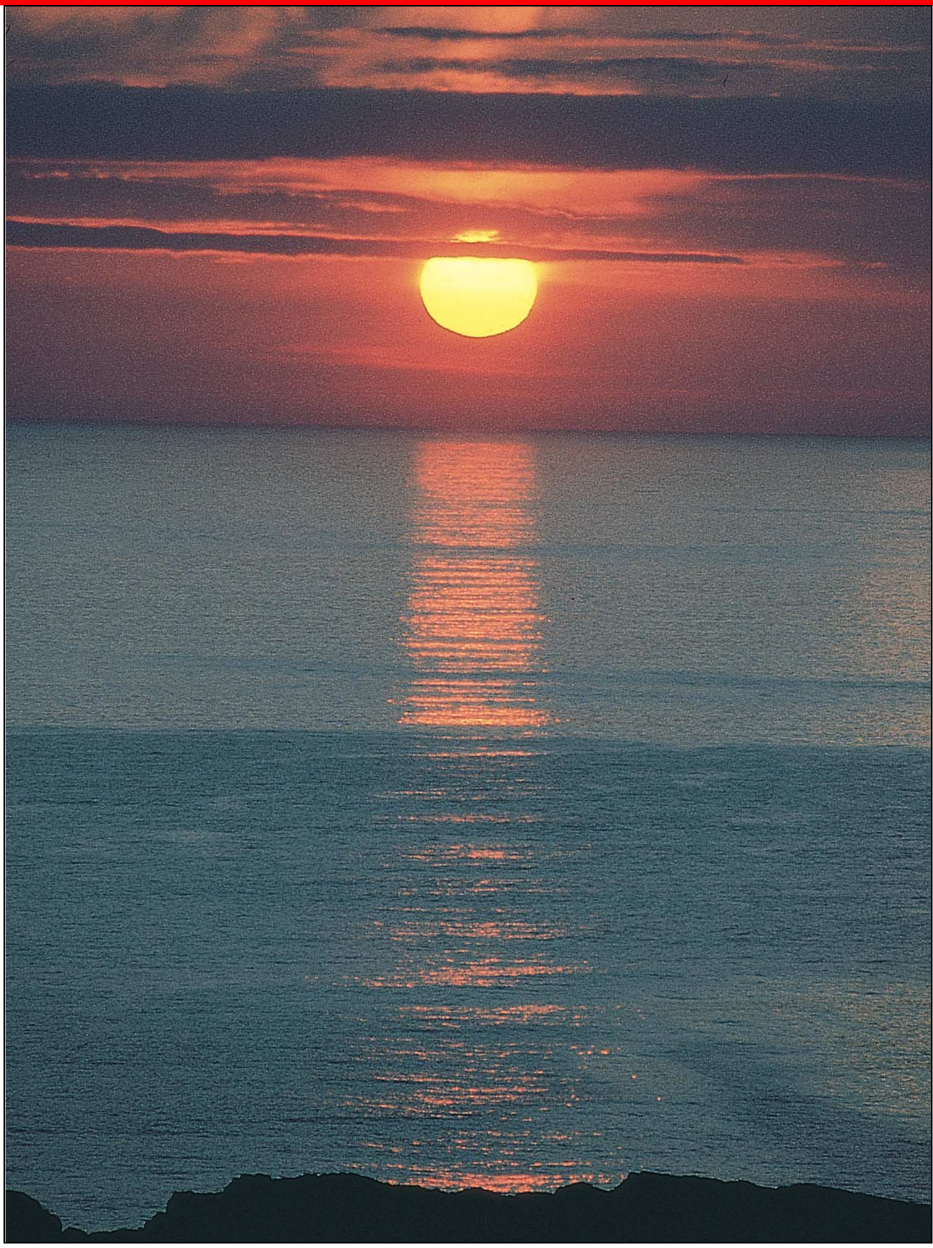
1. Měření

Obsah přednášky:

1. Měření phyzikálních veličin
2. SI soustava
3. Základní jednotky v mechanice
4. Převody jednotek
5. Základní tabulky jednotek, prefixi, sufixi

1
Měření



Ležíte na pláži u moře. Hladina je úplně klidná a vy pozorujete západ Slunce. Můžete ho dokonce pozorovat dvakrát: poprvé vleže a podruhé, když vstanete. Možná vás překvapí, že z doby, která uplyne mezi těmito dvěma západy, lze odhadnout poloměr Země. Opravdu je možné změřit Zemi tak prostým pozorováním?

1.1 MĚŘENÍ

Základem fyziky je měření. Objevovat fyziku znamená také poznávat možnosti měření veličin, které jsou s ní spjaty. Nazýváme je **fyzikálními veličinami**. Patří k nim například délka, čas, hmotnost, teplota, tlak nebo elektrický odpor.

Abychom mohli fyzikální veličinu popsat, zavedeme nejprve její **jednotku**, tj. takovou míru této veličiny, které přisoudíme číselnou hodnotu přesně 1,0. Poté vytvoříme **standard**, s nímž budeme všechny ostatní hodnoty dané fyzikální veličiny porovnávat. Tak například jednotkou délky je metr. Jeho standard je definován jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za přesně definovaný zlomek sekundy. (K definici metru se ještě vrátíme.) Jednotku fyzikální veličiny i její standard můžeme definovat naprosto libovolným způsobem. Důležité je jen to, aby naše definice byla natolik rozumná a praktická, aby mohla být v odborných kruzích všeobecně přijata.

Jakmile jsme definovali standard, řekněme pro délku, musíme ještě vypracovat metody, jak jej používat pro určování různých délek, ať již jde o poloměr atomu vodíku, vzdálenost koleček skateboardu nebo mezihvězdnou vzdálenost. Můžeme například používat pravítka, která přibližně nahrazují standard délky. Často však nelze přímo porovnat měřenou veličinu se standardem. Pravítkem nezměříme ani poloměr atomu, ani mezihvězdnou vzdálenost.

Fyzikálních veličin je takové množství, že není jednoduché je nějakým způsobem uspořádat. Naštěstí však nejsou všechny navzájem nezávislé. Příkladem může být rychlost, kterou lze vyjádřit jako podíl délky a času. Lze tedy vybrat, po mezinárodní dohodě, celkem malý počet fyzikálních veličin, pro něž definujeme jejich vlastní standardy. Délka i čas k nim patří. Všechny ostatní veličiny lze pak vyjádřit pomocí těchto základních veličin a jejich standardů. Tak například rychlost je definována pomocí dvou základních veličin — délky a času — a jim odpovídajících jednotek a standardů.

Standardy základních veličin musí být dostupné a při opakovaném měření neproměnné. Kdybychom třeba definovali jako standard délky starý český sáh, tedy vzdálenost mezi prsty rozpažených rukou (cca 190 cm), získali bychom bezpochyby standard snadno dostupný, avšak pro každého člověka jiný. Věda a technika však vyžadují přesnost, a proto je neproměnnost standardu mnohem důležitější než jeho snadná dosažitelnost. Je tedy třeba mít k dispozici dostatečný počet jeho přesných kopií i za cenu náročnosti jejich zhotovení.

