

19 Kinetická teorie plynů 523

Co způsobuje mlhu, která se objeví, když otevřeme sodovku nebo jiný sycený nápoj?

- 19-1 O co jde a jak na to 524
 - 19-2 Avogadrova konstanta 524
 - 19-3 Ideální plyny 525
 - 19-4 Tlak, teplota a střední kvadratická rychlost 528
 - 19-5 Kinetická energie posuvného pohybu 530
 - 19-6 Střední volná dráha 531
 - 19-7 Rozdělení rychlostí molekul 532
 - 19-8 Molární tepelné kapacity ideálního plynu 536
 - 19-9 Stupně volnosti a molární tepelné kapacity 539
 - 19-10 Trocha kvantové teorie 541
 - 19-11 Adiabatické rozpínání ideálního plynu 542
- Přehled & shrnutí 545
Otázky 546 / Úlohy 546

20 Entropie a druhý zákon termodynamiky 552

Co spojuje napnutou gumovou pásku a směr času?

- 20-1 O co jde a jak na to 553
- 20-2 Vratné a nevrátané děje 553

- 20-3 Změna entropie 553
 - 20-4 Druhý zákon termodynamiky 557
 - 20-5 Entropie kolem nás: motory 559
 - 20-6 Entropie kolem nás: chladničky 563
 - 20-7 Účinnost reálných motorů 564
 - 20-8 Statistický pohled na entropii 565
 - 20-9 Třetí zákon termodynamiky 569
- Přehled & shrnutí 570
Otázky 571 / Úlohy 572

