

1.1. Slunce

Máte pocit, že si musíme vysvětlit, kdy Slunce vychází, zapadá, a pak ještě pohovoříme o rovnodennostech, slunovratech a podobných věcech? Jsou to nepochybně důležité základní informace (a mnoho lidí o nich téměř nic neví, navzdory tomu, že se o tom učili ve škole). My si tyto poznatky jen zlehka připomeneme na konci kapitoly, protože teď budeme rozebírat, jakou hvězdou je naše Slunce: *je hvězdou zcela běžnou nebo výjimečnou?*

Nejdůležitější čísla o Slunci

Popišme si Slunce pomocí několika důležitých čísel. Není třeba se je učit nazpaměť, důležitější je nad každým chvíli přemýšlet a srovnávat (zajisté – pokud jde s něčím srovnat):

- střední vzdálenost Země – Slunce (tzv. *astronomická jednotka*, zkratka AU) činí 149,6 milionu km;
- průměr Slunce dosahuje 1,4 milionu km, hmotnost $2 \cdot 10^{30}$ kg;
- ze 73 procent (podle hmotnosti) je Slunce tvořeno vodíkem, z 25 procent heliem, a na další těžší prvky připadají jen 2 procenta hmotnosti Slunce;
- povrchová teplota dosahuje 5510 °C. Ve vzdálenosti 1 AU od Slunce dopadá na jeden čtvereční metr povrchu, namířeného kolmo na Slunce, výkon 1380 W; této veličině říkáme též *sluneční konstanta*.



Snímek Slunce z 21. 9. 2000 (Ray Galak).

1. Astronomické zoo

Slunce je pro každého symbolem nevyčerpatelného množství energie. To je samozřejmě jen náš pocit, neboť jsme zvyklí vše posuzovat měřítky pozemskými. Nicméně uveďme si číselně, jak mnoho Slunce vyzařuje: zářivý výkon Slunce dosahuje $3,85 \cdot 10^{26}$ W, téměř 400 kvadrilionů wattů.

Srovnání výkonu Slunce s pozemskými jevy

Srovnáme-li celkovou energii, uvolňovanou Sluncem každou sekundu, s energií uvolňovanou některými jevy na Zemi, je zřejmé, že je obrovská (zde uváděné hodnoty energií jsou řádové).

sluneční energie vyzářená za 1 s	10^{26} J (joulů)
silný sopečný výbuch	10^{19} J
největší vodíková bomba	10^{17} J
tornádo nebo vlna cunami	10^{15} J
výroba energie celého lidstva za 1 s	10^{13} J

Je Slunce typickou hvězdou?

Občas se v populárních knihách o astronomii dočtete, že Slunce je docela obyčejnou, ba až „tucetovou“ hvězdou, jakých je v naší Galaxii většina. Nevěřte tomu! Jaká jsou fakta? Ze stovky nejjasnějších hvězd na obloze má *jen jedna* menší zářivý výkon než Slunce. To by znamenalo, že Slunce je málo zářící hvězdou. Na druhé straně ze stovky nejbližších hvězd je jich pouze *sedm* s větším výkonem než Slunce, z 1000 hvězd z okolí Slunce je jen 40 hmotnějších a zářivějších než Slunce. To by pak Slunce mělo být hvězdou velmi jasnou. Jenže ani sto nejjasnějších, ani sto nejbližších hvězd nejsou správné vzorky k posouzení, zda Slunce je či není typickou hvězdou. Z mnohem větších souborů hvězd plyne, že *Slunce je hvězdou nadprůměrně hmotnou a zářivou*.

Parametry Slunce		Parametry „typické“ hvězdy	
poloměr R	$1 R_S = 6,9599 \cdot 10^8$ m	poloměr	$R = 1/5 R_S$
hmotnost M	$M_S = 1,989 \cdot 10^{30}$ kg	hmotnost	$M = 1/6 M_S$
zářivý výkon L	$1 L_S = 3,83 \cdot 10^{26}$ W	zářivý výkon	$L = 1/250 L_S$

Jedinečné Slunce

Bez ohledu na to, zda v porovnání s jinými hvězdami je Slunce tělesem typickým či výjimečným, pro nás, pozemšťany, je hvězdou bezesporu nejdůležitější a jedinečnou. Poznávání Slunce je v našem nejvlastnějším zájmu.

Začněme se zdánlivě jednoduchými otázkami. Například – jak se Slunce pohybuje během dne po obloze? Kde a kdy vychází a zapadá? Nastávají nějaké změny v pohybu Slunce během roku? Je pohyb Slunce stejný při pohledu od nás a odjinud? O pohybu Slunce, střídání dne a noci či ročních obdobích jste určitě něco slyšeli ve škole. Nyní si to nejzákladnější stručně připomeneme.

1. Astronomické zoo

Pohyb Slunce po obloze

(platí pro naši zeměpisnou šířku, tj. asi +50 stupňů)

Začátek *astronomického jara* (kolem 21. 3., jarní rovnodennost):

- Slunce vychází v 6 h východním směrem;
- v poledne je Slunce asi 40 stupňů vysoko (nad vodorovnou rovinou);
- Slunce zapadá v 18 h západním směrem;
- „bílý den“ trvá přibližně 12 h, noc také 12 h.