V klasické fyzice (včetně teorie relativity) mlčky předpokládáme, že měření můžeme provádět tak, abychom při něm měřenou hodnotu neovlivnili. (Nebo — realističtěji — tak, že vliv měření je zanedbatelně malý.) Tak např. při měření průměru šroubu mikrometrem stiskneme šroub čelistmi měřidla přesně definovanou silou. Tím jej nepatrně stlačíme a naměříme údaj menší. Tento rozdíl je pro šroub jistě zanedbatelný. Kdybychom však měřili gumový špalík, už by byl vliv patrný. Lze však jistě najít jiný, vhodnější způsob měření, který průměr špalku znatelně neovlivní.

V kvantové fyzice je problém měření mnohem složitější.

1.2 MEZINÁRODNÍ SOUSTAVA JEDNOTEK

V roce 1971 bylo na 14. generální konferenci pro váhy a míry vybráno sedm **základních veličin** a odpovídajících základních jednotek, které se staly základem **Mezinárodní soustavy jednotek** označované zkratkou SI (z francouzského Système International des Unités), nazývané též metrická soustava. V tab. 1.1 jsou uvedeny jednotky tří základních veličin — délky, hmotnosti a času, které používáme už v úvodních kapitolách této knihy. Byly vybrány tak, aby byly blízké „lidským měřítkům“.

Tabulka 1.1 **Některé základní jednotky SI**

VELIČINA	NÁZEV JEDNOTKY	SYMBOL
délka	metr	m
čas	sekunda	s
hmotnost	kilogram	kg

Všechny tzv. **odvozené jednotky** soustavy SI jsou definovány pomocí jednotek základních. Například jednotku výkonu **watt** (značka W) lze vyjádřit základními jednotkami hmotnosti, délky a času. V kap. 7 ukážeme, že

$$1\ \text{watt} = 1\ \text{W} = 1\ \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}. \tag{1.1}$$

Abychom jednoduše a stručně zapsali velmi velké nebo velmi malé hodnoty veličin, používáme tzv. exponenciální tvar zápisu čísel pomocí mocnin čísla 10. Takto vyjádříme například:

$$3\,560\,000\,000\ \text{m} = 3{,}56\cdot 10^9\ \text{m} \tag{1.2}$$

nebo

$$0{,}000\,000\,492\ \text{s} = 4{,}92\cdot 10^{-7}\ \text{s}. \tag{1.3}$$

S rozvojem počítačů se čísla v exponenciálním tvaru začala zapisovat ještě jednodušším způsobem, například 3,56 E9 m nebo 4,92 E−7 s. Písmeno E označuje, že následující číslo má význam mocnitele (exponentu) základu 10. Některé kalkulačky zápis ještě více zjednodušují a písmeno E nahrazují mezerou.

Jinou možností vyjádření velmi velkých a velmi malých hodnot je použití vhodných předpon v názvech jednotek. Jejich seznam uvádí tab. 1.2. Každá předpona zastupuje příslušnou mocninu čísla 10. Předpona u kterékoli z jednotek SI signalizuje, že hodnotu veličiny je třeba vynásobit odpovídajícím koeficientem. Zadanou hodnotu elektrického výkonu nebo délku časového intervalu můžeme zapsat například takto:

$$1{,}27\cdot 10^9 \text{ wattů} = 1{,}27 \text{ gigawattů} = 1{,}27\,\mathrm{GW}, \quad (1.4)$$

$$2{,}35\cdot 10^{-9}\,\mathrm{s} = 2{,}35 \text{ nanosekundy} = 2{,}35\,\mathrm{ns}. \quad (1.5)$$

Některé jednotky s předponami (např. decilitr, centimetr, kilogram nebo megabajt) se používají zcela běžně.

1.3 PŘEVODY JEDNOTEK

Při výpočtech číselných hodnot fyzikálních veličin často potřebujeme měnit jednotky, v nichž veličinu vyjadřujeme. Tento přepočet nazýváme **převod jednotek**. Převod můžeme snadno provést například tak, že vynásobíme původní zadanou či změřenou hodnotu **převodním koeficientem**. Tento koeficient je ve skutečnosti roven jedné, je však vyjádřen ve tvaru zlomku, jehož čitatel i jmenovatel udávají tutéž hodnotu v různých jednotkách. Uveďme příklad: Údaje 1 min a 60 s představují stejné časové intervaly. Můžeme proto psát

$$\frac{1\,\mathrm{min}}{60\,\mathrm{s}} = 1 \quad \text{a} \quad \frac{60\,\mathrm{s}}{1\,\mathrm{min}} = 1.$$

Tento zápis *neznamená*, že by snad platilo $\frac{1}{60} = 1$ nebo $60 = 1$. *Číselný údaj* a odpovídající *jednotka* tvoří ve výrazu pro převodní koeficient neoddělitelnou dvojici.

Vzhledem k tomu, že vynásobení libovolné veličiny jedničkou nezmění její hodnotu, můžeme takové převody provádět, kdykoli to považujeme za užitečné. Zbavíme se tak jednotek, které nechceme používat: jednoduše se vykrátí. Chceme-li například převést 2 min na sekundy, píšeme

$$2\,\mathrm{min} = (2\,\mathrm{min})(1) = (2\,\cancel{\mathrm{min}})\left(\frac{60\,\mathrm{s}}{1\,\cancel{\mathrm{min}}}\right) = 120\,\mathrm{s}. \quad (1.6)$$

Častou chybou při převodu jednotek je záměna čitatele a jmenovatele v převodním koeficientu. V tom případě se nežádoucí jednotky nevykrátí, a tak chybu snadno objevíme. Pro počítání s jednotkami platí stejná algebraická pravidla jako pro proměnné a čísla.

V dod. D a na vnitřní straně zadní obálky této knihy jsou uvedeny koeficienty pro převody mezi soustavou SI a jinými soustavami jednotek. Jednou z mála zemí, které nestanovily zákonem povinnost používat Mezinárodní soustavu jednotek, jsou i Spojené státy americké.

PŘÍKLAD 1.1

Průzkumná ponorka ALVIN se potápí rychlostí 36,5 sáhů za minutu.

(a) Vyjádřete tuto rychlost v metrech za sekundu. Jeden sáh je roven přesně 6 stopám (ft).

ŘEŠENÍ: Jednotky převádíme následujícím způsobem:

$$36{,}5\,\frac{\text{sáhů}}{\text{min}} = \left(36{,}5\,\frac{\cancel{\text{sáhů}}}{\cancel{\text{min}}}\right)\left(\frac{1\,\cancel{\text{min}}}{60\,\mathrm{s}}\right)\cdot$$
$$\cdot\left(\frac{6\,\cancel{\mathrm{ft}}}{1\,\cancel{\text{sáh}}}\right)\left(\frac{1\,\mathrm{m}}{3{,}28\,\cancel{\mathrm{ft}}}\right) =$$
$$= 1{,}11\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

(b) Jaká je tato rychlost v mílích (mi) za hodinu?

