

David HALLIDAY • Robert RESNICK • JEARL WALKER

1 | Fyzika

Třetí přepracované vydání připravil Petr Dub

Svazek 1

Vysoké učení technické v Brně
Nakladatelství VUTIAM



1–2 ČAS, DÉLKA, HMOTNOST

Co se naučíme a čemu porozumíme

Po prostudování tohoto modulu bychom měli umět ...

- 1.06** Objasnit, jak je v reformované soustavě SI definována jednotka času sekunda.

1.07 Objasnit, jak je v reformované soustavě SI definována jednotka délky metr.
- 1.08** Objasnit, jak je v reformované soustavě SI definována jednotka hmotnosti kilogram, a jak byl definován předtím.

1.09 Objasnit, co je atomová jednotka hmotnosti.

Klíčové poznatky

- Sekunda je navázána na pevně zvolenou hodnotu frekvence záření atomu cesia Cs 133.
 - Metr je navázán na pevně zvolenou hodnotu rychlosti světla ve vakuu.
 - Kilogram je navázán na pevně zvolenou hodnotu Planckovy konstanty. Dříve byl definován pomocí prototypu, vyrobeného ze slitiny platiny a iridia a uloženého v Mezinárodním ústavu pro váhy a míry v Sèvres u Paříže.
- Pro měření hmotností na atomární úrovni se obvykle používá atomová hmotnostní jednotka u. Základem její definice je hmotnost atomu uhlíku C 12.

Čas

Čas můžeme chápat dvěma různými způsoby. V běžném životě a často i ve vědě potřebujeme znát denní čas, abychom mohli popsat sled událostí. Ve vědecké práci je zase většinou důležité, jak dlouho daná událost trvala. Každý standard času tedy musí umožňovat odpověď na dvě otázky: „*Kdy* se to stalo?“ a „*Jak dlouho* to trvalo?“ Tab. 1-3 uvádí přehled některých časových intervalů.

Standardem času může být jakýkoli jev, který se pravidelně opakuje. Po staletí sloužilo tomuto účelu otáčení Země, které určovalo délku dne. Obr. 1-1 ukazuje další příklad, a to příklad hodinek, jejichž zobrazování času je založeno rovněž na rotaci. I křemenné hodiny, ve kterých osciluje křemenný krystal v elektronickém obvodu, lze pomocí astronomických pozorování cejchovat vzhledem k rotaci Země a používat pak v laboratořích pro měření dob. Tato kalibrace však nemůže být provedena s přesností odpovídající požadavkům současné vědy a techniky.

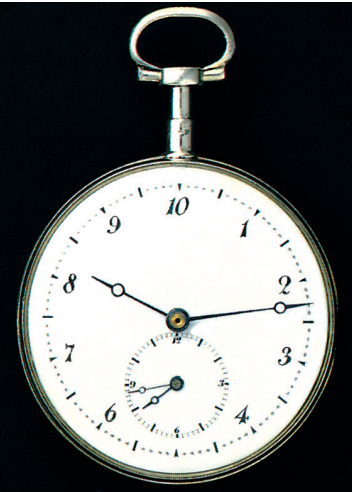
Snaha o získání lepšího standardu času vedla ke konstrukci atomových hodin. Na obr. 1-2 (na následující straně) je záznam kolísání délky dne v průběhu čtyřletého období získaný srovnáním s cesiovými hodinami. Zjištěné rozdíly, zřejmě související s ročními obdobími, přisuzujeme nepravidelnosti rotace Země a věříme, že chod cesiových hodin je pravidelnější. Kolísání rychlosti rotace Země je pravděpodobně způsobeno slapovými jevy (vliv Měsíce) a rozsáhlým prouděním vzduchu v atmosféře.

Přesnost cesiových hodin je taková, že by trvalo 15 milionů let, než by se dvoje hodiny rozešly o více než 1 s. Ovšem i tato přesnost je malá ve srovnání s hodinami, které se vyvíjejí v současnosti. Mají dosáhnout přesnosti $1 : 10^{18}$, která odpovídá odchylce pouhé 1 s za 10^{18} s (asi $3 \cdot 10^{10}$ let).

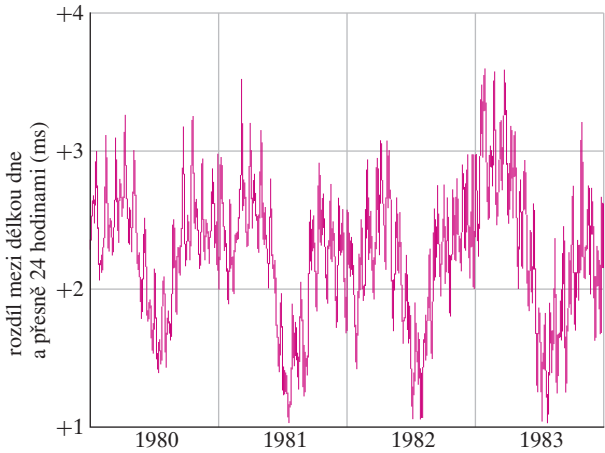
Tabulka 1-3 Některé časové intervaly

Doba	v sekundách	Doba	v sekundách
stáří Vesmíru	$5 \cdot 10^{17}$	doba života částice mion	$2 \cdot 10^{-6}$
stáří Cheopsovy pyramidy	$1 \cdot 10^{11}$	nejkratší světelný pulz (r. 2023)	$5 \cdot 10^{-18}$
průměrný věk člověka	$2 \cdot 10^9$	doba života	
délka roku	$3 \cdot 10^7$	nejnestabilnějších částic (W a Z bosonů)	$1 \cdot 10^{-25}$
délka dne	$9 \cdot 10^4$	Planckův čas ^a	$1 \cdot 10^{-43}$
tep lidského srdce	$8 \cdot 10^{-1}$		

^a Je dán třemi základními konstantami G , c a h (viz úloha 60) a je považován za nejkratší čas po velkém třesku, od něhož lze užívat zákony fyziky v takové podobě, v jaké je známe nyní.



Obr. 1-1 V návrhu metrické soustavy z roku 1792 byla hodina definována tak, aby den měl 10 hodin. Myšlenka se neujala. Tvůrce těchto desetihodinových hodinek byl prozíravý a opatřil je ještě malým ciferníkem ukazujícím tradiční dvanáctihodinový čas. Ukazují oboje hodinky stejný čas?



Obr. 1-2 Kolísání délky dne v průběhu čtyřletého období. Všimněte si, že rozsah svislé stupnice odpovídá pouhým 3 ms (= 0,003 s).

Na 13. generální konferenci pro váhy a míry konané v roce 1967 byl přijat standard sekundy založený na cesiových hodinách. Sekunda byla definována takto: „Jedna sekunda je doba trvání 9 192 631 770 kmitů světla (dané vlnové délky) emitovaného atomem cesia 133.“

Sekunda je tedy navázána na pevně zvolenou hodnotu frekvence záření $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}^*$, které vzniká při přechodu mezi dvěma velmi jemnými hladinami atomu cesia 133. Definice **sekundy** v reformované soustavě SI nyní zní:

* Hz je značka jednotky frekvence hertz, $1\text{ Hz} = 1\text{ s}^{-1}$ (viz modul 15-1).

★ Sekunda, značka s, je jednotka času. Je definována stanovením pevné číselné hodnoty frekvence přechodu $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133 nacházejícího se v klidovém stavu, která je rovna 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotce Hz, která je rovna s^{-1} .

Přestože se znění této definice sekundy liší od definice užívané do roku 2019, její podstata se nemění.

Délka

V roce 1792 byl v mladé Francouzské republice zaveden nový systém měř a vah. Jejím základním kamenem byla jednotka délky metr, definovaný jako jedna desetimiliontina vzdálenosti od severního pólu k rovníku. Z praktických důvodů se později od vazby na tento „zemský“ standard upustilo a metr byl definován jako vzdálenost mezi dvěma tenkými vrypy na tyči vyrobené ze slitiny platiny a iridia, tzv. **standardním metru**. Tento standard je dodnes uložen v Mezinárodním úřadu pro váhy a míry v Sèvres u Paříže. Jeho přesné kopie se nazývaly **druhotné standardy** a byly rozslány do metrologických laboratoří po celém světě a používány pro kalibraci dalších, mnohem snadněji dostupných standardů. Každé zařízení pro měření délky poskytuje údaje odvozené z jeho srovnání se standardním metrem.

Později vyžadovala moderní věda a technika ještě přesnější standard, než je vzdálenost mezi dvěma jemnými vrypy na kovové tyči. Proto byl v roce 1960 přijat nový standard metru, který vycházel z vlnové délky světla. Metr byl definován jako 1 650 763,73násobek vlnové délky oranžovo-červeného světla, jež při výboji emitují atomy kryptonu 86 (který je jedním z izotopů kryptonu). Tento zvláštní počet vlnových délek byl vybrán proto, aby nový standard byl velikostí co nejbližší do té doby používanému standardu metru.

Požadavky na přesnost však stále rostly, až dosáhl takového stupně, že jim už ani kryptonové atomy nedokázaly vyhovět. V roce 1983 byl v historii vývoje standardu délky zaznamenán výrazný pokrok. Metr byl nově definován

Tabulka 1-4 Některé délky

Délka	v metrech	Délka	v metrech
vzdálenost		výška Mount Everestu	$9\cdot 10^3$
k nejvzdálenějším galaxiím (2013)	$3\cdot 10^{26}$	výška člověka	$2\cdot 10^0$
k mlhovině v Andromedě	$2\cdot 10^{22}$	tloušťka této stránky	$1\cdot 10^{-4}$
k nejbližší hvězdě (Proxima Centauri)	$4\cdot 10^{16}$	vlnová délka světla	$5\cdot 10^{-7}$
k Plutu	$6\cdot 10^{12}$	typická velikost viru	$1\cdot 10^{-8}$
poloměr Země	$6\cdot 10^6$	poloměr atomu vodíku	$5\cdot 10^{-11}$
		poloměr protonu	$1\cdot 10^{-15}$
		Planckova délka*	$1\cdot 10^{-35}$

* Je dána třemi základními konstantami G , c a h (viz úloha 60) a je považována za nejkratší délku, nad kterou lze užívat zákony fyziky v takové podobě, v jaké je známe nyní.

jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za definovanou dobu. Na 17. generální konferenci pro váhy a míry konané v roce 1983 byla přijata tato definice metru: „Jeden metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za dobu $1/299\,792\,458$ sekundy.“ Tato doba byla vybrána tak, aby rychlost světla ve vakuu byla *přesně*

$$c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Metr je tedy navázán na pevně zvolenou hodnotu rychlosti světla ve vakuu c . Definice **metru** v reformované soustavě SI nyní zní:

★ Metr, značka m, je jednotka délky. Je definován stanovením pevné číselné hodnoty rychlosti světla ve vakuu c , která je rovna 299 792 458, je-li vyjádřena v jednotce $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, kde jednotka s je definována prostřednictvím $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Přestože se znění této definice metru liší od definice užívané do roku 2019, její podstata se nemění.

V tab. 1-4 jsou uvedeny údaje o rozměrech některých objektů a některých vzdálenostech, od vzdáleností ve vesmíru (horní řádky) k délkám v subatomárním měřítku.

Příklad 1.02 Řákový odhad délky pružinek vytvářejících kouli

Největší koule složená z malých pružinek má poloměr přibližně 2 metry. Jakého nejbližšího řádu dosahuje celková délka L všech pružinek v kouli?