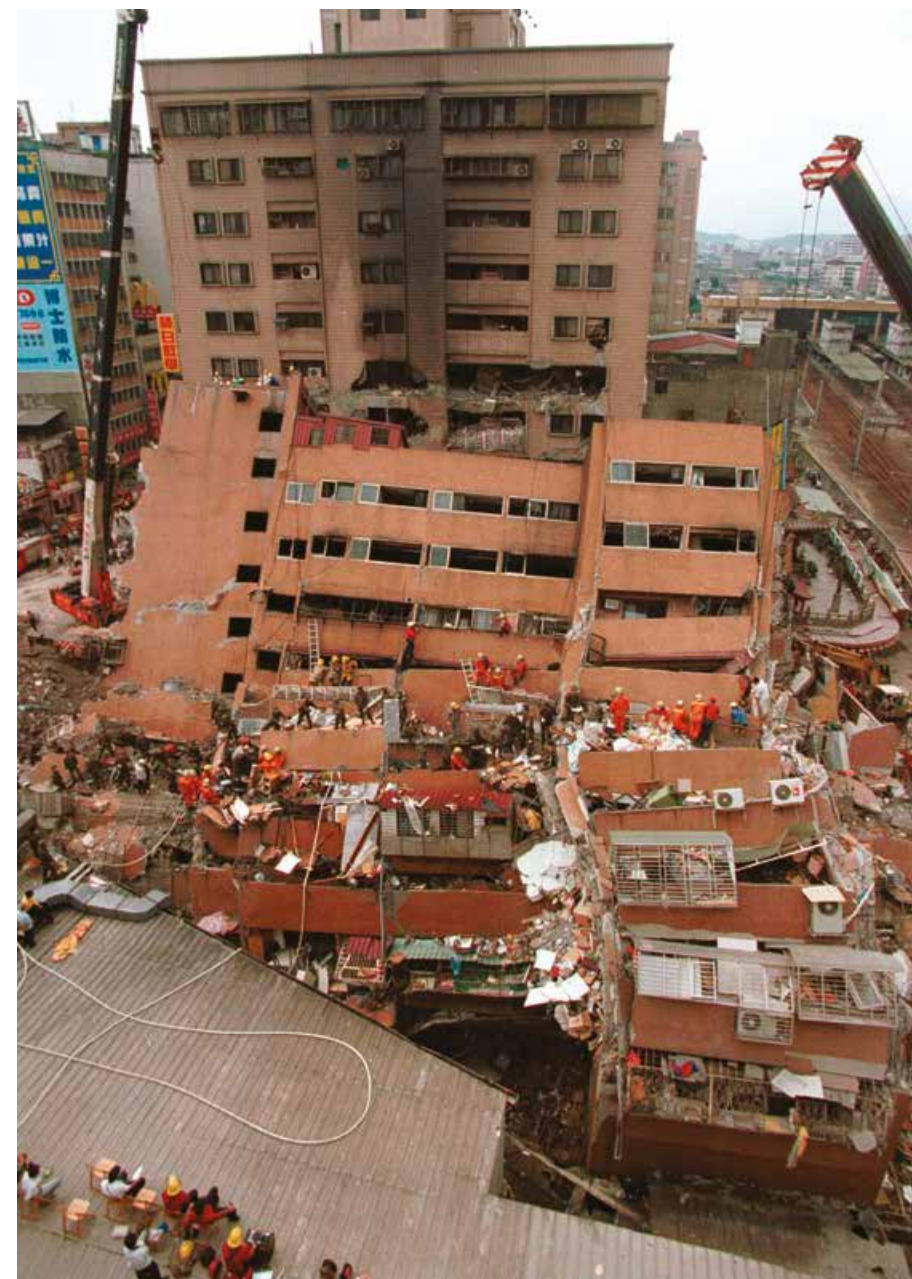
■ Dodatky

- A Mezinárodní soustava jednotek (SI) D1
- B Některé základní fyzikální konstanty D3
- C Některá astronomická data D4
- D Převodní koeficienty mezi jednotkami D5
- E Matematické vzorce D9
- F Vlastnosti prvků D12
- G Periodická soustava prvků D15
- H Nositelé Nobelových cen za fyziku D16

Výsledky V1

Rejstřík R1

Měření



Když zemětřesení zasáhne obydlenou oblast, může rozkmitat obytné budovy a jiné stavby nebo způsobit jejich zničení. V některých oblastech se dokonce může vlivem zemětřesení významná část budov vnořit pod povrch, jako kdyby nestály na pevném podloží, ale na husté tekutině.

Jak se může budova potopit do země?

Odpověď je v této kapitole.



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.

9-1 O CO JDE A JAK NA TO

Každý soudní znalec používá při rekonstrukcích dopravních nehod fyziku. Rovněž osobní trenér baletky, který ji vede při nácviu skoků, používá fyziku. Chceme-li totiž analyzovat složité pohyby různých typů, musíme je zjednodušit, abychom je mohli pomocí fyziky, která se za nimi skrývá, dobře pochopit. V této kapitole si ukážeme, jak můžeme komplikované pohyby složitých soustav, jakými jsou například auta nebo baletka, zjednodušit, pokud stanovíme význačný bod těchto soustav, který nazýváme *střed hmotnosti*.*

Představme si například, že vyhodíme do vzduchu míček jako na obr. 9-1a. Jeho pohyb bude jednoduchý – míček, který můžeme považovat za hmotný bod, se bude pohybovat po parabolické dráze, jak jsme probírali v kap. 4. Pokud ale vyhodíme do vzduchu baseballovou pálku (obr. 9-1b), její pohyb bude daleko komplikovanější. Protože trajektorie jednotlivých elementů pálky jsou navzájem odlišné, nemůžeme pálku nahradit hmotným bodem. Pálku je třeba chápat jako soustavu hmotných bodů, které se pohybují po různých trajektoriích. Přesto existuje jeden význačný bod – střed hmotnosti pálky – který se pohybuje po parabolické dráze. (K jeho určení můžeme použít následující postup – podepřeme nataženým prstem pálku v takovém bodě, aby byla vyvážená. Její střed hmotnosti se pak nachází nad bodem dotyku na ose souměrnosti pálky.)

Těžko vystavíte svoji profesní kariéru na házení rotujících pálek do vzduchu. Můžete se ale stát profesionálním trenérem skokanů do dálky nebo učitelem baletu a radit svým svěřencům jak správně proletět vzduchem a jak přitom pohybovat rukama, nohama a trupem. Asi začnete se studiem pohybu středu hmotnosti zmiňovaných osob, protože jeho pohyb je jednoduchý.

