektrycznego cząstki z otaczającymi ją obiektami zależy od jej **ładunku elektrycznego**, który może być dodatni lub ujemny. Ładunki o tym samym znaku odpychają się, a ładunki o przeciwnych znakach się przyciągają. Ciało z równymi ilościami dwóch rodzajów ładunku jest obojętne elektrycznie, a z niezrównoważonym ładunkiem — naładowane elektrycznie.

Przewodniki są materiałami, w których znaczna liczba cząstek naładowanych (elektronów w metalu) może poruszać się swobodnie. Naładowane cząstki w **izolatorach** nie mogą się swobodnie poruszać. Gdy ładunek porusza się w przewodzie, mówimy, że w przewodzie płynie **prąd elektryczny**.

Kulomb i amper Jednostką ładunku elektrycznego w układzie SI jest **kulomb** (C). Jest on zdefiniowany za pomocą jednostki natężenia prądu elektrycznego, ampera (A), jako ładunek przepływający przez określoną powierzchnię w ciągu 1 sekundy, jeśli natężenie prądu przepływającego przez tę powierzchnię jest równe 1 amperowi.

Prawo Coulomba Prawo Coulomba określa **siłę elektrostatyczną**, działającą między małymi (punktowymi) ładunkami elektrycznymi q_1 i q_2 , znajdującymi się w spoczynku w odległości r :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (\text{prawo Coulomba}), \quad (22.4)$$

gdzie $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ jest **przenikalnością elektryczną próżni** i $1/(4\pi\epsilon_0) = k = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.

Siła przyciągania lub odpychania, działająca między ładunkami w spoczynku, działa wzdłuż prostej, łączącej dwa ładunki. Jeśli jest ich więcej niż dwa, to wzór (22.4) jest słuszny dla każdej pary ładunków. Siłę wypadkową działającą na każdy ładunek znajdujemy, korzystając z zasady superpozycji, jako sumę wektorową sił oddziaływania wszystkich innych ładunków na dany ładunek.

Dwa twierdzenia o powłoce dla elektrostatyki są następujące:

Jednorodnie naładowana powłoka kulista przyciąga lub odpycha naładowaną cząstkę, znajdującą się na zewnątrz powłoki tak, jakby cały ładunek powłoki był skupiony w jej środku.

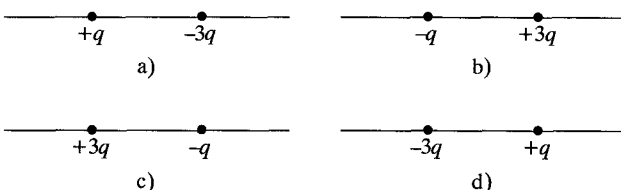
Jeśli cząstka naładowana znajduje się wewnątrz jednorodnie naładowanej powłoki kulistej, to wypadkowa siła elektrostatyczna oddziaływania powłoki na cząstkę jest równa zero.

Ładunek elementarny Ładunek elektryczny jest **skwantowany**: dowolny ładunek można zapisać jako ne , gdzie n jest dodatnią lub ujemną liczbą całkowitą, a e jest stałą fizyczną zwaną **ładunkiem elementarnym** (w przybliżeniu $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$). Ładunek elektryczny jest **zachowany**: algebraiczna suma ładunków w dowolnym odosobnionym układzie nie może ulegać zmianie.

Pytania

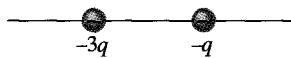
1. Czy prawo Coulomba jest słuszne dla wszystkich ciał naładowanych?
2. Cząstkę o ładunku q umieszczamy kolejno na zewnątrz następujących czterech metalowych ciał naładowanych jednorodnie ładunkiem Q : 1) dużej kuli, 2) dużej powłoki kulistej, 3) małej kuli i 4) małej powłoki kulistej. Odległość między cząstką i środkiem ciała jest taka sama, a ładunek q jest na tyle mały, że nie zmienia znacząco jednorodnego rozkładu ładunku Q . U szereguj ciała według wartości siły ich oddziaływania na cząstkę, zaczynając od największej.

