

Petr Dub a Jiří Spousta
Ústav fyzikálního inženýrství a Středoevropský technologický institut (CEITEC)
Vysoké učení technické v Brně



XVII. seminář o filosofických otázkách matematiky a fyziky
Gymnázium Velké Meziříčí, 18. – 21. 8. 2014

Trocha historie

1960

D. Halliday, R. Resnick, *Physics for Students of Science and Engineering*

Přednáška prof. R. Resnicka o vzniku knihy <https://www.youtube.com/watch?v=THPGQDLdeHw>

Nakladatelství
John Wiley & Sons

D. Halliday, R. Resnick, **J. Walker**,
Fundamentals of Physics
(plnobarevné,
výrazná motivační složka)

D. Halliday, R. Resnick, K. S. Krane,
Physics

1997: 5. vydání
(1993: 4. vydání, 2001: 6. vydání)
1. české vydání - 2000

2008: 8. vydání
2. přepracované české vydání - 2013

Trocha historie

1960

D. Halliday, R. Resnick, *Physics for Students of Science and Engineering*

Přednáška prof. R. Resnicka o vzniku knihy <https://www.youtube.com/watch?v=THPGQDLdeHw>



Nakladatelství
John Wiley & Sons



D. Halliday, R. Resnick, **J. Walker**,
Fundamentals of Physics
(plnobarevné,
výrazná motivační složka)

D. Halliday, R. Resnick, K. S. Krane,
Physics

2002

American Physical Society

„H&R ... the most outstanding introductory physics text
of the twentieth century”

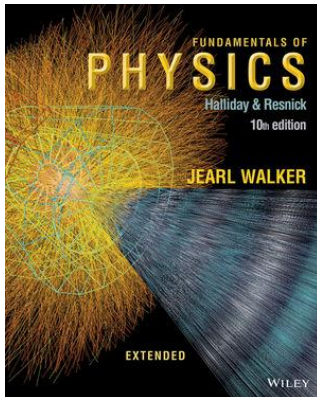
Trocha historie

1960

D. Halliday, R. Resnick, *Physics for Students of Science and Engineering*

Nakladatelství
John Wiley & Sons

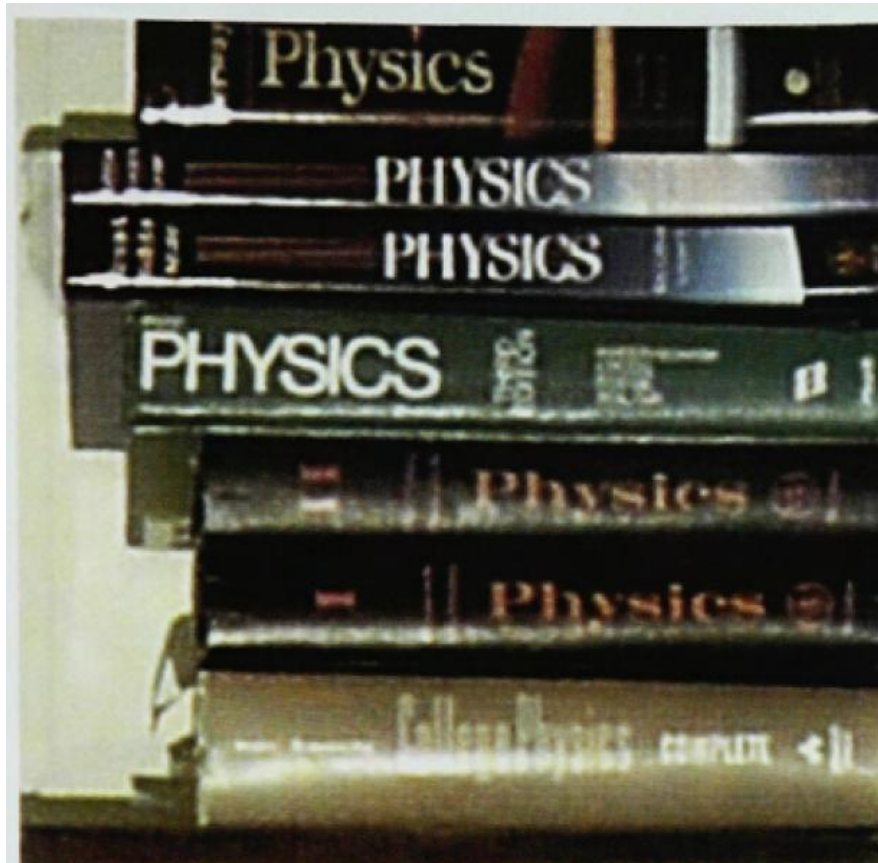
D. Halliday, R. Resnick, **J. Walker**,
Fundamentals of Physics



2014

<http://www.wiley.com/college/sc/halliday/samplechapter.html>

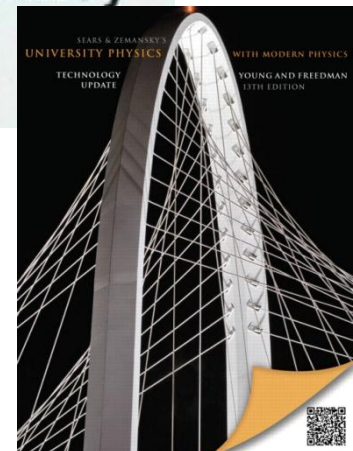
Trocha historie



Resnick, Halliday
& Krane 4th ed.
1992

Halliday & Resnick
1960

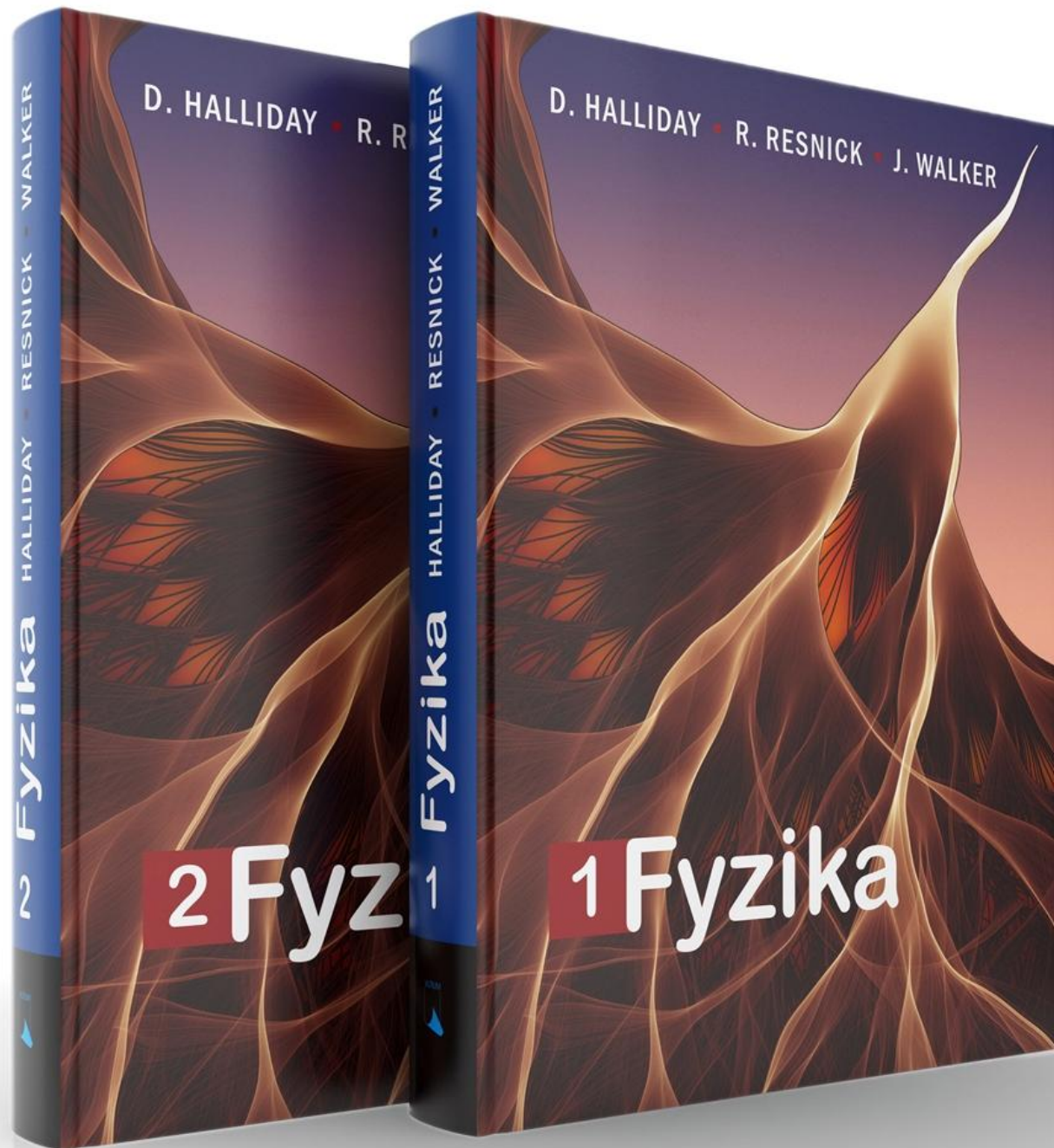
Sears & Zemansky
1948



C. H. Holbrow, „Archeology of a bookstack...“.

Physics Today **52**, March 1999, p. 50.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.882613>



D. HALLIDAY • R. RESNICK • J. WALKER

Fyzika

HALLIDAY • RESNICK • WALKER

2

Fyzika

2 Fyz

D. HALLIDAY • R. RESNICK • J. WALKER

Fyzika

HALLIDAY • RESNICK • WALKER

1

Fyzika

1 Fyzika

David HALLIDAY • Robert RESNICK • Jearl WALKER

1 Fyzika

Druhé přepracované vydání

Redakce českého vydání Petr Dub

Svazek 1

Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIMUM

David HALLIDAY • Robert RESNICK • Jearl WALKER

2 Fyzika

Druhé přepracované vydání

Redakce českého vydání Petr Dub

Svazek 2

Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIMUM

David HALLIDAY • Robert RESNICK • Jearl WALKER

1 Fyzika

Druhé přepracované vydání

Redakce českého vydání Petr Dub

Svazek 1

David HALLIDAY • Robert RESNICK • Jearl WALKER

2 Fyzika

Druhé přepracované vydání

Redakce českého vydání Petr Dub

Svazek 2

Listování v knize

Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIMUM

Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIMUM

4

Dvojrozměrný a trojrozměrný pohyb



Jak může středopolař při baseballu odhadnout, kde má na hřišti stát, aby mohl zachytit z vysoka letící baseballový míček ještě před jeho dopadem na zem? Často hráč pouze popoběhne nebo běží rozvážným tempem k místu, kde míček polapí zrovna v okamžiku jeho přiletu. Hráčská zkušenost mu přitom jistě pomáhá, ale zdá se, že důležitou roli v úspěšném zachycení míčku hraje i jiný faktor.

*Co se
v pohybu
míčku skrývá?*

Odpověď je v této kapitole.

4

Dvojmrozměrný a trojmrozměrný pohyb



Příklad 4-8

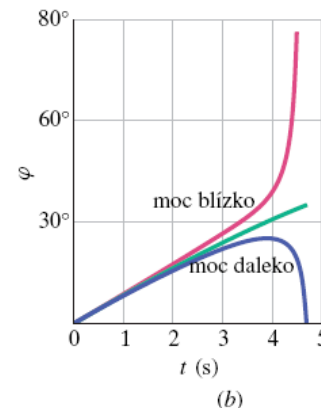
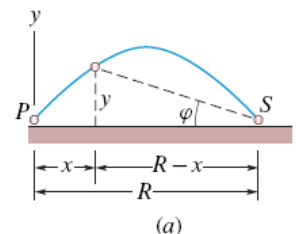
Baseballový pálkař, který je v bodě P , udeří míček tak, že letí vysoko do pole směrem ke středopolaři, který je v bodě S . Velikost počáteční rychlosti a elevační úhel jsou po řadě $v_0 = 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $\theta_0 = 35^\circ$. Představme si spojnicí letícího míče a středopolaře (obr.4-17a). Nakreslete časovou závislost zorného úhlu φ , který spojnice svírá se zemí, pokud středopolař stojí tam, kde by měl správně stát, a pokud stojí o 6 metrů blíž k pálkaři nebo o 6 metrů dál od něj.

Jak může středopolař při baseballu aby mohl zachytit z vysoka letící baseball dopadem na zem? Často hráč použije tempem k místu, kde míček polapí. Hráčská zkušenost mu přitom jistě pomůže v úspěšném zachycení míčku hraje

ROZVAHA

(1) Zanedbáme-li odpor vzduchu, lze let míčku považovat za šikmý vrh. Pohyby ve svislém a vodorovném směru se tak můžeme zabývat zvlášť. (2) Předpokládejme, že míček je zachycen přibližně ve stejné výšce, ve které byl odpálen – ve vodorovném směru tedy urazí vzdálenost odpovídající doletu R , který je podle rov. (4.26) roven $R = (v_0^2/g) \sin 2\theta_0$.

Výpočet: Míček bude zachycen středopolařem správně, pokud jeho vzdálenost od pálkaře bude rovna doletu míčku R . Z rov. (4.26) máme



OB.4-17 Příklad 4-8. (a) Definice zorného úhlu φ , pod nímž vidí středopolař v bodě S baseballový míček, který přímo k němu odpálil pálkař z bodu P . (b) Graf závislosti φ na čase.

Odtud

$$\varphi = \arctg \left(\frac{(40 \sin 35^\circ)t - 4,9t^2}{153,42 - (40 \cos 35^\circ)t} \right), \quad (4.33)$$

4-1 O CO JDE A JAK NA TO

V této kapitole rozšíříme dosavadní úvahy na případ pohybu, který již nebude omezen pouze na přímku. Budeme sledovat dvoj- i trojrozměrný pohyb částice, tedy pohyb v rovině a v prostoru. Kupříkladu lékaři a letečtí inženýři se zabývají dopady fyziky, která vládne pilotům prolétávajícím v průběhu vzdušných soubojů ostrými zatáčkami, ať již v rovině nebo v prostoru. Moderní stíhačky dosahují takových výkonů a technických parametrů, že mohou proletět zatáčkou tak rychle, že pilot okamžitě ztratí vědomí. Biomedicinští inženýři se mohou zaměřit na studium trestného hodu v basketbale (při kterém je hráč vzdálen od koše asi 4,3 m). Tento trestný hod je zpravidla veden tak, že ruka s míčem začíná pohyb v úrovni ramen a míč opouští dlaň zpravidla v okamžiku, kdy je ruka nad hlavou hráče. Jiný způsob vykonávání trestných hodů spočívá v hodu spodem – hráč drží míč pod úrovní svého pasu a z ruky jej vypustí v okamžiku, kdy touto úrovní prochází. První technika je využívána drtivou většinou profesionálních hráčů, ale není bez zajímavosti, že rekord v počtu úspěšných trestných hodů vytvořil legendární Rick Barry technikou druhou.

Pohyb ve třech dimenzích není snadné pochopit. Můžete být například dobří v řízení automobilu po přímém úseku dálnice (tj. jednorozměrný případ pohybu), ale asi byste jako piloti zažívali krušné časy při přistávání s letadlem na letišti (trojrozměrný pohyb), pokud byste k tomu nebyli dostatečně vycvičení.

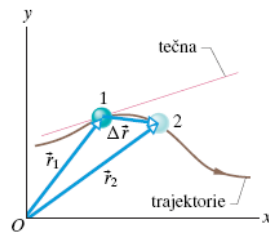
Studium dvoj- a trojrozměrného pohybu začneme pojmy poloha a posunutí.

4-2 | Poloha a posunutí

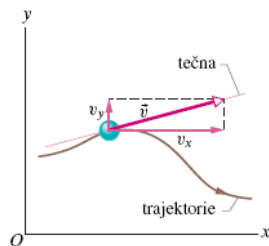
Polohu částice nejčastěji popisujeme jejím **polohovým vektorem** \vec{r} , který spojuje předem zvolený vztažný bod (obvykle počátek soustavy souřadnic) s touto částicí. V kartézské soustavě souřadnic popsané v čl. 3-5 zapisujeme vektor \vec{r} ve tvaru

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}, \quad (4.1)$$

kde $x\vec{i}$, $y\vec{j}$ a $z\vec{k}$ jsou jeho průměty (tj. vektory) do souřadnicových os x , y a z jsou jeho složky (vyjádřené kladnými nebo zápornými čísly).



