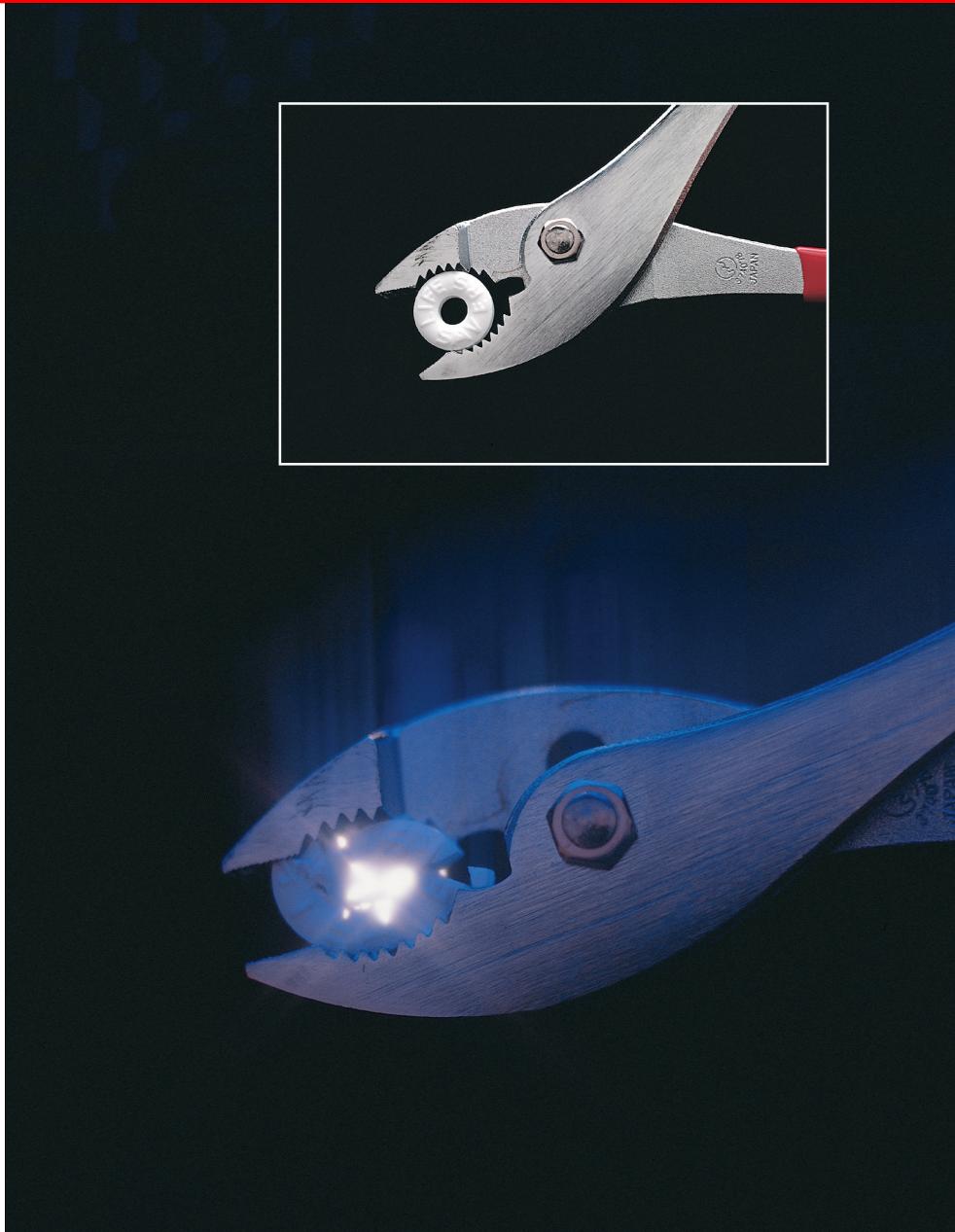


# 22

## *Elektrický náboj*



---

Zavřete se s přítelem do temné komory; asi po 15 minutách si vaše oči přivykou 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 světelny úkaz, obvykle nazývaný triboluminiscence?

---

## 22.1 ELEKTROMAGNETISMUS

Již starí 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 střelku 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 představivostí. 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. Přijdeme 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 klice u dveří, přeskočí jiskra. Televizní reklamy nás upozorňují na problém „statické přílnavosti“ 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 nachází v jakékoli situaci.