3. Na rysunku 22.10 przedstawiono na osi cztery układy cząstek naładowanych. W których układach istnieje punkt na lewo od cząstek, w którym elektron będzie w stanie równowagi?



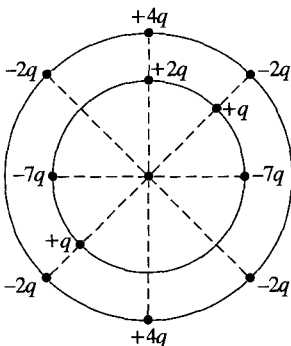
Rys. 22.10. Pytanie 3

4. Na rysunku 22.11 przedstawiono na osi dwie naładowane cząstki. Cząstki te mogą się poruszać. Istnieje jednak jeden taki punkt, że po umieszczeniu w nim trzeciej naładowanej cząstki wszystkie trzy będą w stanie równowagi. a) Czy ten punkt jest na lewo od pierwszych dwóch cząstek, czy na prawo, czy między nimi? b) Czy trzecia cząstka powinna być naładowana dodatnio, czy ujemnie? c) Czy równowaga jest trwała, czy nie-trwała?



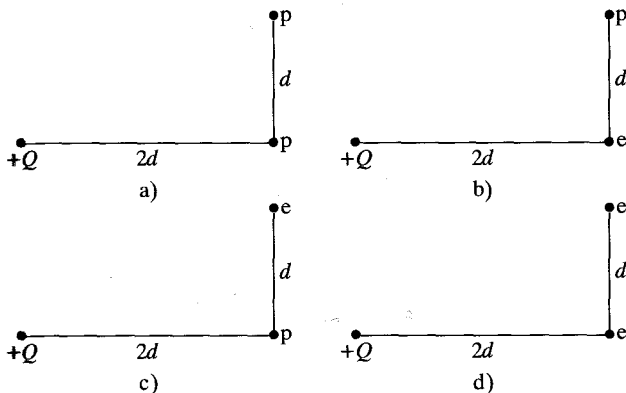
Rys. 22.11. Pytanie 4

5. Na rysunku 22.12 przedstawiono znajdującą się w środku cząstkę o ładunku $-q$, otoczoną przez dwa okręgi o promieniach r i R ($R > r$), z umieszczonymi na nich cząstkami naładowanymi. Jaka jest wartość i kierunek wypadkowej siły elektrostatycznej oddziaływania pozostałych cząstek na cząstkę środkową?



Rys. 22.12. Pytanie 5

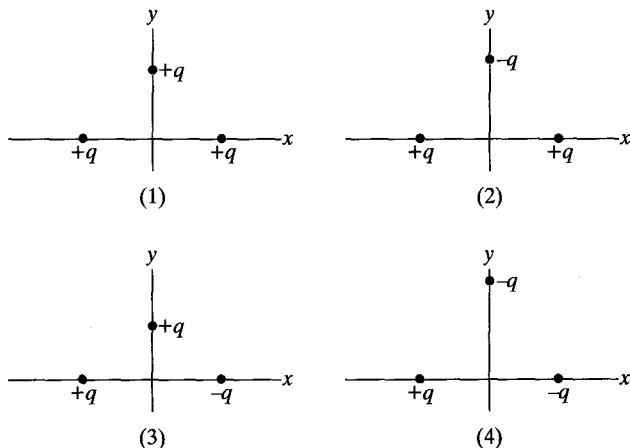
6. Na rysunku 22.13 przedstawiono cztery układy cząstek naładowanych. Uszereguj te układy według wartości wypadkowej siły elektrostatycznej, działającej na cząstkę o ładunku $+Q$, zaczynając od największej.