Začátek *astronomického léta* (kolem 21. 6., letní slunovrat):

- Slunce vychází ve 4 h severovýchodním směrem;
- v poledne je Slunce asi 63 stupňů vysoko (nad vodorovnou rovinou);
- Slunce zapadá v 20 h severozápadním směrem;
- „bílý den“ trvá přibližně 16 h, noc 8 h.

Začátek *astronomického podzimu* (kolem 23. 9., podzimní rovnodennost):

- Slunce vychází v 6 h východním směrem;
- v poledne je Slunce asi 40 stupňů vysoko (nad vodorovnou rovinou);
- Slunce zapadá v 18 h západním směrem;
- „bílý den“ trvá přibližně 12 h, noc také 12 h.

Začátek *astronomické zimy* (kolem 21. 12., zimní slunovrat):

- Slunce vychází v 8 h jihovýchodním směrem;
- v poledne je Slunce asi 17 stupňů vysoko (nad vodorovnou rovinou);
- Slunce zapadá v 16 h jihozápadním směrem;
- „bílý den“ trvá přibližně 8 h, noc 16 h.



Východ Slunce ve Stonehenge v době letní rovnodennosti v roce 2005 (Pete Strasser).

1. Astronomické zoo

Bílé noci

Nastávají v dobách kolem *letního slunovratu* všude od zeměpisné šířky asi 60 stupňů až k pólu (nejsou samozřejmě doménou severní polokoule, nastávají také na polokouli jižní). Bílé noci nejsou nic jiného než splynutí večerního soumraku s ranním svítáním. Slunce neklesne hlouběji pod vodorovnou rovinu než řekněme 6 až 10 stupňů, takže se zcela nesetmí a pravá „černá noc“ nenastane.

V té době jsme tak vlastně zbaveni možnosti zahledět se na tmavé hvězdné nebe, k malé radosti astronomů, ale o to větší všech ostatních lidí. Astronomové však vědí, že za půl roku tomu bude naopak, a za extrémně dlouhých zimních nocí si na své přijdou zase oni. Škoda jen, že se k tmavé noci neoddělitelně přidají mráz a sněhové vánice.

Svítání v tropech

Kdo zažil svítání či soumrak v rovníkových krajích, potvrdí, že přechod ze tmy do bílého dne a naopak je zde velice rychlý. Není to záležitost mnoha desítek minut jako u nás, vše se odehraje doslova za okamžik. Příčina tohoto jevu je myslím jasná: Slunce se v tropech pohybuje po obloze téměř kolmo k obzoru, zatímco u nás sestupuje dosti šikmo k vodorovné rovině. To se na délce trvání soumraku a svítání samozřejmě projeví.

U protinožců

Jaký bude pohyb Slunce po obloze, když jej budeme sledovat odněkud z jižní polokoule, například z Nového Zélandu? Zjistíme, že Slunce se pohybuje od východního obzoru k západnímu. To ještě nic zvláštního není. Jenže – Slunce se pohybuje opačným směrem, než na jaký jsme zvyklí! Zde na jižní polokouli se během dne otáčíme za Sluncem *doleva*, kdežto u nás doma – *doprava*! Ještě jeden rozdíl tu najdeme: doma, když chceme spatřit v poledne Slunce, otáčíme se k jihu, zde ovšem – k severu. Ano, jak je vidět, vše je relativní. To, co nám může připadat prapodivné, je tady na jižní polokouli docela normální.

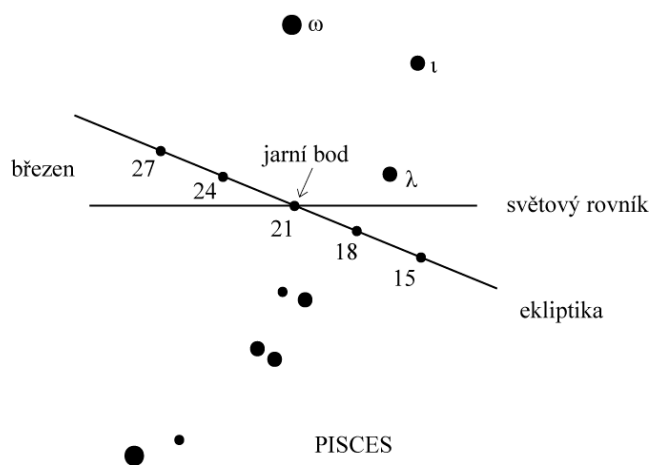
Ekliptika

Slunce mění svou polohu nejen na obloze, ale také na *hvězdné obloze*¹⁾. Vůči vzdáleným hvězdám se Slunce pomalu posouvá, za kalendářní rok se ocitne ve stejné poloze vzhledem ke hvězdám jako před rokem. Množina všech směrů, ve kterých se Slunce v průběhu celého roku postupně nachází, je právě *ekliptika*. Je zajímavé, že již v nejstarších dobách lidé věděli, kde se na hvězdné obloze ekliptika nachází, i když to vůbec není snadné určit. Uvažme, že nikdy nevidíme současně hvězdy a Slunce, ve dne jsou přece hvězdy Sluncem přezářeny! Po pravdě řečeno, dosud nevíme, jak vlastně nejstarší hvězdáři dokázali tak přesně určit, kde se ekliptika nachází.

