

22. Elektrický náboj

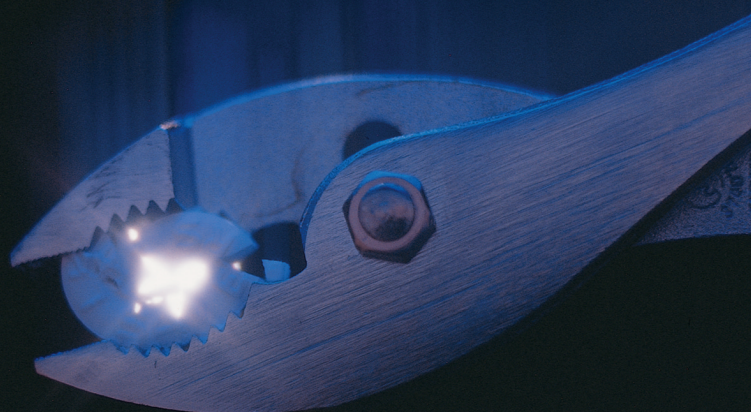
Vlastnost hmoty známá jako „elektrický náboj“.

Vlastnosti náboje:

- * druhy elektrického náboje
- * síly mezi dvěma náboji (Coulombův zákon)
- * kvantování náboje
- * zachování náboje

22

Elektrický náboj



Zavřete se s přítelem do temné komory; asi po 15 minutách si vaše oči přivyknou na tmu. Bude-li pak váš přítel kousat kostku cukru, bude kostka jiskřit. U některých tvrdých bonbonů uvidíte při každém kousnutí vystupovat z jeho úst slabé záblesky modrého světla. (Můžete také drtit kostku kleštěmi, jako je to na fotografii.) Co způsobuje tento světelný úkaz, obvykle nazývaný triboluminiscence?

22.1 ELEKTROMAGNETISMUS

Již staří Řekové věděli, že když budou třít kus jantaru, bude přitahovat kousky slámy. Tato dávná pozorování zanechala své stopy i v dnešní elektronické době — slovo **elektron** znamená řecky jantar. Řekové také pozorovali, že některé přírodní „kameny“, např. minerál magnetovec, přitahují železo.

Z těchto skromných počátků se vědy o elektřině a magnetismu rozvíjely po staletí odděleně — v podstatě až do roku 1820, kdy Hans Christian Oersted mezi nimi našel spojení: zjistil, že elektrický proud protékající vodičem vychyluje magnetickou střílku kompasu. Je zajímavé, že Oersted učinil tento objev, když si připravoval demonstrace k přednášce pro své studenty fyziky.

Novou vědu, **elektromagnetismus** (spojující elektrické a magnetické jevy), rozvíjeli dále vědci v mnoha zemích. Jedním z nejvýznamnějších byl Michael Faraday, velice nadaný experimentátor s velkou fyzikální intuicí a představitostí. Toto jeho nadání zejména vyniká, uvážíme-li, že jeho sebrané laboratorní deníky neobsahují jedinou rovnici. V polovině 19. století James Clerk Maxwell vyjádřil Faradayovy poznatky v matematické podobě, připojil řadu svých vlastních nových myšlenek a položil tak teoretické základy elektromagnetismu.

Tab. 32.1 uvádí základní zákony elektromagnetismu, nyní nazývané Maxwellovy rovnice. Přijďeme k nim postupně v následujících kapitolách, ale možná se na ně chcete podívat už teď, abyste viděli, jaký je náš cíl.

22.2 ELEKTRICKÝ NÁBOJ

Projdete-li se za suchého dne po koberci a pak přiblížíte prst ke kovové klíče u dveří, přeskočí jiskra. Televizní reklamy nás upozorňují na problém „statické přilnavosti“ oblečení (obr. 22.1). A blesk, abychom uvedli i něco velkolepého, zná každý z nás. Každý z těchto jevů je přitom projevem jen nepatrné části z obrovského množství **elektrického náboje**, jenž je obsažen v předmětech, které nás obklopují, i v našem vlastním těle. **Elektrický náboj** neboli stručně jen **náboj** je atributem (neodmyslitelnou vlastností) základních částic, z nichž se skládají objekty kolem nás; je charakteristickou vlastností, která je s těmito částicemi spojena, ať se nacházejí v jakékoli situaci.

Obrovské množství náboje si v běžných předmětech obvykle neuvědomujeme, protože předměty obsahují stejné množství *náboje* dvojího druhu: *kladného* a *záporného*. V takovém případě jsou předměty jako celek *elektricky neutrální* (předmět není nabit); to znamená, že jeho výsledný náboj je roven nule. Pokud nejsou oba typy náboje ve stejném množství, projeví se jejich rozdíl jako volný



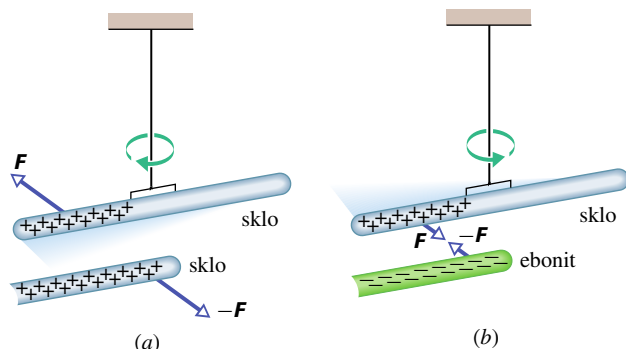
Obr. 22.1 Statická přilnavost — elektrický jev zvláště výrazný v suchých dnech — způsobuje, že se kousky papíru slepí dohromady a přilepí se k plastikovému hřebenu, že se vám šaty lepí na tělo atd.

náboj, který může interagovat s jinými předměty, a tím získáme důkaz o jeho existenci. V tom případě říkáme, že předmět je *nabitý*. Rozdíl v množství náboje je však vždy velmi malý ve srovnání s obrovským celkovým množstvím kladného a záporného náboje obsaženého v předmětu.

Nabitě předměty spolu interagují navzájem silovým působením. Abychom to ukázali, nabijeme nejprve skleněnou tyč třením jednoho jejího konce hedvábím. Při velmi těsném dotyku mezi tyčí a hedvábím se přenáší malé množství náboje z jednoho předmětu na druhý a tím se trochu naruší elektrická neutralita každého z nich. (Tyč hedvábím *třeme* jen proto, abychom dosáhli těsnějšího kontaktu a tím také většího množství přeneseného náboje. To však stále zůstává oproti celkovému náboji předmětů nepatrné.)

Zavěsme nyní nabitou tyč na vlákno, abychom ji *elektricky izolovali* od okolí; její náboj se pak nemůže měnit. Přiblížíme-li k ní druhou skleněnou tyč podobně nabitou (obr. 22.2a), obě tyče se navzájem *odpuzují*. Na každou z tyčí tedy působí síla směřující od druhé tyče. Když však třeme ebonitovou tyč kožešinou a přiblížíme ji k zavěšené skleněné tyči (obr. 22.2b), budou se obě tyče navzájem *přitahovat*. Na každou tyč tedy nyní působí síla směřující ke druhé tyči.

Tento jev můžeme vysvětlit pomocí kladného a záporného náboje. Třeme-li skleněnou tyč hedvábím, ztrácí sklo část svého záporného náboje a získá tak malý přebytek náboje kladného (reprezentovaného znaménkem plus na obr. 22.2a). Třeme-li ebonitovou tyč kožešinou, získá naopak tyč malý přebytek záporného náboje (reprezentovaného znaménkem minus na obr. 22.2b). Z našich dvou pokusů plyne:



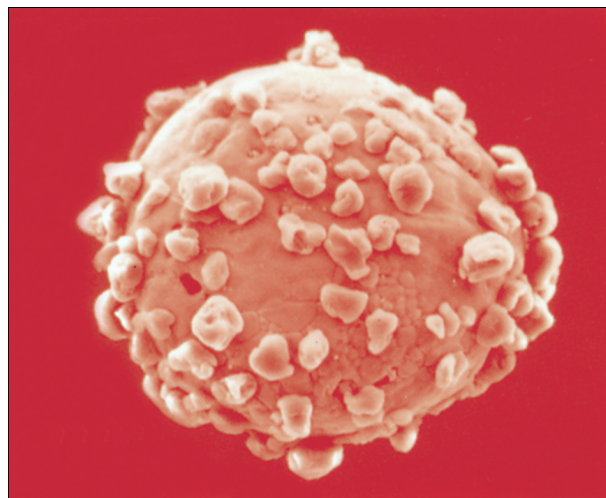
Obr. 22.2 (a) Dvě tyče nabitě souhlasnými náboji se odpuzují. (b) Dvě tyče nabitě opačnými náboji se přitahují.

Elektrické náboje téhož znaménka se odpuzují, náboje opačného znaménka se přitahují.

V čl. 22.4 vyjádříme tuto skutečnost i kvantitativně jako Coulombův zákon pro **elektrostatickou sílu** (nebo stručněji **elektrickou sílu**) mezi náboji.* Termín elektrostatická se používá pro zdůraznění toho, že náboje jsou vůči sobě v klidu nebo se navzájem pohybují jen zanedbatelnou rychlostí.

Přívlastky „kladný“ a „záporný“ a jejich přiřazení elektrickým nábojům „hedvábí“ a „kožešiny“ zvolil Benjamin Franklin, a to zcela libovolně v tom smyslu, že mohl klidně zaměnit označení nebo použít jinou dvojici protikladů pro rozlišení dvou druhů náboje. (Franklin byl světově uznávaný vědec. Dokonce se říkalo, že jeho diplomatický triumf ve Francii během americké války za nezávislost byl umožněn právě díky tomu, že byl jako vědec tak vysoce oceňován.)

Vzájemné přitahování a odpuzování nabitých těles má mnoho průmyslových aplikací, např. elektrostatické nanášení barev a naprašování, zachycování popílku v komínech, bezdotykový inkoustový tisk a fotokopírování. Obr. 22.3 ukazuje nepatrnou nosnou kuličku v xeroxovém kopírovacím stroji, pokrytou částicemi černého prášku nazývaného *toner*, které jsou k ní přitahovány elektrostatickými silami. Při kopírování jsou záporně nabitě částice toneru přetaženy z nosné kuličky na ta místa rotujícího válce, kde byl vytvořen kladně nabitý obraz kopírovaného dokumentu. Odtud jsou poté přitáhnuty na nabitý list papíru a na něj nakonec tepelně nataveny; tím se vytvoří trvanlivá kopie.



Obr. 22.3 Nosná kulička v xeroxu. Je pokryta částicemi toneru, které k ní přilnou díky elektrostatickému přitahování. Průměr kuličky je asi 0,3 mm.