Obrovské množství náboje si v běžných předmětech obvykle neuvědomujeme, protože předměty obsahují stejně 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



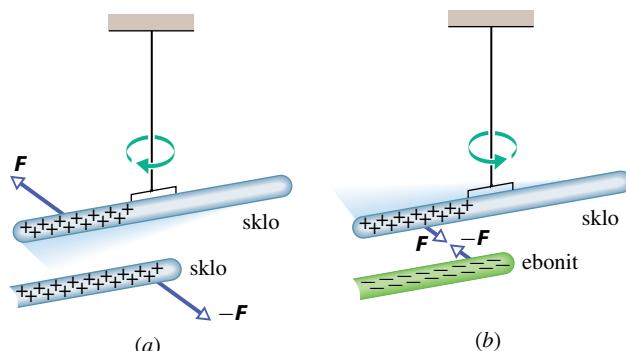
**Obr. 22.1** Statická přílnavost — elektrický jev zvláště výrazný v suchých dnech — způsobuje, že se kousky papíru slepí dohromady a přilepí se k plastovému hřebenu, že se vám šaty lepí na tělo atd.

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.

Nabité 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 předmětu 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 nabité (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 tyče.

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:



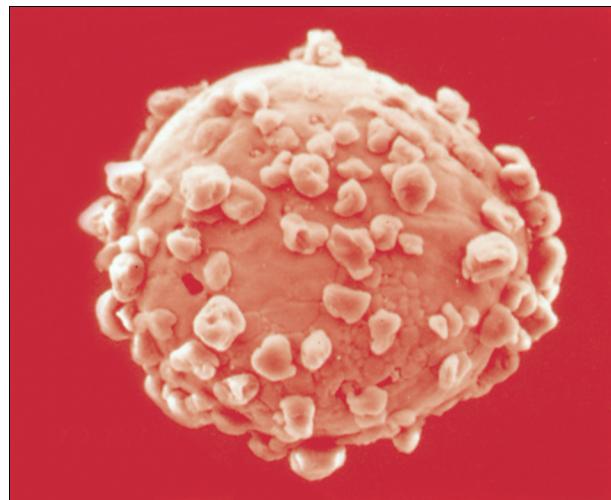
Obr. 22.2 (a) Dvě tyče nabité souhlasnými náboji se odpuzují.  
(b) Dvě tyče nabité opačnými náboji se přitahují.

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.

Přílastky „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 vysoko oceňován.)

Vzájemné přitahování a odpuzování nabitych těles má mnoho průmyslových aplikací, např. elektrostatické nanášení barev a naprašování, zachycování popíalku v komínech, bezdotykový inkoustový tisk a fotokopírování. Obr. 22.3 ukazuje nepatrnou nosnou kuličku v xeroxovém kopírovacím stroji, pokrytu částicemi černého prášku nazývaného *toner*, které jsou k ní přitahovány elektrostatickými silami. Při kopírování jsou záporně nabité částice toneru přetaženy z nosné kuličky na ta místa rotujícího válce, kde byly vytvořen kladně nabity obraz kopírovaného dokumentu. Odtud jsou poté přitáhnuty na nabity 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

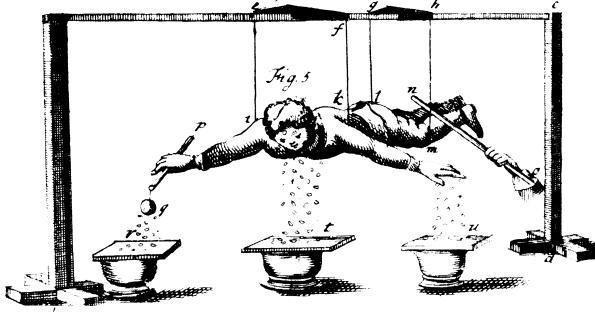
V některých látkách (např. v kovech, v pitné vodě, v lidském těle) se může část jejich náboje pohybovat značně volně. Takové látky nazýváme **vodiče**. V jiných látkách (např. ve skle, v destilované vodě, v ebonitu a vůbec ve většině umělých hmot) se nemůže volně pohybovat prakticky žádný náboj. Tyto 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, nebude schopní ji nabít, protože vy i tyč jste vodiče. Tření vytvoří nerovnováhu náboje na tyči, ale přebytečný náboj je okamžitě odveden z tyče vaším 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 nabitych *protonů*, záporně nabitych *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.



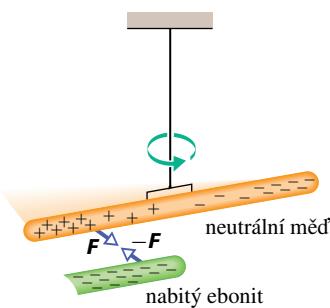
**Obr. 22.4** Toto není akrobatický kousek, ale seriozní experiment, provedený v roce 1774 jako důkaz, že lidské tělo vede elektrický proud. Historický lept ukazuje nevodivými provazy přivázaného člověka, který je nabijen dotykem nabité tyče (tyč se pravděpodobně dotýkala přímo těla, nikoli kalhot). 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 jádru 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 nabité zbytky atomů — *kladné ionty*. Tyto pohyblivé elektrony se nazývají *vodivostní*. V kovech je jich velmi mnoho, zatímco v nevodivících je vodivostních elektronů velmi málo.