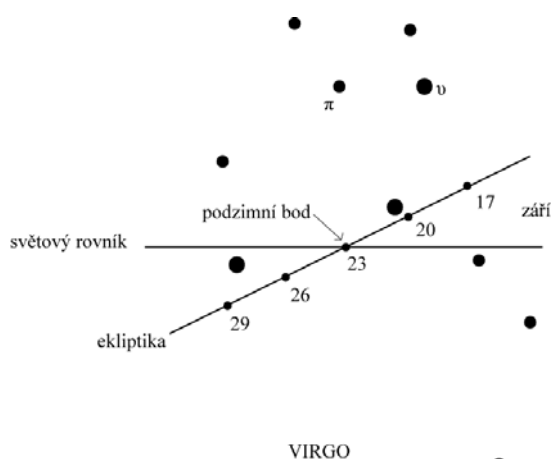
¹⁾ Není to hra se slovíčky: pojmy *obloha* a *hvězdná obloha* opravdu vyjadřují něco poněkud jiného. Důkladně se s problémem seznámíme hned na začátku 2. kapitoly (2.1. Hvězdářský zeměpis), proto zde jen stručně: *oblohou* nazveme všechny směry, kterými se díváme nad krajinu, v níž se nacházíme. Na obloze jsou objekty pozemské (mraky, letadla), ale i objekty kosmické. O ty nám půjde především.

Kosmické objekty se po obloze pohybují od východního obzoru k západnímu. Blízké objekty se ovšem pohybují poněkud jinou úhlovou rychlostí než vzdálené hvězdy. Proto je užitečné vztáhnout pohyby blízkých těles (Slunce, Měsíce, planet) vůči hvězdám. Hovoříme tak o *hvězdné obloze*: vzdálené hvězdy vytvářejí jakousi síť, vůči níž poměříme polohy relativně blízkých objektů ze sluneční soustavy.

1. Astronomické zoo



Jarní bod.



Podzimní bod.

Souhvězdí podél ekliptiky

Když budete pomocí hvězdné mapy zjišťovat, která souhvězdí se nacházejí podél ekliptiky, narazíte většinou na taková, jež se nazývají podle nějakých zvířat (proto jim také často říkáme *zvířetníková souhvězdí*). Existují samozřejmě i výjimky, například Blíženci, Střelec, Vodnář. Každý je asi ochoten přísahat, že těchto souhvězdí je celkem dvanáct. K překvapení mnohých jich však existuje třináct – také Hadonoš je ekliptikální souhvězdí!

Souhvězdí nebo znamení?

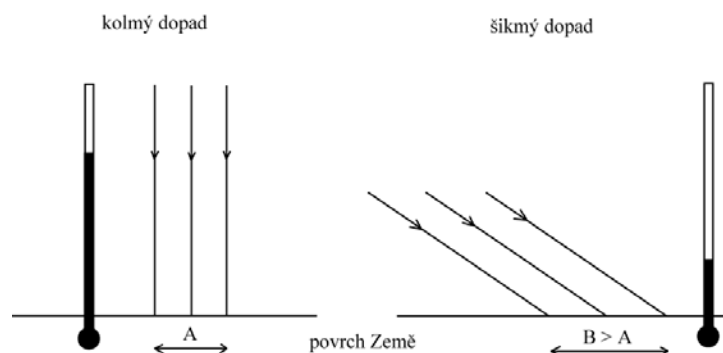
V prvopočátcích astronomie byla ekliptika rozdělena do dvanácti třicetistupňových úseků, jež se nazývaly *znamení*. Ta dostala svá jména podle souhvězdí, která se tam tenkrát (před asi dvěma tisíci lety) nacházela. Tak například Slunce v době jarní rovnodennosti (21. března) vstupuje do *znamení* Berana, protože tehdy tím směrem bylo *souhvězdí* Berana. Jenže rovina ekliptiky se vůči rovině

1. Astronomické zoo

zemského rovníku pozvolna stáčí, takže v současnosti 21. března Slunce sice opět vstupuje do *znamení* Berana, ale nachází se v sousedním *souhvězdí* Ryb. Během roku tak Slunce projde dvanácti znameními, ale třinácti souhvězdími.

Čtvero ročních období²⁾

Země je veliký rotující setrvačnick, jehož osa rotace svírá s rovinou oběhu Země kolem Slunce – *ekliptikou* – stále stejný úhel. Ten činí asi $66,5^\circ$. Poloha rotační osy Země se vzhledem ke vzdáleným hvězdám nemění, vůči Slunci však pochopitelně ano. Mění se podle toho, ve které části své dráhy kolem Slunce se planeta Země nachází. Máme-li u nás zimu, je severní část Země od Slunce odkloněna, a za půl roku v létě, až se Země přesune na opačnou stranu vůči Slunci, je severní polokoule ke Slunci přikloněna. Vzhledem k různé výšce Slunce nad obzorem během dne i různě dlouhé době oslunění v jednotlivých obdobích roku se mění přísun energie na jednotkový povrch (třeba 1 metr čtvereční). V našich zeměpisných šířkách dostáváme v létě asi šestkrát více energie než v zimě, a to je příčinou *střídání ročních období* u nás.