22.3 VODIČE A NEVODIČE

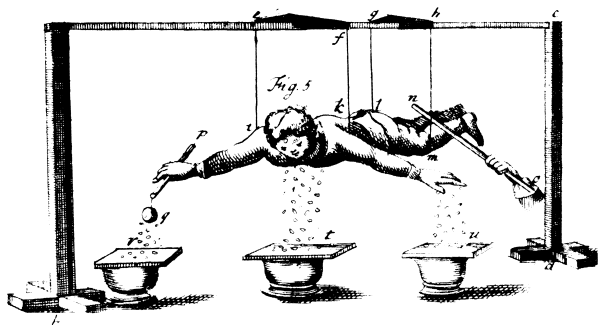
V některých látkách (např. v kovech, v pitné vodě, v lidském těle) se může část jejich náboje pohybovat značně volně. Takové látky nazýváme **vodiče**. V jiných látkách (např. ve skle, v destilované vodě, v ebonitu a vůbec ve většině umělých hmot) se nemůže volně pohybovat prakticky žádný náboj. Tyto látky nazýváme **nevodiče** (též **izolátory**, **dielektrika**). To, co se jeví při mikroskopickém popisu jako *uspořádaný pohyb náboje* látkou, je právě to, čemu říkáme v makroskopickém popisu **elektrický proud**.

Třete-li měděnou tyč vlnou a přitom ji držíte v ruce, nebudete schopni ji nabít, protože vy i tyč jste vodiče. Tření vytvoří nerovnováhu náboje na tyči, ale přebytečný náboj je okamžitě odveden z tyče vašim tělem do podlahy (která je spojena se zemským povrchem) a na tyči žádný přebytečný náboj nezůstane.

Uzemnit předmět znamená vytvořit vodivou cestu mezi ním a zemským povrchem. *Vybít* předmět znamená jej zneutralizovat, tj. vyrovnat jakoukoli cestou množství kladného a záporného náboje, který na něm je. (Obr. 22.4 ukazuje poněkud bizarní způsob vybíjení.) Když tyč držíme nikoli přímo v ruce, ale za držadlo z izolátoru, přerušíme vodivou cestu k zemi a tyč pak můžeme třením nabít.

Vlastnosti vodičů a nevodičů jsou podmíněny strukturou a elektrickou podstatou *atomů*. Atomy se skládají z kladně nabitých *protonů*, záporně nabitých *elektronů* a elektricky neutrálních *neutronů*. Protony a neutrony jsou těsně vázány v *jádře* atomů; prozatím nám bude stačit představa, že elektrony obíhají na jistých dráhách (orbitách) kolem jádra.

* Elektrický náboj je vždy vázán na látkovou částici, často však kvůli stručnosti hovoříme jen o nábojích, o působení mezi náboji atp.



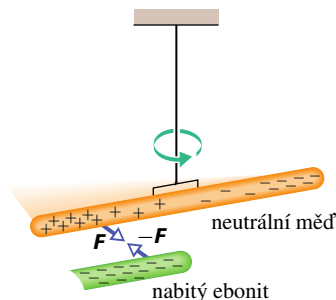
Obr. 22.4 Toto není akrobatický kousek, ale seriózní experiment, provedený v roce 1774 jako důkaz, že lidské tělo vede elektrický proud. Historický lept ukazuje nevodivými provazy přivázaného člověka, který je nabíjen dotykem nabitě tyče (tyč se pravděpodobně dotýkala přímo těla, nikoli kalhot). Když člověk přiblížil obličej, levou ruku nebo tyč s vodivou koulí v pravé ruce ke kovovým deskám, elektrické jiskry přeskakující vzduchem ho vybily.

Náboje elektronu a protonu mají stejnou velikost, ale opačné znaménko, proto elektricky neutrální atom musí obsahovat stejný počet elektronů a protonů. Elektrony se drží poblíž jádra, protože mají elektrický náboj opačného znaménka než protony v jádře a jsou tedy k jádru přitahovány.

Když se seskupí atomy vodiče (např. mědi), aby vytvořily tuhé těleso, pak některé z jejich vnějších (tedy nejméně přitahovaných) elektronů už nejsou vázány k jednotlivým atomům, uvolní se od nich a pohybují se víceméně volně uvnitř celého tělesa, zanechávajíce na místě kladně nabitě zbytky atomů — *kladné ionty*. Tyto pohyblivé elektrony se nazývají *vodivostní*. V kovech je jich velmi mnoho, zatímco v nevodících je vodivostních elektronů velmi málo.

Pokus na obr. 22.5 demonstruje pohyblivost náboje ve vodiči. Záporně nabitá ebonitová tyč bude přitahovat libovolný konec izolované neutrální měděné tyče. Vodivostní elektrony v bližším konci měděné tyče jsou odpuzovány záporným nábojem ebonitové tyče. Pohybují se ke vzdálenějšímu konci měděné tyče a způsobují tak v jejím bližším konci nedostatek elektronů a tím převažující kladný náboj. Tento kladný náboj je přitahován k zápornému náboji ebonitové tyče. Ačkoli měděná tyč jako celek zůstává neutrální, říkáme, že má *indukovaný náboj*; část jejích kladných a záporných nábojů se navzájem oddělila v důsledku přiblížení jiného náboje. Jakmile se tyto náboje od sebe oddálí, budou i od okolních předmětů různě vzdáleny a budou na ně proto působit různě velkými silami; tento rozdíl již můžeme zjistit.

Podobně, přiblížíme-li kladně nabitou skleněnou tyč k jednomu konci neutrální měděné tyče, vodivostní elek-



Obr. 22.5 Neutrální měděná tyč je elektricky izolována od okolí zavěšením na nevodivé vlákno. Každý z obou konců tyče může být přitahován nabitým ebonitem. Vodivostní elektrony z blízké části měděné tyče jsou záporným nábojem ebonitu odpuzovány k jejímu vzdálenějšímu konci a tím v uprázdňené části převáží kladný náboj jader. Záporný náboj ebonitu pak přitahuje kladný náboj na bližším konci měděné tyče a odpuzuje záporný náboj na vzdálenějším; proto se měděná tyč přitáhne k ebonitu.

trony v měděné tyči jsou k tomuto konci přitahovány. Tento konec se nabije záporně a opačný konec kladně, tj. v měděné tyči se opět vytvoří indukovaný náboj. Ačkoli měděná tyč zůstává jako celek neutrální, přitahuje se k nabitě skleněné tyči.

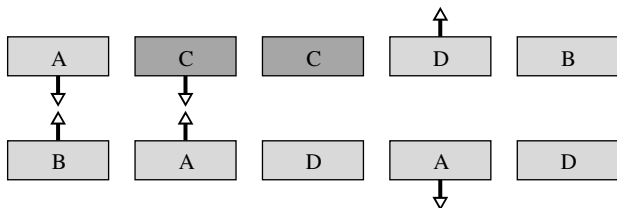
Poznamenejme, že v kovech se mohou pohybovat pouze vodivostní elektrony*; kladné ionty tvořící mřížku kovu zůstávají na místě. Předměty se tedy nabíjejí kladně pouze díky *odvedení části záporných nábojů*.

Polovodiče (např. křemík a germanium) jsou látky, které mají vlastnosti mezi vodiči a izolátory. Revoluce mikroelektroniky, která tolik změnila naše životy, byla možná jen díky přístrojům zkonstruovaným z polovodičových materiálů. V kap. 42 se budeme polovodičům věnovat podrobněji.

Běžné materiály (i ty nejlepší vodiče jako stříbro nebo měď) vždy brání toku náboje, který jimi prochází; mají vždy nenulový odpor. Existují však **supravodiče** nazývané tak proto, že nekladou pohybu elektrického náboje vůbec *žádný* odpor. Pokud vytvoříme v supravodivém prstenci proud, bude jím procházet beze změny stále, aniž by jej bylo potřeba udržovat baterií nebo jiným zdrojem energie.

* V nekovových vodičích (jako jsou roztoky a taveniny solí, ionizované plyny, plazma) se pohybují celé atomy či molekuly, obohacené o elektrony či ochuzené o ně, tedy fakticky se pohybují částice nabitě kladně i záporně.

KONTROLA 1: Obrázek ukazuje pět dvojic desek: A, B, D jsou nabití ebonitové desky a C je elektricky neutrální měděná deska. Elektrostatické síly působící mezi nimi jsou naznačeny pro tři dvojice. Určete, zda se desky ve zbývajících dvojicích budou přitahovat, nebo odpuzovat.

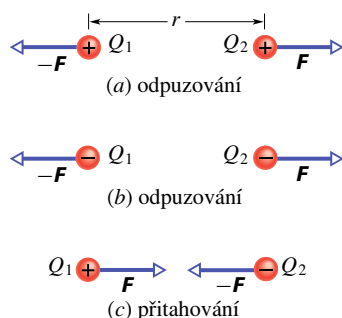


22.4 COULOMBŮV ZÁKON

Uvažujme dvě nabitá tělíska zanedbatelných rozměrů — dvě nabití částice (nazývané **bodové náboje**). Nechť jsou jejich náboje Q_1 a Q_2 a jejich vzdálenost r . **Elektrostatická síla** působící mezi nimi, přitažlivá nebo odpuzivá, má velikost

$$F = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} \quad (\text{Coulombův zákon}), \quad (22.1)$$

kde k je konstanta. Každá částice působí silou této velikosti na druhou částici; tyto dvě síly jsou silami akce a reakce. Jestliže se částice navzájem *odpuzují*, směřuje síla působící na každou částici směrem *od té druhé* (obr. 22.6a, b). Jestliže se navzájem *přitahují*, působí na každou částici síla směřující *ke druhé* částici (obr. 22.6c).



Obr. 22.6 Dvě nabití částice ve vzdálenosti r se navzájem odpuzují, jestliže jejich náboje jsou (a) oba kladné nebo (b) oba záporné. (c) Přitahují se, mají-li náboje opačného znaménka. V každém z těchto případů je síla působící na jednu částici stejně velká jako síla působící na druhou částici, ale směřuje opačným směrem.

Rov. (22.1) se nazývá **Coulombův zákon** podle francouzského fyzika Charlese Augustina Coulomba, který jej v roce 1785 formuloval na základě svých měření. Všimněte si, že má stejný tvar jako Newtonův gravitační zákon (14.1) pro přitažlivou sílu mezi dvěma částicemi s hmotnostmi m_1 a m_2 , jejichž vzdálenost je r :

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

kde G je gravitační konstanta. Konstantu k v rov. (22.1) bychom mohli v analogii s gravitační konstantou G v rovnici (22.2) nazvat „elektrostatická konstanta“. Obě rovnice vyjadřují „zákon převrácených čtverců“, v němž síla klesá se čtvercem vzdálenosti mezi interagujícími částicemi. Oba zákony se liší tím, že gravitační síly jsou vždy přitažlivé, zatímco elektrostatické síly mohou být jak přitažlivé, tak odpuzivé podle toho, jaká jsou znaménka obou nábojů. Existuje totiž jen jeden druh hmotnosti (žádný známý objekt nemá zápornou hmotnost), ale jsou dva druhy náboje (proto jsou v rov. (22.1) potřebné absolutní hodnoty, zatímco v rov. (22.2) nikoli).