Tabulka 1.2 **Předpony jednotek SI**

Násobek	Předpona	Značka	Násobek	Předpona	Značka
10^{24}	yotta-	Y	10^{-24}	yokto-	y
10^{21}	zetta-	Z	10^{-21}	zepto-	z
10^{18}	exa-	E	10^{-18}	atto-	a
10^{15}	peta-	P	10^{-15}	femto-	f
10^{12}	tera-	T	$\mathbf{10^{-12}}$	**piko-**	**p**
$\mathbf{10^{9}}$	**giga-**	**G**	$\mathbf{10^{-9}}$	**nano-**	**n**
$\mathbf{10^{6}}$	**mega-**	**M**	$\mathbf{10^{-6}}$	**mikro-**	**μ**
$\mathbf{10^{3}}$	**kilo-**	**k**	$\mathbf{10^{-3}}$	**mili-**	**m**
10^{2}	hekto-	h	$\mathbf{10^{-2}}$	**centi-**	**c**
10^{1}	deka-	da	10^{-1}	deci-	d

Nejužívanější předpony jsou vytištěny tučně.

ŘEŠENÍ: Stejně jako v předchozím případě dostaneme

$$36{,}5\,\frac{\text{sáhů}}{\text{min}} = \left(36{,}5\,\frac{\cancel{\text{sáhů}}}{\cancel{\text{min}}}\right)\left(\frac{60\,\cancel{\text{min}}}{1\,\text{h}}\right)\cdot \left(\frac{6\,\cancel{\text{ft}}}{1\,\cancel{\text{sáh}}}\right)\left(\frac{1\,\text{mi}}{5\,280\,\cancel{\text{ft}}}\right) = 2{,}49\,\text{mi/h}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

(c) Vyjádřete tuto rychlost ve světelných rocích za rok.

ŘEŠENÍ: Jeden světelný rok (ly z angl. light year) je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za jeden rok. Je roven $9{,}46\cdot 10^{12}$ km.

Užitím výsledku (a) dostaneme

$$1{,}11\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1} = \left(1{,}11\,\frac{\cancel{\text{m}}}{\cancel{\text{s}}}\right)\left(\frac{1\,\text{ly}}{9{,}46\cdot 10^{12}\,\cancel{\text{km}}}\right)\cdot \left(\frac{1\,\cancel{\text{km}}}{1\,000\,\cancel{\text{m}}}\right)\left(\frac{3{,}16\cdot 10^{7}\,\cancel{\text{s}}}{1\,\text{y}}\right) = 3{,}71\cdot 10^{-9}\,\text{ly/y}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

PŘÍKLAD 1.2

Kolik čtverečných metrů má plocha o obsahu $6{,}0\,\text{km}^2$?

ŘEŠENÍ: Obsahuje-li údaj mocninu některé jednotky, je vhodné ji nejprve rozepsat jako součin a pak převést každý činitel zvlášť:

$$\begin{aligned} 6{,}0\,\text{km}^2 &= 6{,}0\,(\text{km})(\text{km}) = \\ &= 6{,}0\,(\text{km})(\text{km})\left(\frac{1\,000\,\text{m}}{1\,\text{km}}\right)\left(\frac{1\,000\,\text{m}}{1\,\text{km}}\right) = \\ &= 6{,}0\cdot 10^{6}\,\text{m}^2. \qquad \text{(Odpověď)} \end{aligned}$$

RADY A NÁMĚTY

Bod 1.1: *Platná místa a desetinná místa*

Při řešení př. 1.1a na kalkulačce se na jejím displeji pravděpodobně zobrazilo číslo 1,112 804 878. Přesnost, se kterou je toto číslo vyjádřeno, však nemá rozumný význam. Proto jsme je rovnou zaokrouhlili na hodnotu 1,11, která odpovídá přesnosti výchozích údajů. Zadaná rychlost 36,5 sáhů za minutu je určena třemi číslicemi. Říkáme, že je dána na tři **platná místa**. Čtvrtou číslici řádu setin již neznáme, a proto při převodu jednotek nemá smysl uvádět více číslic než tři.*

Žádný konečný výsledek by obecně neměl být zapsán číslem s větším počtem platných míst, než měly výchozí údaje.

V průběhu výpočtu vedeného v několika postupných krocích pracujeme s větším počtem platných míst, než měly výchozí údaje. Jakmile však dospějeme ke konečnému výsledku, zaokrouhlíme jej podle výchozích údajů. (Ve výsledcích řešených příkladů v této knize používáme zpravidla rovnítko „=“ i tehdy, byl-li mezivýsledek zaokrouhlen, a symbol „$\doteq$“ až u konečného zaokrouhlení.)

Počet platných míst v údajích 3,15 nebo $3{,}15\cdot 10^3$ je zřejmý. Jak je tomu však u čísla 3 000? Je zadáno pouze na jedno nebo na čtyři platná místa (tedy jako $3\cdot 10^3$ nebo $3{,}000\cdot 10^3$)? V této knize budeme považovat všechny nuly v číslech typu 3 000 za platná místa. Při studiu literatury je však třeba dát pozor, zda autoři neužívají jinou dohodu.

Nezaměňujme *platná místa* s místy *desetinnými*. Uvažujme například údaje 35,6 mm, 3,56 m a 0,003 56 km. Všechny jsou zadány na tři platná místa, i když první z nich má jedno, druhý dvě a třetí dokonce pět desetinných míst.

1.4 DÉLKA

V roce 1792 byl v mladé Francouzské republice zaveden nový systém měr a vah. Jednotkou délky byl stanoven metr, definovaný jako jedna desetimiliontina vzdálenosti od severního pólu k rovníku. Z praktických důvodů se později od vazby na tento „zemský“ standard upustilo a metr byl definován jako vzdálenost mezi dvěma tenkými vrypy na tyči vyrobené ze slitiny platiny a iridia, tzv. **standardním metru**. Tento standard je dodnes uložen v Mezinárodním úřadu pro váhy a míry v Sèvres u Paříže. Jeho přesné kopie, nazývané **druhotnými standardy**, byly rozeslány do metrologických laboratoří po celém světě a jsou používány při výrobě dalších, mnohem snadněji dostupných, standardů. Každé zařízení pro měření délky poskytuje údaje odvozené od standardního metru.

V roce 1959 byl úředně definován yard jako

$$1\ \text{yard} = 0{,}914\,4\ \text{m (přesně)}. \tag{1.7}$$

Tato definice je ekvivalentní se vztahem pro palec (inch):

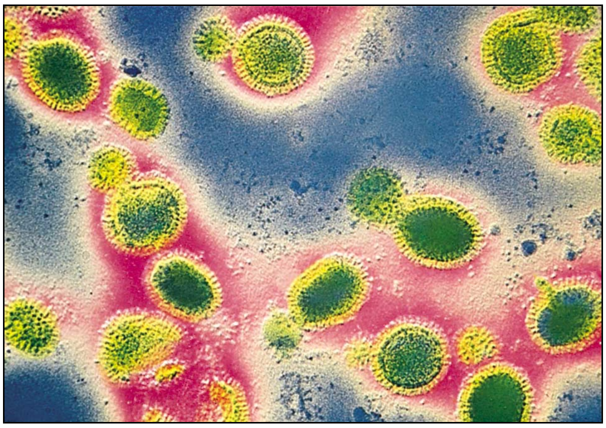
$$1\ \text{in} = 2{,}54\ \text{cm (přesně)}. \tag{1.8}$$

V tab. 1.3 jsou uvedeny zajímavé údaje o délkových rozměrech některých objektů, včetně velikosti viru, jehož mnohonásobně zvětšený obraz získaný v elektronovém mikroskopu vidíme na obr. 1.1.