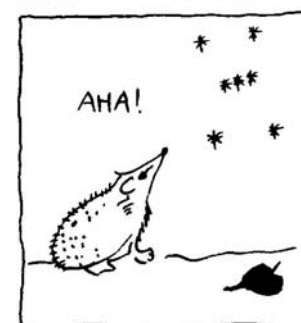


I bez exaktního matematického důkazu je zřejmé, že při šikmém dopadu obdrží jednotka povrchu méně slunečního záření než při kolmém dopadu paprsků.

Střídají se roční období všude na Zemi?

Roční období vznikají proto, že přísun sluneční energie během roku není stálý. Jde ale o rozdílný přísun energie *do určité oblasti* Země, neboť pro celou naši planetu je energetická bilance prakticky vyvážená. Proto má také naše otázka smysl, a stručná odpověď na ni zní – ano. Chcete-li odpověď poněkud obsírnější, zde je: roční období nejsou odlišná v rovníkových oblastech, kde je stále teplé a vlhké počasí. Také v tropických pouštích je celoročně horké (a zde samozřejmě suché) počasí.

V oblasti subtropického podnebí již zaznamenáváme výraznější rozdíly mezi létem a zimou: nastávají zde horká suchá léta a chladnější vlhké zimy. V mírném podnebném pásmu, které dobře známe,



(Podle *Sterne und Weltraum* 2/1983, 97)

²⁾ Budete-li mít dojem, že výklad o vzniku a střídání ročních období je stručný a plně mu nerozumíte, pak připomínám, že právě toto učivo jste probírali v přírodovědě ve 4. až 6. třídě. Takže sáhněte po vhodné učebnici z té doby...

1. Astronomické zoo

neboť tu žijeme, jsou studené zimy odděleny od teplých vlhčích letních dní přechodnými obdobími: jarem a podzimem. Ještě v subarktických oblastech se setkáváme s ročními obdobími – studenou zimou a přece jen o něco teplejším létem. V polárních oblastech pak už zažijeme pouze jediné – po celý rok studené počasí.

1. Astronomické zoo



Nikdo si nemyslí, že se papír vyrábí proto, aby jej směl kdokoli počernit jakýmikoli tlachy.

Jan Amos Komenský, filozof, teolog a pedagog
(1592 – 1670)

otázky a příklady

Otázka 1.1.1. Jak mnoho Slunce září? Zářivý výkon Slunce si můžeme snadno vypočítat sami, když víme, že na každý čtvereční metr plochy, postavené kolmo ke slunečním paprskům, dopadá sluneční záření o výkonu 1380 W (pro přesnost dodejme, že tato plocha musí být sice ve vzdálenosti Země, ale *vně* zemské atmosféry). Jak už víme, je to *sluneční konstanta*. Když ji vynásobíme plochou koule o poloměru jedné astronomické jednotky (tj. střední vzdálenosti Země – Slunce), dostáváme požadované číslo. Ověřte si to!

Otázka 1.1.2. Země z celkového zářivého výkonu Slunce zachytí zajisté jen nepatrnou část. Označíme-li celkový zářivý výkon Slunce jedničkou, jak velkou část z tohoto celkového výkonu je tedy Země schopna zachytit?

Otázka 1.1.3. Je-li Slunce opravdu jen z vodíku a helia, není obtížné vypočítat, z kolika nukleonů (tj. protonů a neutronů) sestává. Aby úloha byla snadnější, budeme předpokládat, že Slunce je tvořeno výhradně vodíkem. Dřív než se pustíte do výpočtu, ujasněte si, které číselné údaje musíte znát. Zde jsou některé na výběr: a) gravitační konstanta a rychlost světla ve vakuu; b) hmotnost Slunce a hmotnost protonu; c) hmotnost neutronu a hmotnost Slunce; d) stáří Slunce a zářivý výkon Slunce; e) některý z výše uvedených údajů plus ještě jeden další.

Otázka 1.1.4. Nyní vlastní příklad: kolika nukleony (tj. protony, neboť podle našeho předpokladu je Slunce zcela z vodíku) je Slunce tvořeno? Uveďte pouze *řádový* výsledek.



(Podle *Science*, Grade Eight, 25)



čítanka

Ladislav Křivský: Spor o prvenství

O becně se soudí, že rotaci Slunce jako první pozoroval a popsal zakladatel moderní fyziky Galileo Galilei. Předcházelo tomu pozorování slunečních skvrn dalekohledem v červenci a srpnu roku 1610. Ačkoli tenkrát experimentální věda byla ještě v plenkách a vědecká publikační činnost teprve začínala, již tehdy se vědci nevyhnuli sporům, jaké pak od té doby podnes nezřídka rozvířily pozornost učené společnosti a často rozdělily vědce na nepřátelské tábory. A spory mezi vědci jsou mnohem urputnější než spory mezi umělci. Jsou ovšem mnohem méně známé.