Pokus na obr. 22.5 demonstруje pohyblivost náboje ve vodiči. Záporně nabité 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 nabité skleněnou tyč k jednomu konci neutrální měděné tyče, vodivostní elekt-



**Obr. 22.5** Neutrální měděná tyč je elektricky izolována od okolí zavěšením na nevodivé vlátko. Každý z obou konců tyče může být přitahován nabitém ebonitem. Vodivostní elektrony z blízké části měděné tyče jsou záporným nábojem ebonitu odpuzovány k jejímu vzdálenějšímu konci a tím v uprásdené části převaží kladný náboj jáder. Záporný náboj ebonitu pak přitahuje kladný náboj na bližším konci měděné tyče a odpuzuje záporný náboj na vzdálenějším; proto se měděná tyč přitáčí 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 nabité skleněné tyči.

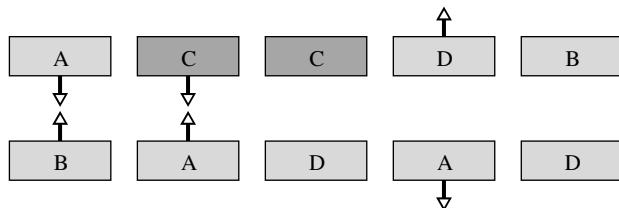
Poznamenejme, že v kovech se mohou pohybovat pouze vodivostní elektrony\*; kladné ionty tvořící mřížku kovu zůstávají na místě. Předměty se tedy nabíjejí kladně pouze díky *odvedení části záporných nábojů*.

**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 nabité kladně i záporně.

**KONTROLA 1:** Obrázek ukazuje pět dvojic desek: A, B, D jsou nabité 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 přitažovat, nebo odpuzovat.

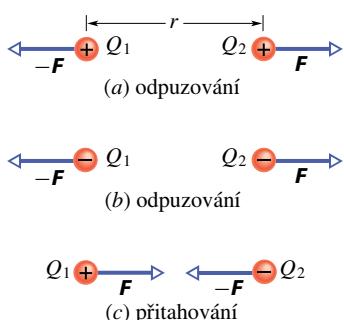


## 22.4 COULOMBŮV ZÁKON

Uvažujme dvě nabité tělíska zanedbatelných rozměrů — dvě nabité částice (nazývané **bodové náboje**). Nechť jsou jejich náboje  $Q_1$  a  $Q_2$  a jejich vzdálenost  $r$ . **Elektrostatická síla** působící mezi nimi, přitažlivá nebo odpudivá, 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*, směruje síla působící na každou částici směrem *od té druhé* (obr. 22.6a, b). Jestliže se navzájem *přitažují*, působí na každou částici síla směřující *ke druhé částici* (obr. 22.6c).



**Obr. 22.6** Dvě nabité částice ve vzdálenosti  $r$  se navzájem odpuzují, jestliže jejich náboje jsou (a) oba kladné nebo (b) oba záporné. (c) Přitažují 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 směruje 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 odpudivé 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 nabitym jádrem a každým ze záporně nabitych elektronů, ačkoliv 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 ampér. 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  $\epsilon_0$ , nazývaná **permitivita vakuua** nebo též **elektrická konstanta**, vystupuje někdy v rovnících samostatně. Její hodnota je

$$\epsilon_0 \doteq 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (22.6)$$

(Jak uvidíme v čl. 34.2 v rov. (34.3), je číselná hodnota  $\{\epsilon_0\}$  spojena s číselnou hodnotou rychlosti  $\{c\}$  světla ve vakuu vztahem  $\{\epsilon_0\} = 1/(4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \{c\}^2)$ .)

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

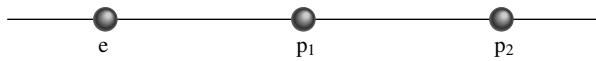
$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14} + \dots + \mathbf{F}_{1n}, \quad (22.7)$$

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 teorémy, které nám byly tak užitečné při studiu gravitace, mají svou analogii v elektrostastice (a zdůvodníme je v čl. 24.9):

1. Kulová slupka nabité rovnoměrně rozloženým nábojem přitahuje nebo odpuzuje nabité částice stejně, jako kdyby veškerý náboj slupky byl soustředěn v jejím středu.
2. Kulová slupka nabité rovnoměrně rozloženým nábojem nepůsobí žádnou elektrostatickou silou na nabité 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  $\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = \mathbf{0}$ .