Rys. 22.13. Pytanie 6

7. Na rysunku 22.14 przedstawiono cztery układy cząstek o ładunku $+q$ lub $-q$, przy czym cząstki umieszczone na osi x są równoodległe od osi y . Rozważ najpierw środkową cząstkę w układzie 1; cząstka ta doznaje działania siły elektrostatycznej ze strony każdej z dwóch pozostałych cząstek. a) Czy wartości F tych sił są takie same, czy różne? b) Czy wartość siły wypadkowej działającej na środkową cząstkę jest równa $2F$, większa,

czy mniejsza od tej wartości? c) Czy składowe x tych dwóch sił dodają się, czy odejmują? d) Czy ich składowe y dodają się, czy odejmują? e) Czy kierunek siły wypadkowej działającej na środkową cząstkę odpowiada odejmowaniu się składowych, czy ich dodawaniu? f) Jaki jest kierunek tej siły wypadkowej? Rozważ teraz pozostałe układy. Jaki jest kierunek siły wypadkowej działającej na środkową cząstkę dla: g) układu 2, h) układu 3, i) układu 4. (Dla każdego układu rozważ symetrię rozkładu ładunku i określ, które składowe się dodają, a które odejmują).



Rys. 22.14. Pytanie 7

8. Dodatnio naładowana kula znajduje się w pobliżu obojętnego izolowanego przewodnika. Przewodnik zostaje uziemiony, gdy kula jest blisko przewodnika. Czy przewodnik naładowuje się dodatnio, ujemnie, czy pozostanie obojętny, jeśli: a) najpierw zabierzemy kulę, a potem usuniemy uziemienie, b) najpierw usuniemy uziemienie, a potem zabierzemy kulę?

9. a) Dodatnio naładowany pręt szklany przyciąga ciało zawieszone na nieprzewodzącej nici. Czy ciało jest na pewno naładowane ujemnie, czy tylko może być naładowane ujemnie? b) Dodatnio naładowany pręt szklany odpycha podobnie zawieszone ciało. Czy ciało jest na pewno naładowane dodatnio, czy jest tylko taka możliwość?

10. Na rysunku 22.3 przedstawiono sytuację, w której zbliżony (ujemnie naładowany) pręt plastikowy powoduje, że pewna liczba elektronów przewodnictwa w miedzi przesuwa się do bardziej odległego końca pręta miedzianego. Dlaczego przepływ elektronów przewodnictwa szybko się kończy? Przecież ogromna liczba elektronów może przesuwać się swobodnie do tego końca.

11. Osoba stojąca na elektrycznie izolowanej platformie dotyka naładowanego i elektrycznie izolowanego przewodnika. Czy przewodnik rozładuje się całkowicie?

Rozwiązanie jest dostępne na stronie internetowej pod-
ręcznika: <http://www.wiley.com/college/hrw>

Rozwiązanie jest dostępne w postaci interaktywnej,
wykorzystującej oprogramowanie Interactive Learning-
Ware (na tej samej stronie)

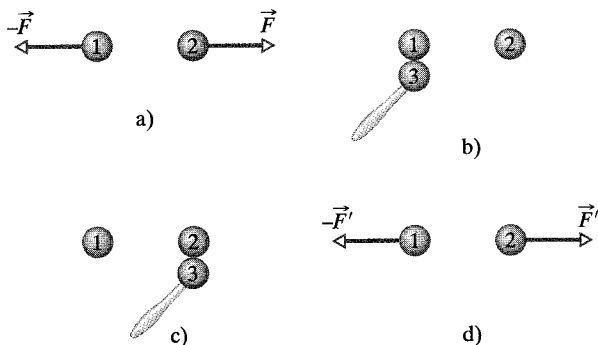
22.4. Prawo Coulomba

1. Ile wynosić musi odległość między ładunkiem punktowym $q_1 = 26 \mu\text{C}$ i ładunkiem punktowym $q_2 = -47 \mu\text{C}$, aby siła elektrostatyczna ich oddziaływania miała wartość $5,7 \text{ N}$?

2. Ładunek punktowy $+3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ jest odległy o 12 cm od drugiego ładunku punkowego $-1,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$. Oblicz wartość siły, działającej na każdy ładunek.

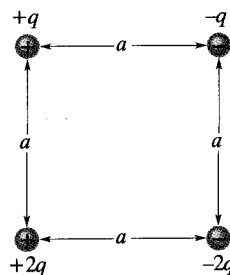
3. Dwie jednakowo naładowane cząstki, znajdujące się początkowo w spoczynku, w odległości $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, zaczęły się poruszać. Zaobserwowano, że początkowe przyspieszenie pierwszej cząstki wynosiło 7 m/s^2 , a drugiej 9 m/s^2 . Jeśli masa pierwszej cząstki wynosi $6,3 \cdot 10^{-7} \text{ kg}$, to ile wynoszą: a) masa drugiej cząstki, b) wartość ładunku każdej cząstki?