Šlo o to, co vlastně jsou sluneční skvrny. Kde jsou? Vypukl spor o prvenství jejich objevu, neboť nárok na jejich objev si činil též jezuita, páter Christoph Scheiner¹⁾. Tento spor byl ovšem o to ostřejší, čím více se oba protivníci lišili v základních názorech na uspořádání planet a světa. V nastalé polemice, která trvala mnoho let a skončila jen proto, že oba protivníci zemřeli, si navzájem vyčetli všechno možné. Scheiner zastával Ptolemaiovu soustavu a Slunce pro něj bylo prostě těleso, obíhající kolem Země jednou za den – tedy pravděpodobně poměrně blízké. Galilei si byl vědom důsledků, plynoucích z Koperníkovy soustavy: Slunce by mohlo být velmi vzdálené těleso.

Scheiner pozoroval skvrny na Slunci svým dalekohledem v březnu roku 1611 v Ingolstadtu v Bavorsku. Jenže je pokládal za útvary atmosférické, za nějaké druhy oblaků mezi Zemí a Sluncem. Nevěřil, že jsou součástí Slunce. Scheiner publikoval svůj objev ve spise, adresovaném augsburskému humanistovi a polyhistorovi Marku Welserovi. Své prvenství před Galileim obhajoval v několika dalších listech, uveřejněných v roce 1612. Během sporu celkem zbytečného a malicherného si v osobě pátera Scheinera Galilei zneprátelil celý jezuitský řád. Velmi pravděpodobně mu to přitížilo při jeho pozdějších procesech.

Jenže objevy a prvenství se nevyhlašují úředními dekrety. Galilei se dal vtáhnout do polemiky s páterem Scheinerem a na jeho útoky odpovídal řadou replik. Byly to dopisy, které se veřejně četly. Vědecké časopisy tehdy ještě neexistovaly.

Scheiner určitě nebyl první, kdo pozoroval sluneční skvrny. Prvenství není jen v pozorování, ani v publikaci. Podstatné na objevu a na obhajobě jeho prvenství je, kdo s objevem vystoupil na světové vědecké fórum; zda se na základě takové publikace mohla s ním seznámit široká vědecká veřejnost. Zda objevitel své výsledky také správně pochopil a vyložil a nakolik je také před útoky ostatních obhájil! O tom u Galileiho

¹⁾ Čti: *christof šajner*.