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.

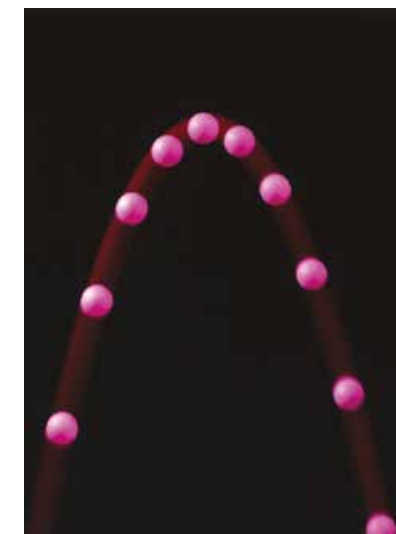
V tomto článku se budeme zabývat tím jak nalézt střed hmotnosti nejrůznějších soustav. Začneme soustavou složenou pouze z několika částic a teprve pak se budeme zabývat soustavami obsahujícími velké množství částic (např. baseballová pálka). V další části této kapitoly budeme rovněž probírat, jak se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

Soustavy částic

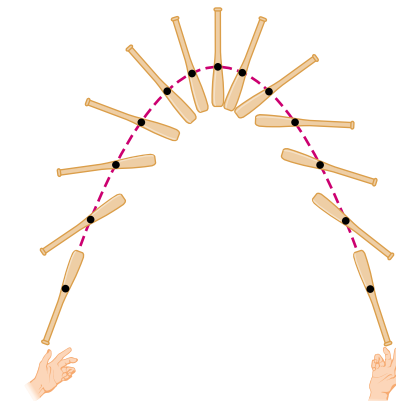
Na obr. 9-2a jsou zakresleny dvě částice o hmotnostech m_1 a m_2 . Jejich vzdálenost je d . Počátek osy x , jehož volba není nijak omezena, jsme vybrali tak, aby splýval s částicí m_1 . Polohu středu hmotnosti této dvoučásticové soustavy *definujeme* vztahem

$$x_{SH} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} d. \quad (9.1)$$

* 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.



(a)



(b)

OBR. 9-1 (a) Míček vržený šikmo vzhůru se pohybuje po parabolické trajektorii. (b) Střed hmotnosti baseballové pálky (černá tečka) vyhozené do vzduchu se rovněž pohybuje po parabole, ostatní body pálky však opisují trajektorie komplikovanější.



Ozvěna může být jak okouzující – ve volné přírodě –, tak i nepříjemná – v místnostech, kde způsobí nesrozumitelnost řeči. Vždy ale věrně napodobuje svůj zdroj. Například zvuk tlesknutí se opět vrací pouze jako zvuk tlesknutí. Přesto ozvěna před schody na pyramidě v mayských zříceninách v mexickém Chichen Itza je zřetelně odlišná, protože tlesknutí se vrací jako hudební tóny s klesajícím kmitočtem.

Čím je způsobena tato cvrlikající ozvěna?

Odpověď je v této kapitole.

17-1 O CO JDE A JAK NA TO

Fyzikou zvukových vln se zabývá bezpočet studií ve vědeckých časopisech v mnoha oblastech. Uvedme jen několik příkladů. Někteří fyziologové se zabývají tím, jak se vytváří řeč, jak napravit vady řeči, jak lze zmírnit ztrátu sluchu, ale také tím, jak vzniká chrápání. Někteří inženýři se zabývají zlepšováním akustiky chrámů a koncertních sálů, snižováním hluku v blízkosti dálnic a dopravních cest, ale též reprodukcí hudby reprodukcními soustavami. Někteří letečtí inženýři se zabývají rázovými vlnami vytvářenými nadzvukovými letadly a hlukem leteckého provozu v obcích poblíž letiště. Někteří lékařští fyzikové se zabývají tím, jak mohou zvuky vydávané srdcem a plicemi signalizovat zdravotní potíže pacienta. Někteří paleontologové se snaží ze zkamenělin dinosaurů zjistit zvuky, které dinosaury vydávali. Někteří vojenští inženýři se zabývají tím, jak ze zvuku snajprova výstřelu může voják určit snajprovo umístění. Z té něžnější stránky – někteří biologové studují, jak kočka přede.