OBR. 4-4 Posunutí $\Delta \vec{r}$ částice během intervalu Δt . V čase t_1 se částice nacházela v poloze 1, které odpovídá polohový vektor \vec{r}_1 , v čase t_2 se nacházela v poloze 2, které odpovídá polohový vektor \vec{r}_2 . Červeně je znázorněna tečna k trajektorii v poloze 1 (odpovídající okamžiku t_1).



OBR. 4-5 Rychlost \vec{v} částice a její složky v_x a v_y .

Na obr. 4-4 je zakreslena trajektorie částice, jejíž pohyb je omezen na souřadnicovou rovinu xy . Při pohybu částice po křivce směrem vpravo se v tomto směru odklání i její polohový vektor. V okamžiku t_1 je její poloha určena polohovým vektorem \vec{r}_1 a v okamžiku $t_1 + \Delta t$ polohovým vektorem \vec{r}_2 . Vektor $\Delta \vec{r}$ představuje *posunutí* částice v časovém intervalu Δt .

Abychom určili okamžitou rychlost např. v okamžiku t_1 (kdy se částice nachází v poloze 1), zmenšujeme kolem t_1 délku časového intervalu Δt k nule. Při poklesu délky časového intervalu Δt k nule si můžeme všimnout následujícího chování vektorů charakterizujících pohyb částice: (1) vektor \vec{r}_2 se přibližuje vektoru \vec{r}_1 a $\Delta \vec{r}$ vektoru nulovému, (2) směr vektoru $\Delta \vec{r}$ a s ním i směr průměrné rychlosti \vec{v} se sklánějí ke směru tečny k trajektorii v bodě \vec{r}_1 a konečně (3) průměrná rychlost \vec{v} se blíží k okamžité rychlosti \vec{v} .

Pro $\Delta t \rightarrow 0$ je $\vec{v} \rightarrow \vec{v}$. Vektor okamžité rychlosti leží tedy v tečně k trajektorii v bodě \vec{r}_1 .

Okamžitá rychlost částice \vec{v} leží vždy v tečně k trajektorii v bodě, kde se částice právě nachází.

Ve třech dimenzích je tento výsledek stejný: \vec{v} je vždy tečný k trajektorii.

Dosazením polohového vektoru \vec{r} z rov. (4.1) do rov. (4.10) vyjádříme rychlost pomocí složek

$$\vec{v} = \frac{d}{dt}(x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}) = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}.$$

Tento vztah přepíšeme jako

$$\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k}, \quad (4.11)$$

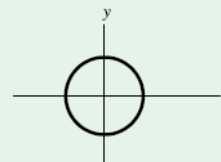
kde složky vektoru (okamžité) rychlosti jsou dány vztahy

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt} \quad \text{a} \quad v_z = \frac{dz}{dt}. \quad (4.12)$$

Složku rychlosti dostaneme derivací příslušné souřadnice podle času.

V obr. 4-5 je zakreslen vektor (okamžitý) rychlosti \vec{v} částice (která se pohybuje v rovině) a jeho rozklad do složek v_x a v_y . Vektor okamžité rychlosti částice \vec{v} je vždy tečný k její trajektorii. Pověsim si, že pokud znázorňujeme polohový vektor (jako na obr. 4-1 až 4-4) pomocí orientované šipky, potom tato orientovaná úsečka začíná v bodě („odtud“) a končí v jiném bodě („tam“). Pokud ale znázorňujeme vektor rychlosti tak jako na obr. 4-5, potom nemíří z jednoho bodu do druhého, nýbrž ukazuje směr pohybu částice v tomto bodě její trajektorie. (Délka vektoru odpovídající velikosti rychlosti může být naškálována libovolně.)

KONTROLA 1 Částice se pohybuje po kružnici (viz obrázek) a v jistém okamžiku má rychlost $\vec{v} = (2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})\vec{i} - (2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})\vec{j}$. Určete, ve kterém kvadrantu částici v tomto okamžiku najdeme, pohybuje-li se (a) ve směru otáčení hodinových ručiček, (b) proti směru otáčení hodinových ručiček. V obou případech vektor \vec{v} do obrázku zakreslete.



PŘEHLED & SHRNUÍ

Polohový vektor Poloha částice vzhledem k počátku soustavy souřadnic je popsána *polohovým vektorem* \vec{r} , zapsaným pomocí jednotkových vektorů kartézské soustavy souřadnic ve tvaru

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}. \quad (4.1)$$

Vektory $x\vec{i}$, $y\vec{j}$ a $z\vec{k}$ jsou *průměry* polohového vektoru \vec{r} do směrů souřadnicových os a x , y a z jsou odpovídající *složky*. Polohový vektor je určen velikostí a jedním úhlem (v rovině) či dvěma úhly (v prostoru), nebo svými složkami.

Posunutí Přemístění částice z polohy určené polohovým vektorem \vec{r}_1 do polohy dané vektorem \vec{r}_2 je popsáno *vektorem posunutí* $\Delta\vec{r}$:

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1. \quad (4.2)$$

S užitím jednotkových vektorů:

$$\Delta\vec{r} = (x_2 - x_1)\vec{i} + (y_2 - y_1)\vec{j} + (z_2 - z_1)\vec{k} = \quad (4.3)$$

$$= \Delta x\vec{i} + \Delta y\vec{j} + \Delta z\vec{k}, \quad (4.4)$$

OTÁZKY

1 Rychlost hokejového kotouče pohybujícího se v rovině xy je dána následujícími výrazy (v metrech za sekundu)

$$(1) v_x = 3t^2 + 4t - 2 \text{ a } v_y = 6t - 4,$$

$$(2) v_x = -3 \text{ a } v_y = -5t^2 + 6,$$

$$(3) \vec{v} = 2t^2\vec{i} - (4t + 3)\vec{j},$$

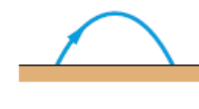
$$(4) \vec{v} = -2t\vec{i} + 3\vec{j}.$$

Ve kterém z uvedených případů je některá ze složek a_x a a_y vektoru zrychlení konstantní? Kdy je konstantní vektor zrychlení? Jaké musí být v případě (4) jednotky koeficientů -2 a 3 , je-li rychlost \vec{v} zadána v metrech za sekundu a čas t v sekundách?

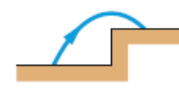
2 Náboje na obr.4-24 jsou ve všech případech vystřeleny stejnou rychlostí pod stejným elevačním úhlem, dopadnou však do různých míst. Seřadte uvedené situace sestupně podle toho, jak velkou rychlostí střely dopadnou.



(a)



(b)



(c)

OBR. 4-24 Otázka 2

3 Ve kterém bodě trajektorií střely z otázky 2 je její rychlost (a) největší, (b) nejmenší?

4 V jistém okamžiku je rychlost letícího míče rovna $\vec{v} = 25\vec{i} -$

ÚLOHY

4-2 Poloha a posunutí

•1 Vektor posunutí pozitronu v určitém časovém intervalu je $\Delta\vec{r} = 2,0\vec{i} - 3,0\vec{j} + 6,0\vec{k}$ a jeho koncová poloha je určena polohovým vektorem $\vec{r} = 3,0\vec{j} - 4,0\vec{k}$ (v metrech). Jaký byl polohový vektor pozitronu na počátku časového intervalu?

•2 Meloun leží v místě o souřadnicích $x = -5,0\text{ m}$, $y = 8,0\text{ m}$ a $z = 0\text{ m}$. Vyjádřete jeho polohový vektor (a) pomocí jednotkových vektorů, (b) pomocí velikosti a úhlu, který svírá s kladným směrem osy x . (c) Načrtněte polohový vektor v kartézské soustavě souřadnic. Meloun se posune do místa o souřadnicích $(x, y, z) = (3,00\text{ m}, 0\text{ m}, 0\text{ m})$. Určete vektor posunutí a vyjádřete jej (d) pomocí jednotkových vektorů, (e) pomocí velikosti a úhlu, který svírá s kladným směrem osy x .

•3 Poloha elektronu je zadána vektorem $\vec{r} = 5,0\vec{i} - 3,0\vec{j} + 2,0\vec{k}$ (v metrech). (a) Určete jeho velikost a (b) zakreslete jej v kartézské soustavě souřadnic.

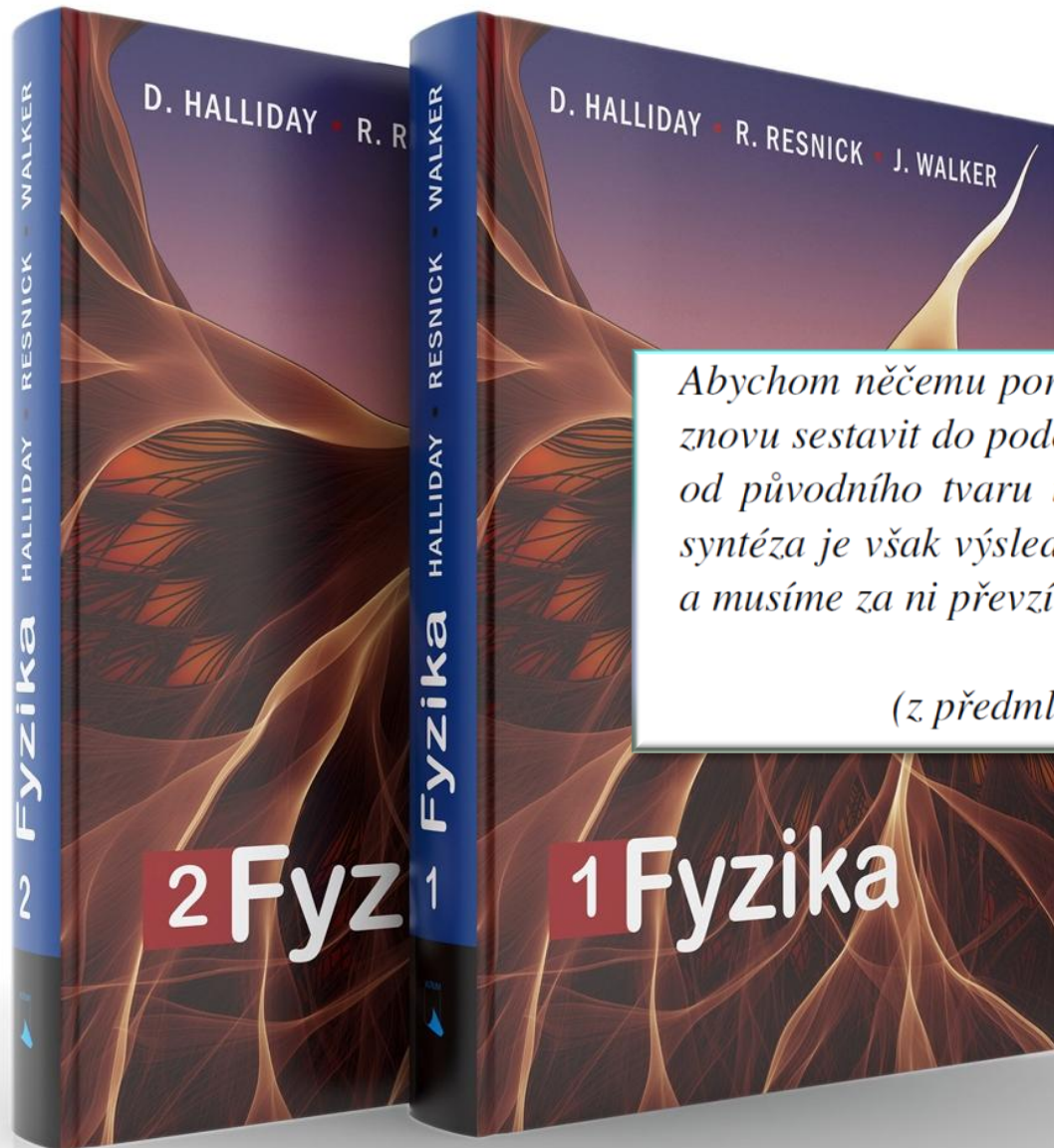
••4 Minutová ručička nástěnných hodin měří od osy otáčení po špičku 10 cm. Jaký je vektor posunutí špičky (a) od čtvrt na čtyři do půl čtvrté, (b) za další půlhodinu a (c) za další hodinu?

4-3 Průměrná a okamžitá rychlost

•5 Poloha iontu se během 10 s změní z hodnoty $\vec{r}_1 = 5,0\vec{i} - 6,0\vec{j} + 2,0\vec{k}$ na $\vec{r}_2 = -2,0\vec{i} + 8,0\vec{j} - 2,0\vec{k}$ (všechny údaje jsou v metrech). Jaká je jeho průměrná rychlost v tomto časovém intervalu?

•6 Poloha elektronu je dána vztahem $\vec{r} = 3,0t\vec{i} - 4,0t^2\vec{j} + 2,0\vec{k}$. (Čas t je v sekundách a složky vektoru \vec{r} v metrech.) (a) Určete

Co je jinak, co je nového ... několik poznámek



Abychom něčemu porozuměli, musíme to roztrhat na kousky a ty znovu sestavit do podoby, která nás uspokojí. Bude se nejspíš lišit od původního tvaru už vzhledem k různosti našich myslí. Naše syntéza je však výsledkem vlastního úsilí, studia a mnoha diskusí a musíme za ni převzít osobní zodpovědnost.

J. G. Synge

(z předmluvy ke knize Relativity: The Special Theory)

O knize | a jak s ní pracovat

inovace

Vstupní problém. Každá kapitola začíná fotografií, která ilustruje a uvádí atraktivní, aktuální a zajímavý problém, který je na vhodném místě kapitoly objasněn ve výkladu nebo v řešeném příkladu. Jsou to problémy přejaté ze současných přírodovědných, inženýrských, lékařských, sportovních a uměleckých časopisů.

O co jde a jak na to? Tato otázka a odpověď na ni uvádí výklad v každé kapitole.

Kontroly. Do textu jsou zařazeny kontrolní otázky, které průběžně ověřují, že jste vyloženou látku skutečně zvládli a že můžete s porozuměním pokračovat dál. Tato zastavení vám pomohou vyhnout se častým nedorozuměním nebo chybným představám. Správnost vašich odpovědí na kontrolní otázky si můžete zkontrolovat na konci knihy. Pokud neodpovíte správně, vraťte se a znovu prostudujte a dobře promyslete předchozí část.

Příklady. V podrobně řešených a komentovaných příkladech uvidíte názorně jak používat vyloženou látku v konkrétních situacích. Příklady vás připravují na samostatné řešení na konci kapitoly.

Rozvaha, která předchází řešení příkladu, připomíná základní pojmy, představy a vztahy, z nichž vychází vlastní řešení problému.

Rady a náměty obsahují užitečné pokyny, které ukazují začínajícímu studentovi fyziky jak řešit problémy a pomohou mu vyhnout se častým chybám.

Přehled a shrnutí. Tato část stručně shrnuje nejdůležitější poznatky a vztahy z celé kapitoly. V žádném případě nenahrazuje pečlivé studium celé kapitoly.

Otázky jsou podobné kontrolním otázkám zařazeným v jednotlivých článcích. Otázky vyžadují spíše fyzikální myšlení než výpočty. Na konci knihy najdete odpovědi na všechny liché otázky.

Úlohy jsou uspořádány podle jednotlivých článků kapitoly a jsou označeny podle obtížnosti. Mnohé úlohy vycházejí z reálných situací a problémů, které jsou předmětem současného výzkumu v nejrůznějších oblastech. Některé zajímavé problémy jsou základem několika dílčích úloh, které na sebe navazují a prostupují více kapitolami a vytvářejí příběh. Dříve než začnete počítat, proveďte rozvahu, které poznatky jsou důležité pro řešení. Výpočty doprovázejte obrázkem, grafem nebo krátkým komentářem.