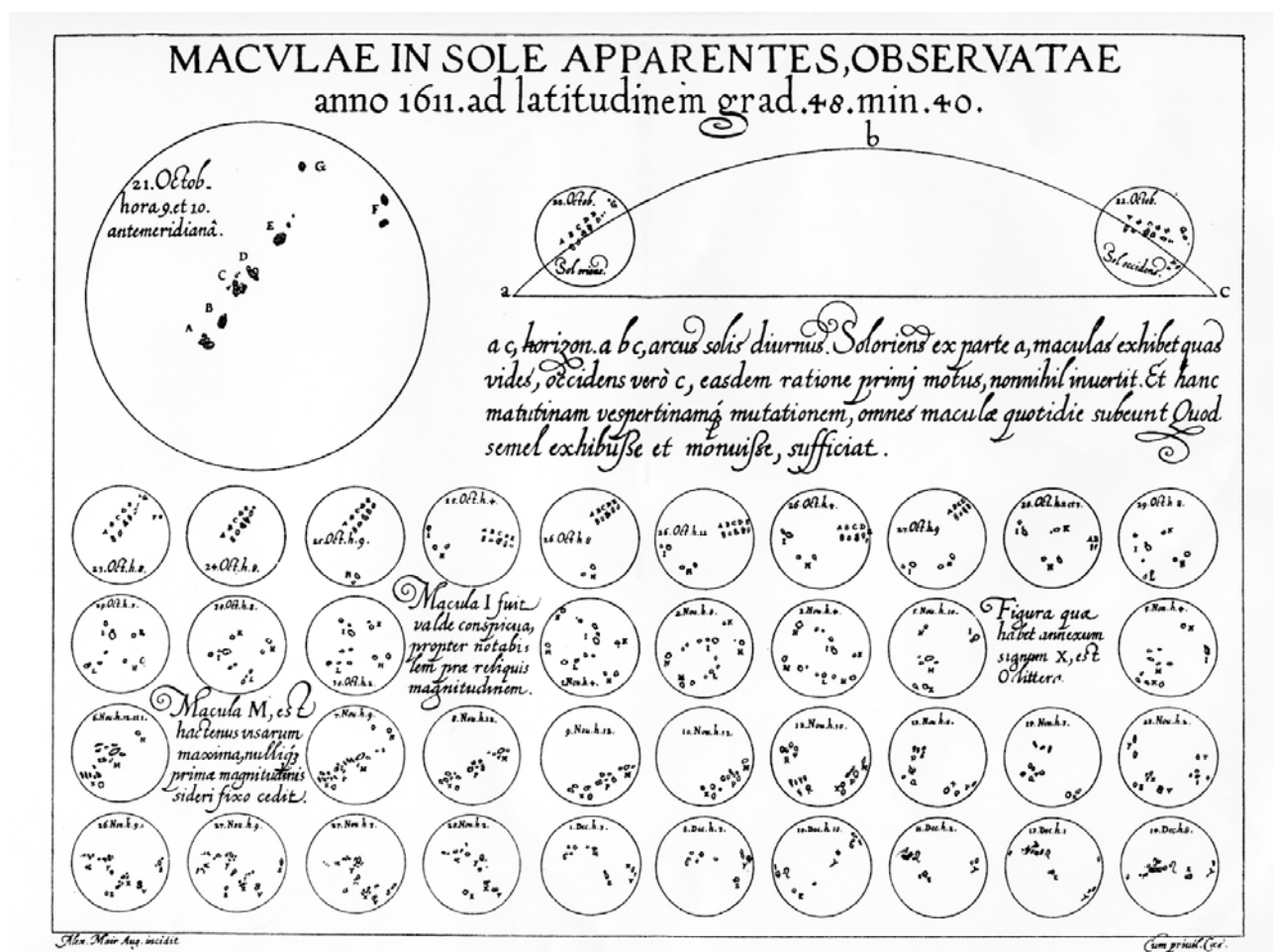
1. Astronomické zoo

nejasnost není. O povaze slunečních skvrn, o jejich vztahu ke Slunci i k jeho rotaci se vyslovil dříve než Scheiner, opakovaně – a správně!

Jenže ve skutečnosti jako první objevil sluneční skvrny lékař, astronom-amatér Jan Fabricius, který je určitě pozoroval dalekohledem před 1. prosincem roku 1611. Pozorování neprodleně publikoval ve spisku *O skvrnách, pozorovaných na Slunci*. Sluneční skvrny ukázal svému otci, objeviteli první proměnné hvězdy (Mira Ceti – v souhvězdí Velryby) Davidu Fabriciovi. Prvenství svého předčasně zemřelého syna ale Fabricius starší nemohl obhajovat, protože dva roky po jeho smrti byl zabit v hádce sedlákem, kterého obvinil, že mu ukradl husu!

O prvenství nemůže být sporu. Aby náš soupis byl úplný, musíme poznamenat, že již v roce 1610 pozoroval skvrny na Slunci anglický mnich Thomas Harriot. Jenže se to poznalo až z kreseb v jeho pozůstalosti, protože svůj objev nepublikoval.

Výňatek ze stejnojmenné kapitoly knihy Josefa Dvořáka a Ladislava Křivského *Slunce náš život* (Panorama, Praha 1989).



Záznam kreseb slunečních skvrn Christopa Scheinera.



pozorování

Dírková komora

Zcela bezpečně můžete sledovat kotouček Slunce pomocí dírkové komory (*camera obscura*¹⁾), a dokonce máte šanci změřit s udivující přesností též úhlový průměr Slunce. Dírkovou komoru si snadno zhotovíte během několika minut: do tužšího papíru (kartonu) propíchnete menší díрку. To bude „objektiv“ komory. Tu namíříte na Slunce a na bílém stínítku v jisté vzdálenosti od otvoru uvidíte malý sluneční kotouček. Po změření vzdálenosti stínítka od otvoru a průměru slunečního kotoučku máte k dispozici vše potřebné, abyste vy počítali úhlový průměr Slunce. Sestrojte si dírkovou komoru! Nečeká vás sice nějaký senzační objev, ale určitě zažijete zvláštní a těžko popsatelný pocit uspokojení, že věci fungují tak, jak si představujete.

Karton s otvorem je třeba umístit kolmo na směr slunečních paprsků. Na stínítku se utvoří jasný disk, jehož okraj nebude ovšem zcela ostrý; je tomu tak proto, že otvor není nekonečně malý. Změřte průměr jasného disku d (jako „okraj“ berte střed přechodové zóny – viz obrázek), a také vzdálenost r stínítka od kartonu. Měření několikrát opakujte pro jiné vzdálenosti r , výsledky zapisujte do tabulky (je jasné, že veličiny d a r měříme ve stejných jednotkách, např. milimetrech).

Úhlový průměr Slunce γ

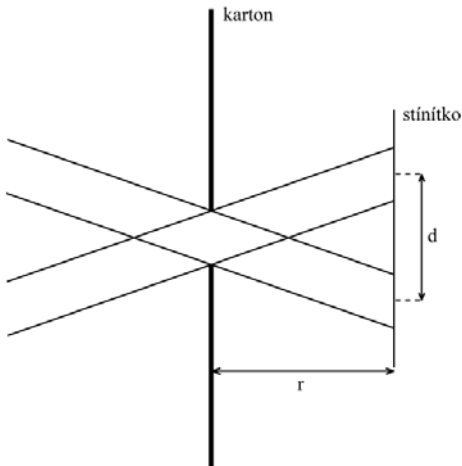
$$\gamma = d/r$$

a vychází v radiánech (nakonec jej přepočteme na úhlovou míru).

¹⁾ Čti: *kamera obskúra*.

1. Astronomické zoo

Sestavení experimentu:



Výsledky:

i	r	d	$\gamma = d/r$ (rad)
1			
2			
3			
4			
5			
střední hodnota:			

Úhlový průměr Slunce je roven _____ radiánů = _____ stupňů.



I tento obrázek je ukázkou dírkové komory, dokonce mnoha dírkových komor. Jste-li nedočkaví a chcete vědět, oč jde, přeskočte pár kapitol a podívejte se na otázku 3.4.1. Snímek pořídil E. Israel v roce 1994.