Coulombův zákon byl doposud potvrzen všemi pokusy, a to s vynikající přesností. Platí dokonce i uvnitř atomu: popisuje správně sílu mezi kladně nabitým jádrem a každým ze záporně nabitých elektronů, ačkoli klasická Newtonova mechanika v této oblasti selhává a musí být nahrazena kvantovou fyzikou. Tento jednoduchý zákon také správně popisuje síly, kterými se navzájem vážou atomy při vytváření molekul, a rovněž síly, kterými jsou vzájemně vázány atomy a molekuly v pevných látkách a kapalinách.

Elektrický náboj je jednou ze základních fyzikálních veličin. Z praktických důvodů (vzhledem k možnostem měření) však jednotka náboje v soustavě SI není jednotkou základní, ale odvozenou, a to z jednotky elektrického proudu — ampéru (A). Jednotkou náboje v soustavě SI je **coulomb** (C): 1 coulomb je množství náboje, které projde průřezem vodiče za 1 sekundu, protéká-li jím proud 1 ampéru. V čl. 30.2 popíšeme, jak je ampér definován experimentálně. Obecně můžeme psát

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

kde dQ (v coulombech) je náboj přenesený proudem I (v ampérech) za časový interval dt (v sekundách).

Coulombův zákon zapisujeme v SI ve tvaru

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} \quad (\text{Coulombův zákon}). \quad (22.4)$$

Konstanta v rov. (22.1) má hodnotu

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

Veličina ε_0 , nazývaná **permitivita vakua** nebo též **elektrická konstanta**, vystupuje někdy v rovnicích samostatně. Její hodnota je

$$\varepsilon_0 \doteq 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (22.6)$$

(Jak uvidíme v čl. 34.2 v rov. (34.3), je číselná hodnota $\{\varepsilon_0\}$ spojena s číselnou hodnotou rychlosti $\{c\}$ světla ve vakuu vztahem $\{\varepsilon_0\} = 1/(4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \{c\}^2)$.)

Další paralelou mezi gravitační a elektrostatickou silou je platnost **principu superpozice** (čl. 14.3). Máme-li n nabíjených částic, je síla působící na libovolnou z nich (označme ji částice 1) dána vektorovým součtem

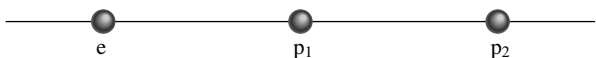
$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14} + \dots + \mathbf{F}_{1n}, \quad (22.7)$$

kde např. \mathbf{F}_{14} je síla působící na částici 1 v důsledku existence částice 4. Stejný vztah platí pro gravitační sílu (čl. 14.3).

Rovněž oba slupkové teoremy, které nám byly tak užitečné při studiu gravitace, mají svou analogii v elektrostaticce (a zdůvodníme je v čl. 24.9):

1. Kulová slupka nabitá rovnoměrně rozloženým nábojem přitahuje nebo odpuzuje nabitě částice stejně, jako kdyby veškerý náboj slupky byl soustředěn v jejím středu.
2. Kulová slupka nabitá rovnoměrně rozloženým nábojem nepůsobí žádnou elektrostatickou silou na nabitě částice umístěné uvnitř (v dutině) slupky.

KONTROLA 2: Obrázek zobrazuje dva protony (p_1, p_2) a jeden elektron (e) ležící na přímce. Jaký je směr (a) elektrostatické síly, kterou působí e na p_1 , (b) elektrostatické síly, kterou působí p_2 na p_1 , (c) výsledné elektrostatické síly, která působí na p_1 ?



PŘÍKLAD 22.1

Na obr. 22.7a jsou dvě částice v klidu: první s nábojem $Q_1 = 8Q$ ($Q > 0$) leží v počátku osy x a druhá s nábojem $Q_2 = -2Q$ ve vzdálenosti $x = d$. Do kterého bodu musíme umístit proton (jinam než do nekonečna) tak, aby byl v rovnováze (tj., aby výslednice sil, které na něj působí, byla nulová)? Je tato rovnováha stabilní, nebo nestabilní?

ŘEŠENÍ: Je-li \mathbf{F}_1 síla, kterou na proton působí náboj Q_1 , a \mathbf{F}_2 síla, kterou působí na proton náboj Q_2 , pak v hledaném bodě musí platit $\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = \mathbf{0}$, tj.

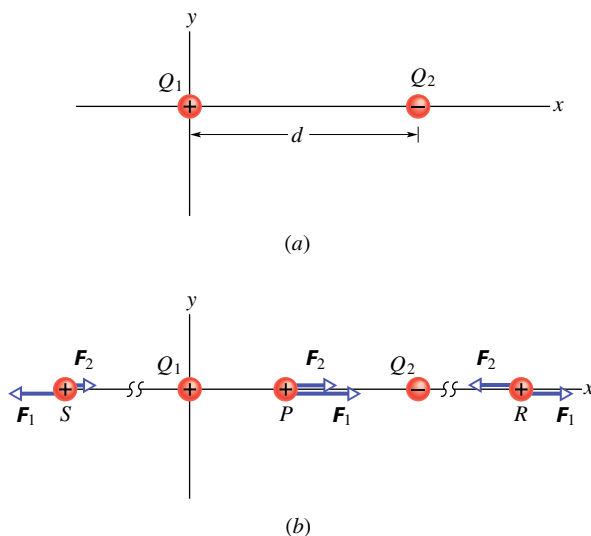
$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2. \quad (22.8)$$

Síly působící na proton v hledaném bodě musí mít tedy stejnou velikost,

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

stejný směr a opačnou orientaci.

Proton má kladný náboj, má tedy stejné znaménko jako Q_1 , a síla \mathbf{F}_1 působící na proton musí tedy směřovat od náboje Q_1 . Proton a částice s nábojem Q_2 mají opačná znaménka, takže síla \mathbf{F}_2 působící na proton směřuje k náboji Q_2 . Síly \mathbf{F}_1 a \mathbf{F}_2 mohou mít opačné směry jen tehdy, leží-li proton na ose x .



Obr. 22.7 Příklad 22.1. (a) Dvě částice s náboji Q_1 a Q_2 jsou v klidu na ose x ve vzdálenosti d . (b) Tři možné polohy S, P, R protonu. V každém bodě působí na proton elektrostatická síla \mathbf{F}_1 buzená nábojem Q_1 a elektrostatická síla \mathbf{F}_2 buzená nábojem Q_2 .

Je-li proton na ose x v libovolném bodě mezi Q_1 a Q_2 (např. v bodě P na obr. 22.7b), pak mají síly \mathbf{F}_1 a \mathbf{F}_2 směr stejný a nikoli opačný, jak požadujeme. Je-li proton v libovolném bodě na ose x vlevo od Q_1 (např. v bodě S na obr. 22.7b), pak síly \mathbf{F}_1 a \mathbf{F}_2 mají opačné směry. Z rov. (22.4) ovšem plyne, že síly \mathbf{F}_1 a \mathbf{F}_2 nemohou mít stejnou velikost: F_1 je větší než F_2 , protože F_1 vzniká působením bližšího náboje (menší r) větší velikosti ($8Q$ proti $2Q$).

Je-li konečně proton v libovolném bodě na ose x vpravo od náboje Q_2 (např. v bodě R), pak $x > d$ a síly \mathbf{F}_1 a \mathbf{F}_2 mají opět opačný směr. Protože je nyní větší náboj (Q_1) dále od protonu než náboj menší, existuje bod, ve kterém si velikosti sil F_1 a F_2 jsou rovny. Nechť x je jeho souřadnice a Q_p náboj protonu. Dosazením z rov. (22.4) do rov. (22.9) dostaneme

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{8Q Q_p}{x^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{2Q Q_p}{(x-d)^2}. \quad (22.10)$$

(Všimněte si, že v rov. (22.10) vystupuje jen velikost nábojů.) Úpravou rov. (22.10) získáme

$$\frac{(x-d)^2}{x^2} = \frac{1}{4}.$$

Odmocněním obou stran získáme

$$\frac{x-d}{x} = \pm \frac{1}{2}$$

a odtud (protože $x > d$)

$$x = 2d. \quad (\text{Odpověď})$$

Rovnováha v bodě $x = 2d$ je nestabilní. (Lze dokonce dokázat tzv. *Earnshawovu větu*: Žádná elektrostatická soustava nábojů se neudrží ve *stabilní* rovnováze pouze elektrickými silami.) Jestliže je proton vychýlen doleva od bodu R , pak velikosti obou sil F_1 i F_2 narůstají, ale F_2 narůstá rychleji (protože Q_2 je blíže než Q_1) a výsledná síla bude posunovat proton dále doleva. Je-li proton vychýlen doprava, velikosti obou sil F_1 a F_2 klesají, ale F_2 klesá více, takže výsledná síla posunuje proton dále doprava. Ve stabilní rovnováze se proton při každém malém vychýlení vrací zpět do rovnovážné polohy.

PŘÍKLAD 22.2

Obr. 22.8a představuje uspořádání šesti nabitých částic, kde $a = 2,0 \text{ cm}$ a úhel $\theta = 30^\circ$. Všechny šest částic má náboj stejné velikosti $Q = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$; znaménka nábojů jsou vyznačena. Jaká je výsledná elektrostatická síla \mathbf{F}_1 , kterou na náboj Q_1 působí ostatní náboje?