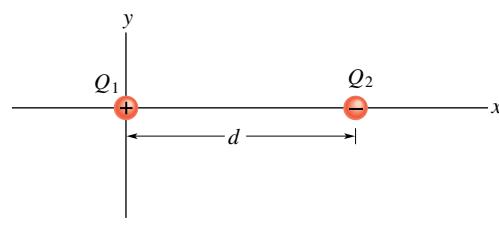
$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2. \quad (22.8)$$

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

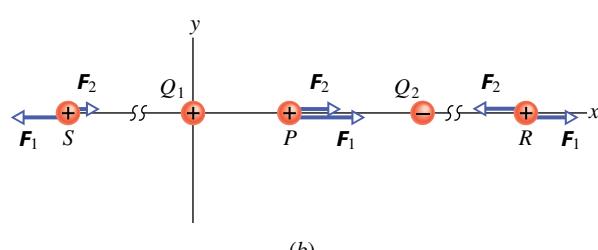
$$F_1 = F_2, \quad (22.9)$$

stejný směr a opačnou orientaci.

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



(a)



(b)

**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

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

(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 dоказat 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 vrátí zpět do rovnovážné polohy.

### PŘÍKLAD 22.2

Obr. 22.8a představuje uspořádání šesti nabitéch částic, kde  $a = 2,0\text{ cm}$  a úhel  $\theta = 30^\circ$ . Všechn šest částic má náboj stejně 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 vyrůší. 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  $\mathbf{F}_{13}$ :

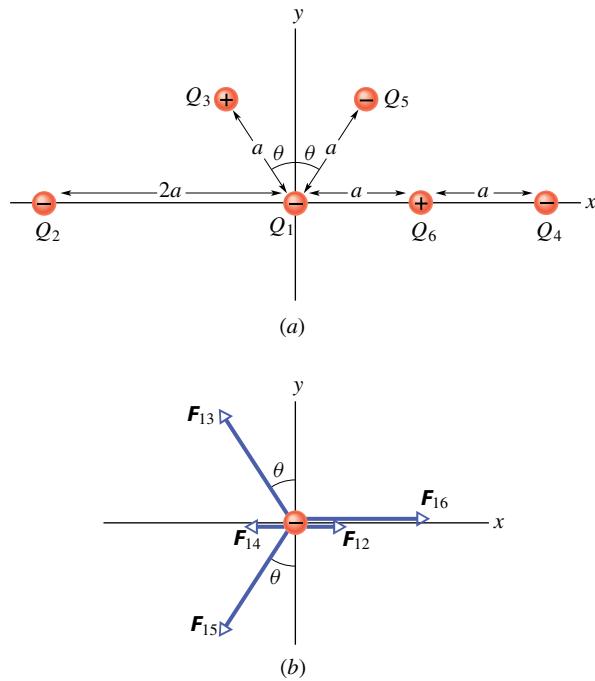
$$F_1 = F_{16} - 2F_{13} \sin \theta = \\ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_6|}{a^2} - \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_3|}{a^2} \sin \theta.$$

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 nabitéch 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 symetrii ke zjednodušení výpočtu 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 námuhanu.

#### Bod 22.2: Zakreslení vektorů elektrostatických sil

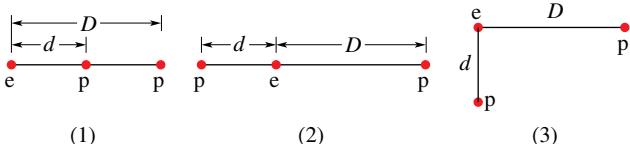
Je-li zadáno rozložení nabitéch částic (obr. 22.8a) a naším úkolem je najít výslednou elektrostatickou sílu působící na

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 zadávaného 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) Seřaďte 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  $45^\circ$ ?



### PŘÍKLAD 22.3

Na obr. 22.9a jsou dvě stejně osamocené elektricky izolované vodivé koule A, B. Vzdálenost  $a$  jejich středu je velká vzhledem k poloměru 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?

**REŠENÍ:** 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.

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

Koule A získává záporný náboj, je stále méně kladně nabité. 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 nabité.

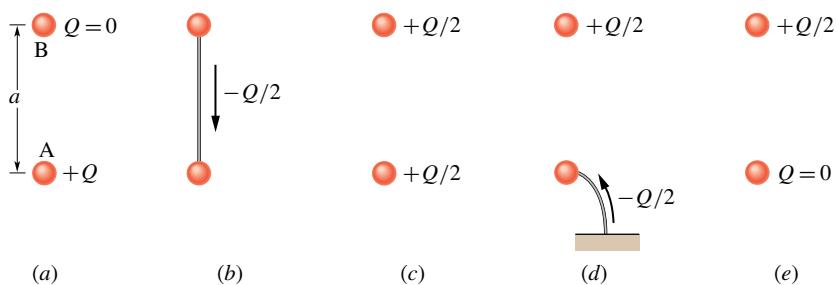
(b) Předpokládejme nyní, že je koule A na okamžik uzemněna, a pak je uzemnění přerušeno. Jaká je nyní elektrostatická síla mezi koulemi?