ROZVAHA

Mohli bychom kouli samozřejmě rozplést a změřit celkovou délku L pružinek – to by ovšem vyžadovalo značné úsilí a navíc by to rozesmutnilo tvůrce koule. Místo toho můžeme při jejím určení používat ve výpočtu pouze odhadované hodnoty jednotlivých veličin, poněvadž chceme znát pouze nejbližší řákový odhad celkové délky.

Výpočet: Předpokládejme, že koule složená z pružinek je dokonale sférická o poloměru $R = 2\text{ m}$. Pružinky v kouli na sebe nejsou těsně namačkány (mezi jednotlivými pružinkami existuje ohromné množství mezer). Abychom vliv existence tohoto prázdného prostoru zahrnuli do výpočtu, nadhodnotíme mírně průřez pružinky tím, že ji budeme považovat za čtvercovou o délce hrany $d = 4\text{ mm}$. Po tomto zjednodušení

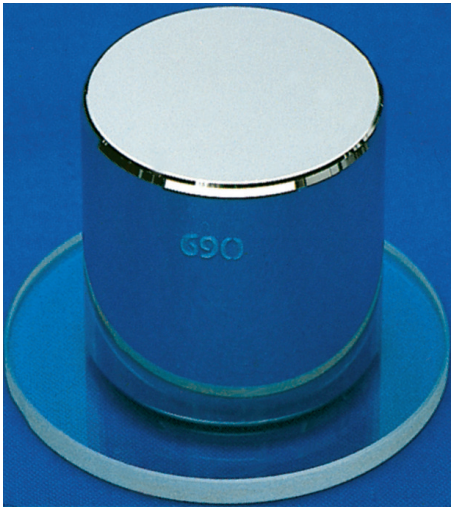
budou pružinky čtvercového průřezu a celkové délky L zaujímat objem

$$V = (\text{obsah průřezu})(\text{délka}) = d^2 L.$$

To se přibližně rovná objemu koule $\frac{4}{3}\pi R^3$, což se dá napsat jako $4R^3$, poněvadž π je přibližně rovno 3. Tak dostáváme

$$\begin{aligned} d^2 L &= 4R^3 \\ \text{neboli} \quad L &= \frac{4R^3}{d^2} = \frac{4(2\text{ m})^3}{(4\cdot 10^{-3}\text{ m})^2} = \\ &= 2\cdot 10^6\text{ m} \approx 10^6\text{ m} = 10^3\text{ km}. \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

(Všimněme si, že k tomuto zjednodušenému výpočtu nepotřebujeme kalkulačku.) Vyjádřeno pomocí nejbližšího řádu odhadu je koule složena z 1 000 km pružinek!



Obr. 1-3 Mezinárodní hmotnostní standard 1 kg má tvar válce, jehož výška i průměr jsou 39 mm. (S laskavým svolením Bureau International des Poids et Mesures, Francie)

Hmotnost

Kilogram

Jednotkou hmotnosti v soustavě SI je **kilogram***. Podle mezinárodní úmluvy byl od roku 1889 do roku 2019 určen hmotností válce vyrobeného ze slitiny platiny a iridia (obr. 1-3), který je uložen v Mezinárodním ústavu pro váhy a míry v Sèvres u Paříže. Přesné kopie tohoto etalonu byly rozeslány do laboratoří pro standardy v ostatních zemích. Hmotnost jiných těles pak byla měřena porovnáním s hmotností kterékoli z těchto kopií.

Metrologická praxe spočívá v neustálém a co nejpřesnějším porovnávání etalonů a měřidel. V případě kilogramu bylo zjištěno, že se hmotnosti etalonů kilogramu během času z různých příčin odlišují od prototypu, viz obr. 1-4. V roce 2014 dosahovala střední hodnota rozdílu mezi prototypem a jeho kopiemi hodnoty 35 μg. Vystala proto otázka, jaká je vlastně pravá hodnota hmotnosti prototypu. Hmotnost tak představovala nejslabší článek soustavy SI a bylo nutné nalézt novou definici jeho standardu.**

V reformované soustavě SI je kilogram navázán na pevně zvolenou hodnotu Planckovy konstanty (viz modul 38-1), a není tedy potřeba vyrábět kopie standardů hmotnosti. Definice **kilogramu** nyní zní:



Kilogram, značka kg, je jednotka hmotnosti. Je definován stanovením pevné číselné hodnoty Planckovy konstanty h , která je rovna $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$, je-li vyjádřena v jednotce J·s, která je rovna $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (viz modul 7-1), kde metr a sekunda jsou definovány pomocí c a $\Delta\nu_{\text{CS}}$.

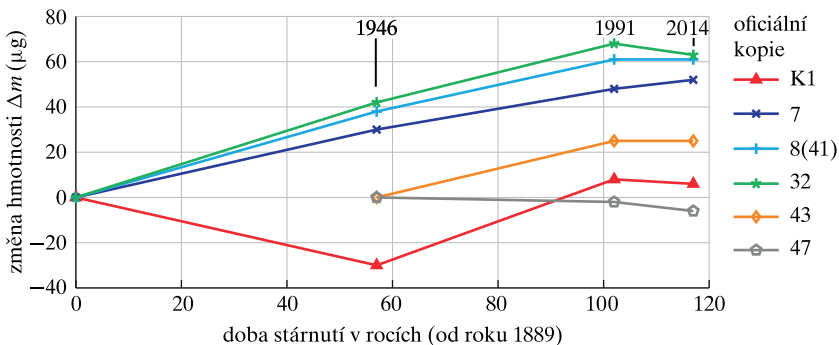
V reformované soustavě SI je hmotnost předchozího standardu kilogramu rovna 1 kg s relativní chybou $1,0 \cdot 10^{-8}$, tj. s nejistotou 10 μg, takže v běžné praxi se nic nemění.

Není pochyb, že současná definice kilogramu je mnohem lepší, přesnější a do budoucna výhodnější než ta minulá. Současně je ale mnohem méně názorná (je nejméně názorná a nejvíce komplexní ze všech definic sedmi základních jednotek soustavy SI) a vyžaduje znalost různých částí fyziky. Proto ji s pochopením přijmou až studenti, kteří se hlouběji seznámí s fyzikou.

V tab. 1-5 jsou uvedeny hmotnosti některých objektů lišící se až o 83 řádů. Podle současných poznatků je tento rozsah ještě větší. Nyní je prokázáno, že neutrina, která patří k nejrozšířenějším hmotným částicím ve vesmíru, mají hmotnosti řádově 10^{-37} kg.

Tabulka 1-5 Hmotnosti některých objektů

Objekt	Hmotnost v kilogramech
známý vesmír	$1 \cdot 10^{53}$
naše Galaxie	$2 \cdot 10^{41}$
Slunce	$2 \cdot 10^{30}$
Měsíc	$7 \cdot 10^{22}$
asteroid Eros	$5 \cdot 10^{15}$
malá hora	$1 \cdot 10^{12}$
zaoceánský parník	$7 \cdot 10^7$
slon	$5 \cdot 10^3$
člověk	$1 \cdot 10^2$
bobule hroznu	$3 \cdot 10^{-3}$
prachová částice	$7 \cdot 10^{-10}$
molekula penicilinu	$5 \cdot 10^{-17}$
atom uranu	$4 \cdot 10^{-25}$
proton	$2 \cdot 10^{-27}$
elektron	$9 \cdot 10^{-31}$



Obr. 1-4 Jak nám stárnuly standardy kilogramu. (Upraveno podle uvedeného článku J. Obdržálka.)

* Název základní jednotky hmotnosti kilogram představuje anomálii; gramaticky je to jméno složené s předponou „kilo“. Proto se jeho díly, případně i násobky, odvozují nikoli od slova „kilogram“, ale od základu „gram“: máme miligram, a nikoli mikrokilogram, megagram (tuna), a nikoli kilokilogram.

** Důvody a cesty, které vedly k nové definici kilogramu, jsou podrobně popsány např. v článku J. Obdržálek: Kilogram bez Sèvres. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* **64**, 139–144 (2019).

Atomová hmotnostní jednotka

Porovnávat hmotnosti atomů mezi sebou dokážeme mnohem přesněji než je srovnávat přímo s kilogramem. K tomu nám slouží další standard hmotnosti. Je jím atom uhlíku C 12, jemuž byla mezinárodní úmluvou přisouzena hmotnost 12 **atomových hmotnostních jednotek** (u). Pro atomovou hmotnostní jednotku u se používá rovněž název dalton (značka Da). Vztah mezi oběma jednotkami je (nejpřesnější hodnota přijatá v roce 2022)

$$1 \text{ u} = 1,660\,539\,068\,92(52) \cdot 10^{-27} \text{ kg.} \quad (1.7)$$

V závorce je uvedena nejistota vztahující se k posledním dvěma místům. Tak lze s přiměřenou přesností porovnávat hmotnosti různých atomů nebo jiných částic s hmotností atomu uhlíku C 12.

Hustota

V kap. 14 zavedeme **hustotu** ρ materiálu, která je rovna hmotnosti jeho jednotkového objemu

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.8)$$

Jednotkou hustoty v soustavě SI je kilogram na metr krychlový, někdy se užívá vyjádření v gramech na centimetr krychlový. Často používaná srovnávací hodnota bývá hustota vody (1,00 gram na centimetr krychlový). Tak například čerstvý sníh má hustotu 10krát menší ve srovnání s vodou, platina ji má naopak 21krát vyšší.

Příklad 1.03 Hustota a zkvalnění

Těžký objekt se může v průběhu zemětřesení potopit do země, pokud otřesy půdy způsobí „zkvalnění“ podloží, na kterém stojí. Ze země se stane doslova tekutý písek. Možnost přeměny podloží v tekutý písek může být předpovězena pomocí hodnoty podílu e , tedy

$$e = \frac{V_{\text{póry}}}{V_{\text{zrna}}}. \quad (1.9)$$

V tomto vztahu V_{zrna} odpovídá celkovému objemu zrn písku ve vzorku a $V_{\text{póry}}$ je celkový objem mezi zrn (tedy celkový objem *pórů*). Jestliže e překročí kritickou hodnotu 0,80, může během zemětřesení dojít ke zkvalnění podloží. Jaká je odpovídající hustota písku $\rho_{\text{písek}}$? Hustota oxidu křemičitého (tvořícího hlavní složku písku) je $\rho_{\text{SiO}_2} = 2,600 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

ROZVAHA

Hustota písku $\rho_{\text{písek}}$ ve vzorku je dána jeho hmotností vztaženou na jednotku objemu, tzn. podílem celkové hmotnosti $m_{\text{písek}}$ zrn písku k celkovému objemu V_{celek} , který zaujímá vzorek písku, tedy

$$\rho_{\text{písek}} = \frac{m_{\text{písek}}}{V_{\text{celek}}}. \quad (1.10)$$

Výpočet: Celkový objem vzorku písku V_{celek} je

$$V_{\text{celek}} = V_{\text{zrna}} + V_{\text{póry}}.$$

Dosazením za $V_{\text{póry}}$ z rov. (1.9) a řešením pro V_{zrna} dostáváme

$$V_{\text{zrna}} = \frac{V_{\text{celek}}}{1 + e}. \quad (1.11)$$

Z rov. (1.8) pro hodnotu $m_{\text{písek}}$ plyne

$$m_{\text{písek}} = \rho_{\text{SiO}_2} V_{\text{zrna}}. \quad (1.12)$$

Dosazením tohoto výrazu do rovnice (1.10) a dosazením z rov. (1.11) za V_{zrna} dostáváme

$$\rho_{\text{písek}} = \frac{\rho_{\text{SiO}_2} V_{\text{celek}}}{V_{\text{celek}} (1 + e)} = \frac{\rho_{\text{SiO}_2}}{1 + e}. \quad (1.13)$$

Dosadíme-li za $\rho_{\text{SiO}_2} = 2,600 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a za kritickou hodnotu $e = 0,80$, zjistíme, že ke zkvalnění podloží dojde, pokud hustota písku bude menší než

$$\rho_{\text{písek}} = \frac{2,600 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{1,80} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}. \quad (\text{Odpověď})$$

Přehled & shrnutí

Fyzikální měření Fyzika je založena na měření *fyzikálních veličin*. Některé fyzikální veličiny byly vybrány za základní (například čas, délka a hmotnost). Každá z nich byla definována prostřednictvím standardu a dané základní jednotky (například metr, sekunda, kilogram). Ostatní fyzikální veličiny (nazývané odvozené) se definují pomocí základních veličin a jejich standardů a jednotek.