ŘEŠENÍ: Z rov. (22.7) víme, že \mathbf{F}_1 je vektorovým součtem sil \mathbf{F}_{12} , \mathbf{F}_{13} , \mathbf{F}_{14} , \mathbf{F}_{15} a \mathbf{F}_{16} , což jsou elektrostatické síly, kterými na Q_1 působí ostatní náboje. Protože Q_2 a Q_4 mají stejnou velikost a oba jsou ve vzdálenosti $r = 2a$ od náboje Q_1 , dostáváme z rov. (22.4)

$$F_{12} = F_{14} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{(2a)^2}. \quad (22.11)$$

A obdobně, protože Q_3 , Q_5 a Q_6 mají stejnou velikost a jsou stejně vzdáleny ($r = a$) od náboje Q_1 , dostáváme

$$F_{13} = F_{15} = F_{16} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_3|}{a^2}. \quad (22.12)$$

Na obr. 22.8b jsou znázorněny síly, které působí na náboj Q_1 (silový diagram podle kap. 5). Z něho a z rovnice (22.11) je vidět, že síly \mathbf{F}_{12} a \mathbf{F}_{14} mají stejnou velikost, ale opačný směr, takže se navzájem vruší. Z obr. 22.8b a z rov. (22.12) dále plyne, že y -ové složky sil \mathbf{F}_{13} a \mathbf{F}_{15} se také ruší a že jejich x -ové složky mají stejnou velikost a obě jsou záporné. Z obr. 22.8b také plyne, že síla \mathbf{F}_{16} má směr osy x ; síla \mathbf{F}_1 musí tedy být rovnoběžná s osou x ; její velikost je rovna rozdílu mezi velikostí F_{16} a dvojnásobkem velikosti x -ové

složky síly \mathbf{F}_{13} :

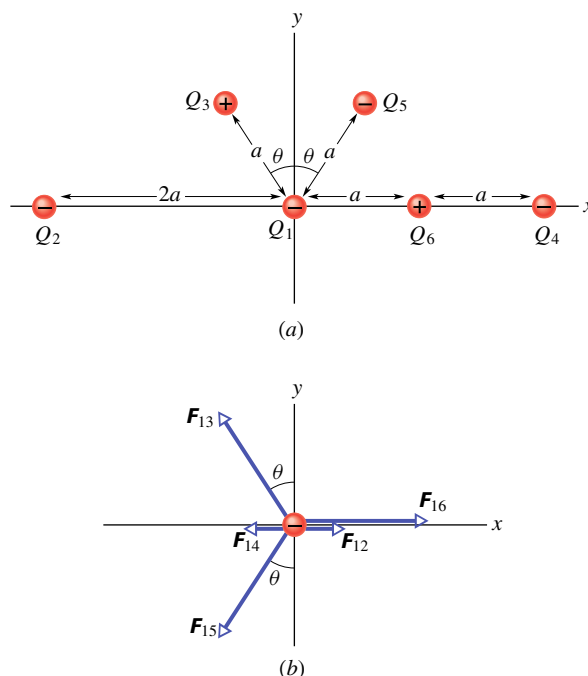
$$\begin{aligned} F_1 &= F_{16} - 2F_{13} \sin \theta = \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_6|}{a^2} - \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_3|}{a^2} \sin \theta. \end{aligned}$$

Dosadíme $Q_3 = Q_6$ a $\theta = 30^\circ$:

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_6|}{a^2} - \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_6|}{a^2} \sin 30^\circ = 0.$$

(Odpověď)

Všimněte si, že přítomnost Q_6 na spojnici mezi náboji Q_1 a Q_4 neovlivní elektrostatickou sílu, kterou působí náboj Q_4 na Q_1 .



Obr. 22.8 Příklad 22.2. (a) Uspořádání šesti nabitých částic. (b) Elektrostatické síly, kterými působí ostatních pět nábojů na Q_1 .

RADY A NÁMĚTY

Bod 22.1: Symetrie

V př. 22.2 jsme využili symetrie ke zjednodušení výpočtů potřebných k řešení. Protože Q_2 a Q_4 jsou umístěny symetricky vzhledem ke Q_1 a síly \mathbf{F}_{12} a \mathbf{F}_{14} se tedy ruší, nebylo třeba tyto síly počítat. Protože y -ové složky \mathbf{F}_{13} a \mathbf{F}_{15} se ruší a jejich x -ové složky jsou stejné a sčítají se, ušetřili jsme si další námahu.

Bod 22.2: Zakreslení vektorů elektrostatických sil

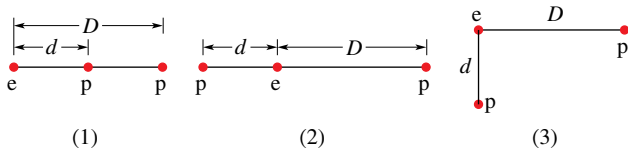
Je-li zadáno rozložení nabitých částic (obr. 22.8a) a našim úkolem je najít výslednou elektrostatickou sílu působící na

jednu z nich, sestrojíme obvykle silový diagram zobrazující pouze uvažovanou částici a síly, které na ni působí (obr. 22.8b). Pokud místo toho zakreslujeme síly přímo do zadaného diagramu zobrazujícího všechny částice, zakreslujeme je vždy s počátečním nebo koncovým bodem v místě uvažované částice.

Bod 22.3: Symboly pro náboje

Pokud znaménko náboje není slovy specifikováno, symbol Q může znamenat jak náboj kladný, tak záporný. Naproti tomu označení $+Q$ (nebo např. také $+3Q$) vyjadřuje náboj kladný a označení $-Q$ (nebo např. také $-3Q$) náboj záporný.

KONTROLA 3: Obrázek ukazuje tři různá uspořádání jednoho elektronu e a dvou protonů p . (a) Seřadte uspořádání sestupně podle velikosti výsledné elektrostatické síly, kterou na elektron působí oba protony. (b) Je v případě (3) úhel mezi výslednou silou působící na elektron a úsečkou d menší, nebo větší než 45° ?



Koule A získává záporný náboj, je stále méně kladně nabitá. Protože jsou koule stejné, musí nakonec získat stejný náboj. Přenos náboje proto skončí, když nadbytečný náboj na kouli B vzroste na $+Q/2$ a nadbytečný náboj na kouli A klesne na $+Q/2$ (obr. 22.9c).

Můžeme předpokládat, že po odstranění drátu nenaruší náboj na jedné kouli rovnoměrnost rozložení náboje na druhé kouli, protože koule jsou malé vzhledem ke své vzájemné vzdálenosti. Můžeme tedy použít první slupkový teorém. Z rov. (22.4) s $Q_1 = Q_2 = Q/2$ a $r = a$ plyne pro velikost elektrostatické síly mezi koulemi

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

Koule se nyní navzájem odpuzují, protože jsou obě kladně nabitě.

(b) Předpokládejme nyní, že je koule A na okamžik uzemněna, a pak je uzemnění přerušeno. Jaká je nyní elektrostatická síla mezi koulemi?

ŘEŠENÍ: Uzemnění dovolí elektronům s celkovým nábojem $-Q/2$ přesunout se (ze země) na kouli A (obr. 22.9d) a neutralizovat ji (obr. 22.9e). Není-li na kouli A žádný volný náboj, pak mezi koulemi nepůsobí žádná elektrostatická síla (tak jako na počátku na obr. 22.9a).

PŘÍKLAD 22.3

Na obr. 22.9a jsou dvě stejné osamocené elektricky izolované vodivé koule A, B. Vzdálenost a jejich středů je velká vzhledem k poloměřům koulí. Koule A má kladný náboj $+Q$, koule B je elektricky neutrální. Na počátku nepůsobí mezi koulemi žádná elektrostatická síla.

(a) Předpokládejme, že koule jsou na okamžik spojeny vodivým drátem. Drát je dostatečně tenký, aby bylo možno zanedbat jeho výsledný náboj. Jaká je elektrostatická síla působící mezi koulemi, je-li drát odstraněn?

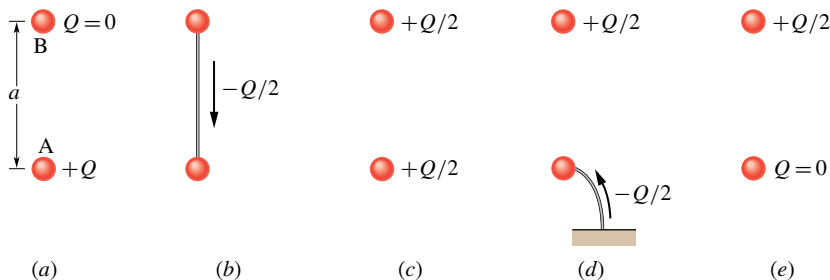
ŘEŠENÍ: Když jsou koule spojeny drátem, jsou vodivostní elektrony z koule B přitahovány kladným nábojem koule A (obr. 22.9b). Koule B ztrácí záporný náboj a nabíjí se kladně.

22.5 KVANTOVÁNÍ NÁBOJE

V dobách Benjamina Franklina byl elektrický náboj považován za spojitou tekutinu („fluidum“, podobně jako teplo, světlo apod.); tato myšlenka byla v mnoha případech užitečná. Dnes však již víme, že i samotné tekutiny (jako vzduch, voda) nejsou spojité, ale jsou tvořeny atomy a molekulami; hmota je rozložena diskrétně. Experimenty ukazují, že ani „elektrická tekutina“ není spojitá, ale je tvořena násobky jistého elementárního náboje. Libovolný kladný nebo záporný náboj Q , který můžeme naměřit, může tedy mít hodnotu jenom

$$Q = ne, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \quad (22.13)$$

Obr. 22.9 Příklad 22.3. Dvě malé vodivé koule A a B. (a) Na počátku je koule A nabitá kladně. (b) Vodivým spojením je mezi koulemi přenesen záporný náboj. (c) Obě koule jsou nyní nabitě kladně. (d) Uzemňujícím vodičem je na kouli A přenesen záporný náboj. (e) Koule A je nyní neutrální.



kde e je **elementární náboj**, který má hodnotu

$$e \doteq 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C.} \quad (22.14)$$

Elementární náboj e je jednou z důležitých fyzikálních konstant. Elektron a proton mají náboj o velikosti e (tab. 22.1). (Kvarky — částice tvořící neutrony a protony — mají náboje $\pm e/3$ nebo $\pm 2e/3$, ale nemohou být detegovány samostatně. Proto jejich náboje nepovažujeme za elementární.)

Tabulka 22.1 Náboje tří částic

ČÁSTICE	ZNAČKA	NÁBOJ
elektron	e^- (nebo jen e)	$-e$
proton	p	$+e$
neutron	n	0

Často se můžete setkat s větami jako: „náboj na kouli“, „množství přeneseného náboje“, „náboj nesený elektrodem“, z nichž by se zdálo, že náboj je nějaký objekt, látka. (Taková tvrzení se objevila i v této kapitole.) Elektrický náboj však neexistuje sám o sobě, ale je vždy vázán na hmotné částice. Je to fyzikální veličina, podobně jako např. hmotnost nebo spin.

Pokud nějaká fyzikální veličina nemůže nabývat libovolné hodnoty, ale pouze hodnot diskrétních (nespojitéch), říkáme, že je kvantována. Už víme, že hmotnost, energie, moment hybnosti jsou kvantovány; elektrický náboj je další takovou fyzikální veličinou. Můžeme například najít částici, která nemá vůbec žádný náboj, nebo má náboj $+10e$, nebo $-6e$, ale nenajdeme částici s nábojem, řekněme, $3,57e$.