Chceme-li začít diskusi o fyzice zvuku, musíme nejprve odpovědět na otázku, Co to jsou zvukové vlny?

17-2 | Zvukové vlny

V kap. 16 jsme viděli, že pro vznik mechanických vln je potřeba nosné médium, hmotné prostředí. Existují dva typy mechanických vln: v *příčných* vlnách jsou kmity kolmé ke směru jejich šíření, zatímco v *podélných* vlnách jsou se směrem jejich šíření rovnoběžné.

V této kapitole budeme zvukovou vlnou rozumět podélnou vlnu. Zvuk se šíří jako podélné vlny ve všech látkách, v pevných látkách pak navíc i jako vlny příčné. Zvukové vlny se používají při hledání ropy v zemské kůře. Lodě jsou vybaveny sonarem, aby se vyhnuly překážkám skrytým pod hladinou. Ponorky využívají zvukových vln ke zjištění nepřátelských ponorek: pátrají po charakteristických zvucích, které vydává jejich pohon. Na počítačovém snímku hlavy dítěte (obr. 17-1) vidíme, jak lze zvukové vlny použít ke zkoumání tkání v lidském těle. V této kapitole budeme studovat, jak se zvuk šíří vzduchem.

Obr. 17-2 ilustruje některé základní pojmy, které budeme používat. Z *bodového* zdroje zvuku Z (tj. zdroje zanedbatelných rozměrů) se šíří vlny rovnoměrně do všech směrů. Směr šíření a rozložení zvukových vln znázorňujeme pomocí *vlnoploch* a *paprsků*. **Vlnoplocha** je plocha, na níž mají všechny částice vzduchu stejně velkou výchylku i rychlost (stejnou fázi); tyto plochy znázorňujeme na dvojrozměrném obrázku pomocí kružnic a oblouků. **Paprsky** jsou čáry kolmé k vlnoplochám a určují směr postupu vlnoploch. Skutečnost, že kmity podélných vln jsou rovnoběžné s paprsky, je vyznačena na obr. 17-2 krátkou oboustrannou šipkou.

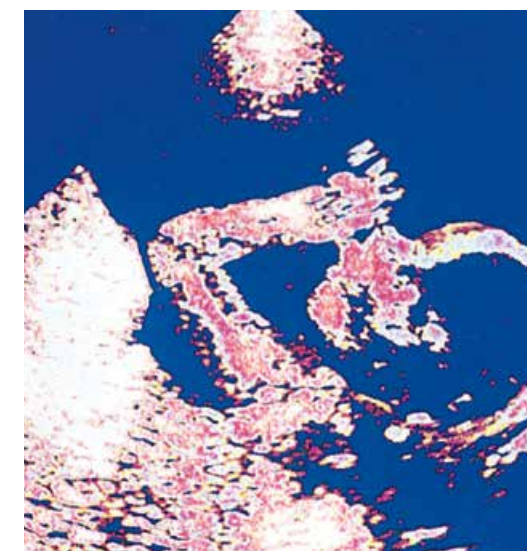
V blízkosti bodového zdroje jsou vlnoplochy kulové a šíří se do celého prostoru; pak mluvíme o *kulové vlně*. Se zvětšující se vzdáleností od zdroje se poloměr postupujících vlnoploch zvětšuje a jejich křivost se zmenšuje. Velmi daleko od zdroje lze vlnoplochy dobře aproximovat rovinami; pak mluvíme o *rovinných vlnách*.