* Tento způsob počítání s čísly zadanými s omezenou přesností je jen velmi přibližný. Tak například každé z čísel 11 a 99 je zadáno na dvě platná místa. Nejistota obou údajů je řádu desetin. Jedna desetina (0,1) však představuje zhruba 1 % hodnoty 11 a pouze 0,1 % hodnoty 99. Veličina s hodnotou 99 je zadána přesněji než veličina, jejíž hodnota je 11. V odborné a vědecké práci zásadně opatřujeme hodnotu každé naměřené nebo vypočtené veličiny její *standardní odchylkou* neboli *chybou*, která vyjadřuje kvantitativně přesnost této veličiny.

Tabulka 1.3 **Řádové velikosti a rozměry**

DÉLKA	V METRECH
k nejvzdálenějšímu kvazaru (1996)	$2\cdot10^{26}$
k mlhovině v Andromedě	$2\cdot10^{22}$
k nejbližší hvězdě (Proxima Centauri)	$4\cdot10^{16}$
k nejvzdálenější planetě (Pluto)	$6\cdot10^{12}$
poloměr Země	$6\cdot10^{6}$
výška Mount Everestu	$9\cdot10^{3}$
výška člověka	$2\cdot10^{0}$
tloušťka této stránky	$1\cdot10^{-4}$
vlnová délka světla	$5\cdot10^{-7}$
typická velikost viru	$1\cdot10^{-8}$
poloměr atomu vodíku	$5\cdot10^{-11}$
poloměr protonu	$1\cdot10^{-15}$



Obr. 1.1 Obarvený elektronový obraz chřipkového viru. Lipoproteiny hostitele (obarveny žlutě) obklopují jádro viru (zelené). Celkový průměr útvaru je menší než 50 nm.

Později vyžadovala moderní věda a technika ještě přesnější standard, než je vzdálenost mezi dvěma jemnými vrypy na kovové tyči. Proto byl v roce 1960 přijat nový standard metru, který vycházel z vlnové délky světla. Metr byl definován jako 1 650 763,73 násobek vlnové délky oranžově červeného světla, které při výboji emitují atomy kryptonu 86.* Tento zvláštní počet vlnových délek byl vybrán proto, aby nový standard byl co nejbližší dosavadnímu metru.

Atomy kryptonu 86, použité pro definici standardu délky, jsou dostupné kdekoli, jsou identické a všechny vyzařují světlo přesně stejné vlnové délky. V každém z nich je tak standard uschován lépe a bezpečněji než v Mezinárodním úřadu pro váhy a míry (P. Morrison, MIT). Požadavky na přesnost však stále rostly, až dosáhly takového stupně, že jim už ani kryptonové atomy nedokázaly vyhovět. V roce 1983 byl v historii vývoje standardu délky zaznamenán výrazný pokrok. Metr byl nově definován jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu v přesně stanoveném časovém intervalu. Sedmnáctá generální konference pro váhy a míry přijala tuto definici metru:

Jeden metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za dobu 1/299 792 458 sekundy.

Tato konkrétní volba délky časového intervalu v definici metru určuje přesně hodnotu rychlosti světla ve vakuu

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

Rychlost světla už dokážeme měřit velmi přesně a také měření časových intervalů patří v současnosti k nejpřesnějším měřením vůbec. Jejich využití pro novou definici metru je proto velmi dobře odůvodněné.

PŘÍKLAD 1.3

Sprinterská trať mívala vedle délky 100 m, běžné v současném atletickém sportu, také délku 110 yardů.

(a) Která trať je delší?

ŘEŠENÍ: Z (1.7) snadno zjistíme, že vzdálenost 110 yardů je 100,58 m. Sprint na 110 yardů je tedy delší.

(b) O kolik stop (ft)?

ŘEŠENÍ: Označme ΔL rozdíl délek běžeckých tratí. (Symbol Δ — velké řecké „delta“ — značí rozdíl veličin.) Pak

$$\begin{aligned}\Delta L &= 110\ \text{yardů} - 100\ \mathrm{m} = \\ &= 100{,}584\ \mathrm{m} - 100\ \mathrm{m} = 0{,}584\ \mathrm{m} = \\ &= (0{,}584\ \mathrm{m})\left(\frac{3{,}28\ \mathrm{ft}}{1\ \mathrm{m}}\right) = \\ &= 1{,}916\ \mathrm{ft} \doteq 1{,}9\ \mathrm{ft}. \qquad \text{(Odpověď)}\end{aligned}$$

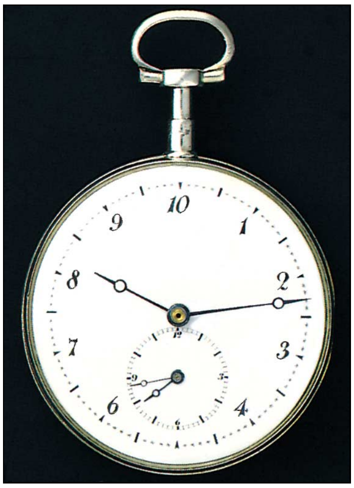
1.5 ČAS

Pojem čas můžeme chápat dvěma různými způsoby. V běžném životě a často i ve vědě potřebujeme znát denní čas (obr. 1.2), abychom mohli popsat sled událostí. Ve vědecké práci je zase většinou důležité, jak dlouho daná událost trvala. Každý standard času tedy musí umožňovat odpověď na dvě otázky: „*Kdy* se to stalo?“ a „*Jak dlouho* to trvalo?“ tab. 1.4 uvádí přehled některých časových intervalů.

Standardem času může být jakýkoli jev, který se pravidelně opakuje. Po staletí sloužilo tomuto účelu otáčení Země, které určovalo délku dne. I křemenné hodiny, ve kterých osciluje křemenný krystal v elektronickém obvodu, lze

* Číslo 86 v označení atomu (často užívaným označením je i ^{86}Kr nebo $^{86}_{36}$Kr) identifikuje jeden z pěti stabilních izotopů (stabilních nuklidů) kryptonu a nazývá se *hmotnostním* nebo *nukleonovým* číslem.

pomocí astronomických pozorování cejchovat vzhledem k rotaci Země a používat pak v laboratořích pro měření časových intervalů. Tato kalibrace však nemůže být provedena s přesností odpovídající požadavkům současné vědy a techniky.



Obr. 1.2 V návrhu metrické soustavy z roku 1792 byla hodina definována tak, aby den měl 10 hodin. Tato myšlenka se neujala. Tvůrce těchto desetihodinových hodinek byl prozíravý a opatřil je ještě malým ciferníkem ukazujícím tradiční dvanáctihodinový čas. Ukazují obojí hodinky stejný čas?

Tabulka 1.4 **Řádové doby vybraných dějů**

ČASOVÝ INTERVAL	SEKUNDY
doba života protonu (předpověď)	$1{\cdot}10^{39}$
stáří Vesmíru	$5{\cdot}10^{17}$
stáří Cheopsovy pyramidy	$1{\cdot}10^{11}$
průměrný věk člověka	$2{\cdot}10^{9}$
délka roku	$3{\cdot}10^{7}$
délka dne	$9{\cdot}10^{4}$
tep lidského srdce	$8{\cdot}10^{-1}$
doba života mionu	$2{\cdot}10^{-6}$
nejkratší světelný pulz (r. 1989)	$6{\cdot}10^{-15}$
doba života nejnestabilnějších částic	$1{\cdot}10^{-23}$
Planckův čas*	$1{\cdot}10^{-43}$

* nejkratší doba po Velkém třesku, po které již platí zákony fyziky v takové podobě, v jaké je známe nyní.