Kvantem náboje je elementární náboj e ; je velmi malý. Pro ilustraci: svítí-li 100 W žárovka, vstupuje do ní každou sekundu zhruba 10^{19} elementárních nábojů a stejné množství ji opouští. „Zrnitost“ elektřiny se při tak velkém počtu neprojevuje, stejně jako nepocítíme rukou ve vodě jednotlivé molekuly.

„Zrnitost“ elektřiny můžeme také přičíst modré záblesky (jev triboluminiscence), které emituje kostka cukru z úvodu kapitoly, je-li drcena. Když se rozlomí krystaly cukru, jedna část každého porušeného krystalu má přebytek elektronů, zatímco druhá část má přebytek kladných iontů. Téměř okamžitě elektrony a ionty přeskočí trhlinu v porušeném krystalu, a tak se obě strany neutralizují. Během přeskočení se elektrony a ionty srážejí s molekulami dusíku obsaženého ve vzduchu, který proudí do trhliny. V důsledku srážek emituje dusík ultrafialové záření, které je neviditelné, a velmi slabé modré světlo (z viditelné oblasti spektra), které vidíme jako slabé jiskření. Aromatický olej z některých bonbonů absorbuje ultrafialové světlo a emituje následně dostatek modrého světla, které osvětlí ústa nebo

čelisti kleští. Je-li však bonbon zvlhčen slinami, pokus se nezdaří, protože vodivé sliny neutralizují obě části porušeného krystalu ještě dříve, než by se mohly objevit jiskry.

KONTROLA 4: Koule A má na začátku pokusu náboj $-50e$ a koule B náboj $+20e$. Obě jsou vyrobeny z vodivého materiálu a stejně velké. Jaký bude výsledný náboj na kouli A poté, co se navzájem dotknou?

PŘÍKLAD 22.4

Elektricky neutrální měděná mince o hmotnosti $m = 3,11 \text{ g}$ obsahuje stejné množství kladného a záporného náboje.

(a) Jaká je velikost Q celkového kladného (nebo záporného) náboje obsaženého v minci?

ŘEŠENÍ: Neutrální atom má záporný náboj o velikosti Ze , představovaný jeho elektrony, a kladný náboj o stejné velikosti, představovaný protony v jádře; Z je atomové číslo uvažovaného prvku. Pro měď je $Z = 29$ (dodatek F), tj. atom mědi má 29 protonů, a je-li elektricky neutrální, také 29 elektronů.

Náboj velikosti Q , který hledáme, je roven NZe , kde N je počet atomů v minci. Určíme ho tak, že násobíme počet molů mědi v minci počtem atomů obsažených v jednom molu (Avogadrova konstanta $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$). Počet molů mědi v minci je m/m_m , kde $m_m = 63,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ je molární hmotnost mědi (dodatek F). Je tedy

$$N = N_A \frac{m}{m_m} = (6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \frac{(3,11 \text{ g})}{(63,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1})} = 2,95 \cdot 10^{22}.$$

Velikost celkového kladného nebo záporného náboje v minci je pak

$$\begin{aligned} Q &= NZe = \\ &= (2,95 \cdot 10^{22})(29)(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}) = \\ &= 137\,000 \text{ C.} \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

To je obrovský náboj. Z kap. 25 vyplyne, že tento náboj by centimetrovou kuličku nabil na nepředstavitelné napětí 10^{17} V . Pro srovnání: Třete-li ebonitovou tyč kožešinou, můžete na tyč přemístit stěží náboj o velikosti 10^{-9} C .

(b) Předpokládejme, že kladný a záporný náboj v minci by mohly být soustředěny do dvou oddělených „balíčků“ vzdálených 100 m. Jak velká přitažlivá síla by působila na každý balíček?

ŘEŠENÍ: Z Coulombova zákona (22.4) plyne

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{r^2} = \\ &= (8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}) \frac{(1,37 \cdot 10^5 \text{ C})^2}{(100 \text{ m})^2} = \\ &= 1,69 \cdot 10^{16} \text{ N.} \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

Na „balíčky“ by tedy působila síla odpovídající váze tělesa o hmotnosti skoro $2 \cdot 10^{12}$ tun. Dokonce i kdyby náboje byly ve vzdálenosti poloměru Země, přitažlivá síla by byla stále ještě obrovská; odpovídala by váze 426tunového závaží. Proto je také nemožné výrazně porušit elektrickou neutralitu. Pokud se pokusíme odstranit z tělesa větší část náboje jednoho znaménka, vzniká velká elektrostatická síla, která se ho snaží přitáhnout zpět.

PŘÍKLAD 22.5

Jádro atomu železa má poloměr asi $4,0 \cdot 10^{-15}$ m a obsahuje 26 protonů.

(a) Jak velká je odpudivá elektrostatická síla mezi dvěma protony, které jsou ve vzdálenosti $4,0 \cdot 10^{-15}$ m?

ŘEŠENÍ: Z rov. (22.4) a tab. 22.1 plyne

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \\ &= \frac{(8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2})(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(4,0 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2} = \\ &= 14 \text{ N}. \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

Účinek této síly by byl zanedbatelný, pokud by působila třeba na meloun, ale je obrovský, pokud působí na proton. Tak velké síly by musely roztrhnout na kousky jádro každého prvku (kromě jádra atomu vodíku, které obsahuje jen jediný proton). To se ale nestane, dokonce ani v jádrech s velkým počtem protonů. Musí tedy existovat nějaká přitažlivá jaderná síla, která tak velkou odpudivou elektrostatickou sílu překoná.

(b) Jaká je velikost gravitační síly, kterou na sebe působí tyto dva protony?

ŘEŠENÍ: Hmotnost protonu je $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Vztah (22.2) pro gravitační sílu pak dává

$$\begin{aligned} F &= G \frac{m_p^2}{r^2} = \\ &= \frac{(6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2})(1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg})^2}{(4,0 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2} = \\ &= 1,2 \cdot 10^{-35} \text{ N}. \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

Z tohoto výsledku je vidět, že (přitažlivá) gravitační síla je příliš slabá na to, aby mohla překonat odpudivé elektrostatické síly působící mezi protony v jádře. Protony jsou však navzájem vázány obrovskou přitažlivou silou způsobenou *silnou interakcí*. Ta se však výrazně projevuje jen tehdy, pokud jsou částice velmi blízko u sebe (jak je tomu v jádře atomu).

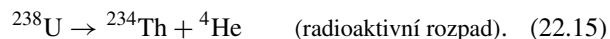
Ačkoli je gravitační síla mnohonásobně slabší než síla elektrostatická, je důležitější ve velkých měřítkách. Protože je vždy přitažlivá, může se velmi mnoho malých těles spojit do těles s obrovskými hmotnostmi, jako jsou planety a hvězdy, které vyvolávají obrovské gravitační síly. Na druhé straně,

elektrostatická síla je pro náboje stejného znaménka odpudivá, nemůže tedy spojit samotné kladné nebo samotné záporné náboje do velkých objektů, které by pak mohly působit navenek velkými elektrostatickými silami.

22.6 ZACHOVÁNÍ NÁBOJE

Třeme-li skleněnou tyč hedvábím, objeví se na tyči kladný náboj. Z měření plyne, že se na hedvábí objeví záporný náboj stejné velikosti. Třením se tedy náboj nevytváří, ale jen přerozděluje — převádí z jednoho tělesa na druhé a porušuje se tak původní elektrická neutralita obou těles. Tato hypotéza o **zachování náboje** byla poprvé vyslovena Benjaminem Franklinem a byla mnohokrát ověřena jak pro makroskopická nabitá tělesa, tak i pro atomy, jádra a elementární částice. Proto patří elektrický náboj k veličinám (energie, hybnost, momentu hybnost, hmotnost), pro něž platí v izolovaných systémech zákon zachování.

Radioaktivní rozpad jádra, při němž se jádro spontánně přemění na jádro jiného typu, nám dává mnoho příkladů zachování elektrického náboje. Například uran 238 (^{238}U) se může přeměnit na α -částici (tj. heliové jádro ^4He) a thorium (^{234}Th):



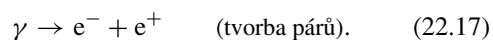
Radioaktivní *mateřské* jádro ^{238}U má atomové číslo $Z = 92$, tj. jádro obsahuje 92 protonů a má náboj $92e$. Emitovaná α -částice má $Z = 2$ a *deceřiné* jádro ^{234}Th má $Z = 90$. Náboj před rozpadem je $92e$, celkový náboj po rozpadu je $90e + 2e$. Náboj se zachovává.

Jiným příkladem zachování náboje je *anihilace* elektronu e^- (jehož náboj je $-e$) a jeho antičástice pozitronu e^+ (jehož náboj je $+e$), při níž vznikají dva fotony γ -záření.



Při použití zákona zachování náboje musíme náboje počítat algebraicky, tj. s ohledem na jejich znaménka. V anihilačním procesu rov. (22.16) je celkový náboj systému nulový před i po procesu. Náboj se opět zachovává.

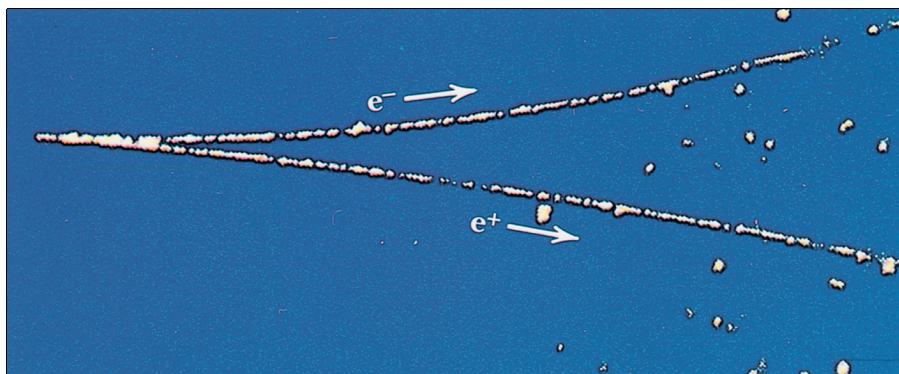
Při *tvorbě elektron-pozitronových párů* (opačný proces k anihilaci) se náboj také zachovává. V tomto procesu se γ -kvantum přemění na elektron a pozitron:



Obr. 22.10 ukazuje takovou tvorbu párů v bublinkové komoře. Záření γ vstupuje do komory zleva v přímém směru

a v určitém místě se přemění na elektron a pozitron. Protože tyto nové částice jsou nabité a pohybují se, zanechávají za sebou stopu drobných bublinek. Stopy jsou zakřivené, protože v komoře je magnetické pole (kap. 29.5). Záření γ ,

které nemá náboj, nezanechává žádnou stopu. Můžeme tedy určit, kde přesně došlo k vytvoření páru: bylo to ve špičce vidlice tvaru V , kde začínají stopy elektronu a pozitronu.