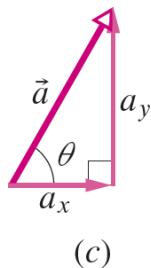
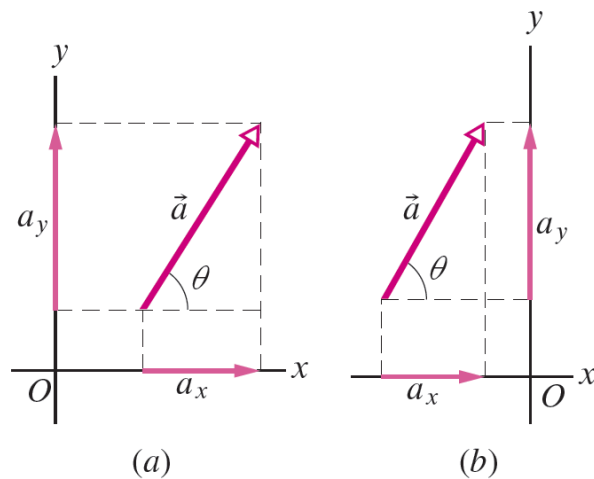
Grafy a obrázky. Řada příkladů a úloh je doprovázena grafy a obrázky. Naučte se s grafy a obrázky správně pracovat a efektivně je používat. Nezapomeňte, že dobrý graf či obrázek vydá za tisíc slov.

inovace

nové

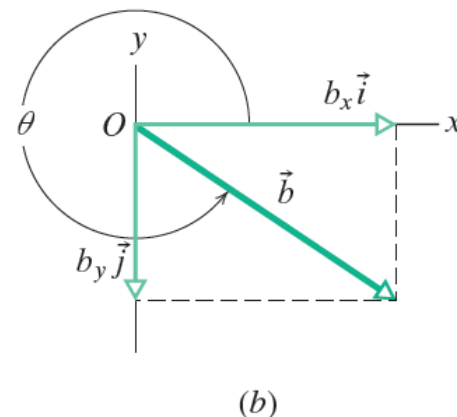
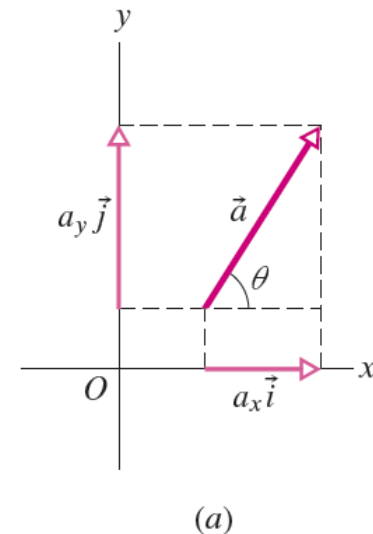
Vektory jsou se šipkou

složky



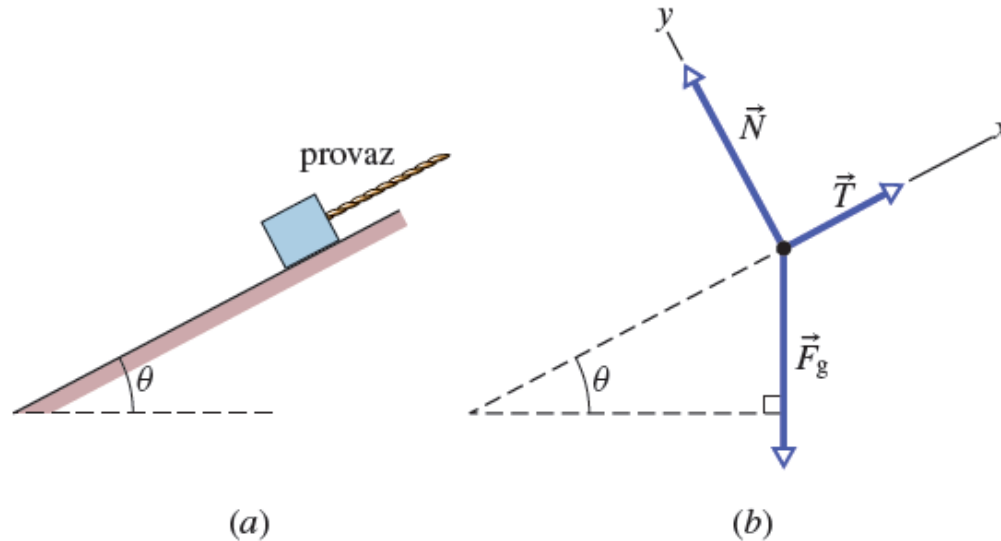
OBR. 3-8 (a) Složky vektoru \vec{a} .
(b) Při posunutí vektoru (při zachování jeho velikosti i směru) se jeho složky nezmění. (c) Složky vektoru \vec{a} tvoří odvěsny pravoúhlého trojúhelníka, jehož přeponou je vektor \vec{a} .

průměty

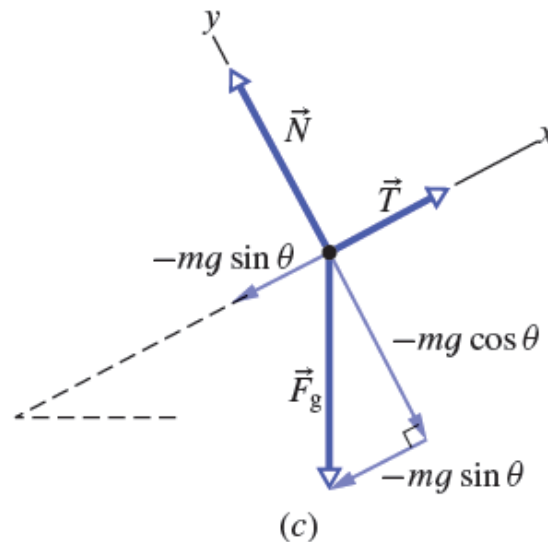


OBR. 3-15 (a), (b) Pravoúhlé průměty vektorů \vec{a} , \vec{b} .

Vektory a složky



OBR. 5-16 Příklad 5-5.
(a) Přepravka je tažena na provaze vzhůru po nakloněné rovině. (b) Na přepravku působí tři síly: tahová síla provazu \vec{T} , gravitační síla \vec{F}_g a normálová síla (tlaková síla podložky) \vec{F}_N .
(c) Složky síly \vec{F}_g .



Síla gravitační / tíhová

5-7 | Některé typy sil

Gravitační síla

* Jedním z Newtonových objevů, zcela zásadním pro vývoj fyzikálního poznání, byla skutečnost, že *každá* dvě hmotná tělesa se navzájem přitahují. Newton také objevil závislost přitažlivé síly na hmotnostech těles a jejich vzdálenosti – Newtonův gravitační zákon. Objasnil tak, že pád těles k zemi a oběh planet kolem Slunce mají stejnou podstatu, gravitační přitahování. Tento výsledek bychom mohli považovat za první krok k teorii sjednocení interakcí. O Newtonově gravitačním zákonu bude řeč v kap.13.

** O malém rozdílu mezi hodnotami tíhového zrychlení a gravitačního zrychlení se dozvíme v čl.13-4.

Gravitační silou \vec{F}_g rozumíme určitý druh síly, kterou je těleso přitahováno k jinému tělesu. V úvodních kapitolách knihy, kterými právě procházíme, se nebudeme podstatou gravitační síly zabývat. V běžných situacích bude oním „druhým objektem“ Země. Budeme-li hovořit o gravitační síle \vec{F}_g působící na těleso, budeme mít obvykle na mysli sílu, kterou Země přitahuje toto těleso ke svému středu, tj. směrem „dolů“, k zemskému povrchu.* Vztažnou soustavu spojenou se zemským povrchem považujeme za inerciální.

Předpokládejme, že těleso o hmotnosti m volně padá v blízkosti Země se zrychlením o velikosti g . (Zrychlení volného pádu se často nazývá *tíhové*, popřípadě *gravitační zrychlení*.** Vedle termínu gravitační síla se užívá také termín *tíhová síla*.) Zanedbáme-li vliv odporu vzduchu, bude jedinou silou působící na těleso právě gravitační síla \vec{F}_g . Zrychlení volného pádu a gravitační síla \vec{F}_g spolu souvisejí druhým Newtonovým zákonem ($m\vec{a} = \vec{F}_g$). Zvolme souřadnicovou osu y tak, aby směřovala vzhůru podél trajektorie tělesa. Druhý Newtonův zákon má pak tvar $ma_y = \sum F_y$ neboli

$$m(-g) = -F_g,$$

odkud

$$F_g = mg. \quad (5.8)$$

Velikost gravitační síly je rovna součinu mg .

Táží gravitační síla o velikosti mg působí na těleso i tehdy, když zrovna nepadá, ale třeba leží v klidu na stole, nebo se podél stolu pohybuje. (Aby gravitační síla zmizela, musela by zmizet i Země.)

Vektorový vztah pro gravitační sílu má tvar

$$\vec{F}_g = -F_g \vec{j} = m\vec{g}, \quad (5.9)$$

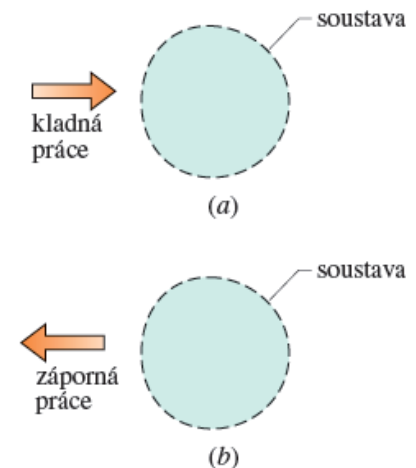
kde \vec{j} je jednotkový vektor ve směru osy y , vektor zrychlení volného pádu \vec{g} míří dolů.

Příklady částí, které jsou podstatně upraveny (1)

8-7 | Práce vnějších a nekonzervativních sil

Působí-li v izolované soustavě pouze konzervativní interakční síly, je její mechanická energie konstantní. Jsou-li však interakční síly v soustavě nekonzervativní, nebo působí-li na částice soustavy vnější síly, které konají nenulovou práci, nebude se mechanická energie soustavy zachovávat. V takových případech *nemůžeme* použít vztahy (8.17) a (8.18). Obr. 8-11a, resp. obr. 8-11b schematicky znázorňuje situaci, kdy vnější síly působící na soustavu konají kladnou, resp. zápornou práci. Přímou tak přispívají ke změně (přírůstku, nebo úbytku) kinetické, a tedy i mechanické energie soustavy.

Připomíná to převody peněz na účtech. Soustavě tvořené jedinou částicí, popřípadě tělesem, které může být za částici považováno (bodový objekt), lze přisoudit jen jeden typ energie – kinetickou energii. Z kapitoly 7 víme, že změna kinetické energie částice je rovna práci všech sil působících na částici. Platí při tom teorém o práci a kinetické energii (7.10) ($\Delta E_k = W$). V našem přirovnání k problematice z finanční oblasti lze říci, že jednočásticová soustava má pouze jediný „energiový účet“ a síly působící na částici přispívají svou prací pouze na tento účet. Je-li soustava složitější, je ve hře více „energiových účtů“ – kinetická energie a potenciální energie různých typů (např. gravitační a pružná). Pokud na soustavu nepůsobí vnější síly a vnitřní síly jsou konzervativní, dochází pouze k „převodům mezi účty“, soustava jako jejich „majitel nebohatne ani nechudne“. (Opět ovšem platí, že práce všech sil působících na jednotlivé částice, v tomto případě vnitřních konzervativních sil, vede ke změně kinetické energie soustavy. Díky konzervativnosti vnitřních sil ji však lze alternativně vyjádřit jako změnu nově definovaného typu energie – energie potenciální, přičemž se změny na účtech přesně kompenzují.) Působí-li na soustavu také *vnější* síly (soustava není izolovaná), je příspěvek jejich práce samozřejmě směřován opět na „účet“ kinetické energie (změna kinetické energie každé částice náležící do soustavy je přímo dána prací *všech* sil, které na částici působí). Vnější síly mají ovšem vliv i na změny konfigurace soustavy. Jejich působení proto vede nejen ke změnám celkové hodnoty všech energiových účtů prostřednictvím účtu kinetické energie, ale vyvolá i možné převody mezi energiovými účty. Podstatné je, že při působení *vnějších sil* se mechanická energie soustavy nemusí zachovávat. Obdobně



OBR. 8-11 (a) Kladná, resp. (b) záporná práce vnějších sil přispívá k přírůstku, resp. úbytku mechanické energie soustavy.

Příklady částí, které jsou podstatně upraveny (2)

9

Soustavy částic



Berani druhu ovce tlustorohé (*Ovis canadensis*) svádí o přízeň samic lité souboje. Samci se svými rohy v plné rychlosti opakovaně srážejí tak dlouho, dokud to jeden z nich nakonec nevzdá. Tyto vzájemné střety mohou být pro ně velmi nebezpečné – pokud se některému ze samců roh zlomí, bude pravděpodobně během příští kolize vážně zraněn nebo zabít. Ale i bez zlomeného rohu by se oba soupeři měli po každém střetu ocitnout na zemi v bezvědomí.


**Jak mohou
berani tvrdé
čelní nárazy
vydržet?**

Odpověď je v této kapitole.

Střed hmotnosti a těžiště

9-2 | Střed hmotnosti

Střed hmotnosti soustavy částic zavádíme proto, abychom mohli předpovědět, jak se bude soustava pohybovat.

 Střed hmotnosti soustavy částic (nebo tělesa) je bod, který se pohybuje tak, jako by (1) v něm byla soustředěna veškerá hmotnost soustavy a (2) působily v něm všechny vnější síly působící na soustavu.


V tomto článku se budeme zabývat tím jak nalézt střed hmotnosti nejrůznějších soustav. Začneme soustavou složenou pouze z několika částic a teprve pak se budeme zabývat soustavami obsahujícími velké množství částic (např. baseballová pálka). V další části této kapitoly budeme rovněž probírat, jak se střed hmotnosti pohybuje, působí-li na soustavu vnější síly.

* Pojem střed hmotnosti bývá často zaměňován s pojmem těžiště. V praktických situacích, kdy se soustava pohybuje v blízkosti zemského povrchu, a gravitační pole lze tedy považovat za homogenní, nevede tato záměna k chybným výsledkům. Dokonce se jí často vědomě používá. Z fyzikálního hlediska však jde o pojmy zcela odlišné. Střed hmotnosti je definován univerzálně, pouze na základě rozložení hmotnosti v soustavě. Jeho polohu určuje vážený aritmetický průměr poloh jednotlivých částic soustavy s hmotnostmi částic jako vahami. Je proto nezávislá na tom, zda vůbec anebo jaké síly na soustavu působí. Pojem těžiště se striktně vztahuje ke speciální situaci, kdy na soustavu působí gravitační síly. Těžištěm se budeme zabývat v čl. 12-4, kde ukážeme, že v případě soustavy umístěné v homogenním gravitačním poli splývá těžiště (přesně) se středem hmotnosti soustavy.

Střed hmotnosti a těžiště

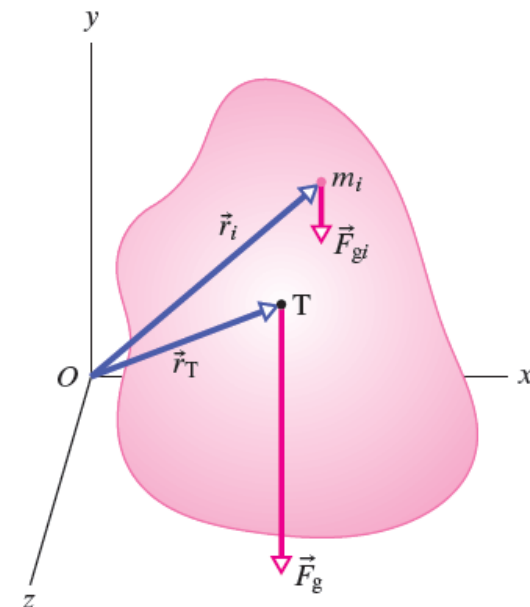
12-4 | Těžiště

V úlohách týkajících se rovnováhy těles je jednou ze sil, které na ně působí, gravitační síla. Potřebujeme umět určit moment této síly vzhledem ke zvolenému vztažnému bodu. Gravitační síla nepůsobí na těleso v jediném bodě, ale je „rozestřena“ v celém tělese – působí na každý jednotlivý element tělesa, tj. na každou částici, z nichž se těleso skládá. Výsledná gravitační síla působící na těleso je, jak již víme, součtem všech těchto „elementárních“ gravitačních sil. Podobně je jejich výsledný moment součtem všech jejich momentů. Položme si otázku, zda je možné umístit výslednici elementárních gravitačních sil do vhodného působíště tak, aby její moment vzhledem ke zvolenému vztažnému bodu byl stejný jako výsledný moment elementárních sil vzhledem k témuž bodu. V případech, kdy takový bod existuje, jej nazýváme *těžiště* (a označujeme T). Zrychlení volného pádu \vec{g} není všude stejné, v blízkosti Země se (mírně) mění s výškou nad zemí a místem na Zemi. V případě těles běžných rozměrů, kdy můžeme změny \vec{g} v oblasti, kterou zaujímá dané těleso, zanedbat, těžiště tělesa existuje a splývá se středem hmotnosti tělesa, který byl zaveden v čl. 9-2.

 Pokud je \vec{g} ve všech bodech tělesa stejné, splývá těžiště tělesa se středem hmotnosti tělesa.