**REŠENÍ:** 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).

## 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 tvorený atomy a molekulami; hmota je rozložena diskrétně. Experimenty ukazují, že ani „elektrická tekutina“ není spojité, ale je tvořena násobky jistého elementárního náboje. Libovolný kladný nebo záporný náboj  $Q$ , který můžeme naměřit, může tedy mít hodnotu jenom

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



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 častic

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 elektrom“, 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 (nespojitých), 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 stejně množství jí opouští. „Zrnitost“ elektřiny se při tak velkém počtu neprojeví, stejně jako nepocítíme rukou ve vodě jednotlivé molekuly.

„Zrnitost“ elektřiny můžeme také přiřídit modré záblesky (jev triboluminiscence), které emisuje 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 přeskoku se elektrony a ionty sráží s molekulami dusíku obsaženého ve vzduchu, který proudí do trhliny. V důsledku srážek emisuje 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 emisuje 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 měďerná 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 konstantou  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ). 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

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

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

(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

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q^2}{r^2} = \\ = (8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}) \frac{(1,37 \cdot 10^5 \text{ C})^2}{(100 \text{ m})^2} = \\ = 1,69 \cdot 10^{16} \text{ N.} \quad (\text{Odpověď})$$

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?

**REŠENÍ:** 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?

**REŠENÍ:** Hmotnost protonu je  $m_p \doteq 1,67 \cdot 10^{-27}$  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 vazány obrovskou přitažlivou silou způsobenou *silou interakcí*. Ta se však výrazně projevuje jen tehdy, pokud jsou částice velmi blízko u sebe (jak je tomu v jádře atomu).

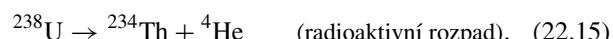
Ačkoli je gravitační síla mnohonásobně slabší než síla elektrostatická, je důležitější ve velkých měřítkách. Protože je vždy přitažlivá, může se velmi mnoho malých těles spojit do těles s obrovskými hmotnostmi, jako jsou planety a hvězdy, které vyvolávají obrovské gravitační síly. Na druhé straně,

elektrostatická síla je pro náboje stejněho znaménka odpuzivá, nemůže tedy spojit samotné kladné nebo samotné záporné náboje do velkých objektů, které by pak mohly působit na venek 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 stejně velikosti. Třením se tedy náboj nevytváří, ale jen přerozděluje — převádí z jednoho tělesa na druhé a pořušuje se tak původní elektrická neutralita obou těles. Tato hypotéza o **zachování náboje** byla poprvé vyslovena Benjaminem Franklinem a byla mnohokrát ověřena jak pro makroskopická nabité 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  $^{238}\text{U}$  se může přeměnit na  $\alpha$ -částici (tj. heliové jádro  $^4\text{He}$ ) a thorium ( $^{234}\text{Th}$ ):



Radioaktivní *materšské* jádro  $^{238}\text{U}$  má atomové číslo  $Z = 92$ , tj. jádro obsahuje 92 protonů a má náboj  $92e$ . Emisovaná  $\alpha$ -částice má  $Z = 2$  a *dceřiné* jádro  $^{234}\text{Th}$  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  $\gamma$ -záření.



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

Při tvorbě *elektron-pozitronových* páru (opacný proces k anihilaci) se náboj také zachovává. V tomto procesu se  $\gamma$ -kvantum přemění na elektron a pozitron:



Obr. 22.10 ukazuje takovou tvorbu páru v bublinkové komoře. Záření  $\gamma$  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  $\gamma$ ,

které nemá náboj, nezanechává žádnou stopu. Můžeme tedy určit, kde přesně došlo k vytvoření páru: bylo to ve špiči 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  $\gamma$ -záření, které vniklo do komory zleva. Protože  $\gamma$ -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 & SHRNUTI

### Elektrický náboj

Elektrická interakce těles (makroskopických i mikroskopických) je dáná 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 nabité.

### Vodiče a nevodiče

*Vodiče* jsou látky, ve kterých se může volně pohybovat velmi mnoho nabitéch částic (elektrony v kovech). V *nevodičích* (*izolátorech*) se nabité částice nemohou volně pohybovat. Pohybují-li se nabité částice látkou převážně určitým směrem (probíhá-li usměrněný pohyb nosičů náboje), říkáme, že látkou *proteká 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 odpudivá síla mezi bodovými náboji v klidu působí ve spojenici obou nábojů. Jestliže uvažujeme více než dva náboje, platí rov. (22.4) pro každou dvojici nábojů. Výsledná síla působící na každý náboj je dáná *principem superpozice* jako vektorový součet sil, kterými na náboj působí všechny ostatní přítomné náboje.