Obr. 22.10 Fotografie stop, které zanechaly v bublinkové komoře elektron e^- a pozitron e^+ . Dvojice částic vznikla z γ -záření, které vniklo do komory zleva. Protože γ -záření nemá náboj, nezanechává žádnou stopu podél své dráhy (na rozdíl od elektronu a pozitronu). Stopy jsou tvořeny nepatrnými bublinkami vzniklými v přehřáté kapalině.

PŘEHLED & SHRNU TÍ

Elektrický náboj

Elektrická interakce těles (makroskopických i mikroskopických) je dána jejich *elektrickým nábojem*; ten může být kladný nebo záporný. Náboje stejného znaménka se vzájemně odpuzují, náboje opačného znaménka se přitahují. Těleso se stejným množstvím obou druhů náboje je elektricky neutrální. Těleso, ve kterém náboj není v rovnováze, je elektricky nabitě.

Vodiče a nevodíče

Vodiče jsou látky, ve kterých se může volně pohybovat velmi mnoho nabitých částic (elektrony v kovech). V *nevodících* (izolátorech) se nabitě částice nemohou volně pohybovat. Pohybují-li se nabitě částice látkou převážně určitým směrem (probíhá-li usměrněný pohyb nosičů náboje), říkáme, že látkou *protéká elektrický proud*.

Coulomb a ampér

Jednotkou náboje v SI je coulomb (C). Je definován pomocí jednotky elektrického proudu, ampéru (A), jako náboj, který projde průřezem vodiče za dobu 1 sekundy, když vodičem prochází stálý proud o velikosti 1 ampéru.

Coulombův zákon

Coulombův zákon popisuje elektrostatickou sílu působící mezi dvěma bodovými elektrickými náboji Q_1 a Q_2 , které jsou v klidu

a jejichž vzdálenost je r :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} \quad (\text{Coulombův zákon}). \quad (22.4)$$

Zde $\epsilon_0 \doteq 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ je *permitivita vakua* neboli *elektrická konstanta*; $1/(4\pi\epsilon_0) \doteq 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.

Přitažlivá nebo odpuzivá síla mezi bodovými náboji v klidu působí ve spojnici obou nábojů. Jestliže uvažujeme více než dva náboje, platí rov. (22.4) pro každou dvojici nábojů. Výsledná síla působící na každý náboj je dána *principem superpozice* jako vektorový součet sil, kterými na náboj působí všechny ostatní přítomné náboje.

Dále platí dva slupkové teoremy elektrostatiky:

Slupka s rovnoměrně rozloženým nábojem přitahuje nebo odpuzuje nabitou částici vně slupky tak, jako by veškerý náboj slupky byl soustředěn v jejím středu.

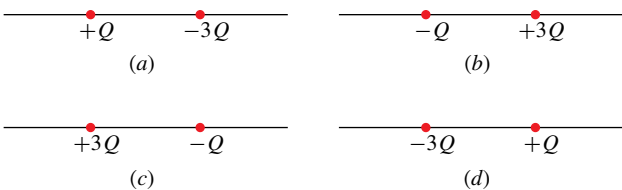
Slupka s rovnoměrně rozloženým nábojem nepůsobí žádnou elektrickou silou na nabitou částici, která se nachází uvnitř (v dutině) slupky.

Elementární náboj

Elektrický náboj je *kvantován*. Každý náboj může být vyjádřen součinem ne , kde n je kladné nebo záporné celé číslo a e je fyzikální konstanta nazývaná *elementární náboj* (je rovna přibližně $1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$). Elektrický náboj se zachovává: celkový náboj libovolného izolovaného systému se nemění při libovolných procesech v něm probíhajících.

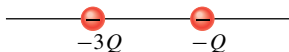
OTÁZKY

1. Platí Coulombův zákon pro všechny nabitě objekty?
2. Částice s nábojem Q_1 je umístěna vně vodivého tělesa s rovnoměrně rozloženým nábojem Q . Těleso je (1) velká plná koule, (2) velká kulová slupka, (3) malá plná koule, (4) malá kulová slupka. Vzdálenost mezi částicí a středem tělesa je ve všech případech stejná, Q_1 je dostatečně malé, aby prakticky neovlivnilo rovnoměrné rozložení náboje Q . Seřadte tělesa sestupně podle velikosti elektrostatické síly, kterou působí na částici.
3. Obr. 22.11 ukazuje čtyři uspořádání dvou nabitých částic. Ve kterém případě existuje vlevo od nich bod, do kterého můžeme umístit elektron tak, že bude v rovnováze?



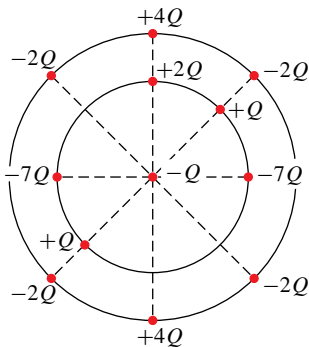
Obr. 22.11 Otázka 3

4. Na obrázku 22.12 jsou dvě nabitě částice, které se mohou volně pohybovat. Víme, že existuje bod, kam můžeme umístit třetí částici tak, aby všechny tři částice byly v rovnováze. (a) Leží tento bod vlevo od obou původních částic, vpravo od nich, nebo mezi nimi? (b) Má mít třetí částice kladný, nebo záporný náboj? (c) Je rovnováha stabilní, nebo nestabilní?



Obr. 22.12 Otázka 4

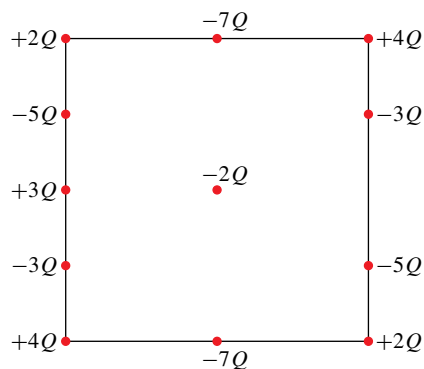
5. Na obr. ke kontrole 2 jsou na ose pevně umístěny dva protony a jeden elektron. Kam bychom měli na ose umístit čtvrtou nabitou částici tak, aby výsledná elektrostatická síla, kterou na ni působí první tři částice, byla nulová? Je to vlevo od prvních tří částic, vpravo od nich, mezi protony, nebo mezi elektronem a jemu bližším protonem?
6. Na obr. 22.13 je centrální částice s nábojem $-Q$ obklopená



Obr. 22.13 Otázka 6

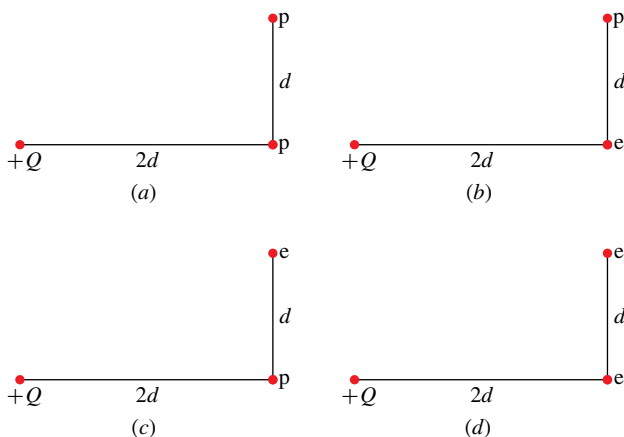
dvěma soustřednými kružnicemi s poloměry r a R , $R > r$. Na kružnicích jsou rozmístěny nabitě částice. Jakou velikost a směr má výsledná elektrostatická síla, kterou na centrální částici působí ostatní částice?

7. Na obr. 22.14 je centrální částice s nábojem $-2Q$ obklopena nabitými částicemi rozmístěnými po obvodu čtverce ve vzdálenostech d nebo $d/2$. Jakou velikost a směr má výsledná elektrostatická síla, kterou na centrální částici působí ostatní částice?



Obr. 22.14 Otázka 7

8. Na obr. 22.15 jsou čtyři uspořádání nabitých částic: protonu, elektronu a náboje $+Q$. Seřadte tato uspořádání sestupně podle velikosti výsledné elektrostatické síly působící na částici s nábojem $+Q$.

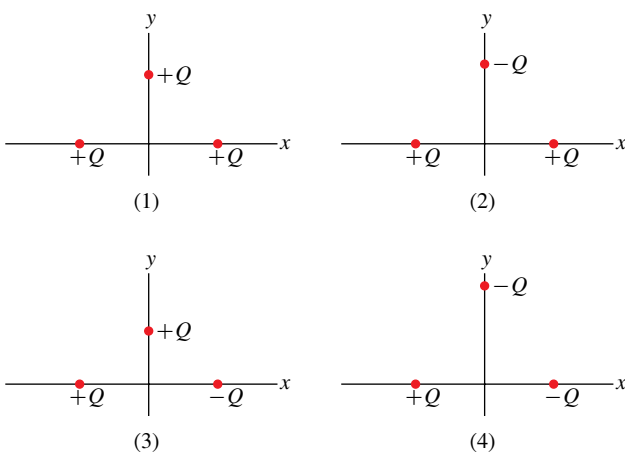


Obr. 22.15 Otázka 8

9. Na obr. 22.16 jsou čtyři uspořádání tří částic s náboji $+Q$ a $-Q$. Částice na ose x jsou stejně vzdáleny od osy y . Nejprve uvažujme prostřední částici v případě (1); každá z ostatních dvou částic na ni působí elektrostatickou silou. (a) Jsou velikosti těchto sil stejné, nebo rozdílné? (b) Je velikost výsledné síly působící na prostřední částici stejně velká, větší, nebo menší než součet

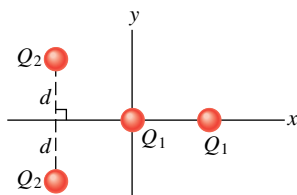
velikostí sil od obou částic? (c) Vyuší se x -ové složky obou sil? (d) Vyuší se y -ové složky obou sil? (e) Jaký směr má výsledná síla působící na prostřední částici?

Nyní uvažujme zbývající případy: Jaký je směr výsledné síly působící na prostřední částici (f) v případě (2), (g) v případě (3), (h) v případě (4)?



Obr. 22.16 Otázka 9

10. Na obr. 22.17 jsou dvě částice s nábojem Q_1 a jiné dvě částice s nábojem Q_2 . Částice v počátku se může volně pohybovat, ostatní částice jsou nepohyblivé. Určete, zda Q_2 je kladné, nebo záporné, má-li být výsledná síla působící na volnou částici nulová v případě, že Q_1 je (a) kladné, (b) záporné.