Soustava SI a ISQ V této knize (až na výjimky v některých úlohách) používáme Mezinárodní soustavu jednotek (SI) a Mezinárodní soustavu veličin (ISQ), viz dodatek A. V úvodních kapitolách vystačíme jen se třemi základními veličinami, které jsou uvedeny v tab.1-1. Mezinárodní dohodou byly pro tyto veličiny stanoveny standardy, jež musí být dostupné a neměnné. Pomocí nich se vyjadřují výsledky všech fyzikálních měření základních i odvozených veličin. Zápis velmi velkých nebo velmi malých hodnot lze zjednodušit použitím předpon (viz tab.1-2) nebo použitím exponenciálního tvaru.

Převod jednotek Při převodu jednotek postupně násobíme

původní hodnotu jednotkovými *převodními koeficienty*. Výrazy můžeme upravovat pomocí běžných algebraických pravidel.

Čas Jednotkou času je sekunda. Je navázána na pevně zvolenou hodnotu frekvence záření atomu cezia Cs 133.

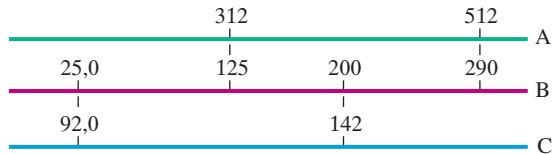
Délka Jednotkou délky je metr. Je navázán na pevně zvolenou hodnotu rychlosti světla ve vakuu.

Hmotnost Jednotkou hmotnosti je kilogram. Dříve byl definován pomocí prototypu, vyrobeného ze slitiny platiny a iridia a uloženého v Mezinárodním ústavu pro váhy a míry v Sèvres u Paříže. Nyní je kilogram navázán na pevně zvolenou hodnotu Planckovy konstanty. Pro měření hmotností na atomární úrovni se obvykle používá atomová hmotnostní jednotka u. Základem její definice je hmotnost atomu uhlíku ¹²C.

Hustota Hustota ρ materiálu je dána hmotností jeho objemové jednotky:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.8)$$

odpovídá 600 jednotek. Kolik jednotek při měření této doby ukážou hodiny (a) B a (b) C? (c) Jaký údaj je na hodinách B v okamžiku, kdy hodiny A ukazují 400 jednotek A? (d) Jaký údaj je na hodinách B v okamžiku, kdy hodiny C ukazují 15 jednotek C? (Předpokládáme, že čas před nulovou hodnotou je záporný.)



Obr.1-5 Úloha 6. Údaje času na hodinách A, B, C jsou v různých jednotkách.

•7 Až do roku 1883 se každé město ve Spojených státech řídilo svým vlastním časem. Cestujeme-li dnes, posouváme si hodinky jen tehdy, je-li časový posuv roven* celé hodině. Kolik stupňů zeměpisné délky a jakou vzdálenost na 45. rovnoběžce je třeba v průměru překonat, abychom své hodinky museli posunout právě o jednu hodinu?

•8 V laboratoři byly testovány patery různé hodiny. V jednom týdnu byly každý den přesně v poledne zaznamenány údaje všech hodin do následující tabulky. Seřadte hodiny podle přesnosti jejich chodu, od nejlepších po nejhorší.

Hodiny	Ne	Po	Út	St	Čt	Pá	So
A	12:36:40	12:36:56	12:37:12	12:37:27	12:37:44	12:37:59	12:38:14
B	11:59:59	12:00:02	11:59:57	12:00:07	12:00:02	11:59:56	12:00:03
C	15:50:45	15:51:43	15:52:41	15:53:39	15:54:37	15:55:35	15:56:33
D	12:03:59	12:02:52	12:01:45	12:00:38	11:59:31	11:58:24	11:57:17
E	12:03:59	12:02:49	12:01:54	12:01:52	12:01:32	12:01:22	12:01:12

* Časová pásma z praktických důvodů respektují státní útvary.

prázdným místem? Vyjádřete 7,00 almude v jednotkách (e) medio, (f) cahiz a (g) centimetrech krychlových (cm³).

••19 Hydrauličtí inženýři ve Spojených státech často používají jednotku *acre-foot*, která je definována jako objem vody pokrývající plochu jednoho akru do výšky jedné stopy (ft). Při silné bouřce spadlo 2,0 in srážek za 30 minut na město o ploše 26km². Vyjádřete objem srážek, které spadly na město, v jednotkách acre-foot.

Hmotnost

•20 Zlato má hustotu 19,32g·cm⁻³ a je nejtažnějším kovem, může být vytvarováno do tenkého listu nebo dlouhého vlákna. (a) Jaká je plocha listu o tloušťce 1000μm vyrobeného ze vzorku zlata o hmotnosti 27,63g? (b) Jaká je délka vlákna tvaru válce o poloměru 2,500μm vyrobeného z téhož vzorku zlata?

•21 (a) Předpokládáme, že voda má hustotu 1g·cm⁻³. Jakou hmotnost má jeden krychlový metr vody v kilogramech? (b) Předpokládáme, že voda z nádoby o objemu 5700m³ vyteče za 10,0 hodin. Určete hmotnostní tok vody v kilogramech za sekundu.

•22 Největší skleněnou láhev vyrobili v Millville v New Jersey – vyfoukali láhev s objemem 193 US galonů. (a) Kolik je to kubických centimetrů? (b) Jak dlouho bude z naplněné láhve volně vytékat voda rychlostí 1,8g·min⁻¹? Voda má hustotu 1000kg/m³.

•23 Země má hmotnost 5,98·10²⁴ kg. Průměrná hmotnost atomů, z nichž se skládá, je 40u. Z kolika atomů je Země složena?

••24 Krychlový centimetr typického mraku obsahuje 50 až 500 kapek vody s poloměrem 10μm. Z těchto informací odhadněte postupně nejmenší a největší hodnotu (a) objemu vody (v krychlových metrech) ve válcovém mraku výšky 3,0km a poloměru 1,0km, (b) počet litrových lahví, které tato voda zaplní, a (c) hmotnost vody v mraku. Voda má hustotu 1000kg/m³.

••25 Železo má hustotu 7,87g·cm⁻³. Hmotnost jednoho atomu železa je 9,27·10⁻²⁶ kg. (a) Jaký je objem jednoho atomu železa? (b) Jaká je vzdálenost mezi středy sousedních atomů za předpokladu, že atomy jsou sférické a těsně uspořádané?

••26 Jeden mol je roven 6,02·10²³ jednotek. Kolik molů atomů obsahuje jeden kilogram uhlíku? Hmotnost jednoho atomu uhlíku je 12u.

••27 V Malajsii si koupíte vola s hmotností 28,9 picul v místních jednotkách: 1 picul = 100 gin, 1 gin = 16 tahil, 1 tahil = 10 chee a 1 chee = 10 hoon. Jeden hoon odpovídá hmotnosti 0,3779g. Jakou hmotnost v kilogramech musíte uvést do přepravního dokladu, chcete-li vola přepravit na lodi domů?

••28 Jemná křemenná zrnka písku (SiO₂) z kalifornských pláží mají přibližně tvar kuliček o poloměru 50μm. Hustota křemene je 2600kg·m⁻³. Kolik kg písku má stejný povrch jako krychle o hraně 1m?

••29 Část úbočí hory ve tvaru hranolu měřícího 2,5km vodorovně a 0,80km podél svahu a o výšce 2,0m se při silném dešti sesunula. Bahno sklouzlo do údolí o rozměrech 0,40km×0,40km. Předpokládejte, že hustota sesunutého bahna je 1900kg/m³. Jaká byla hmotnost bahna ležícího nad plochou 4,0m² údolí?

••30 Voda přitéká i odtéká z nádoby, přičemž časová závislost hmotnosti m vody v nádobě je dána vzorcem

$$m = 5,00t^{0,8} - 3,00t + 20,00, \quad t \geq 0,$$

kde hmotnost m je v gramech, čas t v sekundách. (a) Ve kterém okamžiku bude hmotnost vody v nádobě největší? (b) Určete

Úlohy

Modul 1-2 Čas, délka, hmotnost

Čas

•1 Nejrychleji rostoucí zaznamenaná rostlina je *Hesperoyucca whipplei*, která za 14 dní vyroste o 3,7m. Vyjádřete rychlost jejího růstu v mikrometrech za sekundu.

•2 Dva týdny je obvyklá doba pro dovolenou. Kolik je to mikrosekund?

•3 Enrico Fermi kdysi poznamenal, že standardní doba vyučovací hodiny (45 min) je přibližně rovna jednomu mikrostoletí. Vyjádřete jedno mikrostoletí v minutách a vypočtete procentní odchylku výsledku od Fermiho odhadu.

•4 Asi deset let po Velké francouzské revoluci se francouzská vláda pokoušela ustanovit za základní jednotky času násobky deseti: Jeden nový týden by měl 10 nových dní, jeden nový den by byl rozdělen na 10 nových hodin, jedna nová hodina na 100 nových minut a jedna nová minuta na 100 nových sekund. Jaké jsou poměry (a) francouzského „desítkového“ týdne ke standardnímu týdnu a (b) francouzské „desítkové“ sekundy ke standardní sekundě?

•5 Standardy času jsou nyní založeny na atomových hodinách. Druhá slibná norma času vychází z *pulzarů*, které jsou rotujícími neutronovými hvězdami (vysoce kompaktní hvězdy složené pouze z neutronů). Některé rotují s velmi stabilní periodou a při každém otočení pulzaru je vysláno rádiové záření k Zemi (hvězda funguje jako maják). Pulzar PSR 1937+21 je toho příkladem. Rotuje jednou za 1,55780644887275(3)ms, kde 3 ukazuje nejistotu posledního desetinného místa. (a) Kolik otáček udělá pulzar PSR 1937+21 za 7,00 dní? (b) Kolik času potřebuje pulzar na to, aby se otočil přesně milionkrát a (c) jaká je nejistota tohoto výsledku?