Dále platí dva slupkové teorémy elektrostatiky:

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

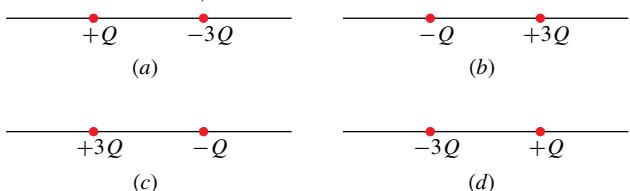
*Slupka s rovnoměrně rozloženým nábojem nepůsobí žádnou elektrickou silou na nabité částici, která se nachází uvnitř (v dutině) slupky.*

### 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.

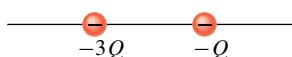
## OTÁZKY

1. Platí Coulombův zákon pro všechny nabité 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  $Q$ . Seřaďte tělesa sestupně podle velikosti elektrostatické síly, kterou působí na částici.
3. Obr. 22.11 ukazuje čtyři usporádání dvou nabitych častic. Ve kterém případě existuje vlevo od nich bod, do kterého můžeme umístit elektron tak, že bude v rovnováze?



Obr. 22.11 Otázka 3

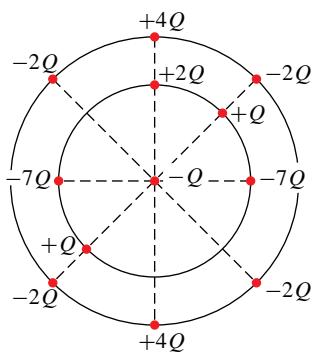
4. Na obrázku 22.12 jsou dvě nabité částice, které se mohou volně pohybovat. Víme, že existuje bod, kam můžeme umístit třetí částici tak, aby všechny tři částice byly v rovnováze. (a) Leží tento bod vlevo od obou původních častic, vpravo od nich, nebo mezi nimi? (b) Má mít třetí částice kladný, nebo 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 nabitu částici tak, aby výsledná elektrostatická síla, kterou na ni působí první tři částice, byla nulová? Je to vlevo od prvních tří častic, vpravo od nich, mezi protony, nebo mezi elektronem a jemu bližším protonem?

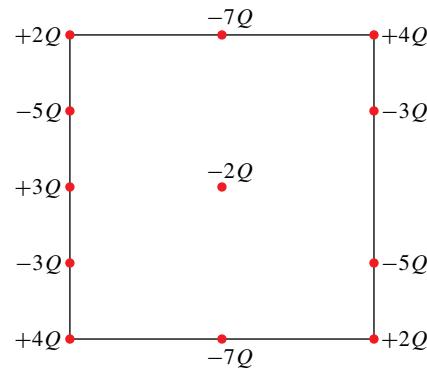
6. Na obr. 22.13 je centrální částice s nábojem  $-Q$  obklopena



Obr. 22.13 Otázka 6

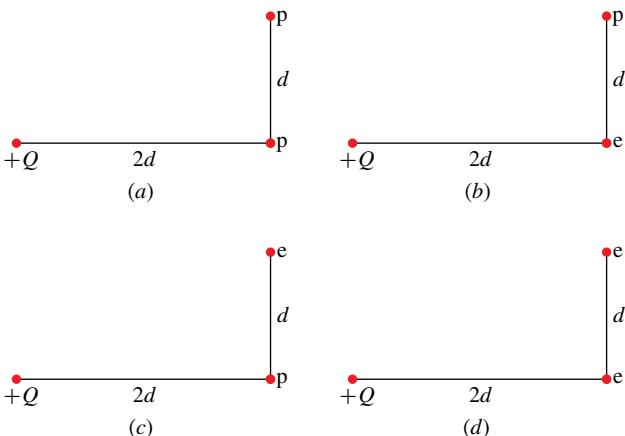
dvěma soustřednými kružnicemi s poloměry  $r$  a  $R$ ,  $R > r$ . Na kružnicích jsou rozmístěny nabité částice. Jakou velikost a směr má výsledná elektrostatická síla, kterou na centrální částici působí ostatní částice?

7. Na obr. 22.14 je centrální částice s nábojem  $-2Q$  obklopena nabitymi 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 usporádání nabitych častic: protonu, elektronu a náboje  $+Q$ . Seřaďte tato usporádání sestupně podle velikosti výsledné elektrostatické síly působící na částici s nábojem  $+Q$ .