Nyní toto tvrzení dokážeme. Máme těleso (o hmotnosti M), které rozdělíme na n malých elementů o hmotnostech m_i , $i = 1, 2, \dots, n$ (obr. 12-4). Na i -tý element působí gravitační síla $\vec{F}_{gi} = m_i \vec{g}$. Je-li \vec{r}_i polohový vektor i -tého elementu vzhledem k bodu O , potom podle rov. (11.14) je moment gravitační síly \vec{F}_{gi} vzhledem k bodu O roven

$$\vec{M}_{gi} = \vec{r}_i \times \vec{F}_{gi}. \quad (12.10)$$



OBR. 12-4 Na element tělesa o hmotnosti m_i působí gravitační síla $\vec{F}_{gi} = m_i \vec{g}$ a vzhledem k bodu O vytváří moment $\vec{M}_{gi} = \vec{r}_i \times \vec{F}_{gi}$. Na (celé) těleso o hmotnosti M působí výsledná gravitační síla $\vec{F}_g = M \vec{g}$ v jeho těžišti T a vzhledem k bodu O vytváří moment $\vec{M}_g = \vec{r}_T \times \vec{F}_g$. Pokud je \vec{g} v celém objemu tělesa stejné, splývá těžiště tělesa T se středem hmotnosti SH.

Slovní vyjádření rovnic / Důsledné užívání složek

9-9 | Nepružné přímé srážky

Nepružná přímá srážka

Na obr. 9-15 jsou dvě tělesa těsně před nepružnou přímou srážkou a těsně po ní. Jsou na něm rovněž znázorněny rychlosti obou těles před srážkou (index i) a po srážce (index f). Obě částice tvoří uzavřenou soustavu, která je (nebo se chová jako) izolovaná. Zákon zachování hybnosti této dvoučásticové soustavy lze psát ve tvaru

$$\left(\begin{array}{c} \text{hybnost soustavy } \vec{P}_i \\ \text{před srážkou} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{hybnost soustavy } \vec{P}_f \\ \text{po srážce} \end{array} \right),$$

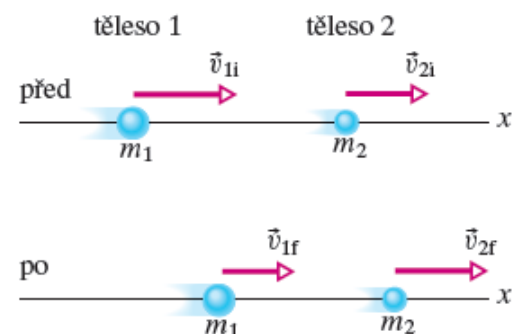
což lze zapsat jako

$$\vec{p}_{1i} + \vec{p}_{2i} = \vec{p}_{1f} + \vec{p}_{2f} \quad (\text{zákon zachování hybnosti soustavy}). \quad (9.50)$$

Při přímé srážce leží vektory rychlostí částic ve stejné vektorové přímce. Poněvadž se v tomto případě částice pohybují po přímce, mají vektory rychlostí jedinou nenulovou složku v_x . Použijeme-li vztah $p_x = mv_x$, dostáváme**

$$m_1 v_{1i,x} + m_2 v_{2i,x} = m_1 v_{1f,x} + m_2 v_{2f,x}. \quad (9.51)$$

Pokud známe například hmotnosti jednotlivých těles, jejich počáteční rychlosti a jednu z rychlostí po srážce, můžeme pomocí rov. (9.51) určit koncovou rychlost druhé částice.



OBR. 9-15 Tělesa 1 a 2 pohybující se podél osy x před nepružnou přímou srážkou a po nepružné přímé srážce.

** Při popisu přímých srážek se často index x neuvádí a v pak značí x -ovou složku rychlosti v_x (která může být kladná i záporná). Z kontextu je potom nutno dobře rozlišit, zda v značí vskutku x -ovou složku vektoru, nebo jeho velikost, která je samozřejmě jen nezáporná. V úvodních kapitolách této učebnice tyto dva případy důsledně rozlišujeme.

Slovní vyjádření rovnic / Důsledné užívání složek

9-9 | Nepružné přímé srážky

Nepružná přímá srážka

Na obr. 9-15 jsou dvě tělesa těsně před nepružnou přímou srážkou a těsně po ní. Jsou na něm rovněž znázorněny rychlosti obou těles před srážkou (index i) a po srážce (index f). Obě částice tvoří uzavřenou soustavu, která je (nebo se chová jako) izolovaná. Zákon zachování hybnosti této dvoučásticové soustavy lze psát ve tvaru

$$\left(\begin{array}{c} \text{hybnost soustavy } \vec{P}_i \\ \text{před srážkou} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{hybnost soustavy } \vec{P}_f \\ \text{po srážce} \end{array} \right),$$

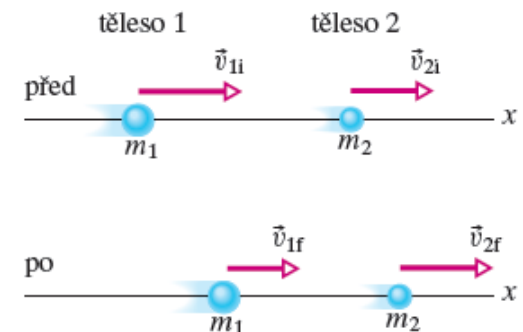
což lze zapsat jako

$$\vec{p}_{1i} + \vec{p}_{2i} = \vec{p}_{1f} + \vec{p}_{2f} \quad (\text{zákon zachování hybnosti soustavy}). \quad (9.50)$$

Při přímé srážce leží vektory rychlostí částic ve stejné vektorové přímce. Poněvadž se v tomto případě částice pohybují po přímce, mají vektory rychlostí jedinou nenulovou složku v_x . Použijeme-li vztah $p_x = mv_x$, dostáváme**

$$m_1 v_{1i,x} + m_2 v_{2i,x} = m_1 v_{1f,x} + m_2 v_{2f,x}. \quad (9.51)$$

Pokud známe například hmotnosti jednotlivých těles, jejich počáteční rychlosti a jednu z rychlostí po srážce, můžeme pomocí rov. (9.51) určit koncovou rychlost druhé částice.



OBR. 9-15 Tělesa 1 a 2 pohybující se podél osy x před nepružnou přímou srážkou a po nepružné přímé srážce.

** Při popisu přímých srážek se často index x neuvádí a v pak značí x -ovou složku rychlosti v_x (která může být kladná i záporná). Z kontextu je potom nutno dobře rozlišit, zda v značí vskutku x -ovou složku vektoru, nebo jeho velikost, která je samozřejmě jen nezáporná. V úvodních kapitolách této učebnice tyto dva případy důsledně rozlišujeme.

Rotace. Důsledné užívání složek

Úhlová rychlost

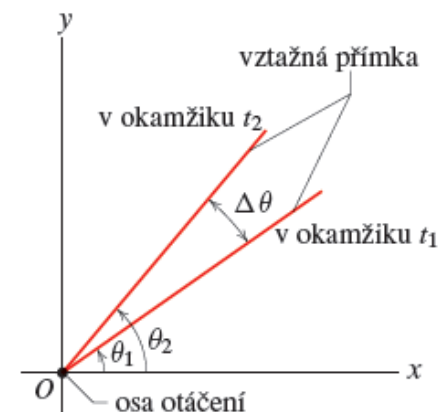
Podle obr. 10-4 označme úhlovou polohu rotujícího tělesa v okamžiku t_1 jako θ_1 a v okamžiku t_2 jako θ_2 . **Průměrnou úhlovou rychlost** tělesa v časovém intervalu Δt od t_1 do t_2 definujeme vztahem

$$\bar{\omega}_z = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}, \quad (10.5)$$

kde $\Delta\theta$ je otočení tělesa v časovém intervalu Δt . Index z značí, že se těleso otáčí kolem osy z (která na obr. 10-2 míří nahoru a na obr. 10-3 a obr. 10-4 je kolmá k rovině stránky a míří k nám.) V čl. 10-3 uvidíme, že ω_z je z -ová složka vektoru úhlové rychlosti $\vec{\omega}$.

(Okamžitá) úhlová rychlost ω_z , se kterou budeme pracovat nejčastěji, je limitou podílu na pravé straně rov. (10.5) pro Δt blížící se k nule. Tedy

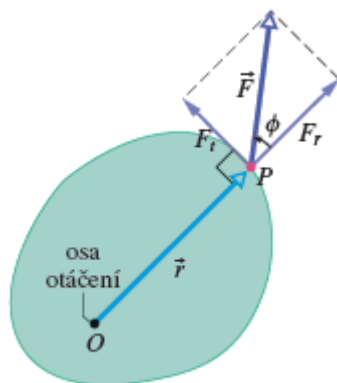
$$\omega_z = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}. \quad (10.6)$$



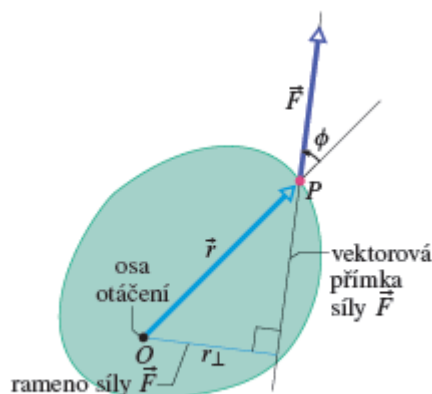
OBR. 10-4 Vztažná přímka tuhého tělesa z obrázků 10-2 a 10-3 má v okamžiku t_1 úhlovou polohu θ_1 a v okamžiku t_2 úhlovou polohu θ_2 . Rozdíl $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ představuje otočení tělesa v časovém intervalu $\Delta t = t_2 - t_1$. (Těleso není v obrázku zakresleno.)

Rotace. Důsledné užívání složek

10-8 | Moment síly vzhledem k ose otáčení



(b)



(c)

Abychom zjistili otáčivý účinek síly \vec{F} , rozložíme ji do dvou složek podle obr. 10-16b. První z nich je *radiální složka* F_r ve směru vektoru \vec{r} , který leží na spojnici bodu P (působíště síly) a bodu O (na ose otáčení). (Jistě si snadno představíme, nebo i vyzkoušíme, co se stane, budeme-li tahat za kliku ve směru ležícím v rovině dveří. Pravděpodobně dveřmi příliš nepohneme.) Druhá složka ve směru kolmém k \vec{r} je *tečná složka* $F_t = F \sin \phi$. Právě ona je zodpovědná za otočení dveří. (Můžeme si vyzkoušet, že silou namířenou kolmo k rovině dveří jimi celkem snadno otočíme.)

Schopnost síly \vec{F} otáčet tělesem závisí však nejen na její tečné složce F_t , ale také na vzdálenosti působíště síly \vec{F} od bodu O . Veličina, která bere v úvahu oba tyto vlivy, se nazývá **moment síly** (vzhledem k ose otáčení), a definujeme ji vztahem

$$M_z = (r)(F \sin \phi). \quad (10.39)$$

Index z značí, že se jedná o z -ovou složku vektoru \vec{M} , který leží v pevné ose otáčení. Složka M_z je kladná, nebo záporná podle toho, zda orientovaný úhel ϕ je kladný, nebo záporný. Složka M_z je tedy kladná, roztáčí-li působící síla těleso proti směru otáčení hodinových ručiček. (Taková situace je znázorněna na obr. 10-16a až c.) Složka M_z je záporná, roztáčí-li působící síla těleso ve směru otáčení hodinových ručiček.

Moment síly definovaný vztahem (10.39) můžeme vyjádřit také ve tvaru (viz obr. 10-16b)

$$M_z = (r)(F \sin \phi) = r F_t, \quad (10.40)$$

kde $F_t (= F \sin \phi)$ je tečná složka** působící síly \vec{F} , nebo ve tvaru (viz obr. 10-16c)

$$M_z = +r_{\perp} F, \quad M_z = -r_{\perp} F, \quad (10.41)$$

\odot
 \ominus

kde r_{\perp} je kolmá vzdálenost bodu O od vektorové přímky síly \vec{F} , což je ta přímka, v níž vektor síly leží (obr. 10-16c). Veličinu r_{\perp} nazýváme **rameno síly** \vec{F} . Součin ramena síly r_{\perp} a velikosti působící síly F udává velikost momentu síly, $M = r_{\perp} F$. Znaménko ve vztazích (10.41) určíme podle toho, jakým směrem působící síla \vec{F} roztáčí těleso.

Klasická a moderní fyzika

- ➡ Co znamená „Extended“ (*Physics. Extended.*)
- ➡ V předchozím vydání byly některé poznatky z relativity a kvantové fyziky (např. téma hmotnost a energie, kvantování momentu hybnosti) vyloženy v článcích věnovaných již klasické fyzice. V novém vydání je výklad upraven a přenesen do části moderní fyzika. Základní ideje moderní fyziky se ale stále vinou celým textem.



8.8 HMOTNOST A ENERGIE

Klasická chemie byla založena na předpokladu, že při chemických reakcích se zachovává jak energie, tak hmotnost. V roce 1905 však ukázal Albert Einstein v rámci své speciální teorie relativity, že hmotnost lze ekvivalentně vyjádřit pomocí energie a že zákon zachování energie říká jinými slovy totéž, co zákon zachování hmotnosti.

Při chemických reakcích jsou ovšem změny hmotnosti odpovídající změnám energie ve smyslu Einsteinovy teorie tak nepatrným zlomkem celkové hmotnosti látek, které se reakce účastní, že není naděje na jejich registraci ani v nejpreciznějších laboratorních analýzách. Situace se tedy tak, že hmotnost i energie se skutečně zachovávají. Během reakcí jaderných však často dochází k změně energie až milionkrát větší a změny hmotnosti lze zcela snadno. Úvahy o souvislostech změn hmotnosti při jaderných reakcích se již staly součástí rutiny.

Vztah mezi hmotností a energií je uveden v jedné z největších rovnic fyziky (obr. 8.16):

$$E = mc^2,$$

kde E je energie ekvivalentní hmotnosti m (tzv. **energie ekvivalent hmotnosti**), c je rychlost světla ve vakuu. (Při hlubším studiu fyziky mimo rámec této knihy se jistě časem setkáte s hlubším rozбором vztahu mezi hmotností a energií a pravděpodobně i s různými názory na jeho správnou interpretaci.)



Obr. 8.16 Takto vzdali hold Albertu Einsteinovi studenti střední školy Shennandoah Junior v Miami (Florida) při oslavách stého výročí jeho narození v roce 1979. Slavnou formuli vytvořili svými těly.

Tabulka 8.1 shrnuje energie ekvivalenty hmotnosti vybraných objektů. Energie uložená v běžných objektech je obrovská. Například výroba energetického ekvivalentu tří gramové mince by stála desítky milionů korun. Také hmotnostní ekvivalenty některých typických hodnot energie jsou šokující. Například celá roční produkce elektrické energie v USA odpovídá hmotnosti pouhých několika stovek kilogramů látky (kamení, brambor, prostě čokoliv!).

Tabulka 8.1 Energie ekvivalenty vybraných objektů

OBJEKT	HMOTNOST (kg)	ENERGIEVÝ EKVIVALENT
Elektron	$9,11 \cdot 10^{-31}$	$8,2 \cdot 10^{-14} \text{ J}$ ($= 511 \text{ keV}$)
Proton	$1,67 \cdot 10^{-27}$	$1,5 \cdot 10^{-10} \text{ J}$ ($= 938 \text{ MeV}$)
Atom uranu	$4,0 \cdot 10^{-25}$	$3,6 \cdot 10^{-8} \text{ J}$ ($= 225 \text{ GeV}$)
Prachová částice	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^4 \text{ J}$ ($= 2 \text{ kcal}$)
Mince	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{14} \text{ J}$ ($= 78 \text{ GW} \cdot \text{h}$)

Chceme-li použít vztah (8.39) pro chemické či jaderné reakce, je vhodné jej přepsat do tvaru

$$Q = -\Delta m c^2, \quad (8.40)$$

kde Q je energie uvolněná (kladná hodnota), nebo pohlcená (záporná hodnota) při reakci a Δm je odpovídající úbytek, či přírůstek hmotnosti částic v důsledku reakce. Při jaderném štěpení, kdy se větší jádra rozpadnou v jádra s nižším atomovým číslem, činí hmotnostní úbytek méně než 0,1 % původní hmotnosti. Při chemických reakcích je toto procento zhruba milionkrát nižší.