•6 Troje digitální hodiny A, B a C běží různým tempem a ani neměly ve stejném okamžiku nastavené hodnoty na nulu. Obr.1-5 ukazuje čtyři současná měření vždy na páru hodin. Uvažujme o dvou událostech, mezi nimiž uplyne doba, které na hodinách A

••9 Délka pozemského dne se rovnoměrně zvyšuje o 0,001s za každé století. O kolik sekund se prodloužil den za dvacet století uplynulých od začátku našeho letopočtu? (Zpomalování rotace Země bylo zjištěno sledováním zatmění Slunce během posledních dvou tisíciletí.)

•••10 Předpokládejme, že ležice na pláži v blízkosti rovníku sledujeme západ Slunce nad klidným oceánem a spustíme stopky v okamžiku, kdy horní okraj Slunce zmizí za obzorem. Poté vstaneme (výška očí se změní o 1,70m) a stopky zastavíme ve chvíli, kdy opět horní okraj Slunce zmizí za obzorem. Určete poloměr Země, je-li naměřený čas roven 11,1s.

Délka

•11 Mikrometr (1μm) je často nazýván *mikron*. (a) Kolik mikrometrů má jeden kilometr? (b) Jakou část centimetru představuje 1μm? (c) Kolik mikrometrů je jeden yard?

•12 Mezery v této knize se obecně uvádí v typografických jednotkách point a pica [pajka]: 12 point = 1 pica a 6 pica = 1 palec. Obrázek byl chybně umístěn a na náhledu stránky byl posunut o 0,80cm. Vyjádřete tuto vzdálenost v jednotkách (a) pica a (b) point.

•13 Koňský závod se běží na vzdálenost 4,0 furlongy. Vyjádřete tuto vzdálenost v jednotkách (a) rod a (b) chain (1 furlong = 201,168m, 1 rod = 5,0292m a 1 chain = 20,117m).

•14 Gry je stará anglická míra pro délku definovaná jako 1/10 z line. *Line* je další stará anglická míra pro délku definovaná jako 1/12 palce. Běžná jednotka délky v topografii je *point*, 1 point = 1/72 palce. Vyjádřete plochu 0,50gry² v jednotkách point².

•15 Země má přibližně tvar koule s poloměrem 6378km. (a) Vypočtete její obvod v m. (b) Jaký má povrch v m²? (c) Jaký je její objem v m³?

•16 Převeďte 20 mil na km jen s použitím následujících převodních vztahů: 1 míle = 5280 stop, 1 stopa = 12 palců, 1 palec = 2,54cm, 1 m = 100cm a 1 km = 1000m.

••17 Antarktida má přibližně půlkruhový tvar o poloměru asi 2 tisíc km (obr.1-6). Je pokryta ledem, jehož průměrná tloušťka je 3000m. Kolik krychlových centimetrů ledu je v Antarktidě? (Zakřivení zemského povrchu zanedbejte.)



Obr.1-6 Úloha 17

••18 Běžné jednotky a měření můžete snadno převádět elektronicky, ale stále byste měli být schopni používat převodní tabulku (takovou, jaká je v dodatku D). Tabulka 1-6 je částí převodní tabulky pro systém objemových jednotek, které byly kdysi běžné ve Španělsku; objem 1 fanega je ekvivalentní objemu 55,501 dm³. Chcete-li dokončit tabulku, jaká čísla (na tři platná místa) by měla být zapsána (a) ve sloupci cahiz, (b) ve sloupci fanega, (c) ve sloupci cuartilla a (d) ve sloupci almude, počínaje vždy horním

Tabulka 1-6 Úloha 18

	cahiz	fanega	cuartilla	almude	medio
1 cahiz =	1	12	48	144	288
1 fanega =		1	4	12	24
1 cuartilla =			1	3	6
1 almude =				1	2
1 medio =					1

hmotnost vody v nádobě v tomto okamžiku. Určete v kilogramech za minutu hmotnostní průtok (míru změny hmotnosti) vody v nádobě v okamžiku (c) $t = 2,00\text{ s}$ a (d) $t = 5,00\text{ s}$.

•••**31** Do svislé nádoby s podstavou $14,0\text{ cm} \times 17,0\text{ cm}$ sypeme bonbony. Každý z nich má objem $50,0\text{ mm}^3$ a hmotnost $0,0200\text{ g}$. Předpokládejme, že objem prázdných prostorů mezi bonbony je zanedbatelný. Výška, po kterou je nádoba zaplněna, vzrůstá rychlostí $0,250\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jakou rychlostí (v kilogramech za minutu) vzrůstá hmotnost bonbonů v nádobě?

Další úlohy

32 Tabulka 1-7 obsahuje údaje pro převod starých jednotek objemu. Doplňte čísla v tabulce (na tři platná místa) (a) ve sloupci wey, (b) ve sloupci chaldron, (c) ve sloupci bag, (d) ve sloupci pottle a (e) ve sloupci gill, vždy shora dolů. (f) Objem 1 bag odpovídá objemu $0,1091\text{ m}^3$. Podle starého příběhu vaří čarodějnice odpor-nou tekutinu v kotli o objemu $1,5$ chaldronu. Jaký je to objem v krychlových metrech?

Tabulka 1-7 Úloha 32

	wey	chaldron	bag	pottle	gill
1 cahiz =	1	10/9	40/3	640	120240
1 fanega =					
1 cuartilla =					
1 almude =					
1 medio =					

33 Najděte převodní vztahy mezi (a) čtverečním yardem a čtve-reční stopou, (b) čtverečním palcem a čtverečním centimetrem, (c) čtveřční mílí a čtverečním kilometrem, (d) krychlovým metrem a krychlovým centimetrem.

34 Ve starém rukopisu z doby krále Artuše je psáno, že vlastník půdy měl $3,00$ akry orné půdy a louku o délce $25,0$ rodů a šířce $4,00$ rody. Jaká je celková plocha jeho pozemků (a) ve starých jednotkách rood a (b) v metrech čtveřčních? Jeden akr odpovídá ploše o délce 40 rodů a šířce 4 rody, jeden rood je plocha o rozmě-rech 40 rodů čtveřčních, rod má délku $16,5$ stopy.

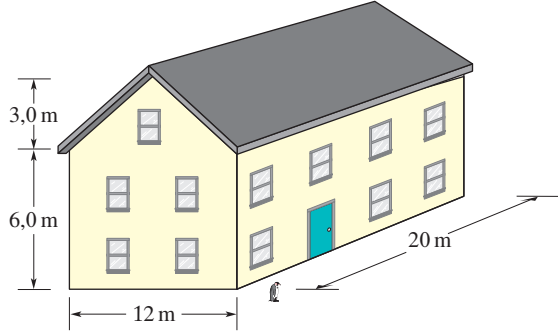
35 Turistka ze Spojených států si koupí auto vyrobené v Ang-lii, u nějž výrobce udává spotřebu jeden galon na 40 kilometrů. Neuvědomí si však, že anglický a americký galon se liší: 1 galon UK = $4,545\,9631$ litru, 1 galon US = $3,785\,3060$ litru. Turistka plánuje cestu dlouhou 750 km . (a) Jaký je počet galonů paliva, o němž (mylně) předpokládá, že jí bude stačit? (b) Kolik galonů paliva bude skutečně potřebovat?

36 V roce 1920 se ve Spojených státech používaly dva typy jed-notky barel. Apple barel je jednotka o objemu 7056 kubických palců, zatímco cranberry barel má 5826 kubických palců. Obchod-ník prodává zákazníkovi zboží s objemem 20 cranberry barelů, ale zákazník si myslí, že se jedná o apple barely. Jaký je rozdíl skutečného a zákazníkem předpokládaného objemu zboží?

37 Na malířské barvě je uveden údaj $460\text{ ft}^2/\text{gal}$. (a) Vyjádřete tuto hodnotu v čtveřčních metrech na litr. (b) Převeďte údaj do jednotek SI (viz dodatky A a D). (c) Určete převrácenou hodnotu údaje a (d) její fyzikální význam.

38 Dům pro panenky je vyroben v měřítku $1 : 12$ oproti sku-tečnému domu (tj. každá délka je dvanáctinou skutečné délky). Miniaturní dům je vyroben v měřítku $1 : 144$ vzhledem ke sku-tečnému. Předpokládejte, že skutečný dům se standardní šikmou střechou (obr. 1-7) (trojúhelníkové svislé plochy na koncích s výš-

kou $3,0\text{ m}$) má délku 20 m , hloubku 12 m a výšku $6,0\text{ m}$. Určete v krychlových centimetrech objem odpovídajícího (a) domu pro panenky a (b) miniaturního domu.



Obr. 1-7 Úloha 38

39 Staročeské látro představovalo podle některých pramenů objem řezaného dřeva srovnaného do tvaru kvádru o délce 8 stop, šířce 4 stopy a výšce rovněž 4 stopy. Kolik láter dřeva je v 1 m^3 ?

40 Molekula vody H_2O je tvořena dvěma atomy vodíku a jed-ním atomem kyslíku. Hmotnost atomu vodíku je $1,0\text{ u}$ a hmotnost atomu kyslíku je přibližně 16 u . (a) Jaká je celková hmotnost mo-lekuly vody? (b) Kolik molekul vody je ve všech světových oceá-nech, obsahují-li přibližně $1,4\cdot 10^{21}\text{ kg}$ vody?

41 V lodní dopravě je běžně používanou jednotkou objemu tuna. Použití této jednotky však vyžaduje jistou opatrnost, pro-tože existují nejméně tři druhy tun. První z nich odpovídá ob-jemu 7 barelů, druhý objemu 8 barelů a třetí objemu 20 barelů. 1 barel = $0,1415\text{ m}^3$. V přepravním příkazu klient uvádí požada-vek na 73 tuny bonbonů a jste si jistí, že má na mysli jednotky ob-jemu (nikoli hmotnosti). Měl-li klient na mysli první typ jednotky tuna, určete (v jednotkách US bušl), o jaký objem více bonbonů bude přepravováno na lodi, jestliže chybně naložíte (a) 73 tun dru-hého typu a (b) 73 tun třetího typu. ($1\text{ m}^3 = 28,378\text{ US bušlu}$.)

42 Pro velkou svatební hostinu má být víno servírováno v ohrom-né skleněné nádobě s vnitřními rozměry $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 30\text{ cm}$. Nej-prve je třeba nádobu naplnit až po okraj. Víno můžeme zakoupit v lahvích uvedených v následující tabulce. Nákup větší lahve místo několika menších snižuje celkové náklady. (a) Chcete-li minimali-zovat náklady, které velikosti lahví je třeba zakoupit? Kolik bude lahví jednotlivých velikostí? Kolik vína zbude po naplnění nádoby (b) v jednotkách standardní lahve a (c) v litrech?

1 magnum = 2 standardní lahve,
1 jeroboam = 4 standardní lahve,
1 rehoboam = 6 standardních lahví,
1 methuselah = 8 standardních lahví,
1 salmanazar = 12 standardních lahví,
1 balthazar = 16 standardních lahví = $11,3561$,
1 nebuchadnezzar = 20 standardních lahví.

43 Malá kostka cukru má tvar krychle s hranou délky 1 cm . Jaká by musela být délka hrany krychlové krabice, do které bychom chtěli uložit jeden mol kostek cukru?

44 S využitím údajů a převodů uvedených v této kapitole ur-čete počet atomů vodíku v $1,0\text{ kg}$ vodíku. Atom vodíku má hmot-nost $1,0\text{ u}$.