4. Identyczne izolowane kule 1 i 2 mają jednakowe ładunki i znajdują się w odległości dużej, w porównaniu z ich średnicami (rys. 22.15a). Siła elektrostatyczna oddziaływania kuli 1 na kulę 2 wynosi $\vec{F}$. Załóż teraz, że trzecia identyczna kula 3, mająca izolującą rączkę i początkowo obojętna, dotknęła najpierw kuli 1 (rys. 22.15b), potem kuli 2 (rys. 22.15c), a na koniec została usunięta (rys. 22.15d). Wyraż przez F wartość siły elektrostatycznej $\vec{F}'$, która teraz działa na kulę 2.



Rys. 22.15. Zadanie 4

5. Dla układu ładunków z rysunku 22.16 znajdź: a) poziomą, b) pionową składową wypadkowej siły elektrostatycznej, działającej na naładowaną cząstkę w dolnym lewym rogu kwadratu, jeśli $q = 1 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ i $a = 5 \text{ cm}$?

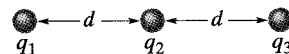


Rys. 22.16. Zadanie 5

6. Ładunki punktowe q_1 i q_2 znajdują się na osi x , odpowiednio w punktach $x = -a$ i $x = +a$. a) Jaki musi być związek między q_1 i q_2 , aby wypadkowa siła elektrostatyczna, działająca na ładunek punktowy $+Q$, umieszczony w punkcie $x = +a/2$ była równa zero? b) Powtórz (a) dla ładunku $+Q$, umieszczonego w punkcie $x = +3a/2$.

7. Dwie identyczne przewodzące kule, których środki są odległe o 50 cm , przyciągają się wzajemnie siłą elektrostatyczną o wartości $0,108 \text{ N}$. Następnie kule połączono cienkim przewodnikiem. Po usunięciu przewodnika kule odpychają się wzajemnie siłą elektrostatyczną o wartości $0,036 \text{ N}$. Ile wynosiły początkowe ładunki na kulach?

8. Na rysunku 22.17 przedstawiono trzy naładowane cząstki, leżące na linii prostej, w odległościach d od siebie. Ładunki q_1 i q_2 są unieruchomione. Ładunek q_3 może się poruszać, ale okazuje się, że jest w stanie równowagi (działająca na ten ładunek siła wypadkowa jest równa zero). Wyraż q_1 przez q_2 .



Rys. 22.17. Zadanie 8

9. Dwie cząstki (mogące się poruszać) o ładunkach $+q$ i $+4q$ znajdują się w odległości L od siebie. Trzecia cząstka została tak umieszczona, że cały układ jest w stanie równowagi. a) Znajdź położenie, wartość i znak trzeciego ładunku. b) Wykaż, że równowaga jest niestabilna.

10. Dwie unieruchomione cząstki o ładunkach $q_1 = +1 \mu\text{C}$ i $q_2 = -3 \mu\text{C}$ znajdują się w odległości 10 cm od siebie. W jakiej odległości od nich należy umieścić trzeci ładunek, aby działająca na niego wypadkowa siła elektrostatyczna była równa zero?

11. a) Jakie jednakowe ładunki dodatnie należy umieścić na Ziemi i na Księżycu, aby zrównoważyć ich przyciąganie grawitacyjne? Czy musisz znać odległość do Księżyca, aby rozwiązać to zadanie? Dlaczego? b) Ile kilogramów wodoru potrzeba, aby uzyskać ładunek dodatni, obliczony w punkcie (a)?

12. Ładunki i współrzędne dwóch cząstek naładowanych znajdujących się w płaszczyźnie xy wynoszą $q_1 = +3 \mu\text{C}$, $x_1 = 3,5 \text{ cm}$, $y_1 = 0,5 \text{ cm}$ i $q_2 = -4 \mu\text{C}$, $x_2 = -2 \text{ cm}$, $y_2 = 1,5 \text{ cm}$.

a) Znajdź wartość i kierunek siły elektrostatycznej działającej na q_2 . b) Gdzie należy umieścić trzeci ładunek $q_3 = +4 \mu\text{C}$, aby wypadkowa siła elektrostatyczna działająca na q_2 była równa zero?