čítanka

Zdeněk Horský: Příliš dlouhý rok

Kdekdo vám řekne, že rok trvá 365 dní. Tolik jich skutečně zpravidla od Nového roku do Silvestra bývá. Školáček se však nad otázkou zamyslí, protože čeká nějaký háček, vzpomene i na přestupné roky, a nakonec se dohodnete, že rok vlastně trvá 365 a jednu čtvrtinu dne. Proto za každé tři běžné roky řadíme jeden přestupný s 366 dny, tedy vlastně – když to jinak šikovněji nejde – ke každému roku o 365 dnech připojujeme ještě čtvrtinu dne.



Ve skutečnosti není možno vystačit s takto jednoduchou praxí. Rozdíl mezi tímto jednoduchým a správným počítáním se sice projeví až v roce 2100, ale rozdíl tu je.

Kalendář, v němž každý čtvrtý rok je přestupný a má 366 dní místo 365, zavedl a uzákonil již v roce 46 př. n. l. první starořímský císař Gaius Iulius Caesar. Aby v kalendáři nepanovaly zmatky, prosadil, že roky budou mít předem přesně stanovenou délku a přesně stanovené pořadí, tedy musí být předem jasno, do kterých let se mají vkládat přestupné dny. S přestupným dnem musel počítat proto, že délku roku nelze vyjádřit celistvým počtem dní. V otázce, jak dlouho má rok správně trvat, se Caesar opřel, jak bychom dnes řekli, o astronomickou expertízu. Egyptský astronom Sosigenes mu doporučil, aby rok byl roven 365,25 dne. To je velmi praktické opatření, protože umožňuje vytvořit velmi jednoduchý a přehledný kalendářní systém. Proto je Caesar přijal, vzdor tomu, že se již tenkrát vědělo, že rok je ve skutečnosti o něco málo kratší. Rokem se tu myslí tzv. *tropický rok*, neboť právě on je tou veličinou, která v dlouhodobém průměru vystihuje střídání čtyř ročních období tak, jak se projevuje v meteorologických jevech a ve vegetačním rytmu.

Caesarův kalendář dostal po svém ustanoviteli jméno juliánský. Pro další vývoj bylo rozhodující, že právě tento kalendář převzalo křesťanství. Na koncilu v Nikáji v roce 325 bylo ustanoveno, že se jím budou křesťané řídit a též podle něj určovat hlavní pohyblivé svátky, a to tak, že velikonoční neděle bude první neděle po prvním jarním úplňku. Tedy po tom úplňku, který bude následovat po 21. březnu, tehdejším počátku jara, kdy Slunce procházelo jarním bodem.

1. Astronomické zoo

Kdo pravidelně strádá i jen haléřové hodnoty, naspoří nakonec značnou sumu. Totéž se stalo s kalendářem. Tropický rok je přece ve skutečnosti o něco málo kratší, než jak s trváním roku počítá juliánský kalendář. Trvá 365,2422 dne. Rok juliánského kalendáře, obsahující 365,2500 dne, je tedy o 0,0078 dne delší než tropický rok. Zdá se to být hodnota zcela zanedbatelná, ale nedejte se mýlit! Za deset let naroste rozdíl mezi skutečností a juliánským počítáním na 0,078 dne, za sto let činí to již o něco více než tři čtvrtě dne a za 128 let je rozdíl právě jeden den.

A tak již v polovině 5. století přešla ve skutečnosti jarní rovnodennost na 20. března, koncem 6. století na 19. března, a tak dál, až v 16. století byla už na 11. březnu. Velikonoce se však stále určovaly podle úplňku po 21. březnu v duchu nikájského usnesení a stěhovaly se tedy stále více do léta.

Po vleklých nářcích na nedokonalost kalendáře a po mnoha přípravách vyhlásil nakonec v roce 1582 papež Řehoř XIII. reformu kalendáře. Byla dost drastická. Aby se jarní rovnodennost vrátila na 21. březen, nařídil přeskočit deset dní v kalendáři, a sice tak, že po čtvrtku 4. října 1582 měl hned následovat pátek 15. října. Jak se dalo očekávat, reforma se setkala se značným odporem. Vznikly zmatky s již vytištěnými kalendáři, se smlouvami, nájmy, půjčkami i úroky. Prostí lidé papeži spílali, že je okradl o deset dní života. Reforma také byla bezprostředně přijata jen málokde, většinou docházelo ke značným zpožděním. V Čechách ji nařídil až císař Rudolf II. tak, že po 6. lednu 1584 následoval hned 17. leden. To ještě bylo velmi časně přijetí nového kalendáře, který po papežovi dostal jméno gregoriánský. Na Moravě byl přijat na podzim téhož roku, na Slovensku až v roce 1587. Protestantské země na severu Evropy včetně severního Německa přistoupily na reformu až k roku 1700, pravoslavná církev ji nepřijala nikdy.