(zkratka u, čl. 1.6), kde

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, \quad (8.42)$$

Obvyklou jednotkou energie je elektronvolt či jeho násobky. Podle (7.3) je

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}, \quad (8.43)$$

V jednotkách definovaných vztahy (8.41) a (8.42) má kvadrát rychlosti světla hodnotu

$$c^2 = 9,315 \cdot 10^8 \text{ eV} \cdot \text{u}^{-1} = 9,315 \cdot 10^5 \text{ keV} \cdot \text{u}^{-1} = 931,5 \text{ MeV} \cdot \text{u}^{-1}.$$

PŘÍKLAD 8.9

Při jaderném štěpení

$$n + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{140}\text{Ce} + {}^{94}\text{Zr} + n + n$$

je neutron (n) zachycen jádrem uranu (${}^{235}\text{U}$). Vznikne nestabilní jádro, které se rozštěpí na dvě menší jádra (${}^{140}\text{Ce}$ a ${}^{94}\text{Zr}$) za současného uvolnění dvou neutronů. Hmotnosti zúčastněných elementů jsou

hmotnost (${}^{235}\text{U}$) = 235,04 u,
 hmotnost (${}^{140}\text{Ce}$) = 139,91 u,
 hmotnost (${}^{94}\text{Zr}$) = 93,91 u,
 hmotnost (n) = 1,008 67 u.

(a) Jaká je relativní změna hmotnosti interagujících částic? **ŘEŠENÍ:** Změnu hmotnosti Δm získáme odečtením hmotnosti částic, které vstupují do reakce od hmotnosti částic, které jsou výsledkem reakce:

$$\Delta m = (139,91 + 93,91 + 2 \cdot 1,008 67) \text{ u} - (235,04 + 1,008 67) \text{ u} = -0,211 \text{ u}.$$

Hmotnost částic vstupujících do reakce je

$$M = 235,04 \text{ u} + 1,008 67 \text{ u} = 236,05 \text{ u}.$$

Tomu odpovídá relativní úbytek hmotnosti

$$\frac{|\Delta m|}{M} = \frac{0,211 \text{ u}}{236,05 \text{ u}} = 0,000 89, \quad \text{tj. asi } 0,1 \%$$

Relativita a jaderná fyzika. Hmotnost a energie.

2013

V soustavě, v níž dochází k chemickým nebo jaderným reakcím, se mění celková klidové energie částic tvořících soustavu. Tato změna celkové klidové energie v důsledku reakce se často označuje jako Q . Energie Q uvolněná (Q je kladné) nebo pohlcená (Q je záporné) při reakci se získá ze vztahu

$$\left(\begin{array}{c} \text{počáteční hodnota} \\ \text{celkové klidové energie soustavy} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{koncová hodnota} \\ \text{celkové klidové energie soustavy} \end{array} \right) + Q$$

neboli

$$E_{0i} = E_{0f} + Q. \quad (37.49)$$

Použijeme-li rov. (37.43) ($E_0 = mc^2$), můžeme předchozí rovnici vyjádřit pomocí počáteční *celkové* hmotnosti M_i a koncové *celkové* hmotnosti M_f soustavy:

$$M_i c^2 = M_f c^2 + Q,$$

odkud

$$Q = M_i c^2 - M_f c^2 = -\Delta M c^2. \quad (37.50)$$

kde $\Delta M = M_f - M_i$ je změna hmotnosti soustavy způsobená reakcí.

Pokud reakce vede k přenosu energie z klidové energie soustavy například do kinetické energie produktů vzniklých reakcí, celková klidová energie E_0 soustavy (a jeho celková hmotnost M) se při reakci sníží, a Q je kladné. Pokud naopak reakce vyžaduje, aby se energie přenesla do klidové energie soustavy, jeho celková klidová E_0 (a jeho celková hmotnost M) se zvýší, a Q je záporné.

Relativita a jaderná fyzika. Hmotnost a energie.

V soustavě, v níž dochází k chemickým nebo jaderným reakcím, se mění celková klidová energie částic tvořících soustavu. Tato změna celkové klidové energie v důsledku reakce se často označuje jako Q . Energie Q uvolněná (Q je kladné) nebo

2013

Jaderná vazební energie

Hmotnost M jádra je *menší* než celková hmotnost $\sum m$ protonů a neutronů, které je tvoří. To znamená, že klidová energie Mc^2 jádra je *menší* než celková klidová energie $\sum(mc^2)$ samostatných protonů a neutronů, které je tvoří. Rozdíl mezi těmito dvěma energiemi nazýváme **vazební energie jádra**:

$$E_V = \sum(mc^2) - Mc^2 \quad (\text{vazební energie}). \quad (42.7)$$

Zdůrazněme, že vazební energie není energie jádra, jde o *rozdíl* mezi klidovými energiemi příslušejícími jádru a jeho jednotlivým nukleonům. Pokud bychom byli schopni jádro rozdělit na jednotlivé nukleony, museli bychom při tomto procesu dodat energii rovnou E_V .

Pokud reakce vede k přenosu energie z klidové energie soustavy například do kinetické energie produktů vzniklých reakcí, celková klidová energie E_0 soustavy (a jeho celková hmotnost M) se při reakci sníží, a Q je kladné. Pokud naopak reakce vyžaduje, aby se energie přenesla do klidové energie soustavy, jeho celková klidová E_0 (a jeho celková hmotnost M) se zvýší, a Q je záporné.

Atom vodíku: návrat Bohrova modelu

39-8 | Bohrov model atomu vodíku

Nyní přejdeme od umělých a modelových elektronových pastí k přirozeným pastím – atomům. V této kapitole se budeme věnovat nejjednoduššímu z nich – atomu vodíku. Ten se skládá z jediného elektronu elektricky vázaného k protonu, který tvoří jádro atomu. Jádrem se nyní zabývat nebudeme. Soustředíme se na záporně nabitý elektron, který je přitahován Coulombovou silou ke kladně nabitému protonu. Poněvadž hmotnost protonu je mnohem větší než hmotnost elektronu, můžeme oprávněně předpokládat, že proton se nepohybuje, setrvává na jednom místě. Výskyt elektronu je pak omezen na určitou oblast prostoru v jeho blízkosti, což znamená, že elektron je zachycen v pasti.

Z omezovacího principu, jímž jsme se podrobně zabývali, vyplývá, že energie E elektronu uvězněného v pasti je kvantována, může nabývat jen určitých diskrétních hodnot. Kvantované jsou nejen hodnoty energie samotné, ale i jejich možné změny ΔE (přírůstky nebo úbytky). V tomto článku chceme vypočítat tyto hodnoty energie pro elektron v atomu vodíku. Dříve, než použijeme vlnový přístup, který jsme užili při studiu nekonečných i konečných potenciálních jam, prozkoumáme atom vodíku v raném stadiu jeho kvantového popisu, kdy fyzikové poprvé zjistili, že atomy jsou kvantové soustavy.

Od počátku 20. století vědci věděli, že hmota sestává z malých kousků zvaných atomy. Zjistili, že atom vodíku je tvořen kladným nábojem $+e$ v jeho středu a záporným nábojem $-e$, který se vyskytuje někde mimo tento střed. Nikdo však nechápal, proč elektrická přitažlivá síla mezi elektronem a kladným nábojem nezpůsobí zhroucení těchto dvou částic na sebe.

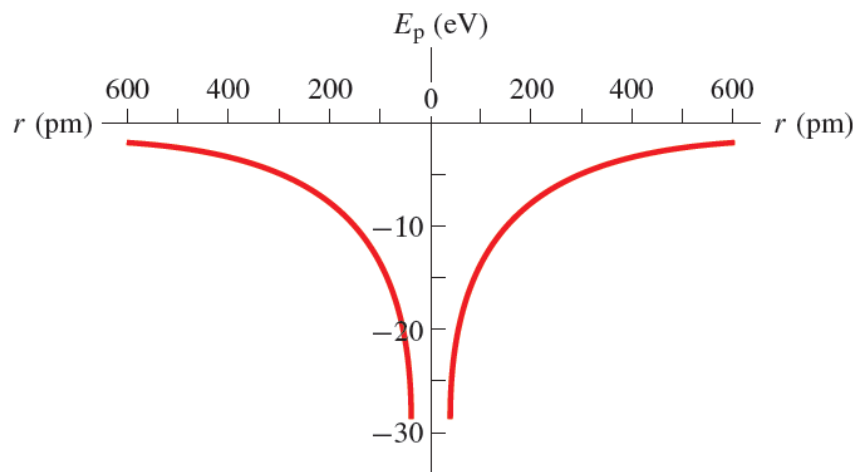
Atom vodíku

39-9 | Schrödingerova rovnice a atom vodíku

Potenciálová jáma pro atom vodíku je určena elektrickou potenciální energií

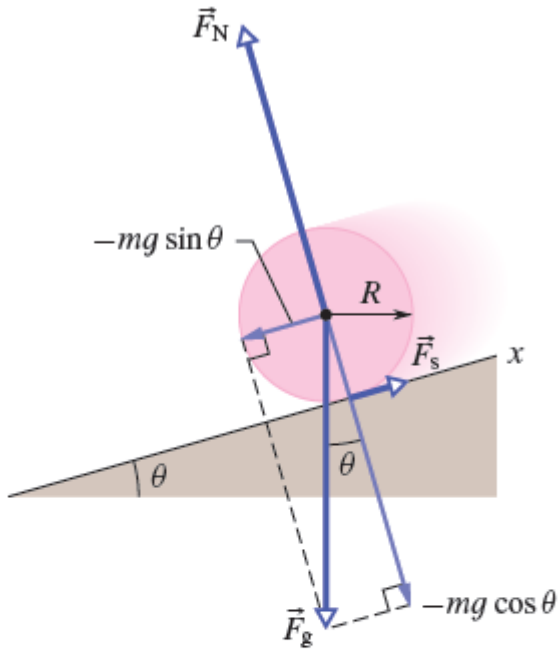
$$E_p(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(e)(-e)}{r} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}. \quad (39.38)$$

Tato trojrozměrná jáma je podstatně komplikovanější než pravoúhlá krabice na obr. 39-14 s neproniknutelnými stěnami. Potenciálová jáma pro atom vodíku nemá ostře definované stěny a její hloubka se mění se vzdáleností r od středu atomu. Obr. 39-17 je asi to nejlepší, co lze nakreslit, když chceme znázornit potenciálovou jámu, v níž se nachází elektron zachycený v atomu vodíku. Tento obrázek musíme dobře interpretovat.



OBR. 39-17 Závislost potenciální energie E_p atomu vodíku na vzdálenosti r mezi elektronem a jádrem umístěným v počátku souřadnic. Závislost je vynesena na-pravo i nalevo, aby byla naznačena trojrozměrná sféricky symetrická jáma, ve které je elektron „uvězněn“.

Details jsou podstatné (valení a třecí síla)



OBR. 11-8 Homogenní válec o poloměru R se valí dolů po nakloněné rovině. Země na něj působí gravitační silou \vec{F}_g , podložka kolmou tlakovou silou \vec{F}_N a třecí silou \vec{F}_s , která míří vzhůru podél nakloněné roviny. (Působíště síly \vec{F}_N jsme pro větší přehlednost přesunuli podél její vektorové přímky do středu tělesa.)

Pro situaci na obr. 11-8 má věta o hybnosti tvar:

$$m\vec{a}_{SH} = \vec{F}_g + \vec{F}_N + \vec{F}_s$$

neboli

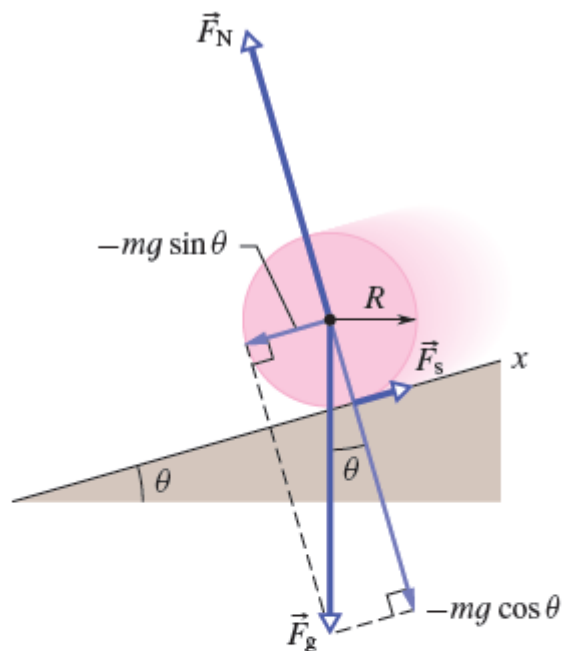
$$ma_{SH,x} = -mg \sin \theta + 0 + F_s \quad (11.7)$$

a

$$ma_{SH,y} = -mg \cos \theta + F_N + 0.$$

Nyní budeme studovat rotaci válce kolem osy (která je kolmá k rovině stránky a míří k nám) procházející jeho středem hmotnosti. V kap. 10 jsme odvodili větu o momentu hybnosti pro rotaci tělesa kolem pevné osy, tj. osy, která je v klidu vzhledem k inerciální vztažné soustavě. Střed hmotnosti válce se však pohybuje se zrychlením. Poměrně snadným výpočtem lze ukázat, že platnost věty o momentu hybnosti zůstane zachována i pro případ, že osa otáčení je nepohyblivá ve vztažné soustavě spojené se středem hmotnosti tělesa, jejíž pohyb vzhledem k soustavám inerciálním je posuvný. Připomeňme, že tato speciální soustava spojená se středem hmotnosti soustavy může být i neinerciální (a v našem případě tomu tak vskutku je).

Details jsou podstatné (valení a třecí síla)



OBR. 11-8 Homogenní válec o poloměru R se valí dolů po nakloněné rovině. Země na něj působí gravitační silou \vec{F}_g , podložka kolmou tlakovou silou \vec{F}_N a třecí silou \vec{F}_s , která míří vzhůru podél nakloněné roviny. (Působíště síly \vec{F}_N jsme pro větší přehlednost přesunuli podél její vektorové přímky do středu tělesa.)

Příklad 11-2

Homogenní koule o hmotnosti $m = 6 \text{ kg}$ a poloměru R se začne z klidu bez prokluzování valit po nakloněné rovině o úhlu sklonu $\theta = 30^\circ$ (obr. 11-8).

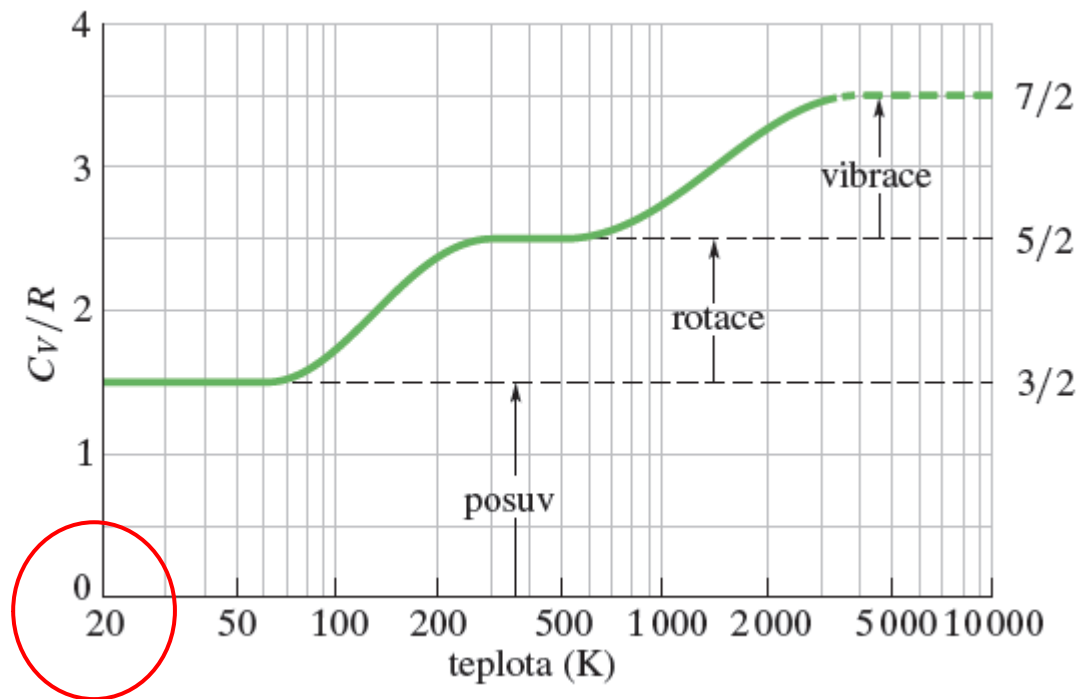
(a) Než koule dosáhne konce nakloněné roviny, klesne při svém pohybu z výšky $h = 1,20 \text{ m}$. Jak velkou rychlostí se pohybuje na konci nakloněné roviny?