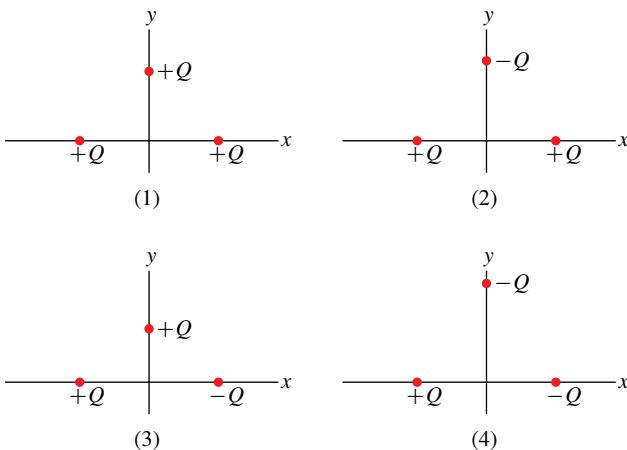


Obr. 22.15 Otázka 8

9. Na obr. 22.16 jsou čtyři usporádání tří častic 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 častic 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

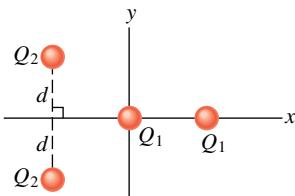
- velikostí sil od obou částic? (c) Vyrůší se  $x$ -ové složky obou sil?  
 (d) Vyrůší se  $y$ -ové složky obou sil? (e) Jaký směr má výsledná síla působící na prostřední částici?

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 dve částice s nábojem  $Q_2$ . Částice v počátku se může volně pohybovat, ostatní částice jsou nepohyblivé. Určete, zda  $Q_2$  je kladné, nebo záporné, může 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 nabité kouli přiblížíme k izolovanému neutrálnímu vodiči. Vodič uzemněníme. 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?

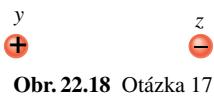
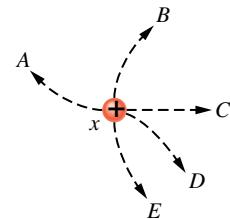
- 13.** Vedle kladně nabité skleněné tyče visí na nevodivém vlákně tělíska. (a) Tyč tělísko přitahuje. Znamená to nutně, že je tělísko záporně nabité? (b) Tyč a tělísko se odpuzují. Je nutně tělísko nabité kladně?

- 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. Tyč se nesmíte dotknout žádné z koulí. Jak můžete koule nabít nábojem (a) stejně velikosti a stejněho znaménka, (b) stejně 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 nabité 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 nabitého, 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?

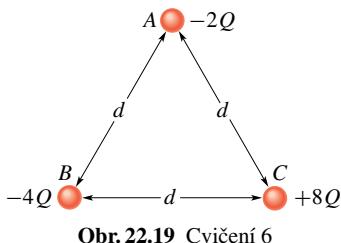
**2C.** Jaká elektrostatická síla působí mezi dvěma bodovými náboji o velikosti  $1,00 \text{ C}$ , jsou-li vzdáleny (a)  $1,00 \text{ m}$ , (b)  $1,00 \text{ km}$ ?

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

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

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

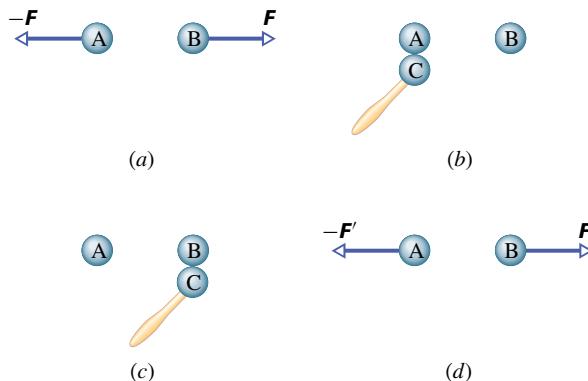
**6C.** Na obr. 22.19 leží ve vrcholech rovnostranného trojúhelníka se stranou délky  $d$  tři stejné vodivé koule  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , jejichž počáteční náboje jsou  $-2Q$ ,  $-4Q$ ,  $+8Q$ . (a) Jaká je velikost elektrostatické síly, která působí mezi koulemi  $A$  a  $C$ ? Pak proběhnou následující 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  $C$ ?



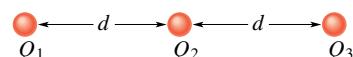
Obr. 22.19 Cvičení 6

**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  $\mathbf{F}$ . Uvažujme nyní třetí, stejnou a na počátku neutrální koule (C) s nevodivým držadlem. Nejprve se s ní dotkneme koule (A) (obr. 22.20b), potom koule (B) (obr. 22.20c) a pak ji odstraníme (obr. 22.20d). Pomocí původní síly  $\mathbf{F}$  vyjádřete elektrostatickou sílu  $\mathbf{F}'$ , která nyní působí na kouli (B).