17-3 | Rychlost zvuku

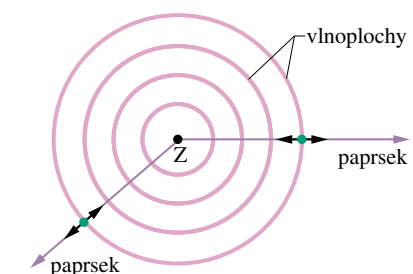
Rychlost mechanických vln (příčných i podélných) závisí jak na setrvačných vlastnostech prostředí (na jeho schopnosti uchovávat kinetickou energii), tak na elastických vlastnostech prostředí (na jeho schopnosti uchovávat potenciální energii). Rov. (16.26), která udává rychlost šíření příčných vln na struně, můžeme zobecnit:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{\text{pružnost}}{\text{setrvačnost}}}, \quad (17.1)$$

kde (pro příčné výchylky) je T napětí struny a μ její délková hustota. Je-li nosným prostředím vzduch, lze ze srovnání usoudit, že setrvačnosti vyjádřené μ odpovídá hustota vzduchu ρ . Čím je třeba nahradit T souvisící s pružností?



OBR. 17-1 Snímek pořízený ultrazvukem: plod se snaží nalézt svůj palec.



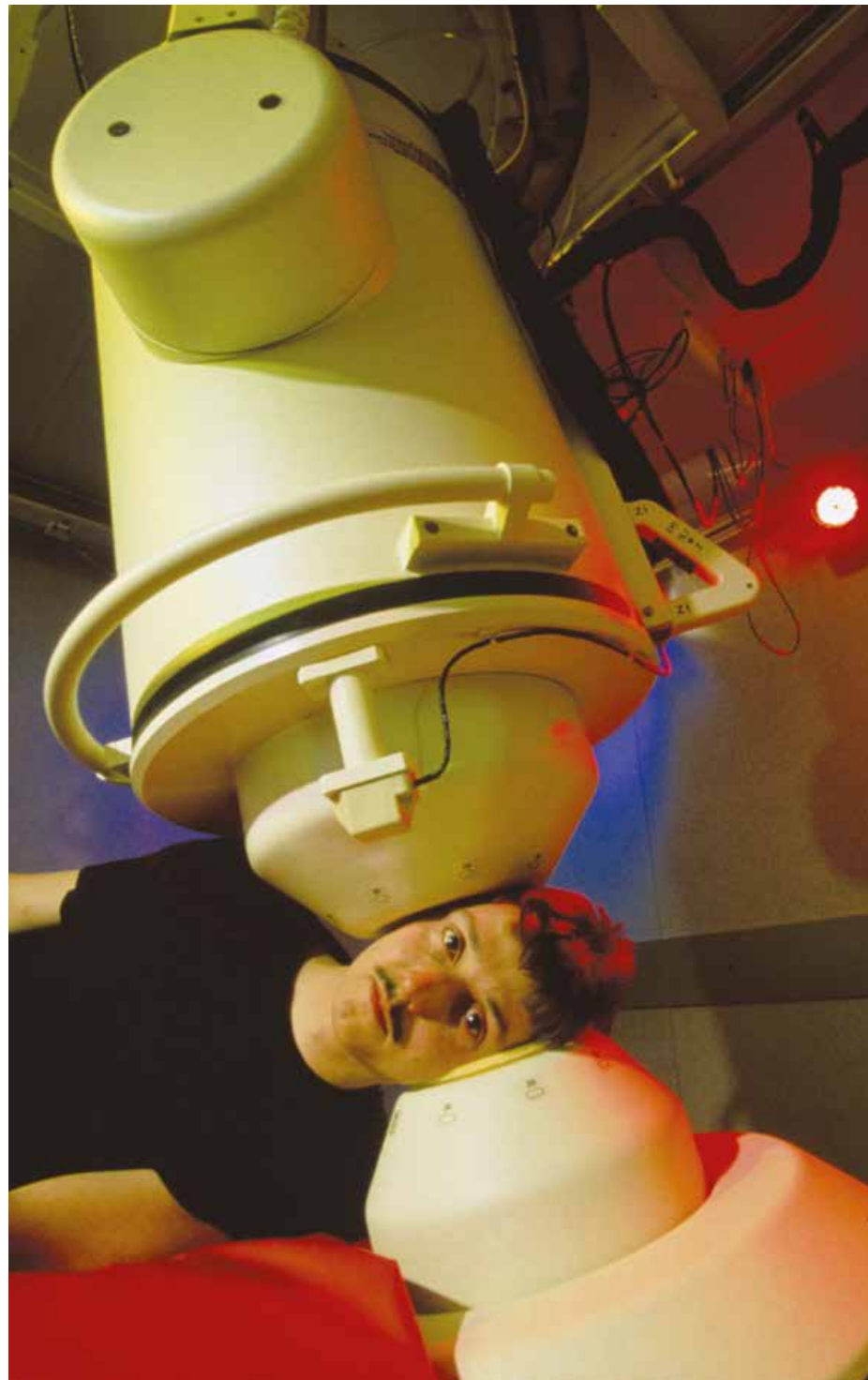
OBR. 17-2 Zvukové vlny se šíří trojrozměrným prostředím z bodového zdroje Z. Vlnoplochy jsou kulové plochy se středem v Z. Paprsky mají radiální směr od Z. Krátká oboustranná šipka naznačuje směr kmitů částic prostředí; je rovnoběžný s paprsky.