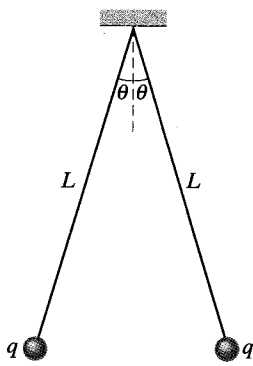
13. Pewien ładunek Q podzielono na dwie części q i $Q - q$, które rozsunięto na pewną odległość. Jakie musi być q (wyrażone za pomocą Q), aby odpychanie elektrostatyczne między tymi dwoma ładunkami było maksymalne?

14. W dwóch przeciwległych wierzchołkach kwadratu znajdują się cząstki o ładunku Q , a cząstki o ładunku q znajdują się w pozostałych wierzchołkach. a) Jaki jest związek między Q i q , jeśli wypadkowa siła elektrostatyczna działająca na każdą cząstkę o ładunku Q jest równa zero? b) Czy istnieje jakaś wartość q , dla której wypadkowa siła elektrostatyczna, działająca na każdą z czterech cząstek jest równa zero? Odpowiedź uzasadnij.

15. Na rysunku 22.18 przedstawiono dwie małe kulki przewodzące o takich samych masach m i takich samych ładunkach q , wiszące na nieprzewodzących niciach o długości L . Załóżmy, że kąt θ jest tak mały, że $\tan \theta$ można zastąpić przez $\sin \theta$. a) Wykaż, że w stanie równowagi:

$$x = \left(\frac{q^2 L}{2\pi\epsilon_0 m g} \right)^{\frac{1}{3}},$$

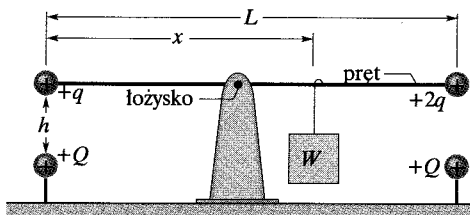
gdzie x jest odległością między kulkami. b) Jeśli $L = 120 \text{ cm}$, $m = 10 \text{ g}$ i $x = 5 \text{ cm}$, to jaką wartość ma q ?



Rys. 22.18. Zadanie 15

16. Wyjaśnij, co stanie się z kulkami z zadania 15(b), jeśli jedną z nich się rozładuje (przekazując jej ładunek q do ziemi). Znajdź nową odległość x w stanie równowagi, używając podanych wartości L , m i obliczonej wartości q .

17. Na rysunku 22.19 przedstawiono długi, nieprzewodzący pręt o znikomo małej masie i długości L , o osi obrotu w środku, zrównoważony obciążnikiem o ciężarze W , w odległości x od lewego końca pręta. Na lewym i prawym końcu pręta umocowano małe przewodzące kule o dodatnich ładunkach, równych odpowiednio



Rys. 22.19. Zadanie 17

q i $2q$. W odległości h poniżej każdej z tych kul znajduje się kula o dodatnim ładunku Q . a) Znajdź odległość x , jeśli pręt jest poziomy i w stanie równowagi. b) Jaka powinna być odległość h , aby pionowa siła działająca na łożysko, gdy pręt jest poziomy i w stanie równowagi, była równa zero?

22.5 Ładunek jest skwantowany

18. Jaka jest wartość siły elektrostatycznej działającej między pojedynczo naładowanym jonem sodu (Na^+ o ładunku $+e$) i towarzyszącym mu pojedynczo naładowanym jonem chloru (Cl^- o ładunku $-e$) w kryształach soli, jeśli ich odległość wynosi $2,82 \cdot 10^{-10} \text{ m}$?

19. Ile wynosi w kulombach całkowity ładunek 75 kg elektronów?

20. Ile megakulombów dodatniego (lub ujemnego) ładunku jest w 1 molu obojętnej cząsteczkowej wodoru (H_2)?

21. Wartość siły elektrostatycznej działającej między dwoma identycznymi jonami znajdującymi się w odległości $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ wynosi $3,7 \cdot 10^{-9} \text{ N}$. a) Ile wynosi ładunek każdego z jonów? b) Ile elektronów „brakuje” w każdym z jonów (powodując nierównowagę ładunku jonu)?