Obr. 22.17 Otázka 10

11. Čtyři stejné vodivé koule A, B, C, D mají náboje $-8,0Q$, $-6,0Q$, $-4,0Q$, $+8,0Q$. Které z nich je třeba vodivě spojit (tenkým vodičem), aby vznikly útvary s nábojem (a) $-2,0Q$, (b) $-2,5Q$? (c) Jakým spojením vzniknou dvě koule s nábojem $-3,0Q$?

12. Kladně nabitou kouli přiblížíme k izolovanému neutrálnímu vodiči. Vodič uzemníme. Určete, je-li nabit kladně, záporně, nebo je neutrální, jestliže (a) nejprve vzdálíme kouli a pak pře-

rušíme uzemnění, (b) nejprve přerušíme uzemnění a kouli pak vzdálíme?

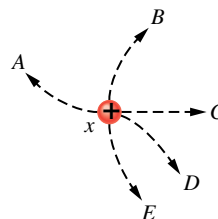
13. Vedle kladně nabitě skleněné tyče visí na nevodivém vlákně tělísko. (a) Tyč tělísko přitahuje. Znamená to nutně, že je tělísko záporně nabitě? (b) Tyč a tělísko se odpuzují. Je nutně tělísko nabitě kladně?

14. Máte k dispozici dvě stejné neutrální vodivé koule A, B, kterými můžete pohybovat po nevodivé podložce, dále tenký vodič a skleněnou tyč, kterou můžete třít hedvábím. Vodičem smíte spojit koule navzájem nebo spojit jednu kouli s podlahou. Tyčí se nesmíte dotknout žádné z koulí. Jak můžete koule nabít nábojem (a) stejné velikosti a stejného znaménka, (b) stejné velikosti a opačného znaménka?

15. V jednoduchém modelu atomu helia obíhají dva elektrony kolem jádra skládajícího se ze dvou protonů. Je velikost síly, kterou na jádro působí jeden z elektronů, větší, menší, nebo stejně velká vzhledem k velikosti síly, kterou působí jádro na tento elektron?

16. Záporně nabitá ebonitová tyč na obr. 22.5 způsobí, že se některé z vodivostních elektronů v měděné tyči pohybují k jejímu vzdálenějšímu konci. Proč proud vodivostních elektronů rychle ustane? V tyči je přece velké množství vodivostních elektronů, které se mohou ke vzdálenějšímu konci pohybovat.

17. Na obr. 22.18 jsou tři malé koule, které mají náboje o stejné velikosti a jsou v klidu na dokonale hladké ploše. Koule y a z jsou pevně umístěny ve stejné vzdálenosti od koule x. Po které z pěti naznačených trajektorií se bude pohybovat koule x, jestliže ji uvolníme z klidu?



Obr. 22.18 Otázka 17

18. Člověk, stojící na elektricky izolované plošině, se dotkne nabitěho, elektricky izolovaného vodiče. Bude tím vodič zcela vybit?

CVIČENÍ & ÚLOHY

ODST. 22.4 Coulombův zákon

1C. Při zpětném úderu typického blesku protéká výbojovým kanálem proud $2,5 \cdot 10^4$ A po dobu $20 \mu\text{s}$. Jak velký náboj přitom proteče kanálem?

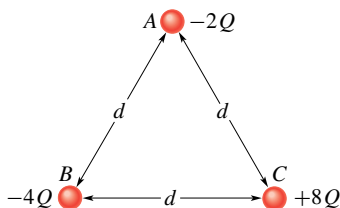
2C. Jaká elektrostatická síla působí mezi dvěma bodovými náboji o velikosti $1,00$ C, jsou-li vzdáleny (a) $1,00$ m, (b) $1,00$ km?

3C. Bodový náboj $+3,00 \cdot 10^{-6}$ C je ve vzdálenosti $12,0$ cm od druhého bodového náboje $-1,50 \cdot 10^{-6}$ C. Vypočítejte velikost síly působící na každý náboj.

4C. Jaká musí být vzdálenost mezi dvěma bodovými náboji $Q_1 = 26,0 \cdot 10^{-6}$ C a $Q_2 = -47,0 \cdot 10^{-6}$ C, aby elektrostatická síla, která mezi nimi působí, měla velikost $5,70$ N?

5C. Dvě pohyblivé částice nabitě souhlasným nábojem stejné velikosti, jsou původně od sebe vzdálené $3,2 \cdot 10^{-3}$ m. Počáteční zrychlení první částice je $7,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, zrychlení druhé částice je $9,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Je-li hmotnost první částice $6,3 \cdot 10^{-7}$ kg, jaká je (a) hmotnost druhé částice, (b) velikost náboje každé z částic?

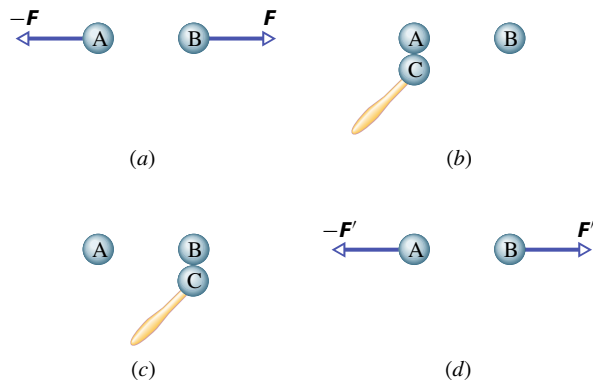
6C. Na obr. 22.19 leží ve vrcholech rovnostranného trojúhelníka se stranou délky d tři stejné vodivé koule A, B, C, jejichž počáteční náboje jsou $-2Q$, $-4Q$, $+8Q$. (a) Jaká je velikost elektrostatické síly, která působí mezi koulemi A a C? Pak proběhnou následující procesy: A a B jsou spojeny tenkým vodičem a pak rozpojeny; B je uzemněna vodičem a pak je vodič odstraněn; B a C jsou spojeny vodičem a pak rozpojeny. Jaká bude nyní velikost elektrostatické síly (b) mezi koulemi A a C, (c) mezi koulemi B a C?



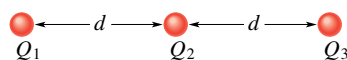
Obr. 22.19 Cvičení 6

7C. Dvě stejné vodivé koule (A) a (B) mají stejný náboj a jejich vzdálenost je mnohem větší než jejich průměr (obr. 22.20a). Elektrostatická síla, kterou působí koule (A) na kouli (B), je F . Uvažujme nyní třetí, stejnou a na počátku neutrální kouli (C) s nevodivým držadlem. Nejprve se s ní dotkne koule (A) (obr. 22.20b), potom koule (B) (obr. 22.20c) a pak ji odstraníme (obr. 22.20d). Pomocí původní síly F vyjádřete elektrostatickou sílu F' , která nyní působí na kouli (B).

8Ú. Na obr. 22.21 leží na téže přímce tři nabitě částice ve vzdálenostech d . Náboje Q_1 a Q_2 jsou pevné. Náboj Q_3 se může volně pohybovat, ale je v rovnováze (výslednice elektrostatických sil, které na něj působí, je nulová). Vyjádřete náboj Q_1 prostřednictvím náboje Q_2 .

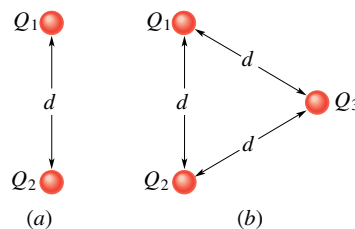


Obr. 22.20 Cvičení 7



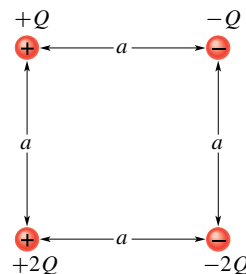
Obr. 22.21 Úloha 8

9Ú. Na obr. 22.22a jsou ve vzdálenosti d dva náboje Q_1 a Q_2 . (a) Jaká je velikost elektrostatické síly, která působí na Q_1 ? Předpokládejme, že $Q_1 = Q_2 = 20,0 \cdot 10^{-6}$ C a $d = 1,50$ m. (b) Přidáme třetí náboj $Q_3 = 20,0 \cdot 10^{-6}$ C podle obr. 22.22b. Jaká je nyní velikost elektrostatické síly, která působí na Q_1 ?



Obr. 22.22 Úloha 9

10Ú. Na obr. 22.23 určete, jaká je vodorovná a svislá složka výsledné elektrostatické síly, která působí na náboj v levém dolním rohu čtverce, je-li $Q = 1,0 \cdot 10^{-7}$ C a $a = 5,0$ cm?



Obr. 22.23 Úloha 10

11Ú. Náboje Q_1 a Q_2 leží na ose x v bodech $x = -a$ a $x = +a$. (a) Jaký musí být poměr Q_1/Q_2 , aby výsledná elektrostatická

síla, která působí na náboj $+Q$ umístěný v bodě $x = +a/2$, byla nulová? (b) Proveďte totéž pro náboj $+Q$, jestliže je umístěn v bodě $x = +3a/2$.

12Ú. Dvě malé kladně nabitě koule mají celkový náboj $5,0 \cdot 10^{-5}$ C. Jaký je náboj na každé z nich, odpuzují-li se elektrostatickou silou velikosti 1,0 N ve vzdálenosti 2,0 m?

13Ú. Dvě stejné vodivé koule, umístěné pevně ve vzdálenosti 50,0 cm, se přitahují elektrostatickou silou 0,108 N. Spojíme je vodičem. Po odstranění vodiče se koule odpuzují silou 0,0360 N. Jaké byly původní náboje na koulích?

14Ú. Dvě pevné částice s náboji $Q_1 = +1,0 \cdot 10^{-6}$ C a $Q_2 = -3,0 \cdot 10^{-6}$ C jsou ve vzdálenosti 10 cm. Jak daleko od každé z nich by měl být umístěn třetí náboj, aby výsledná elektrostatická síla, která na něj působí, byla nulová?

15Ú. Náboje a souřadnice dvou nabitých částic, pevně umístěných v rovině xy , jsou: $Q_1 = +3,0 \cdot 10^{-6}$ C, $x_1 = 3,5$ cm, $y_1 = 0,50$ cm; $Q_2 = -4,0 \cdot 10^{-6}$ C, $x_2 = -2,0$ cm, $y_2 = 1,5$ cm. (a) Určete velikost a směr elektrostatické síly působící na náboj Q_2 . (b) Kam umístíte třetí náboj $Q_3 = +4,0 \cdot 10^{-6}$ C, aby výsledná elektrostatická síla působící na Q_2 , byla nulová?