Čtete-li tuto větu, aktivuje se vám jistá oblast mozku.

Ucítíte-li vůni růže nebo vnímáte-li, že držíte v ruce tužku, aktivují se oblasti jiné. Jeden z nejlepších způsobů lokalizace těchto oblastí spočívá v detekci magnetického pole vytvářeného mozkovou aktivitou. Přístroj na fotografii dokáže detekovat toto magnetické pole a zmapovat, co se v mozku děje, když člověk právě něco dělá. Zdůrazněme, že v mozku přitom nejsou žádné magnetické materiály.

Jak může aktivita mozku budit magnetické pole?

Odpověď je v této kapitole.



29-1 O CO JDE A JAK NA TO

Jedním ze základních poznatků fyziky je, že pohybující se nabitá částice vytváří kolem sebe magnetické pole. Tedy i proud pohybujících se nabitých částic vytváří magnetické pole. Toto propojení elektrických a magnetických jevů bylo pro objevitele velkým překvapením. Ale třebaže je tento poznatek překvapivý, stal se nesmírně důležitým v každodenním životě, protože je základem mnoha elektromagnetických zařízení. Například magnetické pole vytvářené elektrickým proudem využíváme v zařízeních, která zaznamenávají nebo čtou magneticky zakódované pásky a disky, jakými jsou finanční a hotelové karty nebo jakými byly počítačové disky, magnetofonové pásky či videokazety. Magnetické pole také drží celé vlaky pohybující se na magnetických polštářích a využívá se i při zvedání těžkých břemen.

Naším prvním krokem v této kapitole bude určit magnetické pole buzené malým úsekem vodiče, kterým protéká elektrický proud. Z něj pak vypočítáme magnetické pole celého vodiče libovolného tvaru.

29-2 | Magnetické pole elektrického proudu

Dříve než přistoupíme k výkladu jak určit magnetické pole elektrického proudu, připomeneme si, jak jsme určovali elektrické pole vytvořené daným rozložením nábojů. Nejprve jsme pomyslně rozdělili celý náboj (spojitě rozložený) na infinitezimální elementy náboje dQ . Potom jsme vypočítali infinitezimální intenzitu $d\vec{E}$ elektrického pole, kterou vytvoří v daném bodě P náboj dQ . Protože pro elektrické pole platí princip superpozice, určili jsme intenzitu v bodě P integrací příspěvků $d\vec{E}$ od všech elementů.

Analogicky budeme postupovat při výpočtu *magnetického pole* elektrického proudu. Na obr. 29-1 je tenký vodič obecného tvaru, kterým protéká elektrický proud I . Naším úkolem je vypočítat magnetickou indukci \vec{B} v libovolně zvoleném bodě P . Nejdříve pomyslně rozdělíme vodič na infinitezimální délkové elementy $d\vec{s}$, jejichž délka je ds a které leží v tečně k vodiči a míří ve směru proudu. Je vhodné zavést infinitezimální *proudový délkový element* $I d\vec{s}$ (dále pro stručnost pouze **proudový element**) a určit indukci magnetického pole $d\vec{B}$ vytvořenou v bodě P tímto elementem. Pro magnetickou indukci platí princip superpozice stejně jako pro elektrickou intenzitu, tj. výsledné pole je rovno součtu polí dílčích. Indukce \vec{B} výsledného magnetického pole v bodě P vypočteme integrací příspěvků $d\vec{B}$ od všech proudových elementů. Rozdíl oproti elektrickému poli je v tom, že zatímco element elektrického náboje dQ vytvářející elektrické pole je skalár, proudový element $I d\vec{s}$ vytvářející magnetické pole je vektor.