Snaha o získání lepšího standardu času vedla ke konstrukci atomových hodin. Na obr. 1.3 vidíme jeden typ takových hodin, umístěný v Národním ústavu pro standardy a technologii (NIST) v USA. Využívá charakteristické frekvence izotopu cesia 133 a určuje jednotný čas UTC. Jeho časové signály je možné získat z krátkovlnného rozhlasového vysílání (stanice WWV a WWVH) nebo telefonicky (v ČR na lince 14 122). (Pokud bychom chtěli seřídit nějaké místní hodiny s mimořádnou přesností, museli bychom uvážit dobu šíření signálu z vysílací stanice k nám.)

Na obr. 1.4 je záznam kolísání délky dne v průběhu čtyřletého období získaný srovnáním s cesiovými hodinami. Zjištěné rozdíly, zřejmě související s ročními obdobími, přisuzujeme nepravidelnosti rotace Země a věříme, že chod cesiových hodin je pravidelnější. Kolísání je pravděpodobně způsobeno slapovými jevy (vliv Měsíce) a rozsáhlým prouděním vzduchu v atmosféře.

Třináctá generální konference pro váhy a míry (1967) přijala standard **sekundy**, odvozený od frekvence kmitů atomů cesiových hodin:

> Jedna sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period světelného záření, emitovaného při přechodu atomu cesia 133 mezi dvěma konkrétními hladinami jeho velmi jemné struktury.

Přesnost cesiových hodin je taková, že by trvalo 6 000 let, než by se dvoje hodiny rozešly o více než 1 s. I tato přesnost je však malá ve srovnání s hodinami, které se vyvíjejí v současnosti. Mají dosáhnout přesnosti $1 : 10^{18}$, která odpovídá odchylce pouhé 1 s za 10^{18} s (asi $3{\cdot}10^{10}$ let).

PŘÍKLAD 1.4*

Představme si, že pozorujeme západ Slunce vleže na břehu klidného moře. Spustíme stopky právě v okamžiku, kdy Slunce zcela zmizí. Poté vstaneme a zvýšíme tak polohu svých očí o 1,70 m. Stopky zastavíme v okamžiku, kdy nám Slunce zmizí podruhé. Jaký je poloměr Země, ukazují-li stopky 11,1 s?

ŘEŠENÍ: Z obr. 1.5 vidíme, že při pozorování vleže se zorný paprsek směřující k hornímu okraji slunečního kotouče dotýká povrchu Země v místě, ve kterém se právě nacházíme, tj. v bodě A. Při druhém pozorování západu Slunce je zorný paprsek tečnou v bodě B. Označme symbolem d vzdálenost mezi bodem B a polohou očí stojícího pozorovatele. Vzdálenosti bodů A a B od středu Země jsou rovny poloměru Země r. Z Pythagorovy věty dostaneme

$$d^2 + r^2 = (r + h)^2 = r^2 + 2rh + h^2,$$

tj.

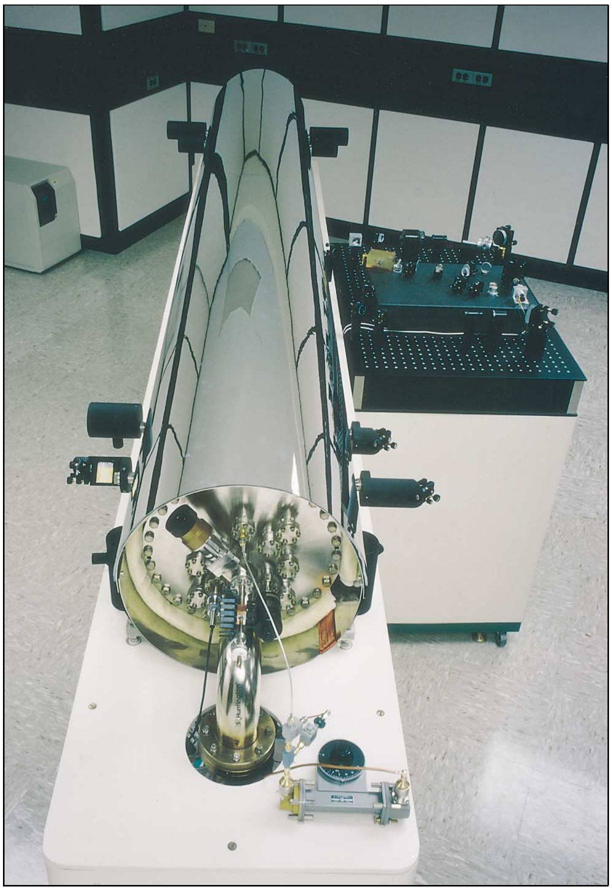
$$d^2 = 2rh + h^2. \tag{1.9}$$

Výška h je ovšem zanedbatelná vzhledem k poloměru Země r. Proto je člen h^2 mnohem menší než člen $2rh$ a rov. (1.9) lze přepsat ve tvaru

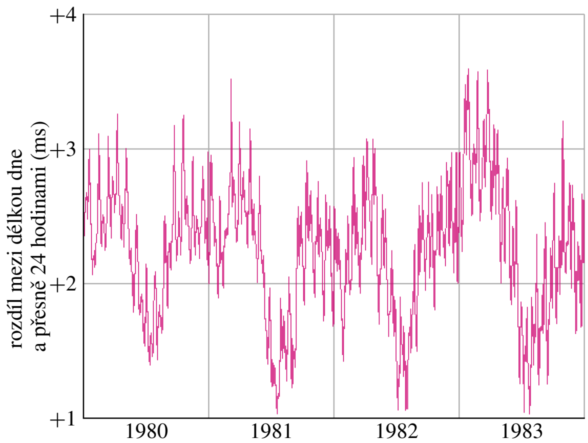
$$d^2 = 2rh. \tag{1.10}$$

Symbolem θ jsme označili úhel mezi tečnami v bodech A a B (obr. 1.5). O stejný úhel se za změřenou dobu 11,1 s

* Převzato z článku Dennise Rawlinse „Doubling Your Sunsets, or How Anyone Can Measure the Earth's size with a Wristwatch and Meter Stick", *American Journal of Physics*, Feb. 1979, Vol. 47, pp. 126–128. Metoda dává nejlepší výsledky na rovníku.



Obr. 1.3 Cesiový frekvenční normál v Národním ústavu pro standardy a technologii v Boulderu (Colorado). Je standardem jednotky času pro Spojené státy americké. Časové signály Námořní observatoře lze získat na adrese http://tycho.usno.navy.mil /time.html; telefonicky v USA na lince (001)-303-499 7111, v ČR na lince 14 122.