**8Ú.** Na obr. 22.21 leží na téže přímce tři nabité 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  $Q_2$ .

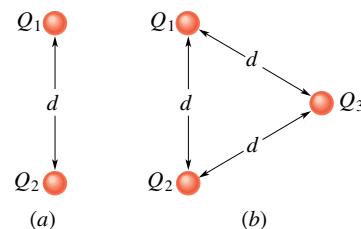


Obr. 22.20 Cvičení 7



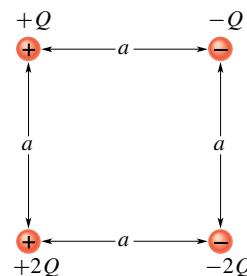
Obr. 22.21 Úloha 8

**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  $Q_1 = Q_2 = 20,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  a  $d = 1,50 \text{ m}$ .  
 (b) Přidáme třetí náboj  $Q_3 = 20,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  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  $Q = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ C}$  a  $a = 5,0 \text{ cm}$ ?



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 kladné 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 nabitéch 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)?

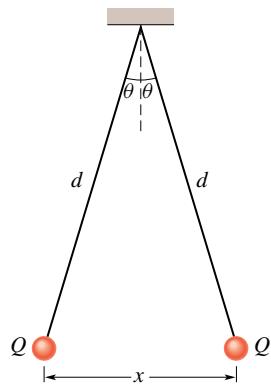
**18Ú.** Náboj  $Q$  je rozdělen na dvě části  $Q_1$  a  $Q - Q_1$ , které jsou pak od sebe odděleny do určité vzdálenosti. Jaké musí být  $Q_1$  vzhledem ke  $Q$ , aby elektrostatické odpuzování mezi náboji bylo maximální?

**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 stejném hmotnosti  $m$  a stejném náboji  $Q$  zavěšené na nevodivých závěsech o délce  $d$ . Předpokládejme, že úhel  $\theta$  je tak malý, že přibližně platí  $\operatorname{tg} \theta = \sin \theta$ . (a) Ukažte, že v rovnováze je vzdálenost mezi kuličkami

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

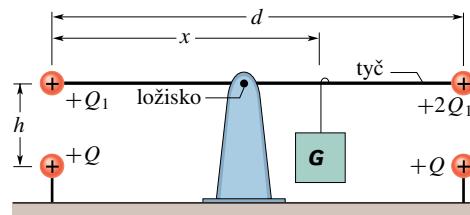
(b) Jaká je hodnota  $Q$ , je-li  $d = 120$  cm,  $m = 10$  g,  $x = 5,0$  cm?



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  $2Q_1$ . Tyč je zavěšena 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  $\text{Na}^+$  s nábojem  $+e$  a sousedním iontem chloru  $\text{Cl}^-$  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 ( $\text{H}_2$ )?

**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?

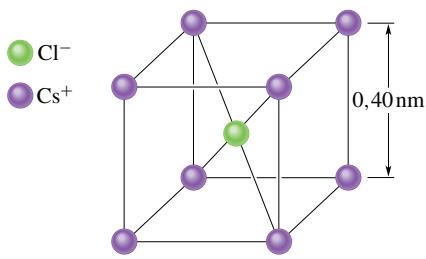
**31C.** Elektron je ve vakuu blízko povrchu Země. Kam je nutno umístit druhý elektron, aby elektrostatická síla vyrovnala tíhou sílu působící na první elektron?

**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.** Vlákno 100 W žárovky, připojené ke stejnosměrnému zdroji napětí 120 V, prochází stálý proud 0,83 A. Za jak dlouho projde vláknom 1 mol elektronů?

**34Ú.** Vypočítejte, kolik coulombů kladného náboje je obsaženo v  $250 \text{ cm}^3$  (neutrální) vody (přibližně plná sklenice).

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



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 nabít 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  $\beta$ -rozpadu se jedna částice mění na jinou, přičemž je emitován buď elektron, nebo pozitron. (a) Jaká částice je emitována, jestliže se z protonu stane  $\beta$ -rozpadem neutron? (b) Jaká částice je emitována, jestliže se neutron mění  $\beta$ -rozpadem na proton?

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

- (a)  ${}^1\text{H} + {}^9\text{Be} \rightarrow \text{X} + \text{n};$
- (b)  ${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow \text{X};$
- (c)  ${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{X}.$

**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  $\alpha$ ,  $Q$  a vzdálenosti nábojů  $d$ . (b) Sestrojte graf závislosti  $F$  na  $\alpha$ . Graficky nalezněte hodnotu  $\alpha$ , 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  $\alpha$  výrazy pro výslednou elektrostatickou sílu  $\mathbf{F}$  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  $\mathbf{F}$  kladný směr osy  $x$ , a záporný výsledek, je-li  $\mathbf{F}$  orientována v záporném směru osy  $x$ . (b) Sestrojte graf závislosti  $F$  na  $\alpha$  v intervalu  $-2 < \alpha < 3$ .