45 *Astronomická jednotka* (ua z angl. *astronomical unit*) je rovna střední vzdálenosti Země od Slunce, tj. asi $1,49\cdot 10^8\text{ km}$. Vyjádřete rychlost světla ($3,0\cdot 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) v astronomických jed-notkách za minutu.

46 Jaká je hmotnost vody, která naprší na město během silné bouře (viz úlohu 9)? Voda má hustotu $1,0\cdot 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

47 Při redukční dietě můžeme ztratit za týden až $2,3\text{ kg}$ tělesné hmotnosti. Kolik miligramů v průměru ztrácíme každou sekundu?

48 V chovu prasat je zaveden pojem obilno-prasečí poměr, který souvisí s náklady na vykrmení prasete. Tento poměr je defi-nován jako podíl tržní ceny prasete o hmotnosti $3,108$ slug k tržní ceně obilí o objemu 1 US bušl (tj. $35,2381$). Jako obilno-prasečí poměr je na trhu uváděna hodnota $5,7$. Určete podíl ceny 1 kilo-gramu prasete k ceně 1 litru obilí. (*Tip:* Využijte převodní tabulku hmotnosti v dodatku D.)

49 Máte připravit večeři pro 400 lidí na sjezdu fanoušků me-xické kuchyně. Váš recept vyžaduje dvě papričky jalapeños na jednu porci, vy však máte k dispozici pouze papričky habanero. Ostrost paprik je měřena v jednotkách SHU. Jedna paprička jalapeños má ostrost 4000 SHU , zatímco paprička habanero 300000 SHU . Kolik papriček habanero musíte použít, abyste zís-kali stejně kořeněné jídlo?

50 Pro určení velikosti pozemků se často používá jednotka plo-chy zvaná ar (značka a), který je roven 10^2 m^2 , a jednotka **hek-tar** (značka ha), představující 10^2 a . Povrchový uhelný důl odebírá každý rok 75 ha půdy do hloubky 26 m . Jaký objem půdy je každo-ročně odstraněn? Vyjádřete jej v km^3 .

51 (a) Čeho je víc: sekund v týdnu nebo minut v roce? (b) Člo-věk na Zemi existuje přibližně 10^6 let a stáří vesmíru je odhado-váno na 10^{10} roků. Kolik „sekund“ by byla Země osídlena člo-věkem, kdybychom za stáří Vesmíru považovali jeden pomyslný „den“?

52 Uvažujme o kontrastu starého a moderního, velkého a ma-lého. Plocha pozemku obdělávaná jednou rodinou ve staré Anglii byla 100 až 120 akrů (1 akr = 4047 m^2). Wapentake byla plocha půdy potřebné pro 100 takových rodin. V kvantové fyzice se prů-řez jádra měří v jednotkách barn (1 barn = $1\cdot 10^{-28}\text{ m}^2$). Vyjádřete číslem poměr plochy o obsahu 25 wapentake k ploše o obsahu 11 barn.

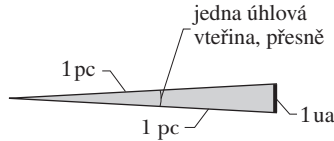
53 Tradiční japonská jednotka délky je ken (1 ken = $1,97\text{ m}$). Ur-čete poměr (a) čtveřčního kenu ke čtveřčnímu metru a (b) krychlo-vého kenu ke krychlovému metru. Jaký je objem válcové cisterny s výškou $5,50$ kenu a poloměrem $3,00$ keny v (c) krychlových ke-nech a (d) krychlových metrech?

54 Jako kapitán lodi obdržíte příkaz plout $24,5$ kilometru na východ, kde má být potopená pirátská loď. Vaši potápěči však nenaleznou žádné známky potopené lodi. Při kontrole původní informace zjistíte, že se jednalo o námořní míle (nikoli kilometry). O jakou vzdálenost v metrech se musíte ještě přesunout? Použijte převodní tabulky v dodatku D.

55 Typické interiérové schodiště má každý schod vysoký 19 cm a nášlap (vodorovná hloubka) 23 cm . Výzkum ukazuje, že scho-diště by bylo pro sestup bezpečnější, kdyby délka nášlapu byla

28 cm . O jakou vzdálenost by zasahovalo schodiště o celkové výšce $4,57\text{ m}$ dál do místnosti, kdybychom provedli navrhovanou změnu délky nášlapu?

56 Při úplném zatmění Slunce je sluneční kotouč téměř přesně zakryt Měsícem. (a) Určete poměr průměrů Slunce a Měsíce, víte-li, že Slunce je od Země asi 400 krát vzdálenější než Měsíc. (b) V jakém poměru jsou jejich objemy? (c) Přidržujte před očima korunovou minci tak, aby právě zakryla měsíční kotouč, a změřte zorný úhel, pod kterým ji vidíte. Z výsledku měření a ze znalosti vzdálenosti Země–Měsíc ($3,8\cdot 10^5\text{ km}$) odhadněte průměr Měsíce. **57** Astronomické vzdálenosti jsou v porovnání s pozemskými tak obrovské, že je výhodné pro ně používat jiných délkových jednotek. *Astronomická jednotka* (ua z angl. *astronomical unit*) je rovna střední vzdálenosti Země od Slunce, tj. asi $1,49\cdot 10^8\text{ km}$. Jeden *parsek* (pc, z angl. *parsec*) je vzdálenost, ze které bychom viděli astronomickou jednotku pod zorným úhlem jedné úhlové vteřiny (obr. 1-8). *Světelný rok* (l.y., z angl. *light year*) je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za jeden rok. (a) Vyjádřete vzdá-le-nost Země–Slunce v parsecích a světelných rocích. (b) Vyjádřete 1 pc a 1 l.y. v kilometrech. I když astronomové dávají přednost jed-notce pc, v populární literatuře se častěji používají světelné roky.



Obr. 1-8 Úloha 57

58 Při nákupu potravin jste chybně objednali pacifické ústřice (jejichž velikost odpovídá počtu 8 až 12 ústřic na jednu US pintu) místo atlantických ústřic (jejichž velikost odpovídá počtu 26 až 38 ústřic na jednu US pintu). O kolik ústřic méně musíte vzít (oproti původně předpokládanému počtu) pro naplnění nádoby s vnitřními rozměry $1\text{ m} \times 12\text{ cm} \times 20\text{ cm}$? (Jedna US pinta odpovídá objemu $0,47321\text{ l}$.)

59 Loket je starověká jednotka délky založená na vzdálenosti mezi loktem a špičkou prostředníčku. Předpokládejme, že tato vzdálenost je mezi 43 cm a 53 cm . Starověké kresby ukazují vál-cové sloupky s délkou 9 loktů a průměrem 2 lokty. Určete postupně nejmenší a největší odhad (a) délky válce v metrech, (b) délky válce v milimetrech a (c) objemu válce v krychlových metrech.

***60** *Planckova délka* a *Planckův čas*. Svět fyziky spočívá na třech fundamentálních konstantách: gravitační konstantě G (viz kap. 13), rychlosti světla c a Planckově konstantě h (viz kap. 38). Z těchto tří konstant vytvořte výraz, který bude mít rozměr délky, resp. času (takového postupu se říká rozměrová analýza a setkáte se s ní v učebnici několikrát). Takovou „přirozenou“ jednotku délky, resp. času nazýváme Planckova délka, resp. Planckův čas. *Po-známka:* Většinou se místo Planckovy konstanty h užívá redu-kovaná Planckova konstanta $\hbar = h/2\pi$ (viz modul 38-1).

2 | Fyzika

Třetí přepracované vydání připravil Petr Dub

Svazek 2

Vysoké učení technické v Brně
Nakladatelství VUTIAM



KAPITOLA 21

Elektrický náboj

21-1 COULOMBŮV ZÁKON

Co se naučíme a čemu porozumíme

Po prostudování tohoto modulu bychom měli umět ...

- 21.01 Rozlišit dva druhy elektrického náboje a popsat, jak interagují.
- 21.02 Rozlišit vodiče a izolanty.
- 21.03 Popsat, jak dochází k nabíjení a vybíjení předmětů.
- 21.04 Popsat, jak vzniká indukovaný náboj.
- 21.05 Objasnit, co je bodový náboj.

- 21.06 Používat princip superpozice pro elektrické síly.
- 21.07 Nakreslit pro zvolenou nabitou částici silový diagram.
- 21.08 Formulovat Coulombův zákon, napsat jeho matematické vyjádření a výklad doprovodit obrázkem.
- 21.09 Určit sílu, kterou na zvolenou nabitou částici působí ostatní nabitě částice.

Klíčové poznatky

- Elektrická interakce objektů závisí na jejich elektrickém náboji; ten může být kladný, nebo záporný. Dvě částice s náboji týchž (opačných) znamének se odpuzují (přitahují).
- Elektrický náboj Q soustavy, sestávající z n částic o nábojích $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, kde náboj Q_k je kladný, nebo záporný, je dán součtem nábojů jednotlivých částic.
- Předměty, které obsahují stejné množství kladného náboje a záporného náboje, jsou elektricky neutrální (jsou nenabitě). Pokud nejsou oba druhy náboje ve stejném množství, projeví se jejich nerovnováha (rozdíl nábojů) jako výsledný nenulový náboj. V tom případě říkáme, že předmět je nabitý.

- Vztah udávající elektrostatickou sílu působící mezi dvěma nabitými částicemi se nazývá Coulombův zákon. Velikost síly působící mezi částicemi o nábojích Q_1 a Q_2 , které jsou ve vzdálenosti r , je rovna

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2},$$

kde ϵ_0 je permitivita vakua.

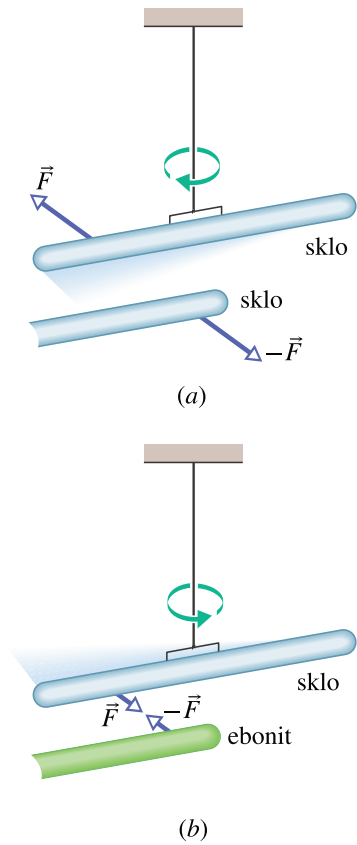
- Pokud na nabitou částici působí více nabitých částic, potom výsledná síla, která na ni působí, je dána vektorovým součtem všech elektrických sil, které na tuto částici působí (princip superpozice).

O co jde a jak na to

Všude kolem nás jsou zařízení, která jsou založena na elektromagnetismu. Elektromagnetismus, spojení elektrických a magnetických jevů, je základem pro činnost počítačů, televize, rozhlasu, telekomunikací, domácího osvětlení a dokonce způsobuje i to, že se sáčky od jídla mohou přilepit k popelnici. Elektromagnetismus je podstatou přírody. Nejenže drží pohromadě všechny atomy a molekuly na světě, ale jeho zásluhou také vznikají blesky, polární záře a duha.