22. Środki dwóch małych, kulistych kropli wody o identycznych ładunkach $-1 \cdot 10^{-16} \text{ C}$ znajdują się w odległości 1 cm. a) Jaka jest wartość siły elektrostatycznej, działającej między nimi? b) Ile nadmiarowych elektronów powodujących ten nierównowagę ładunek znajduje się na każdej kropli?

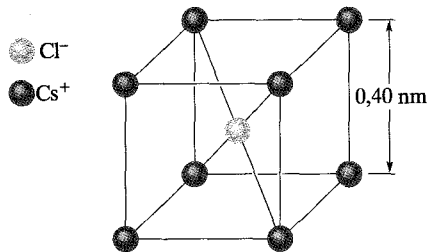
23. Ile elektronów trzeba usunąć z monety, aby uzyskała ładunek $+1 \cdot 10^{-7} \text{ C}$?

24. W próżni w pobliżu powierzchni Ziemi znajduje się elektron. Gdzie należałoby umieścić drugi elektron, aby siła elektrostatyczna działająca na pierwszy elektron równoważyła siłę grawitacyjną oddziaływania Ziemi na pierwszy elektron?

25. Atmosfera Ziemi jest stale bombardowana protonami *promieniowania kosmicznego*, które powstają gdzieś w kosmosie. Gdyby wszystkie protony przeszły przez atmosferę, to na każdy m^2 powierzchni Ziemi padałoby 1500 protonów na sekundę. Jakie byłoby natężenie takiego prądu elektrycznego, przepływającego przez całą powierzchnię planety?

26. Oblicz w kulombach ładunek dodatni, znajdujący się w 250 cm^3 , czyli w szklance, (obojętej) wody.

27. W komórce elementarnej kryształu chlorku ceszu (CsCl) jony Cs^+ zajmują wierzchołki sześcianu, a jony Cl^- znajdują się w środku sześcianu (rys. 22.20). Długość krawędzi sześcianu wynosi $0,40 \text{ nm}$. Jonom Cs^+ brakuje jednego elektronu (i stąd każdy z nich ma ładunek $+e$), a jony Cl^- mają po jednym dodatkowym elektronie (i stąd każdy z nich ma ładunek $-e$). a) Jaka jest war-



Rys. 22.20. Zadanie 27

tość wypadkowej siły elektrostatycznej oddziaływania na jon Cl^- ośmiu jonów Cs^+ , znajdujących się w wierzchołkach sześcianu?
 b) Jeśli brakuje jednego z jonów Cs^+ , to mówimy o *defekcie* kryształu. Jaka jest wartość wypadkowej siły elektrostatycznej oddziaływania na jon Cl^- siedmiu pozostałych jonów Cs^+ ?

28. Wiemy, że wartości ujemnego ładunku elektronu i dodatniego ładunku protonu są równe. Przypuśćmy jednak, że te wartości róż-

nią się od siebie o 0,0001%. Jaką siłą odpychałyby się dwie miedziane monety, znajdujące się w odległości 1 m od siebie? Załóż, że każda moneta zawiera $3 \cdot 10^{22}$ atomów miedzi. (Wskazówka: Obojętny atom miedzi zawiera 29 protonów i 29 elektronów). Jaki wynika stąd wniosek?

22.6 Ładunek jest zachowany

29. Zidentyfikuj X w następujących reakcjach jądrowych (w pierwszej n oznacza neutron): a) $^1\text{H} + ^9\text{Be} \rightarrow X + n$, b) $^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow X$, c) $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + X$. Skorzystaj z dodatku F.

Zadanie dodatkowe

30. Do zadania 13 wstaw $q = \alpha Q$. a) Wyraż wartość siły F , działającej między ładunkami, przez α , Q i odległość d między ładunkami. b) Wykreśl F w zależności od α i znajdź graficznie wartości α , które dają: c) maksymalną wartość F , d) połowę maksymalnej wartości F .