Obr. 1.4 Kolísání délky dne v průběhu čtyřletého období. Všimněte si, že rozsah svislé stupnice je pouhé 3 ms (= 0,003 s).

otočí Slunce na své zdánlivé dráze kolem Země. Za celý den, tj. přibližně za 24 hodin, se Slunce kolem Země otočí o 360°. Pak můžeme psát

$$\frac{\theta}{360^\circ} = \frac{t}{24\ \mathrm{h}}.$$

Dosadíme-li $t = 11{,}1\ \mathrm{s}$, dostaneme

$$\theta = \frac{(360^\circ)(11{,}1\ \mathrm{s})}{(24\ \mathrm{h})(60\ \mathrm{min{\cdot}h^{-1}})(60\ \mathrm{s{\cdot}min^{-1}})} = 0{,}046\,25^\circ.$$

Z obr. 1.5 vidíme, že $d = r\,\mathrm{tg}\,\theta$. Dosazením do rov. (1.10) dostaneme

$$r^2\,\mathrm{tg}^2\,\theta = 2rh,$$

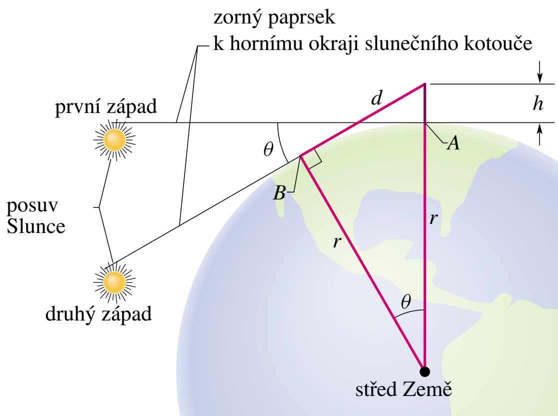
tj.

$$r = \frac{2h}{\mathrm{tg}^2\,\theta}.$$

Pro číselné hodnoty $\theta = 0{,}046\,25^\circ$ a $h = 1{,}70\ \mathrm{m}$ máme konečně

$$r = \frac{2(1{,}70\ \mathrm{m})}{\mathrm{tg}^2\,0{,}046\,25^\circ} = 5{,}22{\cdot}10^6\ \mathrm{m}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

Tento výsledek se liší od známé hodnoty poloměru Země ($6{,}378{\cdot}10^6$ m) o 20 %.

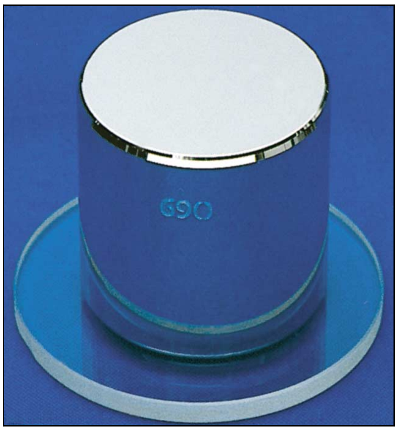


Obr. 1.5 Příklad 1.4. Zvedne-li se pozorovatel z polohy vleže (bod A) a zvýší tak polohu svých očí do výšky h, otočí se zorný paprsek vycházející z horního okraje slunečního kotouče o úhel θ. (Velikosti výšky h i úhlu θ jsou v obrázku mnohem větší, než odpovídá skutečnosti.)

1.6 HMOTNOST

Standardní kilogram

Standardní jednotkou hmotnosti v soustavě SI je **kilogram**. Původně byl definován jako hmotnost jednoho litru (tj. $1\,\mathrm{dm}^3$) vody. Nyní je podle mezinárodní úmluvy určen hmotností válce vyrobeného ze slitiny platiny a iridia (obr. 1.6), který je uložen v Mezinárodním ústavu pro váhy a míry v Sèvres u Paříže. Přesné kopie tohoto etalonu byly rozeslány do laboratoří pro standardy v ostatních zemích. Hmotnost jiných těles pak můžeme měřit porovnáním s hmotností kterékoli z těchto kopií. V tab. 1.5 jsou uvedeny hmotnosti některých objektů.



Obr. 1.6 Mezinárodní hmotnostní standard 1 kg má tvar válce, jehož výška i průměr jsou 39 mm.

Bývalé Československo vlastnilo dva standardy hmotnosti ze slitiny platiny a iridia, které byly porovnávány s etalony v Mezinárodním ústavu pro váhy a míry každých 15 až 20 let. Po rozdělení státu zůstaly oba národní etalony na Slovensku. Česká republika získala vlastní kopii standardního kilogramu na jaře roku 1999. Při posledním vážení v únoru 1999 byla naměřena hmotnost českého národního kilogramu $1\,\mathrm{kg} + 0{,}165\,\mathrm{mg}$. Procedury srovnávání národních kilogramů budou jistě jednou nahrazeny spolehlivějším a přesnějším postupem, vycházejícím z hmotnosti atomu jakožto základního standardu.

Jiný standard hmotnosti

Porovnávat hmotnosti atomů mezi sebou dokážeme mnohem přesněji, než je srovnávat přímo se standardním kilogramem. Proto užíváme ještě dalšího standardu hmotnosti.

Tabulka 1.5 **Řádové hmotnosti vybraných objektů**

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

Je jím atom uhlíku ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, jemuž byla mezinárodní úmluvou přisouzena hmotnost dvanácti tzv. **atomových hmotnostních jednotek** (u). Hmotnost atomové jednotky souvisí s hmotností standardního kilogramu vztahem

$$1\,\mathrm{u} = 1{,}660\,540\,2\cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}. \tag{1.11}$$

Poslední dvě desetinná místa jsou zatížena chybou ± 10. Tak lze s přiměřenou přesností porovnávat hmotnosti různých atomů s hmotností atomu uhlíku ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$. Zatím nám však chybí spolehlivý způsob, jak dosáhnout stejné přesnosti i při měření běžných hmotností, srovnatelných s hmotností kilogramu.

1.7 MNOŽSTVÍ

Zatímco standardní kilogram je typicky makroskopickou jednotkou, patří atomová hmotnostní jednotka do oblasti mikrosvěta. Při vyjádření makroskopických veličin pomocí mikroskopických jednotek lze použít jednotku **mol**, udávající přesně definovaný počet kusů (například atomů, molekul, apod.). Jeden mol má hodnotu $6{,}022\cdot 10^{23}$. Původně byl zaveden jako počet atomů v 1 g nejjednoduššího prvku, vodíku. Nyní je definován pomocí izotopu uhlíku ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$. I když se ho většinou užívá pro vyjádření látkového množství, může být použitelný i jinak (např. pro počet dvojných vazeb či valenčních elektronů).

PŘEHLED & SHRNUTÍ

Fyzikální měření

Základem fyziky je měření fyzikálních veličin. Některé fyzikální veličiny byly vybrány za **základní** (například délka, čas a hmotnost). Každá z nich byla definována prostřednictvím **standardu** a dané **základní jednotky** (například metr, sekunda, kilogram). Jednotky ostatních fyzikálních veličin nazýváme **odvozené** a definujeme je pomocí jednotek základních.

Soustava SI

V této knize (až na výjimky v některých úlohách) používáme mezinárodní soustavu jednotek (SI). V úvodních kapitolách vystačíme jen se třemi základními veličinami, které jsou uvedeny v tab. 1.1. Mezinárodní dohodou byly pro tyto veličiny stanoveny standardy, které musí být dostupné a neměnné. Pomocí nich se vyjadřují výsledky všech fyzikálních měření základních i odvozených veličin. Zápis velmi velkých nebo velmi malých hodnot lze zjednodušit použitím předpon (viz tab. 1.2) nebo užitím exponenciálního tvaru.