Elektromagnetismem se zabývali již staří Řekové, kteří objevili, že když budou třít kus jantaru a poté jej přiblíží ke slámě, budou stébla slámy přiskakovat k jantaru. Dnes víme, že přitažlivost mezi jantarem a slámou je způsobena elektrickou silou. Staří Řekové rovněž objevili, že některé kameny (přirozeně se vyskytující magnety) přitahují železo. Dnes víme, že přitažlivost mezi magnetem a železem je způsobena magnetickou silou.

Z těchto skromných počátků se nauka o elektřině a nauka o magnetismu



Obr.21-1 (a) Dvě skleněné tyče jsme třeli hedvábným hadříkem a jednu pak zavěsili na vlákno upevněné v jejím středu. Když jsou konce tyčí blízko sebe, vzájemně se odpuzují. (b) Ebonitovou tyč jsme třeli kožešinou. Když ji přiblížíme k zavěšené skleněné tyči, kterou jsme třeli hedvábným hadříkem, tyče se vzájemně přitahují.

* Franklin byl světově uznávaný vědec. Dokonce se říkalo, že jeho diplomatický triumf ve Francii během americké války za nezávislost byl možný právě díky tomu, že byl jako vědec tak vysoce oceňován.

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 disciplínu, elektromagnetismus, 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 vynikne, uvažíme-li, že jeho sebrané laboratorní deníky neobsahují jedinou rovnici. V druhé polovině 19. století James Clerk Maxwell vyjádřil Faradayovy poznatky v matematické podobě, připojil řadu svých vlastních nových myšlenek a položil tak teoretické základy elektromagnetismu (J. C. Maxwell: *Treatis on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, Oxford 1873).

Naše diskuse o elektromagnetismu je rozložena do dalších 16 kapitol (výklad vyvrcholí v kap. 32, kde jsou uvedeny čtyři Maxwellovy rovnice vyjadřující zákony elektromagnetismu, a v následujících čtyřech kapitolách se pak budeme věnovat elektromagnetickým vlnám a optice). Začneme s elektrickými jevy a v prvním kroku probereme základní vlastnosti elektrického náboje a elektrické síly.

Elektrický náboj

Na obr.21-1 vidíme dva pokusy, pro někoho možná překvapivé, a naším úkolem bude je objasnit. V prvním experimentu na obr.21-1a jsme nejprve hedvábným hadříkem třeli skleněnou tyč a potom ji zavěsili na vlákno upevněné v jejím středu. Druhou tyč, kterou jsme třeli také hedvábným hadříkem, jsme přiblížili k jednomu konci zavěšené tyče. A ta se pootočí. Vidíme, že je odpuzována od druhé tyče. Na každou z tyčí působí síla směřující od druhé. Ale proč? Vždyť tyče se přece nedotýkají.

V druhém experimentu na obr.21-1b jsme změnili materiál druhé tyče, místo skleněné jsme použili ebonitovou, a tu pak třeli místo hedvábným hadříkem kožešinou. Vidíme, že nyní se tyče přitahují. Stejně jako v prvním experimentu mezi nimi neexistuje žádný kontakt.

V následující kapitole Elektrické pole objasníme, jak zavěšená tyč ví o přítomnosti jiných tyčí. V této kapitole se zaměříme pouze na síly, které působí mezi tyčemi. V prvním experimentu na zavěšenou tyč působila síla *odpudivá*, a ve druhém *přitažlivá*. Na základě dlouhého usilovného zkoumání vědci zjistili, že síly, které se projevují v těchto experimentech, jsou způsobeny elektrickým *nábojem*, který jsme vytvořili na tyčích tím, že byly ve velmi těsném dotyku s hedvábným nebo kožešinou. Elektrický náboj je atributem (základní neodmyslitelnou vlastností) elementárních částic, z nichž se skládají všechny objekty kolem nás, jako jsou tyče, hedvábí či kožešina použité v popsanych experimentech. Elektrický náboj je charakteristickou vlastností, která je s těmito částicemi nerozlučně spojena, ať se nacházejí v jakékoli situaci.

Dva druhy náboje. Existují dva druhy elektrického náboje, kladný náboj a záporný náboj. 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.

Elektrický náboj Q soustavy, sestávající z n částic o nábojích $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, kde náboj Q_k je kladný, nebo záporný, je dán součtem nábojů jednotlivých částic. Tento poznatek se nazývá *zákon aditivnosti elektrických nábojů*.

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

Přebytečný náboj. Za běžných podmínek jste přibližně elektricky neutrální. Pokud se nacházíte v prostředí, kde je nízká vlhkost, a projdete-li se po určitém druhu koberce, může se stát, že se na vašem těle mírně naruší rovnováha mezi oběma druhy elektrického náboje. Buď získáte záporný náboj z koberce (v bodech kontaktu mezi botami s kobercem) a stanete se záporně nabitými, nebo ztratíte záporný náboj a stanete se kladně nabitými. Pravděpodobně si toho nevšimnete, dokud nesáhnete na kovovou kliku dveří nebo se dotknete jiné osoby. Pokud je přebytečný náboj na vašem těle dostatečný, přeskóčí jiskra mezi vámi a druhým objektem, a tak se vybijete a stanete se opět elektricky neutrální. Jiskry jsou obvykle pouze nepříjemné a někdy i poněkud bolestivé. Pokud se vám však stane, že jiskra například ze sundaného svetru přeskóčí na počítač, následky mohou být vážnější. K *nabíjení* a *vybíjení* předmětů nedochází ve vlhkých podmínkách, protože vodní páry ve vzduchu okamžitě *neutralizují* přebytek náboje.

Dvě z velkých záhad fyziky zní (1) *proč* existují ve vesmíru částice s elektrickým nábojem a (2) *proč* jsou elektrické náboje právě dvojího druhu. Odpověď zní, nevíme. Nicméně, na základě řady experimentů podobných těm dvěma našim pokusům vědci zjistili, že



Částice s elektrickým nábojem téhož znaménka se odpuzují, částice s elektrickým nábojem opačného znaménka se přitahují.

Za chvíli pak 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.

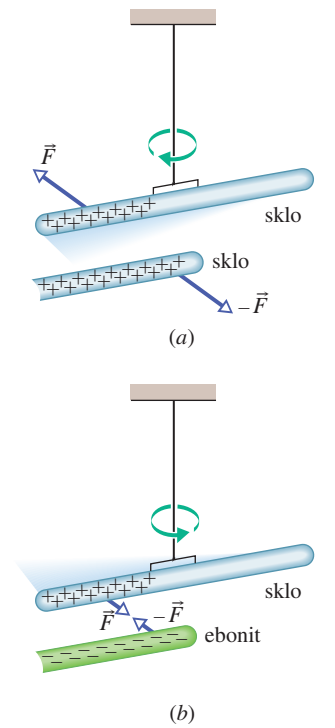
Dva pokusy. Nyní se vrátíme ke dvěma vyloženým experimentům a vysvětlíme, proč se tyče pohybují. Když třeme tyč hedvábným hadříkem, přenáší se malé množství záporného náboje z tyče na hedvábí a tím se trochu naruší elektrická neutralita tyče, tyč se nabije kladně. (K objasnění přenosu záporného náboje by bylo potřeba provést řadu experimentů a mít hlubší představu o stavbě látek.) Poznamenejme, že tyč třeme hedvábním jen proto, abychom dosáhli těsnějšího kontaktu a tím také většího množství přeneseného náboje; to však stále zůstává oproti celkovému náboji předmětů nepatrné. Nabitou tyč zavěsíme na vlákno, abychom ji od okolí *elektricky izolovali*, aby se její náboj nemohl měnit. Když jsme i druhou tyč třeli hedvábným hadříkem, nabila se také kladně. Přiblížíme-li ji potom k první, zavěšené tyči, obě tyče se navzájem *odpuzují* (obr.21-2a).

Když třeme ebonitovou tyč kožešinou, přenáší se na ni z kožešiny malé množství záporného náboje, tyč se tak nabíjí záporně. Přiblížíme-li pak záporně nabitou ebonitovou tyč k zavěšené kladně nabitě skleněné tyči, obě tyče se navzájem *přitahují* (obr.21-2b). Náboje nemůžete vidět, ale můžete pozorovat, jak se projevují.

Vodiče a nevodiče

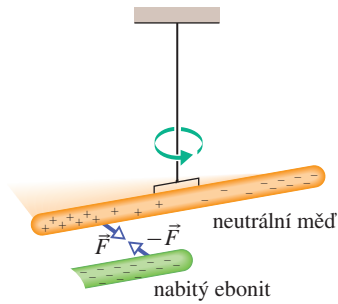
Obecně lze látky rozdělit podle způsobu, jakým se v nich pohybuje náboj. **Vodiče** jsou látky, ve kterých se náboj může pohybovat poměrně volně; mezi příklady patří kovy (jako třeba měď v přívodní šňůře svítidla), lidské tělo a voda z kohoutku. **Nevodiče** – též **izolátory** nebo **dielektrika** – jsou látky, ve kterých se náboj volně pohybovat nemůže; příklady jsou pryž (třeba použitá jako izolace přívodní šňůry), plasty, sklo a destilovaná voda. **Polovodiče** jsou látky, které mají vlastnosti mezi vodiči a izolátory; příklady jsou křemík a germanium v mikroprocesoru počítače. **Supravodiče** jsou *dokonalé* vodiče, v těchto látkách nebrání pohybu náboje *žádná* překážka. V dalším textu se budeme zabývat pouze vodiči a izolátory.

Uzemnění. Uveďme příklad, jak lze pomocí vodiče odstranit přebytečný náboj z nějakého předmětu. Třete-li měděnou tyč vlnou, dochází k přenosu náboje



Obr.21-2 (a) Dvě tyče nabitě souhlasnými náboji se odpuzují. (b) Dvě tyče nabitě opačnými náboji se přitahují. Znaménka plus označují kladný výsledný náboj, znaménka minus záporný výsledný náboj.

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



Obr.21-3 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 přitahuje k ebonitu.

z vlny na tyč. Pokud ovšem držíte tyč a zároveň se dotýkáte vodovodního kohoutku, nebudete schopni tyč nabít. Je tomu tak proto, že vaše tělo, tyč i kohoutek jsou vodiče spojené se zemským povrchem, což je obrovský vodič. Protože přebytečné náboje přenesené pomocí vlny na tyč se vzájemně odpuzují, začnou se od sebe vzdalovat tak, že nejdříve projdou tyčí, dále vámi a pak skrz kohoutek a potrubí do země, kde se rozptýlí. Nakonec tedy tyč zůstane elektricky neutrální.

Uzemnit předmět znamená vytvořit vodivou cestu mezi ním a zemským povrchem. **Vybití** předmět znamená jej zneutralizovat, tj. vyrovnat jakoukoli cestou množství kladného a záporného náboje, který na něm je. Když měděnou tyč držíme nikoli přímo v ruce, ale za držadlo z izolátoru, přerušíme vodivou cestu k zemi a tyč pak můžeme třením nabít.

Nabité částice. 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 *jádru* atomů.

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. Kdyby tomu tak nebylo, nebyly by žádné atomy a ani my. (O stavbě atomů se více dozvíte v kap. 40.)

Když se seskupí atomy vodiče (např. mědi), aby vytvořily tuhé těleso, pak některé z jejich vnějších (tedy nejméně přitahovaných) elektronů se od nich uvolní a pohybují se víceméně volně uvnitř celého tělesa, zanechávající na místě kladně nabitě zbytky atomů – *kladné ionty*. Tyto pohyblivé elektrony se nazývají *vodivostní*. V kovech je jich velmi mnoho, zatímco v nevodičích je vodivostních elektronů velmi málo (o tom více v kap. 41).