ROZVAHA

Během pohybu koule se mechanická energie soustavy koule + Země zachovává. Je to tím, že jedinou silou, která při tomto pohybu koná nenulovou práci, je gravitační síla, kterou na kouli působí Země a o které již víme, že je konzervativní.

Síly (\vec{F}_N a \vec{F}_s), jimiž na kouli působí nakloněná rovina, konají nulovou práci, protože se působíště těchto sil nepohybuje. (Třecí síla nepřeměňuje žádnou energii v tepelnou energii, protože koule neprokluzuje.)

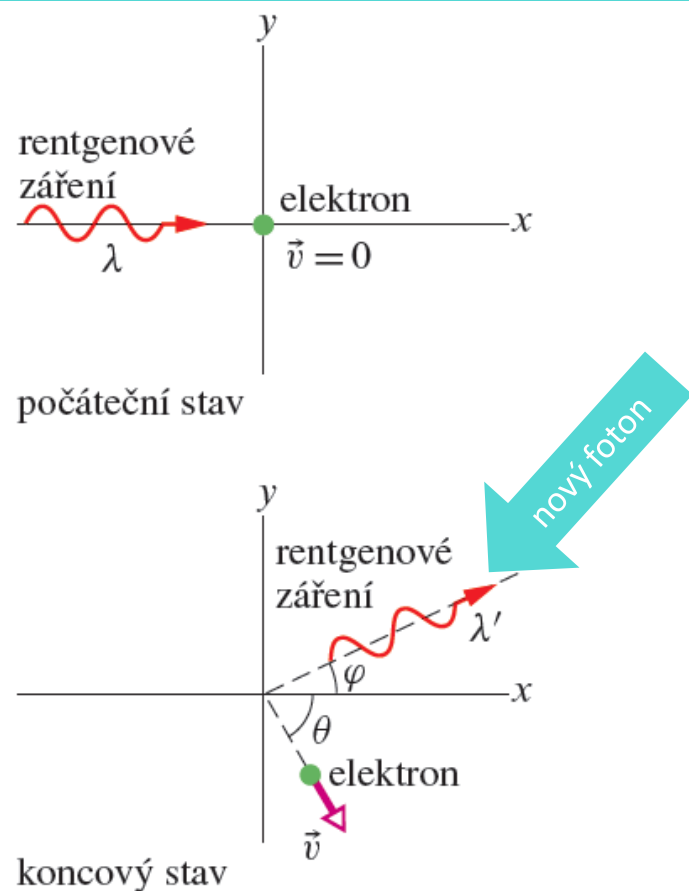
Detaily jsou podstatné (tepelná kapacita kolem 0 K)



OBR. 19-14 Závislost C_V/R na teplotě pro (dvouatomový) vodíkový plyn. Protože rotační a vibrační pohyb vyžadují určitou minimální energii, je při nízkých teplotách možný pouze pohyb posuvný. S rostoucí teplotou plynu začínají molekuly nejprve rotovat a při dostatečných teplotách také kmitat. (Všimněte si, že závislost není zakreslena pro teploty nižší než 20 K. Abychom objasnili chování látek při teplotách blízkých absolutní nule, potřebovali bychom hlubší poznatky z kvantové a statistické fyziky.)

Detaily jsou podstatné (Comptonův rozptyl)

OBR.38-5 Rentgenové záření o vlnové délce λ interaguje s elektronem v klidu. Rentgenový svazek je rozptýlen do úhlu φ a jeho vlnová délka vzroste na λ' . Elektron se pohybuje s rychlostí \vec{v} pod úhlem θ .



Podle přesnějšího popisu Comptonova jevu v kvantové elektrodynamice se jedná o absorpci fotonu, šíření takto „excitovaného“ elektronu a emisi fotonu (časová následnost absorpce a emise je nepodstatná). Jak naznačuje obr. 38-5, pro experiment je důležitý jen počáteční a koncový stav, proto i náš zjednodušený výpočet dobře vyhovuje.

Příklad: (i) rozvaha a výpočet, (ii) graf

Příklad 5-7

Na obrázku 5-18a je znázorněna situace, kdy na kostku o hmotnosti 4,00 kg na hladké vodorovné podlaze působí dvě síly, vyznačena je však pouze jedna z nich, \vec{F}_1 . Tato síla má stálou velikost a svírá s kladným směrem osy x úhel θ , který se může měnit. Síla \vec{F}_2 je stále vodorovná a má i stálou velikost. Graf na obr. 5-18b ukazuje závislost vodorovného zrychlení kostky a_x na úhlu θ v intervalu od 0° do 90° . Jaká je hodnota a_x pro $\theta = 180^\circ$?

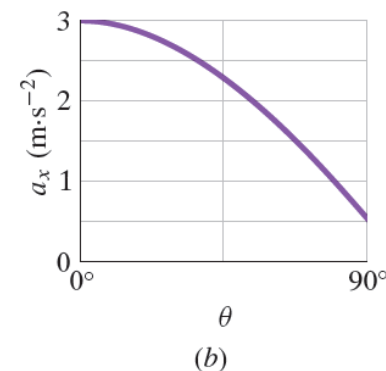
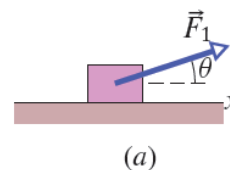
ROZVAHA

(1) Vodorovné zrychlení a_x závisí podle druhého Newtonova zákona na x -ové složce výsledné síly $\sum F_x$.
(2) Výsledná vodorovná síla je součtem vodorovných složek sil \vec{F}_1 a \vec{F}_2 .

Výpočet: x -ovou složku síly \vec{F}_2 označme F_{2x} . Její y -ová složka je nulová. x -ová složka síly \vec{F}_1 je $F_1 \cos \theta$. Druhý Newtonův zákon pro těleso o hmotnosti $m = 4,00$ kg pro pohyb podél osy x má tvar

$$(4,00 \text{ kg})a_x = F_1 \cos \theta + F_{2x}. \quad (5.25)$$

Pro $\theta = 90^\circ$ je $F_1 \cos \theta = 0$. Z grafu vidíme, že odpovídající zrychlení je $0,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Je tedy $F_{2x} = 2,00 \text{ N}$. Dále je



OBR. 5-18 Příklad 5-7. (a) Je vyznačena jedna ze sil působících na kostku. Úhel θ se může měnit. (b) Graf závislosti zrychlení kostky a_x na úhlu θ .

z rov. (5.25) zřejmé, že pro $\theta = 0^\circ$ platí

$$(4,00 \text{ kg})a_x = F_1 \cos 0^\circ + 2,00 \text{ N}. \quad (5.26)$$

Z grafu přečteme, že odpovídající zrychlení je $3,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Z rovnice (5.26) pak určíme $F_1 = 10 \text{ N}$.

Do rov. (5.25) dosadíme $F_1 = 10 \text{ N}$, $F_{2x} = 2,00 \text{ N}$ a $\theta = 180^\circ$. Dostaneme

$$a_x = -2,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}. \quad (\text{Odpověď})$$

Příklad na zajímavou situaci



Když závodní auto zajede do depa, seběhnou se mechanici, aby udělali nutné opravy a doplnili palivo. Jsou pyšní na svou rychlost, protože i zlomek vteřiny promarněného času během zastávky v boxech může stát řidiče vítězství v závodu. Rychle doplnit palivo by ale mohlo být nebezpečné. Když auto přijede do depa, může mít potenciál až -30 kV . Proto mezi ním a stojanem s palivem může přeskočit jiskra a způsobit požár.

Co udělat, aby se předešlo možnosti, že takový požár vypukne?

Odpověď je v této kapitole.

Příklad na zajímavou situaci

Příklad 27-5

Když auto jede po vozovce, jeho pneumatiky se záporně nabíjejí. Elektrony přecházejí nejprve z vozovky na pneumatiky a pak na karoserii. Na autě se hromadí náboj, a tedy i elektrická potenciální energie, poněvadž karoserii lze považovat za jednu elektrodu kondenzátoru a vozovku za druhou (obr. 27-16a). Když auto zastaví, tento kondenzátor se vybíjí přes pneumatiky. Pokud se do blízkosti auta dostane vodivý předmět dříve, než se auto zcela vybije, může mezi ním a autem přeskočit jiskra. Jestliže by přitom probíhalo tankování, mohlo by dojít k požáru. Z experimentu víme, že jiskra palivo nezapálí, pokud je její energie menší než kritická hodnota $E_{\text{zap}} = 50 \text{ mJ}$.

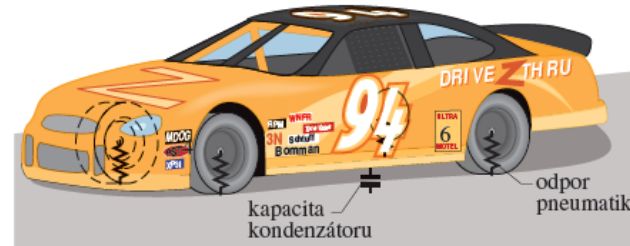
Když v čase $t = 0$ auto zastaví, napětí mezi ním a vozovkou je $U_0 = 30 \text{ kV}$. Kapacita kondenzátoru, tvořeného karoserií auta a vozovkou, je $C = 500 \text{ pF}$ a odpor každé pneumatiky je $R_{\text{pneu}} = 100 \text{ G}\Omega$. Jak dlouho bude trvat, než se karoserie auta vybije přes pneumatiky tak, aby elektrická energie uložená na autě byla menší než kritická hodnota E_{zap} ?

ROZVAHA

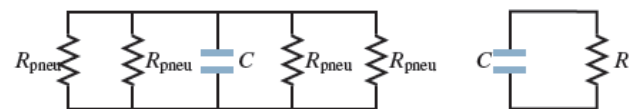
(1) Elektrická energie kondenzátoru E_{el} je v každém čase t dána nábojem na kondenzátoru a jeho kapacitou podle rov. (25.21), $E_{\text{el}} = Q^2/(2C)$. (2) Když se kondenzátor vybíjí, náboj na něm klesá podle rov. (27.36), $Q = Q_0 \exp(-t/(RC))$.

Výpočet: Pneumatiky považujeme za rezistory, které spojují karoserii auta s vozovkou. Obr. 27-16b ukazuje, jak jsou tyto čtyři rezistory v podobě pneumatik paralelně spojeny s kondenzátorem, tvořeným karoserií a vozovkou. Odpor R paralelního uspořádání čtyř rezistorů R_{pneu} je podle rov. (27.21) roven

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{\text{pneu}}} + \frac{1}{R_{\text{pneu}}} + \frac{1}{R_{\text{pneu}}} + \frac{1}{R_{\text{pneu}}},$$

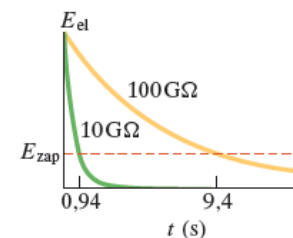


(a)



(b)

(c)



(d)

OBOR.27-16 Příklad 27-5. (a) Nabité karoserie auta a vozovka představují kondenzátor, který se může vybíjet přes pneumatiky. (b) Obvod s kondenzátorem, který tvoří karoserie auta a vozovka, a čtyřmi pneumatikami s odpory R_{pneu} uspořádanými paralelně. (c) Ekvivalentní odpor R čtyř pneumatik. (d) Elektrická energie E_{el} kondenzátoru tvořeného karoserií auta a vozovkou klesá během vybíjení.

Pomocí rov. (25.1) můžeme ze zadaného napětí U_0 určit počáteční náboj Q_0 na karoserii auta: $Q_0 = CU_0$. Po dosazení do rov. (27.42) dostaneme

$$E_{\text{el}} = \frac{(CU_0)^2}{2C} e^{-2t/(RC)} = \frac{CU_0^2}{2} e^{-2t/(RC)},$$

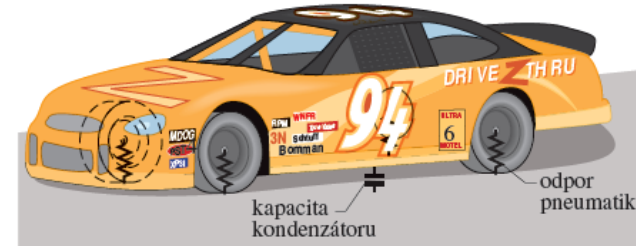
Příklad na zajímavou situaci

Příklad 27-5

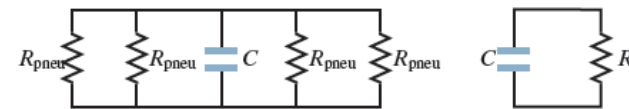
Když auto jede po vozovce, jeho pneumatiky se záporně nabíjejí. Elektrony přecházejí nejprve z vozovky na pneumatiky a pak na karoserii. Na autě se hromadí náboj, a tedy i elektrická potenciální energie, poněvadž karoserii lze považovat za jednu elektrodu kondenzátoru a vozovku za druhou (obr. 27-16a). Když auto zastaví, tento kondenzátor se vybíjí přes pneumatiky. Pokud se do blízkosti auta dostane vodivý předmět dříve, než se auto zcela vybije, může mezi ním a autem přeskočit jiskra. Jestliže by přitom probíhalo tankování, mohlo by dojít k požáru. Z experimentu víme, že jiskra palivo nezapálí, pokud je její energie menší než kritická hodnota $E_{\text{zap}} = 50 \text{ mJ}$.

Když v čase $t = 0$ auto zastaví, napětí mezi ním a vozovkou je $U_0 = 30 \text{ kV}$. Kapacita kondenzátoru, tvořeného karoserií auta a vozovkou, je $C = 500 \text{ pF}$ a odpor každé pneumatiky je $R_{\text{pneu}} = 100 \text{ G}\Omega$. Jak dlouho bude trvat, než se karoserie auta vybije přes pneumatiky tak, aby elektrická energie uložená na autě byla menší než kritická hodnota E_{zap} ?

Dojde či nedojde k požáru? Zjistili jsme, že po zastavení tohoto auta je potřeba počkat alespoň 9,4 s, a teprve potom začít bezpečně tankovat. Během závodu však posádka závodního vozu nemůže tak dlouho čekat. Proto pneumatiky závodních automobilů obsahují jistý vodivý materiál (např. saze), čímž se sníží jejich odpor, a tím se zrychlí i vybíjení vozu. Obr. 27-16d ukazuje energii E_{el} v závislosti na čase t pro pneumatiky s odporem $100 \text{ G}\Omega$ (což je hodnota, kterou jsme použili ve výpočtech) a s desetkrát menším odporem $10 \text{ G}\Omega$. Všimněte si, že čím je odpor pneumatik auta menší, tím se auto rychleji vybije na bezpečnou mez.

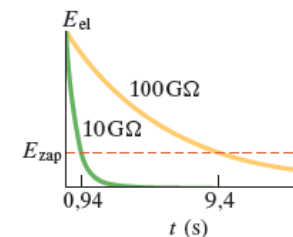


(a)



(b)

(c)



(d)

OBR. 27-16 Příklad 27-5. (a) Nabité karoserie auta a vozovka představují kondenzátor, který se může vybíjet přes pneumatiky. (b) Obvod s kondenzátorem, který tvoří karoserie auta a vozovka, a čtyřmi pneumatikami s odpory R_{pneu} uspořádanými paralelně. (c) Ekvivalentní odpor R čtyř pneumatik. (d) Elektrická energie E_{el} kondenzátoru tvořeného karoserií auta a vozovkou klesá během vybíjení.

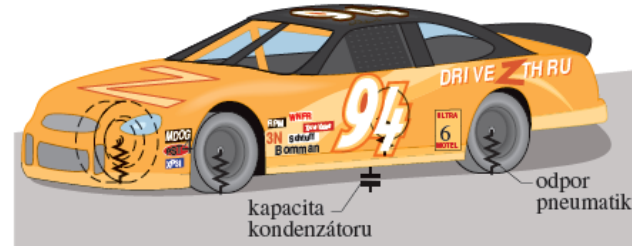
Příklad na zajímavou situaci

Příklad 27-5

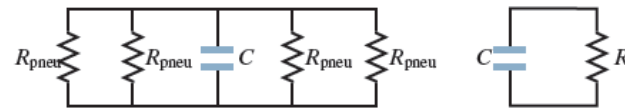
Když auto jede po vozovce, jeho pneumatiky se záporně nabíjejí. Elektrony přecházejí nejprve z vozovky na pneumatiky a pak na karoserii. Na autě se hromadí náboj, a tedy i elektrická potenciální energie, poněvadž karoserii lze považovat za jednu elektrodu kondenzátoru a vozovku za druhou (obr. 27-16a). Když auto zastaví, tento kondenzátor se vybíjí přes pneumatiky. Pokud se do blízkosti auta dostane vodivý předmět dříve, než se auto zcela vybije, může mezi ním a autem přeskočit jiskra. Jestliže by přitom probíhalo tankování, mohlo by dojít k požáru. Z experimentu víme, že jiskra palivo nezapálí, pokud je její energie menší než kritická hodnota $E_{\text{zap}} = 50 \text{ mJ}$.