Převod jednotek

Při převodu jednotek postupně násobíme původní hodnotu jednotkovými převodními koeficienty. Výrazy můžeme upravovat pomocí běžných algebraických pravidel.

Délka

Jednotkou délky je metr. Je definován jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za přesně stanovený časový interval. Jiné délkové jednotky, které se v některých zemích stále používají (například míle, yard, palec), jsou nyní definovány pomocí metru (1 míle $= 1\,609{,}344$ m).

Čas

Jednotkou času je sekunda. Původně byla odvozena z rotace Země. Současná definice využívá frekvence světla vyzářeného atomy cesia $^{133}_{55}\mathrm{Cs}$. Přesný časový signál se z laboratoří pro standardy vysílá rádiem do celého světa.

Hmotnost

Jednotkou hmotnosti je kilogram. Je definován pomocí prototypu, vyrobeného ze slitiny platiny a iridia a uloženého v Mezinárodním ústavu pro váhy a míry. Pro měření hmotností elementárních částic, atomů a molekul se obvykle používá atomová hmotnostní jednotka u. Základem její definice je hmotnost atomu uhlíku $^{12}_{6}\mathrm{C}$.

Množství

Jeden **mol** je roven počtu $6{,}02\cdot10^{23}$ (atomů, molekul, …). Užívá se zejména pro látkové množství.

CVIČENÍ & ÚLOHY

ODST. 1.2 Mezinárodní soustava jednotek

1C. Přečtěte s použitím předpon z tab. 1.2: (a) 10^{-6}klima, (b) 10^{9}nt, (c) 10^{6}fon, (d) 10^{-12}la, (e) 10^{-3}on, (f) 10^{1}dent, (g) 10^{12}sa, (h) 10^{-6}fon, (i) 10^{15}rda, (j) 10^{2}r, (k) 10^{18}minátor.

2C. (a) Některé předpony soustavy SI se staly součástí hovorového jazyka, i když nejsou vždy používány správně. „Půjč mi tři kila" (myšlen jistý obnos peněz). Kolik je to korun? V jiných případech používáme pro označení množství jen předponu bez uvedení jednotky. O jakou hodnotu které veličiny se jedná v následujících větách? (b) Kup asi kilo. (c) Dvě deci, prosím. (d) Deset deka bude stačit. (e) Pevný disk počítače má kapacitu 650 mega. Je-li pro uložení jednoho slova potřeba průměrně 8 bajtů, kolik slov může být na tomto pevném disku uloženo? (Zpravidla však *mega* v případě megabajtu znamená 1 048 576 $(= 2^{20})$, nikoli 1 000 000 a *kilobajt* je 1 024 (2^{10}) bajtů.)

ODST. 1.4 Délka

3C. Raketoplán obíhá kolem Země ve výšce 300 km. Vypočtěte jeho výšku v (a) mílích, (b) milimetrech.

4C. Jaká je vaše výška ve stopách?

5C. (a) Kolik mikrometrů má jeden kilometr? (b) Jakou část centimetru představuje 1 μm? (c) Kolik mikrometrů je jeden yard?

6C. Země má přibližně tvar koule s poloměrem 6 378 km. (a) Vypočtěte její obvod v m. (b) Jaký má povrch v m^2? (c) Jaký je její objem v m^3?

7C. Převeďte 20 mil na km jen s použitím následujících převodních vztahů: 1 míle = 5 280 stop, 1 stopa = 12 palců, 1 palec = 2,54 cm, 1 m = 100 cm a 1 km = 1 000 m.

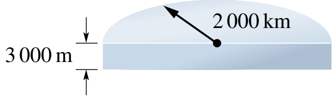
8C. Najděte převodní vztahy mezi (a) čtverečným yardem a čtverečnou stopou, (b) čtverečným palcem a čtverečným centimetrem, (c) čtverečnou mílí a čtverečným kilometrem, (d) krychlovým metrem a krychlovým centimetrem.

9C. Pro určení velikosti pozemků se často používá jednotka plochy zvaná **ar** (zkratka a), který je roven 10^2 m^2, a jednotka **hektar** (zkratka ha), představující 10^2 a. Povrchový uhelný důl odebírá každý rok 75 ha půdy do hloubky 26 m. Jaký objem půdy je každoročně odstraněn? Vyjádřete jej v km^3.

10C. Staročeské látro představovalo podle některých pramenů objem řezaného dřeva srovnaného do tvaru kvádru o délce 8 stop, šířce 4 stopy a výšce rovněž 4 stopy. Kolik láter dřeva je v 1 m^3? Kolik je tisíc láter v SI?

11C. Pokoj je dlouhý 20 stop 2 palce, široký 12 stop 5 palců a vysoký 12 stop 2,5 palce. Jaká je plocha podlahy v (a) čtverečných stopách a (b) čtverečných metrech? Jaký je objem pokoje v (c) krychlových stopách a (d) krychlových metrech?

12C. Antarktida má přibližně půlkruhový tvar o poloměru 2 000 km (obr. 1.7). Je přikryta ledem, jehož průměrná tloušťka je 3 000 m. Kolik krychlových centimetrů ledu je v Antarktidě? (Zakřivení zemského povrchu neuvažujte.)



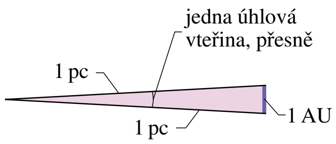
Obr. 1.7 Cvičení 12

13C. Malá kostka cukru má tvar krychle s hranou délky 1 cm. Jaká by musela být délka hrany krychlové krabice, do které bychom chtěli uložit jeden mol kostek cukru?

14C. Meteorologové často vyjadřují množství srážek v milimetrech vodního sloupce. Na město o rozloze 26 km^2 spadlo při silné bouři 50 mm srážek. Vyjádřete objem spadlé vody v litrech.

15C. Výrobce barev udává vydatnost vnějšího laku 11,3 m^2/l. Vyjádřete tuto hodnotu (a) ve čtverečných stopách na galon, (b) v jednotkách SI. (c) Jaký je fyzikální význam převrácené hodnoty tohoto čísla?

16C. Astronomické vzdálenosti jsou v porovnání s pozemskými tak obrovské, že je výhodné pro ně používat jiných délkových jednotek. **Astronomická jednotka** (AU z angl. *Astronomical unit*) je rovna střední vzdálenosti Země od Slunce, tj. $1{,}49\cdot 10^8$ km. Jeden **parsek** (pc, z angl. *parsec*) je vzdálenost, ze které bychom viděli astronomickou jednotku pod zorným úhlem jedné úhlové vteřiny (obr. 1.8). **Světelný rok** (ly, z angl. *light year*) je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za jeden rok. (a) Vyjádřete vzdálenost Země–Slunce v parsecích a světelných rocích. (b) Vyjádřete 1 pc a 1 ly v kilometrech. I když astronomové dávají přednost jednotce pc, v populární literatuře se častěji používají světelné roky.