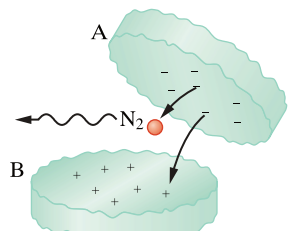
Indukovaný náboj. Pokus na obr. 21-3 demonstruje pohyblivost náboje ve vodiči. Záporně nabitá ebonitová tyč bude přitahovat libovolný konec izolované neutrální měděné tyče. Vodivostní elektrony v bližším konci měděné tyče jsou odpuzovány záporným nábojem ebonitové tyče. Některé z vodivostních elektronů se pohybují ke vzdálenějšímu konci měděné tyče a způsobují tak v jejím bližším konci nedostatek elektronů a tím převahující 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 elektrony 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*.

Modré záblesky z bonbonů

Nepřímý důkaz přitažlivosti nábojů s opačnými znaménky můžeme pozorovat u kostky cukru nebo některých druhů tvrdých bonbonů. Zavřete se s kolegou do temné komory; asi po 15 minutách si vaše oči přivyknou na tmou. Bude-li pak váš kolega kousat kostku cukru, bude kostka jiskřit (jev triboluminiscence). U některých tvrdých bonbonů uvidíte při každém kousnutí vystupovat z jeho úst slabé záblesky modrého světla. (Raději drťte sladkost kleštěmi.) Při každém skousnutí se krystal cukru rozlomí na kousky, přičemž je pravděpodobné, že některé z nich budou mít přebytek elektronů, zatímco jiné budou mít přebytek kladných iontů.



Obr.21-4 Dva kousky bonbonu se rozpadly. Elektrony přeskakující ze záporně nabitého povrchu kousku A na kladně nabitý povrch kousku B se srážejí s molekulami dusíku (N_2) ve vzduchu.

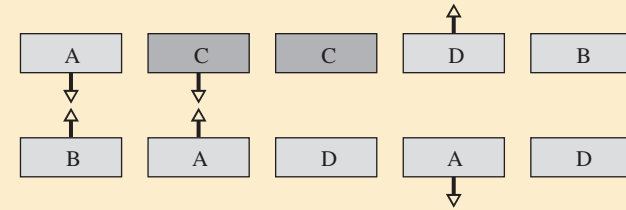
Předpokládejme, že se krystal rozdělí na kousky A a B (obr. 21-4). Má-li kousek A na povrchu více elektronů než kousek B, pak kousek B má na povrchu kladné ionty (atomy, které odevzdaly svoje elektrony kousku A). Elektrony na kousku A jsou silně přitahovány ke kladným iontům na kousku B, a tak některé z těchto elektronů přeskočí mezeru mezi kousky.

Během přeskočení se elektrony srážejí s molekulami dusíku obsaženými 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.



Kontrola 1

Obrázek ukazuje pět dvojic desek: A, B, D jsou nabitě plastové 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.



Coulombův zákon

Nyní přistoupíme k matematické formulaci Coulombova zákona. Dříve než se jím budeme podrobně zabývat, zdůrazníme, že platí pouze pro (nabitě) částice, tedy pro objekty, které jsou mnohem menší, než je vzdálenost mezi nimi. V tomto smyslu hovoříme o bodových nábojích. Jak zjistit síly působící mezi objekty, jejichž rozměry nejsou zanedbatelné vzhledem k jejich vzdálenosti, vyložíme později.

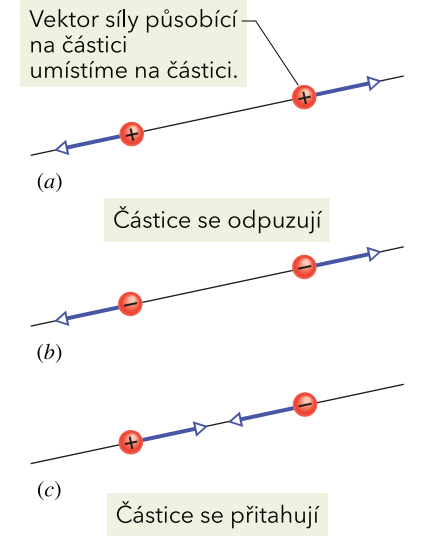
Uvažujme o dvou nabitých částicích, které jsou v dané soustavě v klidu. Potom jedna z nich působí na druhou **elektrostatickou silou**. Směr vektorů síly závisí na znaménkách nábojů. Mají-li náboje na obou částicích stejná znaménka, částice se vzájemně odpuzují. Znamená to, že síla působící na každou částici směřuje směrem od té druhé (obr. 21-5a,b). Pokud částice uvolníme, budou se od sebe zrychleně vzdalovat. Mají-li však náboje na částicích opačná znaménka, částice se vzájemně přitahují (obr. 21-5c). Pokud tyto částice uvolníme, budou se k sobě zrychleně přibližovat.

Vztah udávající elektrostatickou sílu působící mezi nabitými *částicemi* se nazývá **Coulombův zákon** podle francouzského fyzika Charlese Augustina Coulomba, který jej v roce 1785 formuloval na základě svých měření.* Při použití označení částic podle obr. 21-6, kde částice 1 má náboj Q_1 a částice 2 má náboj Q_2 , je síla působící na částici 1 rovna

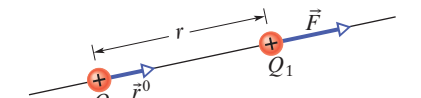
$$\vec{F} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{r}^0 \quad (\text{Coulombův zákon}), \quad (21.1)$$

kde $\vec{r}^0$ je jednotkový vektor směřující od částice 2 k částici 1, r je vzdálenost částic a k je konstanta. (Jako u ostatních jednotkových vektorů má $\vec{r}^0$ velikost přesně 1 a má fyzikální rozměr i jednotku rovnou jedné; jeho smyslem je určení směru.)

* Charles Coulomb použil k měření torzní váhy, které jsou v dané soustavě v klidu. Torzní váhy použil už dříve Henry Cavendish k určení gravitační konstanty (viz úloha 104 v kap. 13).



Obr.21-5 Dvě nabitě částice 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.



Obr.21-6 Elektrostatickou sílu působící na částici 1 lze vyjádřit pomocí jednotkového vektoru $\vec{r}^0$, který leží na přímce procházející oběma částicemi a míří od částice 2 k částici 1.

Mají-li náboje na obou částicích stejná znaménka, směřuje síla působící na částici 1 stejně jako $\vec{r}^0$, částice 1 je tedy odpuzována od částice 2. Jsou-li znaménka nábojů částic opačná, směřuje síla opačně než $\vec{r}^0$, částice 1 je tedy odpuzována částicí 2.

Zákony převrácených čtverců. Všimněte si, že rov. (21.1) má stejný tvar jako Newtonův gravitační zákon (13.3) pro sílu, kterou působí částice 2 o hmotnosti m_2 na částici 1 o hmotnosti m_1 :

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{r}^0 \quad (\text{Newtonův gravitační zákon}), \quad (21.2)$$

kde r je vzdálenost částic a G je gravitační konstanta. Znaménko minus značí, že gravitační síla je vždy přitažlivá.

Konstantu k ve vztahu (21.1) bychom mohli v analogii s gravitační konstantou G ve vztahu (21.2) nazvat „elektrostatická konstanta“. Obě rovnice vyjadřují „zákon převrácených čtverců“, podle něhož velikost síly 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.

Platnost Coulombova zákona. 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 newtonovská 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.

Jednotka náboje a jednotka proudu. Jednotkou náboje v soustavě SI je **coulomb** (značka C). Vzhledem k praktickým potřebám měření však není jednotkou základní, ale odvozenou, a to z jednotky elektrického proudu I — **am-péru** (značka A). Elektrickým proudem se budeme podrobně zabývat v kap. 26, zde uvedeme pouze jeho definici

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{elektrický proud}), \quad (21.3)$$

kde dQ je náboj, který projde průřezem vodiče za dobu dt . Z rov. (21.3) dostaneme

$$1 \text{ C} = (1 \text{ A})(1 \text{ s}).$$

V reformované soustavě SI (platné od roku 2019) je ampér navázán na pevně stanovenou hodnotu elementárního náboje. Definici ampéru uvedeme v modulu 21-2.

V soustavě SI se konstanta k v rov. (21.1) zapisuje ve tvaru $1/(4\pi\epsilon_0)$, kde ϵ_0 je **permitivita vakua** neboli **elektrická konstanta**. Její hodnota přijatá v roce 2022

$$\epsilon_0 = 8,854\,187\,818\,8(14) \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (21.4)$$

je určena s relativní chybou $1,6 \cdot 10^{-10}$.

Hodnota elektrostatické konstanty k je potom rovna

$$k = 8,987\,551\,792\,3(14) \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}. \quad (21.5)$$

Velikost síly. Velikost síly vystupující v Coulombově zákonu je

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} \quad (\text{Coulombův zákon}). \quad (21.6)$$

Všimněte si, že v rov. (21.6), která určuje velikost síly, vystupují velikosti nábojů. Při řešení úloh nejprve určíme velikost síly, kterou působí jedna částice na druhou, a potom určíme směr síly působící na danou částici podle znamének nábojů obou částic.

* Při přímém experimentálním ověřování platnosti Coulombova zákona se předpokládá závislost $1/r^{2+\epsilon}$, kde hodnota ϵ určuje odchylku od Coulombova zákona. Z Coulombova experimentu vyplynulo, že $|\epsilon| < 10^{-2}$, ze současných experimentů (1983) plyne, že $|\epsilon| < 10^{-16}$. Pokud by neplatil Coulombův zákon, zhroutila by se nejen elektrodynamika, ale zhroutil by se především i celý svět, jak jej známe.

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

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \dots + \vec{F}_{1n}, \quad (21.7)$$

kde např. $\vec{F}_{14}$ je síla působící na částici 1 v důsledku existence částice 4.

Jak řešit úkoly. Vzhledem k významu tohoto vztahu pro řešení úloh jej budeme podrobně slovně komentovat. Máme-li určit výslednou elektrostatickou sílu působící na vybranou nabitou částici, která je obklopena jinými nabitými částicemi, nejprve jasně vymezíme vybranou částici a potom najdeme síly, kterými na ni působí všechny ostatní nabitě částice. Tyto síly nakreslíme do *silového diagramu* vybrané částice a pak je vektorově sečteme. Tak dostaneme hledanou výslednou sílu působící na vybranou částici.

Můžeme tedy shrnout:



Užitím Coulombova zákona a principu superpozice lze vyřešit všechny úlohy; v některých případech snadno, v některých případech je řešení pracné. Ale i do takových úloh je potřeba se pustit.

Označení používaná pro náboje. Dříve než se pustíme do řešení úloh, přijmeme dohodu pro označení nábojů. Je-li použita značka Q beze znaménka (ať už s indexem nebo bez něj), může znamenat jak náboj kladný, tak záporný (není-li explicitně řečeno, že jde o velikost náboje). Naproti tomu označení $+Q$ určuje náboj kladný a $-Q$ náboj záporný. Je-li nabitých předmětů více, mohou být jejich náboje zadány jako násobky velikosti nějakého vztažného náboje. Označení $+2Q$ tedy znamená kladný náboj s dvojnásobnou velikostí, než je velikost Q vztažného náboje, $-3Q$ označuje záporný náboj třikrát větší než vztažný náboj.