Východiskem pro další výklad bude vztah pro velikost magnetické indukce $d\vec{B}$ vytvořené v libovolně vybraném bodě P proudovým elementem $I d\vec{s}$:

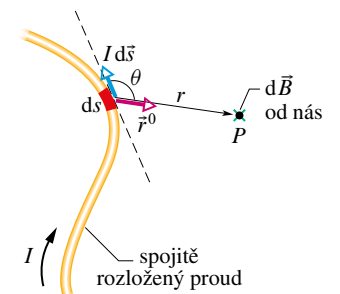
$$dB = \frac{\mu_0 I ds \sin \theta}{4\pi r^2}, \quad (29.1)$$

kde θ je úhel mezi elementem $d\vec{s}$ a jednotkovým vektorem \vec{r}^0 směřujícím od proudového elementu k bodu P . A konstanta μ_0 je **permeabilita vakua** neboli **magnetická konstanta***, jejíž hodnotu definujeme přesně:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}. \quad (29.2)$$

Vektor $d\vec{B}$ má směr daný vektorovým součinem $d\vec{s} \times \vec{r}^0$ (obr. 29-1). Rov. (29.1) tedy můžeme zapsat ve vektorovém tvaru:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{s} \times \vec{r}^0}{4\pi r^2} \quad (\text{Biotův-Savartův zákon}). \quad (29.3)$$



OBR. 29-1 Proudový element $I d\vec{s}$ vytváří magnetické pole o indukci $d\vec{B}$ v bodě P . Zelený křížek vyjadřuje směr $d\vec{B}$ (kolmo k rovině obrázku, směrem od nás).

* Souvislost μ_0 s ϵ_0 a rychlostí světla c je uvedena v čl. 33-3.

Mnohé povrchy (např. košile nebo trenýrky) jsou barevné, protože molekuly barviva absorbují viditelné světlo určitých vlnových délek a zbylé světlo se odráží. Některé povrchy (např. motýlí křídla hrající duhovými barvami) jsou barevné proto, že světlo některých vlnových délek zanikne interferencí na tenkých vrstvách a zbylé se odráží. Pozoruhodné modré zbarvení kůže tohoto paviána mandrila však nepůsobují ani molekuly barviva ani tenké vrstvy.

Co zbarvuje tvář samce paviána mandrila do modra?

Odpověď je v této kapitole.



36-1 O CO JDE A JAK NA TO

Při studiu světla je jedním z cílů porozumět difrakci světla a využívat ji. Difrakční jevy pozorujeme, když světlo prochází štěrbinou nebo (jak uvidíme v dalším) když obtéká překážku nebo míjí nějaký okraj či hranu. Už jsme se o tomto jevu zmínili v kapitole 35, když jsme sledovali, jak se svazek světla rozšiřuje – difraktuje – když prochází štěrbinami v Youngově pokusu. Difrakce na štěrbině je však komplikovanější než prosté rozšíření svazku, neboť světlo ve svazku interferuje samo se sebou, a tak vzniká interferenční obrazec. A právě tyto komplikace nabízejí mnoho aplikací. I když se může zdát, že difrakce světla, jež prochází štěrbinou nebo obtéká překážku, je velice akademická záležitost, poskytuje tento problém obživu bezpočtu inženýrům a přírodovědcům a celosvětově je úhrnná cena aplikací difrakce nevyčíslitelná.

Než se pustíme do studia některých z těchto aplikací, musíme nejprve vyjasnit, proč je difrakce důsledkem vlnové povahy světla.