16Ú. Dva volně pohyblivé bodové náboje $+Q$ a $+4Q$ jsou ve vzdálenosti d . Třetí náboj je umístěn tak, že je systém v rovnováze. (a) Určete polohu, velikost a znaménko třetího náboje. (b) Ukažte, že rovnováha systému je nestabilní.

17Ú. (a) Jaký kladný náboj by musel být umístěn na Zemi i na Měsíci, aby se vykompenzovala jejich gravitační přitažlivost? Potřebujeme k řešení znát vzdálenost Země od Měsíce? Proč ano, nebo proč ne? (b) Kolik tisíc kilogramů vodíku by bylo potřeba rozštěpit na protony a elektrony pro vytvoření kladného náboje spočítaného v případě (a)?

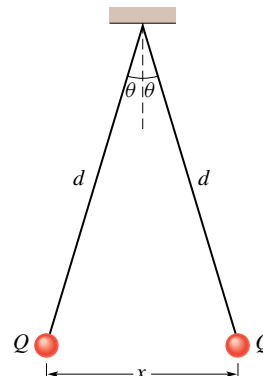
18Ú. Náboj Q je rozdělen na dvě části Q_1 a $Q - Q_1$, které jsou pak od sebe odděleny do určité vzdálenosti. Jaké musí být Q_1 vzhledem ke Q , aby elektrostatické odpuzování mezi náboji bylo maximální?

19Ú. V každém ze dvou protilehlých vrcholů čtverce je pevně umístěn náboj Q_1 , v každém z druhých dvou protilehlých vrcholů je umístěn náboj Q_2 . (a) Vyjádřete Q_1 prostřednictvím Q_2 v případě, že výsledná elektrostatická síla působící na každý náboj Q_1 je nulová. (b) Existuje taková hodnota Q_2 , pro kterou by výsledná elektrostatická síla působící na každý ze čtyř nábojů byla nulová? Vysvětlete.

20Ú. Na obr. 22.24 jsou dvě malé vodivé kuličky o stejné hmotnosti m a stejném náboji Q zavěšené na nevodivých závěsech o délce d . Předpokládejme, že úhel θ je tak malý, že přibližně platí $\tan \theta = \sin \theta$. (a) Ukažte, že v rovnováze je vzdálenost mezi kuličkami

$$x = \left(\frac{Q^2 d}{2\pi\epsilon_0 m g} \right)^{1/3}.$$

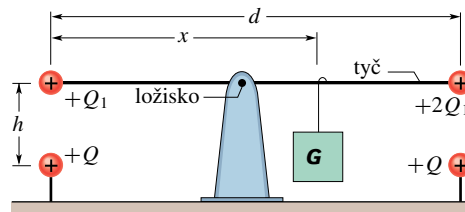
(b) Jaká je hodnota Q , je-li $d = 120$ cm, $m = 10$ g, $x = 5,0$ cm?



Obr. 22.24 Úloha 20

21Ú. Vysvětlete, co se stane s kuličkami z úlohy 20b, bude-li jedna z nich vybita. Najděte novou rovnovážnou vzdálenost x s užitím daných hodnot d a m a vypočítané hodnoty Q .

22Ú. Na obr. 22.25 je nevodivá tyč délky d zanedbatelné hmotnosti, otočná kolem svého středu. Na obou koncích tyče jsou připevněny malé vodivé koule zanedbatelných hmotností s kladnými náboji Q_1 a $2Q_2$. Tyč je vyvážena závažím G dle obrázku. Ve vzdálenosti h přímo pod každou z koulí je pevně umístěna koule s kladným nábojem Q . (a) Určete vzdálenost x , pro niž je tyč vodorovná a je v rovnováze. (b) Pro jakou hodnotu h bude tyč v rovnováze a nebude přitom vůbec zatěžovat čep, na němž je upevněna?



Obr. 22.25 Úloha 22

ODST. 22.5 Kvantování náboje

23C. Jaká je velikost elektrostatické síly mezi iontem sodíku Na^+ s nábojem $+e$ a sousedním iontem chloru Cl^- s nábojem $-e$ v krystalu soli, je-li jejich vzdálenost $2,82 \cdot 10^{-10}$ m?

24C. Neutron se skládá z jednoho kvarku „up“ s nábojem $+2e/3$ a dvou kvarků „down“, každý s nábojem $-e/3$. Jaká je velikost elektrostatické síly, kterou na sebe působí kvarky „down“, jsou-li v neutronu od sebe vzdáleny $2,6 \cdot 10^{-15}$ m?

25C. Jaký celkový náboj v coulombech by mělo 75,0 kg elektronů?

26C. Kolik megacoulombů kladného (resp. záporného) náboje je obsaženo v 1 molu neutrálního molekulárního vodíkového plynu (H_2)?

27C. Dva stejné ionty ve vzdálenosti $5,0 \cdot 10^{-10}$ m se odpuzují silou velikosti $3,7 \cdot 10^{-9}$ N. (a) Jaký je náboj každého iontu? (b) O kolikamocné ionty jde?

28C. (a) Kolik elektronů bychom museli odstranit z mince uvažované v př. 22.4, aby měla náboj $+1,0 \cdot 10^{-7}$ C? (b) Jaké části elektronů obsažených v minci to odpovídá?

29C. Vzdálenost středů dvou malých kulových vodních kapek se stejným nábojem $-1,0 \cdot 10^{-16}$ C je 1,0 cm. (a) Jaká je velikost elektrostatické síly působící mezi kapkami? (b) Kolik přebytečných elektronů způsobujících nerovnováhu jejího náboje je v každé kapce?

30C. Jak daleko musí být od sebe vzdáleny dva protony, aby se velikost elektrostatické síly působící mezi nimi rovnala váze protonu na povrchu Země?

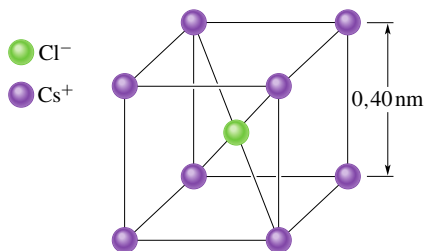
31C. Elektron je ve vakuu blízko povrchu Země. Kam je nutno umístit druhý elektron, aby elektrostatická síla vyrovnala tíhovou sílu působící na první elektron?

32Ú. Zemská atmosféra je neustále bombardována protony kosmického záření z vesmíru. Pokud by všechny protony prošly atmosférou, dopadalo by na každý čtverečný metr povrchu Země zhruba 1 500 protonů za sekundu. Jaký by byl odpovídající proud?

33Ú. Vlákem 100 W žárovky, připojené ke stejnosměrnému zdroji napětí 120 V, prochází stálý proud 0,83 A. Za jak dlouho projde vláknem 1 mol elektronů?

34Ú. Vypočítejte, kolik coulombů kladného náboje je obsaženo v 250 cm^3 (neutrální) vody (přibližně plná sklenice).

35Ú. V krystalové struktuře chloridu cesného CsCl tvoří ionty Cs^+ vrcholy krychle a iont Cl^- leží v jejím středu (obr. 22.26). Délka hrany krychle je 0,40 nm. Každému z iontů Cs^+ chybí jeden elektron (má tedy náboj $+e$), iont Cl^- má jeden elektron navíc (má tedy náboj $-e$). (a) Jaká je velikost výslednice elektrostatických sil, kterými na iont Cl^- působí osm iontů Cs^+ nacházejících se v rozích krychle? (b) Jestliže jeden z iontů Cs^+ chybí, říkáme, že krystal má defekt. Jaká je v tomto případě velikost výslednice elektrostatických sil, kterými na iont Cl^- působí sedm zbývajících iontů Cs^+ ?



Obr. 22.26 Úloha 35

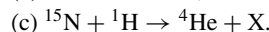
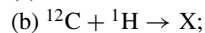
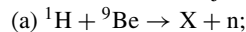
36Ú. Víme, že velikost záporného náboje elektronu a kladného náboje protonu je stejná. Předpokládejme však, že by se tyto hodnoty lišily o 0,000 10 %. Jakou silou by se pak odpuzovaly dvě měděné mince o hmotnosti 3,11 g vzdálené 1,0 m? Jaký závěr můžete učinit? (Tip: Viz př. 22.4.)

37Ú. Dva studenti Jan s hmotností 90 kg a Marie s hmotností 45 kg jsou od sebe vzdáleni 30 m. Předpokládejte, že každý z nich má 0,01 % nerovnováhy v množství svého kladného a záporného náboje, Jan je nabit kladně a Marie záporně. Odhadněte zhruba přitažlivou elektrostatickou sílu působící mezi nimi. Studenty v provedené úvaze nahraďte stejně těžkými koulemi vody.

ODST. 22.6 Zachování náboje

38C. Při β -rozpadu se jedna částice mění na jinou, přičemž je emitován buď elektron, nebo pozitron. (a) Jaká částice je emitována, jestliže se z protonu stane β -rozpadem neutron? (b) Jaká částice je emitována, jestliže se neutron mění β -rozpadem na proton?

39C. Určete X v následujících jaderných reakcích (dodatek F):



40C. Při radioaktivním rozpadu ${}^{238}\text{U}$ (rov. (22.15)) je střed vznikající částice ${}^4\text{He}$ v určitém okamžiku ve vzdálenosti $9,0 \cdot 10^{-15}$ m od dceřiného jádra ${}^{234}\text{Th}$. (a) Jaká je v tomto okamžiku velikost elektrostatické síly, která působí na částici ${}^4\text{He}$? (b) Jaké je v tomto okamžiku zrychlení částice?

PRO POČÍTAČ

41Ú. V úloze 18 označme $Q_1 = \alpha Q$. (a) Napište výraz pro velikost F síly působící mezi náboji pomocí α , Q a vzdálenosti nábojů d . (b) Sestrojte graf závislosti F na α . Graficky nalezněte hodnotu α , která dává (c) maximální hodnotu F , (d) polovinu maximální hodnoty F .

42Ú. Dvě částice, každá s kladným nábojem Q , jsou pevně umístěny na ose x , jedna v bodě $x = 0$, druhá v bodě $x = d$. Částice s nábojem Q_1 má být umístěna na této ose v poloze $x = \alpha d$. (a) Zapište pomocí α výrazy pro výslednou elektrostatickou sílu F působící na třetí částici, která se nachází postupně v oblastech $x < 0$; $0 < x < d$; $d < x$. Výrazy by měly dát kladný výsledek, má-li F kladný směr osy x , a záporný výsledek, je-li F orientována v záporném směru osy x . (b) Sestrojte graf závislosti F na α v intervalu $-2 < \alpha < 3$.