Slupkové teorémy. Oba slupkové teorémy, které nám byly tak užitečné při studiu gravitace, mají svou analogii v elektrostatice a zdůvodníme je v posledním článku modulu 23-4:



První slupkový teorém. Kulová slupka nabitá rovnoměrně rozloženým nábojem přitahuje, nebo odpuzuje nabitou částici umístěnou vně této slupky stejnou silou, jako kdyby se celý náboj slupky nacházel v jejím středu.



Druhý slupkový teorém. Výsledná elektrostatická síla, kterou působí kulová slupka nabitá rovnoměrně rozloženým nábojem na nabitou částici umístěnou uvnitř této slupky, je nulová.

Kulové vodiče

Je-li na kulovou slupku z vodivého materiálu přemístěn volný náboj, rozloží se rovnoměrně po jejím (vnějším) povrchu. Přeneseme-li na ni např. volné elektrony, odpuzují se navzájem a snaží se pohybovat od sebe po celé dosažitelné ploše, dokud se nerozmístí rovnoměrně. Při tomto uspořádání jsou i nejbližší vodivostní elektrony od sebe vzdáleny co nejvíce. Podle prvního slupkového teorému bude slupka přitahovat, nebo odpuzovat vnější náboje tak, jako kdyby byl volný (přebytečný) náboj celé slupky soustředěn v jejím středu*.

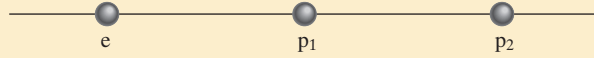
Odstraníme-li naopak z vodivé slupky jistý záporný náboj, rozmístí se zbylý kladný náboj na jejím povrchu také rovnoměrně. Odejmem-li například n elektronů, zbude n jader s kladným nábojem; místa, kde chybí elektron, budou rozložena rovnoměrně po slupce. Podle prvního slupkového teorému bude slupka opět přitahovat, nebo odpuzovat vnější náboj tak, jako kdyby byl její přebytečný náboj umístěn v jejím*.

* Vnější náboj ovšem ovlivní rozložení volného náboje na povrchu kovové koule. Uvedené tvrzení pak platí, pokud lze změnu rozložení volného náboje zanedbat.



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 21.01 Nalezení výsledné síly způsobené dvěma dalšími částicemi

Tento příklad obsahuje tři úkoly, kterým přísluší různá uspořádání nabitých částic. V každém z nich máme stejnou nabitou částici 1 a hledáme síly, které na ni působí. První úkol je velmi snadný, na částici 1 působí pouze jedna síla. Druhý úkol je o něco těžší, na částici 1 působí dvě síly, které míří opačnými směry. Třetí úkol je nejtěžší, na částici 1 působí opět dvě síly, které ale míří různými směry. Stěžejní při řešení všech tří úkolů je správně nakreslit všechny síly působící na částici 1 a teprve potom začít počítat.

(a) Obr. 21-7a ukazuje dvě kladně nabitě částice upevněné na ose x ve vzdálenosti $R = 0,0200$ m. Náboje částic jsou $Q_1 = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C a $Q_2 = 3,20 \cdot 10^{-19}$ C. Jaká je elektrostatická síla $\vec{F}_{12}$, kterou působí částice 2 na částici 1?

ROZVAHA

Protože jsou obě částice kladně nabitý, je částice 1 odpuzována částicí 2 silou, jejíž velikost je dána rovnicí (21.6). Síla $\vec{F}_{12}$ působící na částici 1 proto směřuje *od* částice 2, tedy v záporném směru osy x , což je znázorněno na obr. 21-7d.

Dvě částice: Použijeme-li rov. (21.6), kam dosadíme zadanou vzdálenost R za r , dostaneme

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{R^2} = (8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}) \cdot$$

$$\cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(0,0200 \text{ m})^2} = 1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N}.$$

Síla $\vec{F}_{12}$ má tudíž velikost a směr (určený úhlem, který svírá síla s kladným směrem osy x)

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

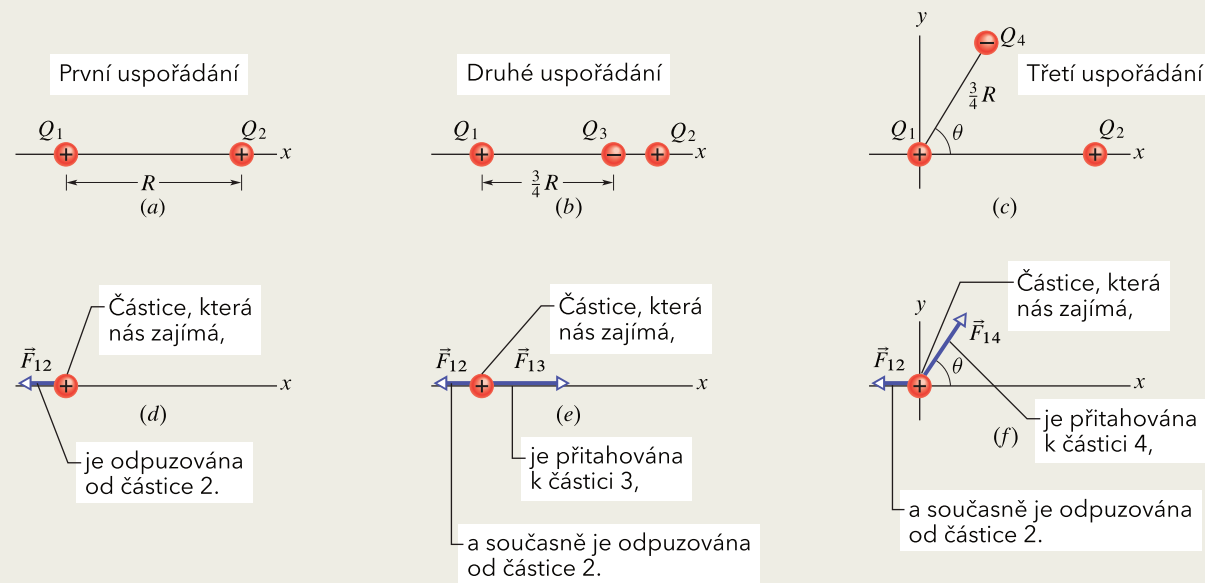
Sílu $\vec{F}_{12}$ lze také vyjádřit pomocí jednotkových vektorů takto:

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

(b) Obr. 21-7b se liší od obr. 21-7a pouze tím, že na ose x mezi částicemi 1 a 2 leží částice 3. Částice 3 má náboj $Q_3 = -3,20 \cdot 10^{-19}$ C a její vzdálenost od částice 1 je $\frac{3}{4}R$. Jaká je výsledná elektrostatická síla $\vec{F}_1$, kterou na částici 1 působí částice 2 a 3?

ROZVAHA

Přítomnost třetí částice nemá vliv na elektrostatickou sílu mezi částicemi 2 a 1. Na částici 1 tedy stále působí síla $\vec{F}_{12}$. Podobně síla $\vec{F}_{13}$, kterou působí částice 3 na částici 1, není ovlivněna přítomností částice 2. Protože částice 1 a 3 mají náboje s opačnými znaménky, je částice 1 přitahována k částici 3. Síla $\vec{F}_{13}$ pak směřuje *k* částici 3, jak je znázorněno na obr. 21-7e. Výsledná síla $\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13}$ leží v ose x .



Obr. 21-7 Příklad 21.01. (a) Dvě částice s náboji Q_1 a Q_2 upevněné na ose x a (d) silový diagram zobrazující částici 1 a elektrostatickou sílu, kterou na ni působí částice 2. (b) Tři částice ležící na přímce a (e) silový diagram pro částici 1. (d) Tři částice neležící na přímce a (f) silový diagram pro částici 1.

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

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \dots + \vec{F}_{1n}, \quad (21.7)$$

kde např. $\vec{F}_{14}$ je síla působící na částici 1 v důsledku existence částice 4.

Jak řešit úkoly. Vzhledem k významu tohoto vztahu pro řešení úloh jej budeme podrobně slovně komentovat. Máme-li určit výslednou elektrostatickou sílu působící na vybranou nabitou částici, která je obklopena jinými nabitými částicemi, nejprve jasně vymezíme vybranou částici a potom najdeme síly, kterými na ni působí všechny ostatní nabitě částice. Tyto síly nakreslíme do *silového diagramu* vybrané částice a pak je vektorově sečteme. Tak dostaneme hledanou výslednou sílu působící na vybranou částici.

Můžeme tedy shrnout:



Užitím Coulombova zákona a principu superpozice lze vyřešit všechny úlohy; v některých případech snadno, v některých případech je řešení pracné. Ale i do takových úloh je potřeba se pustit.

Označení používaná pro náboje. Dříve než se pustíme do řešení úloh, přijmeme dohodu pro označení nábojů. Je-li použita značka Q beze znaménka (ať už s indexem nebo bez něj), může znamenat jak náboj kladný, tak záporný (není-li explicitně řečeno, že jde o velikost náboje). Naproti tomu označení $+Q$ určuje náboj kladný a $-Q$ náboj záporný. Je-li nabitých předmětů více, mohou být jejich náboje zadány jako násobky velikosti nějakého vztažného náboje. Označení $+2Q$ tedy znamená kladný náboj s dvojnásobnou velikostí, než je velikost Q vztažného náboje, $-3Q$ označuje záporný náboj třikrát větší než vztažný náboj.

Slupkové teoremy. Oba slupkové teoremy, které nám byly tak užitečné při studiu gravitace, mají svou analogii v elektrostatice a zdůvodníme je v posledním článku modulu 23-4:



První slupkový teorém. Kulová slupka nabitá rovnoměrně rozloženým nábojem přitahuje, nebo odpuzuje nabitou částici umístěnou vně této slupky stejnou silou, jako kdyby se celý náboj slupky nacházel v jejím středu.



Druhý slupkový teorém. Výsledná elektrostatická síla, kterou působí kulová slupka nabitá rovnoměrně rozloženým nábojem na nabitou částici umístěnou uvnitř této slupky, je nulová.

Kulové vodiče

Je-li na kulovou slupku z vodivého materiálu přemístěn volný náboj, rozloží se rovnoměrně po jejím (vnějším) povrchu. Přeneseme-li na ni např. volné elektrony, odpuzují se navzájem a snaží se pohybovat od sebe po celé dosažitelné ploše, dokud se nerozmístí rovnoměrně. Při tomto uspořádání jsou i nejbližší vodivostní elektrony od sebe vzdáleny co nejvíce. Podle prvního slupkového teorému bude slupka přitahovat, nebo odpuzovat vnější náboje tak, jako kdyby byl volný (přebytečný) náboj celé slupky soustředěn v jejím středu*.

Odstraníme-li naopak z vodivé slupky jistý záporný náboj, rozmístí se zbylý kladný náboj na jejím povrchu také rovnoměrně. Odejmem-li například n elektronů, zbude n jader s kladným nábojem; místa, kde chybí elektron, budou rozložena rovnoměrně po slupce. Podle prvního slupkového teorému bude slupka opět přitahovat, nebo odpuzovat vnější náboj tak, jako kdyby byl její přebytečný náboj umístěn v jejím *.

* Vnější náboj ovšem ovlivní rozložení volného náboje na povrchu kovové koule. Uvedené tvrzení pak platí, pokud lze změnu rozložení volného náboje zanedbat.