36-2 | Difrakce a vlnová teorie světla

V kap. 35 jsme definovali difrakci poněkud volně – jako rozšíření světelného svazku vymezeného štěrbinou. Jde však o víc než o rozšíření, neboť světlo vytváří interferenční obrazec, který nazýváme **difrakčním obrazcem**. Například monochromatické světlo vycházející z nějakého vzdáleného zdroje (nebo laseru) a procházející štěrbinou vytváří na pozorovacím stínítku difrakční obrazec podobný obr. 36-1. Tento obrazec tvoří široké **centrální** maximum s několika užšími a méně intenzivními maximy (nazývanými **sekundární** neboli **vedlejší** maxima) po obou stranách. Mezi maximy jsou minima.

Podle geometrické optiky naprosto nelze takový obrazec očekávat. Kdyby se světlo šířilo přímočaře, tedy jako paprsky, propustila by štěrbina pouze některé z těchto paprsků a ty by vytvořily na pozorovacím stínítku ostrý a jasný obraz štěrbinu. Docházíme tedy – stejně jako v kap. 35 – k závěru, že geometrická optika je pouze aproximací.

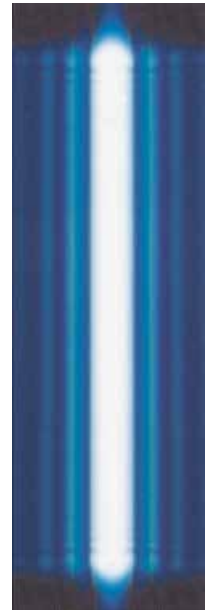
K difrakci dochází nejenom, když světlo prochází otvorem (např. štěrbinou nebo dírkou). Nastává také, když světlo míjí nějaký okraj, např. okraje žiletky na obr. 36-2. Všimněte si maxim a minim, která jsou jak uvnitř, tak vně žiletky a jsou přibližně rovnoběžná s okraji. Míjí-li světlo např. levý svislý okraj, vychýlí se vpravo i vlevo, interferuje a vytvoří obrazec okolo levého okraje. Část obrazce vpravo leží ve skutečnosti v místech, jež jsou podle geometrické optiky stínem žiletky.

S častým příkladem difrakce se setkáte, pohlédnete-li na jasnou modrou oblohu a vidíte jemné skvrny a vláknité struktury vznášející se v zorném poli. Tyto vznášející se struktury vznikají tím, že světlo míjí okraje drobných kousků sklivcového moku (průhledný materiál vyplňující převážnou část oční bulvy). Tyto kousky se odlomily a vznášejí se ve vodní vrstvě těsně před sítnicí, která detekuje světlo. Difrakční obrazec na jednom z těchto vznášejících se kousků je onou vznášející se strukturou, kterou máte ve svém zorném poli. Díváte-li se dírkou v neprůhledném stínítku, takže světlo vstupující do vašeho oka je přibližně rovinnou vlnou, je možné, že budete moci v difrakčním obrazci rozlišit jednotlivá maxima a minima.

Fresnelova světlá stopa

Difrakci lze vysvětlit vlnovou teorií světla. Tuto teorii vytvořil původně Christian Huygens koncem 17. století; po 123 letech ji použil Young k výkladu interference na dvojštěrbině. Byla však přijímána velmi pomalu; byla totiž protikladem Newtonovy teorie, podle níž je světlo proudem částic.

Na počátku 19. století převažovalo Newtonovo hledisko také ve francouzských vědeckých kruzích. Augustin Fresnel, tehdy mladý vojenský inženýr, však věřil ve vlnovou teorii světla a předložil Francouzské akademii věd práci, v níž podal výklad svých experimentů založený na vlnové teorii.



OBR. 36-1 Difrakční obrazec, který se objeví na pozorovacím stínítku, na něž dopadá světlo prošlé svislou štěrbinou. Difrakce způsobuje, že se světlo rozšíří kolmo k dlouhým stranám štěrbinu. Vzniká tak interferenční obrazec tvořený širokým centrálním maximem a méně intenzivními a užšími sekundárními (neboli vedlejšími) maximy, která jsou oddělena minimy.



OBR. 36-2 Difrakce monochromatického světla na žiletce. Všimněte si maxim a minim intenzity.