Obr. 1.8 Cvičení 16

17C. Při úplném zatmění Slunce je sluneční kotouč téměř přesně zakryt Měsícem. (a) Určete poměr průměrů Slunce a Měsíce, víte-li, že Slunce je od Země asi 400krát vzdálenější než Měsíc. (b) V jakém poměru jsou jejich objemy? (c) Přidržujte před očima korunovou minci tak, aby právě zakryla měsíční kotouč, a změřte zorný úhel, pod kterým ji vidíte. Z výsledku měření a ze znalosti vzdálenosti Země–Měsíc ($3{,}8\cdot 10^5$ km) odhadněte průměr Měsíce.

18Ú★. Standardní kilogram má tvar válce, jehož výška (39 mm) je rovna jeho průměru (obr. 1.6). Ukažte, že válec tohoto tvaru má při daném objemu nejmenší povrch. Tím lze omezit změnu hmotnosti tělesa při jeho otěru nebo znečištění povrchu.

ODST. 1.5 Čas

19C. Vyjádřete rychlost světla $3\cdot 10^8\ m\cdot s^{-1}$ (a) ve stopách za nanosekundu, (b) v milimetrech za pikosekundu.

20C. Enrico Fermi kdysi poznamenal, že standardní doba vyučovací hodiny (45 min) je přibližně rovna jednomu mikrostoletí. Vyjádřete jedno mikrostoletí v minutách a vypočtěte procentní odchylku výsledku od Fermiho odhadu.

21C. Pro přibližné výpočty se často hodí odhad, že rok (365,25 dne) má asi $\pi\cdot 10^7$ sekund. Jak je tento odhad přesný?

22C. Jisté kyvadlové hodiny (s dvanáctihodinovým ciferníkem) se zrychlují o 1 minutu za den. Nastavíme-li hodiny v určitém okamžiku správně, za jak dlouho ukážou správný čas znovu?

23C. Vyjádřete stáří vesmíru ve dnech (viz tab. 1.4).

24C. (a) Čeho je víc: sekund v týdnu nebo minut v roce? b) Člověk na Zemi existuje přibližně 10^6 let a stáří vesmíru je odhadováno na 10^{10} roků. Kolik „sekund“ by byla Země osídlena člověkem, kdybychom za stáří Vesmíru považovali jeden pomyslný „den“?

25C. Maximální rychlost, které jsou schopna dosáhnout různá zvířata, můžeme vyjádřit v mílích za hodinu takto: (a) hlemýžď: $3{,}0\cdot 10^{-2}$; (b) pavouk: 1,2; (c) člověk: 23; (d) gepard: 70. Převeďte tyto hodnoty na metry za sekundu. (Pro všechny čtyři výpočty vystačíme s jediným převodním koeficientem. Je výhodné spočítat si jej předem a pro další výpočty uložit do paměti kalkulačky.)

26C. Vyjádřete rychlost světla ($3{,}0\cdot 10^8\ m\cdot s^{-1}$) v astronomických jednotkách za minutu (viz cvič. 16).

27C. Až do roku 1883 se každé město ve Spojených státech řídilo svým vlastním časem. Cestujeme-li dnes, posouváme si hodinky jen tehdy, je-li časový posuv roven* celé hodině. Kolik stupňů zeměpisné délky a jakou vzdálenost na 45. rovnoběžce je třeba v průměru překonat, abychom museli posunout své hodinky právě o jednu hodinu?

28C. Délka pozemského dne se rovnoměrně zvyšuje o 0,001 s za každé století. O kolik sekund se prodloužil den za dvacet století uplynulých od začátku našeho letopočtu? (Zpomalování rotace Země bylo zjištěno sledováním zatmění Slunce během posledních dvou tisíciletí.)

29C. Na dvou *různých* stadionech byly pořádány závody v běhu na jednu míli. Vítězové dosáhli časů 3 min 58,05 s a 3 min 58,20 s. Délka běžecké trati však byla změřena jen s omezenou přesností. Jaký může být maximální rozdíl skutečných délek obou tratí, abychom mohli s jistotou tvrdit, že běžec, který dosáhl kratšího času, byl doopravdy rychlejší?

30C. V laboratoři byly testovány patery různé hodiny. V jednom týdnu byly každý den přesně v poledne zaznamenány údaje

* Časová pásma nejsou přesně určena zemskými poledníky, ale z praktických důvodů respektují státní útvary.

všech hodin do následující tabulky. Seřaďte hodiny podle přesnosti jejich chodu, od nejlepších po nejhorší.

HODINY	NE	PO	ÚT	ST	ČT	PÁ	SO
A	12:36:40	12:36:56	12:37:12	12:37:27	12:37:44	12:37:59	12:38:14
B	11:59:59	12:00:02	11:59:57	12:00:07	12:00:02	11:59:56	12:00:03
C	15:50:45	15:51:43	15:52:41	15:53:39	15:54:37	15:55:35	15:56:33
D	12:03:59	12:02:52	12:01:45	12:00:38	11:59:31	11:58:24	11:57:17
E	12:03:59	12:02:49	12:01:54	12:01:52	12:01:32	12:01:22	12:01:12

31C. **Siderický měsíc** je doba, za kterou Měsíc zaujme při pozorování ze Země tutéž polohu vzhledem k hvězdnému pozadí. **Lunární měsíc** je doba mezi stejnými měsíčními fázemi. Lunární měsíc je delší než siderický. Proč a o kolik?

ODST. 1.6 Hmotnost

32C. S použitím údajů uvedených v textu této kapitoly určete, kolik je atomů v jednom kilogramu vodíku. Hmotnost jednoho atomu vodíku je 1,0 u.

33C. Molekula vody H_2O je tvořena dvěma atomy vodíku a jedním atomem kyslíku. Hmotnost atomu vodíku je 1,0 u a hmotnost atomu kyslíku je přibližně 16 u. (a) Jaká je celková hmotnost molekuly vody? (b) Kolik molekul vody je ve všech světových oceánech, obsahují-li přibližně $1{,}4\cdot10^{21}$ kg vody?

34C. Země má hmotnost $5{,}98\cdot10^{24}$ kg. Průměrná hmotnost atomů, z nichž se skládá, je 40 u. Z kolika atomů je Země složena?

35C. Jaká je hmotnost vody, která naprší na město během silné bouře (viz cvič. 14)?

36C. Při redukční dietě můžeme ztratit za týden až 2,3 kg tělesné hmotnosti. Kolik miligramů v průměru ztrácíme každou sekundu?

37C. (a) Vyjádřete hustotu vody v $\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, víte-li, že je rovna $1{,}0\,\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$. (b) Nádrž o objemu $5\,700\,\mathrm{m^3}$ se naplní za 10 h. Přítok vody je stálý. Jaký je hmotnostní průtok vody v přívodním potrubí (v kilogramech za sekundu)?

38C. Jemná křemenná zrnka písku (SiO_2) z kalifornských pláží mají přibližně tvar kuliček o poloměru 50 μm. Hustota křemene je $2\,600\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$. Kolik kg písku má stejný povrch jako krychle o hraně 1 m?

39C. Železo má hustotu $7{,}87\,\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$. Hmotnost jednoho atomu železa je $9{,}27\cdot10^{-26}$ kg. (a) Jaký je objem jednoho atomu železa? (b) Jaká je vzdálenost mezi středy sousedních atomů za předpokladu, že atomy jsou krychlové a těsně uspořádané?