Když v čase $t = 0$ auto zastaví, napětí mezi ním a vozovkou je $U_0 = 30 \text{ kV}$. Kapacita kondenzátoru, tvořeného karoserií auta a vozovkou, je $C = 500 \text{ pF}$ a odpor každé pneumatiky je $R_{\text{pneu}} = 100 \text{ G}\Omega$. Jak dlouho bude trvat, než se karoserie auta vybije přes pneumatiky tak, aby elektrická energie uložená na autě byla menší než kritická hodnota E_{zap} ?

Dojde či nedojde k požáru? Zjistili jsme, že po zastavení tohoto auta je potřeba počkat alespoň 9,4 s, a teprve potom začít bezpečně tankovat. Během závodu však posádka závodního vozu nemůže tak dlouho čekat. Proto pneumatiky závodních automobilů obsahují jistý vodivý materiál (např. saze), čímž se sníží jejich odpor, a tím se zrychlí i vybíjení vozu. Obr. 27-16d ukazuje energii E_{el} v závislosti na čase t pro pneumatiky s odporem $100 \text{ G}\Omega$ (což je hodnota, kterou jsme použili ve výpočtech) a s desetkrát menším odporem $10 \text{ G}\Omega$. Všimněte si, že čím je odpor pneumatik auta menší, tím se auto rychleji vybije na bezpečnou mez.

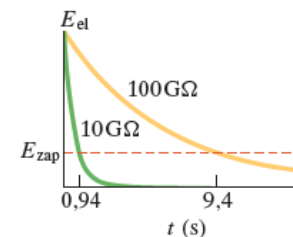


(a)



(b)

(c)



(d)

OBR. 27-16 Příklad 27-5. (a) Nabitá karoserie a stavují kondenzátor, který se může vybíjet přes j vod s kondenzátorem, který tvoří karoserie auta pneumatikami s odpory R_{pneu} uspořádanými pa lentní odpor R čtyř pneumatik. (d) Elektrická e zátoru tvořeného karoserií auta a vozovkou kles

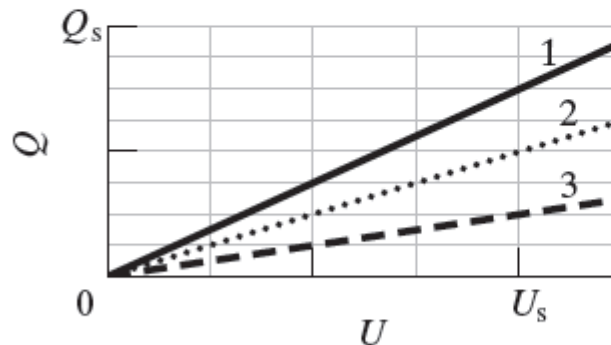
<http://www.flyingcircusofphysics.com/News/NewsDetail.aspx?NewsID=41>

5.9

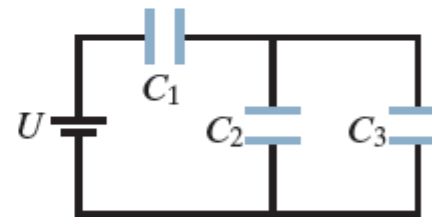


Úlohy s grafy (1)

••18 Křivka 1 v grafu na obr. 25-34a zobrazuje hodnotu náboje Q na elektrodách kondenzátoru C_1 v závislosti na jeho napětí U . Měřítko na svislé ose je zadáno hodnotou $Q_s = 16,0 \mu\text{C}$ a na vodorovné ose hodnotou $U_s = 2,0 \text{ V}$. Křivky 2 a 3 zobrazují podobné závislosti pro kondenzátory C_2 a C_3 . Na obr. 25-34b jsou tyto kondenzátory připojeny k baterii s napětím $6,0 \text{ V}$. Jaký je v tomto zapojení náboj na elektrodách kondenzátoru C_2 ?



(a)

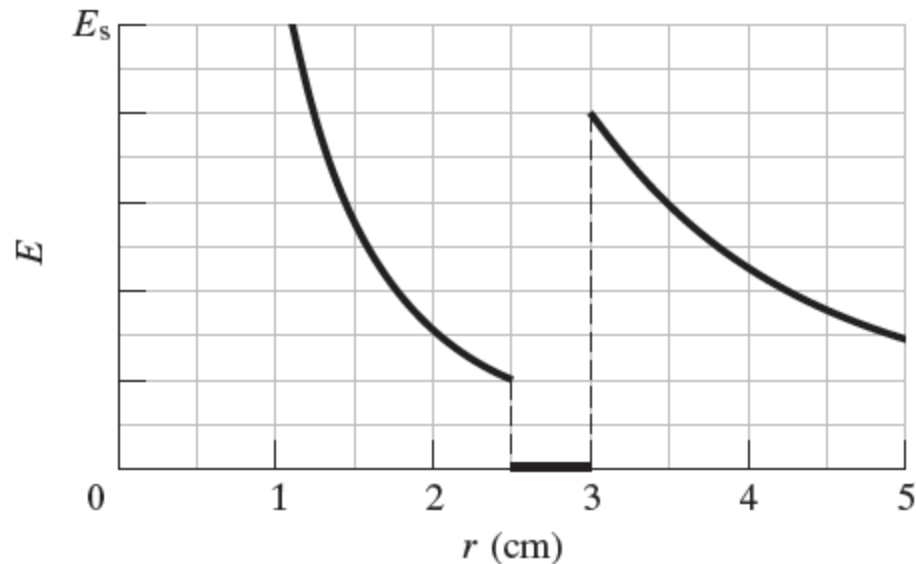


(b)

OBR. 25-34 Úloha 18

Úlohy s grafy (2)

••52 Nabitá částice se nachází ve středu kulové vrstvy. Na obr.23-53 je zobrazena velikost E elektrické intenzity v závislosti na vzdálenosti r od částice. Měřítka svislé osy je $E_s = 10,0 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$. Jaký je přibližně celkový náboj kulové vrstvy?



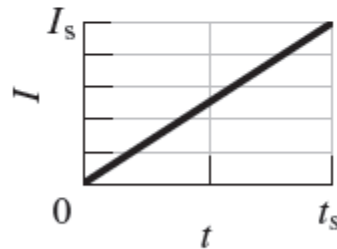
OBR. 23-53 Úloha 52

Úlohy s grafy (3)

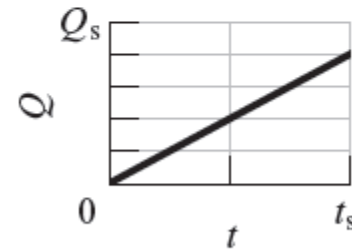
•**28** Na obr. 30-54a je kruhová smyčka o poloměru 6,00 cm, která je souosá se zobrazeným solenoidem. Solenoid má poloměr 2,00 cm, hustotu vinutí 8000 závitů na metr a protéká jím proud I , jehož časový průběh je zobrazen na obr. 30-54b. Měřítka na svislé ose je zadáno hodnotou $I_s = 1,00 \text{ A}$ a na vodorovné ose hodnotou $t_s = 2,0 \text{ s}$. Obr. 30-54c zobrazuje Joulovo teplo Q , které se vyvíjí ve smyčce při průchodu indukovaného proudu, jako funkci času t . Měřítka svislé osy je dáno hodnotou $Q_s = 100,0 \text{ nJ}$. Jaký je odpor smyčky?



(a)



(b)



(c)

OBR. 30-54 Úloha 28

Fyzikální konstanty a soustava SI

Některé základní fyzikální konstanty*

B

Konstanta	Značka	Přibližná hodnota	Nejpřesnější hodnota přijatá v roce 2010	
			Hodnota ^a	Relativní chyba
rychlost světla ve vakuu	c	$3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	2,99792458	přesně
elementární náboj	e	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	1,602 176 565(35)	$2,2 \cdot 10^{-8}$
gravitační konstanta ^b	G	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$	6,673 84(80)	$1,2 \cdot 10^{-4}$
molární plynová konstanta	R	$8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	8,314 462 1(75)	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Avogadrova konstanta	N_A	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	6,022 141 29(27)	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Boltzmannova konstanta	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$	1,380 648 8(13)	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Stefanova-Boltzmannova konstanta	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	5,670 373(21)	$3,6 \cdot 10^{-6}$
molární objem ideálního plynu za NTP ^c	V_m	$2,24 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	2,241 396 8(20)	$9,1 \cdot 10^{-7}$
permitivita vakua (elektrická konstanta)	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$	$1/(c^2 \mu_0)$	přesně
permeabilita vakua (magnetická konstanta)	μ_0	$1,26 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	přesně
Planckova konstanta	h	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	6,626 069 57(29)	$4,4 \cdot 10^{-8}$
redukováná Planckova konstanta	$\hbar = h/(2\pi)$	$1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	1,054 571 726(47)	$4,4 \cdot 10^{-8}$
atomová hmotnostní jednotka ^d	u	$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	1,660 538 921(73)	$4,4 \cdot 10^{-8}$
hmotnost elektronu	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	9,109 382 91(40)	$4,4 \cdot 10^{-8}$
		$5,49 \cdot 10^{-4} u$	5,485 799 094 6(22)	$4,0 \cdot 10^{-10}$
hmotnost protonu	m_p	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	1,672 621 777(74)	$4,4 \cdot 10^{-8}$
		$1,007 3 u$	1,007 276 466 812(90)	$8,9 \cdot 10^{-11}$
poměr hmotností protonu a elektronu	m_p/m_e	1840	1836,152 672 45(75)	$4,1 \cdot 10^{-10}$
měrný náboj elektronu	e/m_e	$1,76 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$	1,758 820 088(39)	$2,2 \cdot 10^{-8}$
hmotnost neutronu	m_n	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	1,674 927 351(74)	$4,4 \cdot 10^{-8}$
		$1,008 7 u$	1,008 664 916 00(43)	$4,2 \cdot 10^{-10}$
hmotnost atomu vodíku ^e	m_{1H}	$1,007 8 u$	1,007 825 032 33(9)	$8,9 \cdot 10^{-11}$
hmotnost atomu deuteria ^e	m_{2H}	$2,014 1 u$	2,014 101 778 12(12)	$5,9 \cdot 10^{-11}$
hmotnost atomu helia ^e	m_{4He}	$4,002 6 u$	4,002 603 254 13(6)	$1,5 \cdot 10^{-11}$
hmotnost mionu	m_μ	$1,88 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$	1,883 531 475(96)	$5,1 \cdot 10^{-8}$
magnetický moment elektronu	μ_e	$9,28 \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	9,284 764 30(21)	$2,2 \cdot 10^{-8}$
magnetický moment protonu	μ_p	$1,41 \cdot 10^{-26} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	1,410 606 743(33)	$2,4 \cdot 10^{-8}$
Bohrův magneton	μ_B	$9,27 \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	9,274 009 68(20)	$2,2 \cdot 10^{-8}$
jaderný magneton	μ_N	$5,05 \cdot 10^{-27} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	5,050 783 53(11)	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Bohrův poloměr	r_B	$5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$	5,291 772 109 2(17)	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Rydbergova konstanta	R	$1,10 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$	1,097 373 156 853 9(55)	$5,0 \cdot 10^{-12}$
Comptonova vlnová délka elektronu	λ_C	$2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}$	2,426 310 238 9(16)	$6,5 \cdot 10^{-10}$

^a K hodnotám v tomto sloupci je nutno přiřadit stejnou jednotku a mocninu desítky jako u přibližné hodnoty. V závorce je neurčitost vztahující se k posledním dvěma místům.

^b V CR je dosud dosti rozšířena starší značka κ .

^c NTP znamená normální teplotu a tlak: 0°C a 1 atm.

^d Atomová hmotnostní jednotka u se nazývá také dalton, značka Da.

^e Hodnoty atomových hmotností jsou převzaty z článku M. Wang et al., *Chinese Physics C* 36, 1603–2014 (2012).

<http://physics.nist.gov/cuu/pdf/RevModPhysCODATA2010.pdf>

* Hodnoty v této tabulce byly vybrány z *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants 2010* (viz také www.physics.nist.gov). Hodnoty fyzikálních konstant jsou aktualizovány každé čtyři roky.

Některé základní fyzikální konstanty*

B

Konstanta	Značka	Přibližná hodnota	Nejpřesnější hodnota přijatá v roce 2010	
			Hodnota ^a	Relativní chyba
rychlost světla ve vakuu	c	$3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	2,997 924 58	přesně
elementární náboj	e	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	1,602 176 565 (35)	$2,2 \cdot 10^{-8}$
gravitační konstanta ^b	G	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$	6,673 84 (80)	$1,2 \cdot 10^{-4}$
molární plynová konstanta	R	$8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	8,314 462 1 (75)	$9,1 \cdot 10^{-7}$

Zde m_1, m_2 značí hmotnosti částic, r vzdálenost mezi nimi a G je **gravitační konstanta**, jejíž hodnota (přijatá v roce 2010) činí*

$$G = 6,673\,84(80) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}. \quad (13.2)$$

hmotnost atomu vodíku ^e	m_1_H	1,007 8 u	1,007 825 032 33 (9)	$8,9 \cdot 10^{-11}$
hmotnost atomu deuteria ^e	m_2_H	2,014 1 u	2,014 101 778 12 (12)	$5,9 \cdot 10^{-11}$
hmotnost atomu helia ^e	m_{He}	4,002 6 u	4,002 603 254 13 (6)	$1,5 \cdot 10^{-11}$
hmotnost mionu	m_μ	$1,88 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$	1,883 531 475 (96)	$5,1 \cdot 10^{-8}$
magnetický moment elektronu	μ_e	$9,28 \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	9,284 764 30 (21)	$2,2 \cdot 10^{-8}$

V tomto vztahu h je **Planckova konstanta**, se kterou jsme se poprvé setkali v rov. (32.43) a která má hodnotu (přijatou v roce 2010)

$$h = 6,626\,069\,57(29) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,135\,667\,516(91) \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \quad (38.3)$$

<http://physics.nist.gov/cuu/pdf/RevModPhysCODATA2010.pdf>

* Hodnoty v této tabulce byly vybrány z *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants 2010* (viz také www.physics.nist.gov). Hodnoty fyzikálních konstant jsou aktualizovány každé čtyři roky.

Mezinárodní soustava jednotek (SI)*

A

TABULKA 1

Základní jednotky SI

Veličina	Název	Značka	Definice
délka	metr	m	„Metr je délka dráhy, kterou urazí světlo ve vakuu za dobu $1/299\,792\,458$ sekundy.“ (1983)
hmotnost	kilogram	kg	„Kilogram je roven hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu.“ (1989)
čas, doba trvání	sekunda	s	„Sekunda je doba trvání $9\,192\,631\,770$ period záření odpovídajícího přechodu mezi dvěma velmi jemnými hladinami základního stavu atomu cesia 133.“ (1967)
elektrický proud	ampér	A	„Ampér je takový stálý elektrický proud, který protéká-li dvěma rovnoběžnými vodiči nekonečné délky zanedbatelného kruhového průřezu a vzdálenými od sebe 1 metr ve vakuu, vyvolá mezi nimi sílu rovnou $2 \cdot 10^{-7}$ newtonu na metr délky vodiče.“ (1946)
termodynamická teplota	kelvin	K	„Kelvin je $1/273,16$ termodynamické teploty trojného bodu vody.“ (1967)
látkové množství	mol	mol	„Mol je takové látkové množství soustavy, která obsahuje tolik elementárních entit, kolik je atomů v $0,012$ kg uhlíku 12. Při užití molu musí být elementární entity určeny. Mohou to být atomy, molekuly, ionty, elektrony, jiné částice nebo určené skupiny takových částic.“ (1971)
svítivost ^a	kandela	cd	„Kandela je svítivost v daném směru zdroje, který vysílá monochromatické záření o kmitočtu $540 \cdot 10^{12}$ hertzů a který má v tomto směru zářivost $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$.“ (1979)

Mezinárodní soustava jednotek (SI)*

A

TABULKA 1

Základní jednotky SI

Veličina	Název	Značka	Definice
délka	metr	m	„Metr je délka dráhy, kterou urazí světlo ve vakuu za dobu $1/299\,792\,458$ sekundy.“ (1983)
hmotnost	kilogram	kg	„Kilogram je roven hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu.“ (1989)
čas, doba trvání	sekunda	s	„Sekunda je doba trvání $9\,192\,631\,770$ period záření odpovídajícího přechodu mezi dvěma velmi jemnými hladinami základního stavu atomu cesia 133.“ (1967)
elektrický proud	ampér	A	„Ampér je takový stálý elektrický proud, který protéká-li dvěma rovnoběžnými vodiči nekonečné délky zanedbatelného kruhového průřezu a vzdálenými od sebe 1 metr ve vakuu, vyvolá mezi nimi sílu rovnou $2 \cdot 10^{-7}$ newtonu na metr délky vodiče.“ (1946)
termodynamická teplota	kelvin	K	„Kelvin je $1/273,16$ termodynamické teploty trojného bodu vody.“ (1967)
látkové množství	mol	mol	„Mol je takové látkové množství soustavy, která obsahuje tolik elementárních entit, kolik je atomů v $0,012$ kg uhlíku 12. Při užití molu musí být elementární entity určeny. Mohou to být atomy, molekuly, ionty, elektrony, jiné částice nebo určené skupiny takových částic.“ (1971)
svítivost ^a	kandela	cd	„Kandela je svítivost v daném směru zdroje, který vysílá monochromatické záření o kmitočtu $540 \cdot 10^{12}$ hertzů a který má v tomto směru zářivost $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$.“ (1979)

2014

Mezinárodní soustava jednotek (SI)*

A

TABULKA 1

Table 2. New SI base quantities, defining constants, and definitions

2018

Base quantity	Defining constant	Definition
Frequency	$\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$	The unperturbed ground-state hyperfine splitting frequency of the cesium-133 atom $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ is exactly 9 192 631 770 hertz.
Velocity	c	The speed of light in vacuum c is exactly 299 792 458 meter per second.
Action	h	The Planck constant h is exactly $6.626\text{X} \times 10^{-34}$ joule second.
Electric charge	e	The elementary charge e is exactly $1.602\text{X} \times 10^{-19}$ coulomb.
Heat capacity	k	The Boltzmann constant k is exactly $1.380\text{X} \times 10^{-23}$ joule per kelvin.
Amount of substance	N_{A}	The Avogadro constant N_{A} is exactly $6.022\text{X} \times 10^{23}$ reciprocal mole.
Luminous intensity	K_{cd}	The luminous efficacy K_{cd} of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} hertz is exactly 683 lumen per watt.

The symbol X in the numerical values indicates additional digits to be set upon redefinition of the SI. The term “defining constant” is used in the broader sense to include invariants of nature such as the hyperfine splitting frequency of the cesium-133 atom and the luminous efficacy.

A more fundamental International System of Units

David B. Newell

2018



Physics Today, July 2014

NIST

The universally accepted method of expressing physical measurements for world commerce, industry, and science is about to get a facelift, thanks to our improved knowledge of fundamental constants.

<http://scitation.aip.org/docserver/fulltext/aip/magazine/physicstoday/67/7/PT.3.2448.pdf?expires=1408393413&id=id&accname=guest&checksum=FEC57F5979B35B80EFC2DB8E0EE7986C>

A more fundamental International System of Units

David B. Newell

2018



NIST

Physics Today, July 2014

The universally accepted measure
for world commerce, industry,
thanks to our improved

For teachers and others who are familiar and comfortable with the present SI and its definitions of base units, the transition may be more difficult. Physics education often starts by exploring the readily available, observable phenomena of classical mechanics followed by the introduction of classical electromagnetism before moving on to quantum mechanics and special and general relativity. With the advent of the new SI, instructors in basic classes may have to explain how a familiar quantity such as mass is directly related to the Planck constant, a subject not typically taught in introductory-level courses. One explanation is to introduce the concept of measuring mechanical power with respect to electrical power using a watt balance.¹⁶ The box on page 38 gives an example of how such an explanation might go.

Na těchto základech můžete stavět

GRE[®]

Graduate Record Examinations[®]

100 otázek, 170 minut

http://www.ets.org/gre/subject/about?WT.ac=grehome_gresubject_130807

Na těchto základech můžete stavět

GR9677

1. The capacitor shown in Figure 1 above is charged by connecting switch S to contact a . If switch S is thrown to contact b at time $t = 0$, which of the curves in Figure 2 above represents the magnitude of the current through the resistor R as a function of time?

- (A) A
- (B) B
- (C) C
- (D) D
- (E) E

73 %

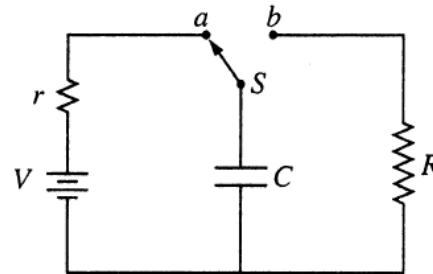


Figure 1

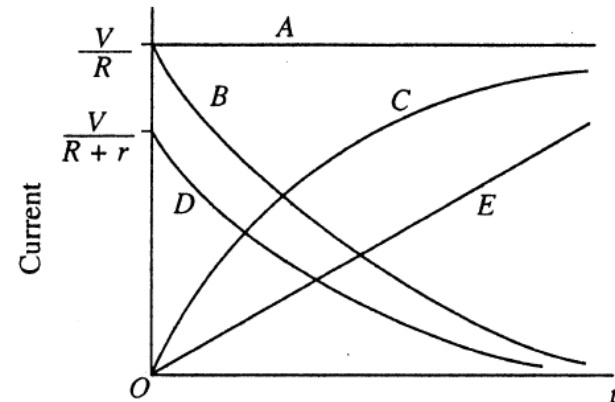
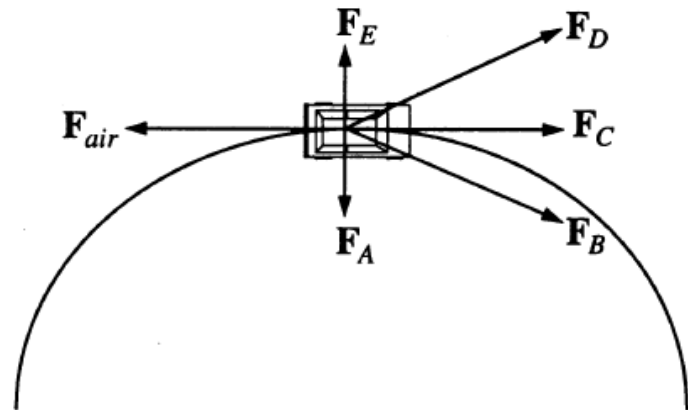


Figure 2

5. A car travels with constant speed on a circular road on level ground. In the diagram above, \mathbf{F}_{air} is the force of air resistance on the car. Which of the other forces shown best represents the horizontal force of the road on the car's tires?

- (A) \mathbf{F}_A
- (B) \mathbf{F}_B
- (C) \mathbf{F}_C
- (D) \mathbf{F}_D
- (E) \mathbf{F}_E

29 %



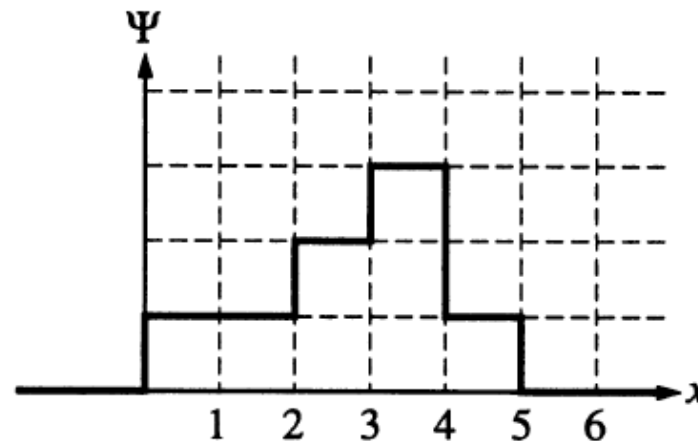
Na těchto základech můžete stavět

GR9677

17. The wave function for a particle constrained to move in one dimension is shown in the graph above ($\Psi = 0$ for $x \leq 0$ and $x \geq 5$). What is the probability that the particle would be found between $x = 2$ and $x = 4$?

- (A) $17/64$
(B) $25/64$
(C) $5/8$
(D) $\sqrt{5/8}$
(E) $13/16$

20 %

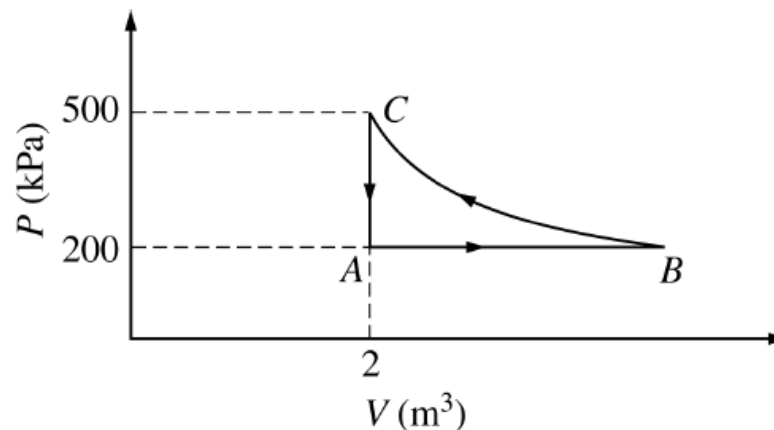


GR0177

37. A constant amount of an ideal gas undergoes the cyclic process $ABCA$ in the PV diagram shown above. The path BC is isothermal. The work done by the gas during one complete cycle, beginning and ending at A , is most nearly

- (A) 600 kJ
(B) 300 kJ
(C) 0
(D) -300 kJ
(E) -600 kJ

36 %



(Na těchto základech můžete stavět)

GR0177

45. Let $|n\rangle$ represent the normalized n^{th} energy eigenstate of the one-dimensional harmonic oscillator, $H|n\rangle = \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right)|n\rangle$. If $|\psi\rangle$ is a normalized ensemble state that can be expanded as a linear combination $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{14}}|1\rangle - \frac{2}{\sqrt{14}}|2\rangle + \frac{3}{\sqrt{14}}|3\rangle$ of the eigenstates, what is the expectation value of the energy operator in this ensemble state?

- (A) $\frac{102}{14} \hbar\omega$
- (B) $\frac{43}{14} \hbar\omega$
- (C) $\frac{23}{14} \hbar\omega$
- (D) $\frac{17}{\sqrt{14}} \hbar\omega$
- (E) $\frac{7}{\sqrt{14}} \hbar\omega$

50 %

74. The Lagrangian for a mechanical system is

$$L = a\dot{q}^2 + bq^4,$$

where q is a generalized coordinate and a and b are constants. The equation of motion for this system is

- (A) $\dot{q} = \sqrt{\frac{b}{a}} q^2$
- (B) $\dot{q} = \frac{2b}{a} q^3$
- (C) $\ddot{q} = -\frac{2b}{a} q^3$
- (D) $\ddot{q} = +\frac{2b}{a} q^3$
- (E) $\ddot{q} = \frac{b}{a} q^3$

50 %

Na těchto základech můžete stavět

Více než 80% otázek může zodpovědět ten, kdo dobré zná HRW.

The logo for the Graduate Record Examinations (GRE) features the letters 'GRE' in a large, bold, serif font. A registered trademark symbol (®) is located to the upper right of the 'E'.

Graduate Record Examinations®

100 otázek, 170 minut

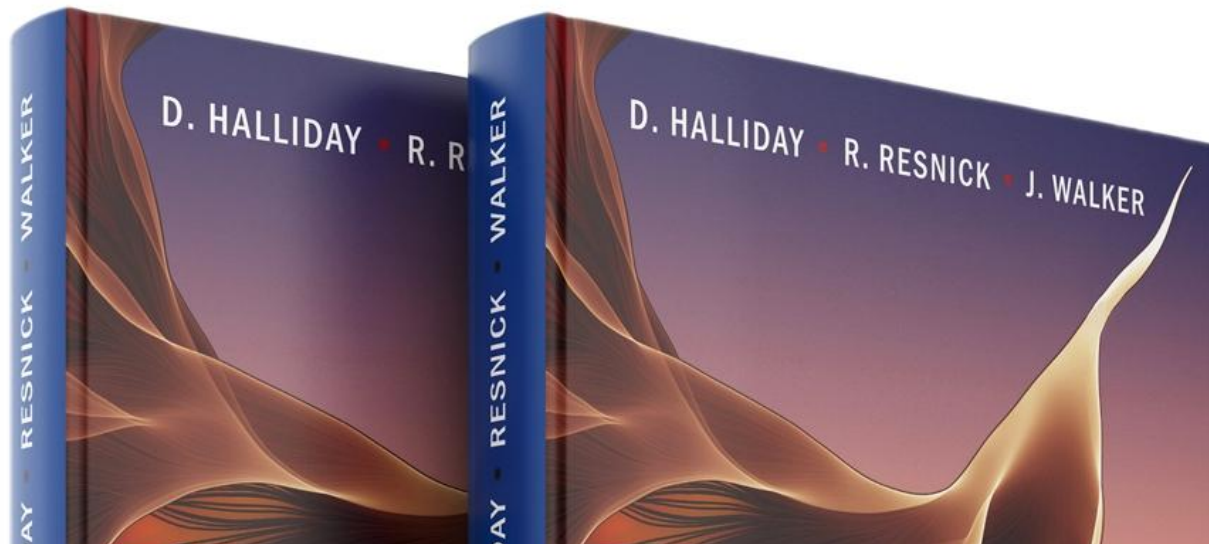
HRW lidé

Na přípravě druhého českého vydání se podíleli:

doc. Mgr. Miroslav Černý, Ph.D., VUT (otázky a úlohy ke kap. 21-31);
prof. RNDr. Petr Dub, CSc., VUT, (kap. 1-44, dodatky, rejstřík);
prof. RNDr. Jiří Komrška, CSc., VUT (kap. 33-36);
prof. RNDr. Michal Lenc, Ph.D., MU (kap. 37, 42-44);
prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc., VUT (kap. 38-41);
prof. RNDr. Miroslav Liška, DrSc., VUT (kap. 33-35);
prof. RNDr. Jana Musilová, CSc., MU (kap. 5-8);
Mgr. Pavla Musilová, Ph.D., MU (otázky a úlohy ke kap. 1-11, 15-20);
doc. RNDr. Jan Obdržálek, CSc., UK (kap. 12-14);
prof. RNDr. Jiří Petráček, Dr., VUT (kap. 15-17, 21-32);
prof. RNDr. Jiří Spousta, Ph.D., VUT (kap. 1-4, 9-11);
doc. RNDr. Marian Štrunc, CSc., VUT (kap. 18-20).

Na přípravě prvního českého vydání se podíleli:

doc. RNDr. Milada Bartlová, Ph.D., VUT; doc. RNDr. Zdeněk Bochníček, Ph.D., MU; prof. Ing. Libor Dědek, CSc., VUT;
prof. RNDr. Petr Dub, CSc., VUT; prof. RNDr. Ludmila Eckertová, CSc., UK; doc. RNDr. Antonín Havránek, CSc., UK;
prof. RNDr. Václav Holý, CSc., UK; RNDr. Michal Horák, CSc., VUT; RNDr. Karel Houfek, Ph.D., UK;
prof. RNDr. Petr Chvosta, CSc., UK; prof. RNDr. Jiří Komrška, CSc., VUT; prof. RNDr. Michal Lenc, Ph.D., MU;
prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc., AV ČR; prof. RNDr. Miroslav Liška, DrSc., VUT; RNDr. Vladimír Mitvalský, VUT;
prof. RNDr. Jana Musilová, CSc., MU; prof. RNDr. Vladimír Navrátil, CSc., MU; prof. RNDr. Jan Novotný, CSc., MU;
doc. RNDr. Jan Obdržálek, CSc., UK; prof. RNDr. Jiří Spousta, Ph.D., VUT; doc. RNDr. Jiří Světlík, CSc., VUT;
prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc., VUT; doc. RNDr. Marian Štrunc, CSc., VUT; prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc., VUT;
RNDr. Vladimír Zdražil, CSc., VUT.



Děkujeme za pozornost



<https://www.facebook.com/groups/255764441270731/>