Nestačilo však jen vrátit jarní rovnodennost na původní datum. Reforma musela především zaručit, že se nový kalendář s přírodním během již nebude podstatně rozcházet. Protože rok byl příliš dlouhý, bylo třeba jej patřičně zkrátit. Nejvýhodnější se ukázalo vhodně vynechávat některé přestupné dny, které by juliánský kalendář vyžadoval. Řešení se našlo v tom, že podle nového gregoriánského kalendáře teď připadá nově na každých 400 let ne plných 100 přestupných roků jako dříve, ale pouhých 97. Platí jednoduché pravidlo: tak zvané *sekulární roky*, jimiž končí století, nejsou přestupnými, ale výjimkou jsou zase ty, které jsou beze zbytku dělitelné 400. Takže roky 1700, 1800 a 1900 nebyly přestupné, kdežto roky 1600, 2000, 2400 atd. přestupné zůstávají. Kdo tedy chce prožít rozdíl mezi juliánským a gregoriánským kalendářem, musí vydržet až do roku 2100.

Nicméně ani touto reformou není trvale zaručena shoda kalendáře s astronomickým průběhem roku a ostatně ani trvání tropického roku není neměnnou veličinou, ale průběžně se, byť sotva znatelně, zkracuje. Na druhou stranu si můžete propočíst, že současně je délka gregoriánského roku zase o něco nepatrně málo kratší než by bylo potřeba. Každopádně řada příštích generací má, pokud jde o kalendář, zcela vystaráno.

Stejnomená kapitola z knihy *Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru* (Svoboda, Praha 1988; autoři: Z. Horský, Z. Mikulášek a Z. Pokorný).

1. Astronomické zoo



radly a „drobnosti“

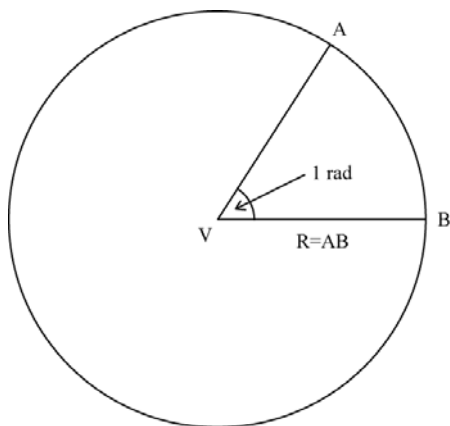
Velká a malá čísla

Psát velká nebo malá čísla se všemi nulami by bylo krajně nepraktické. V dnešní počítačové době je běžné používání pohyblivé řádové (desetinné) čárky. Tak například $150\,000 = 1,5 \cdot 10^5$; $0,0052 = 5,2 \cdot 10^{-3}$; $22,03 = 2,203 \cdot 10^1$. Odborně matematicky jde o zápis čísla v semilogaritmickém tvaru. My tohoto způsobu zápisu budeme používat všude tam, kde je to účelné.

Ještě malou poznámku ke slovu „řádově“, které někteří tak rádi (a obvykle špatně) používají:

„Kopec, na který se díváme, je od nás vzdálen řádově stovky metrů.“ To znamená, že je možná 110, možná 635, možná 960 metrů daleko. Ale ne desítky metrů nebo tisíce metrů. Řeknu-li, že je „řádově 400 metrů daleko“, je to nesmysl. Chtěl jsem říci „asi“, „přibližně“, ale to je přece něco jiného než „řádově“! Zkratka – slovo *řádově* používejte jen v matematickém významu, chcete-li vyjádřit pouze *řád čísla*, nikoli jeho přibližnou hodnotu.

Úhlové stupně a radiány



Z geometrie možná víte, že velikost rovinného úhlu se vyjadřuje buďto ve *stupních* nebo v *radiánech*. Obvyklejší je používání stupňů: základní jednotkou je úhlový stupeň (plný úhel má velikost 360°), dílčími jednotkami jsou úhlová minuta ($1^\circ = 60'$) a úhlová vteřina ($1' = 60''$). Velikost rovinného úhlu AVB můžeme určit též z délky oblouku AB. Oblouk AB vytínají na kružnici dva radiální polopaprsky, vycházející ze středu kružnice V. Je-li délka oblouku kružnice AB rovna velikosti poloměru kružnice, je úhel sevřený dvěma polopaprsky roven 1 radiánu (zkratka: rad). Nulový úhel má tedy velikost 0 rad, plný úhel 2π rad = 6,28... rad (π je Ludolfovo číslo). Pro přepočítání velikosti úhlu ve stupních a v radiánech platí, že $360^\circ = 2\pi$ rad.

Číslo pro zapamatování: $1 \text{ rad} = 57,3^\circ$

1.2. Naši susedé: Měsíc a planety

Pro laika je zřejmě dost obtížné odlišit na hvězdném nebi planetu od podobně vyhlížejících hvězd. Rozhodně to není triviální úkol, ale neřešitelný také není. Tolik planety – s rozpoznáním našeho Měsíce jistě žádné potíže nenastanou.

Družice či dvojplaneta?

Měsíc je jedinou přirozenou družicí Země. Přitom hmotnosti obou těles nejsou příliš rozdílné: poměr hmotností činí asi 1:81. Proto někteří astronomové soustavu Země-Měsíc označují jako *dvojplanetu*. V naší planetární soustavě je tak malý poměr hmotností výjimkou – soupeřit by mohl snad jen Pluto se svou družicí Charon. Pluto má průměr asi 2320 km, Charon 1270 km. Z těchto čísel ale vidíme, že i „planeta“ Pluto je mnohem menší než samotný Měsíc (jeho průměr dosahuje 3476 km), takže jakápak dvojplaneta!



Vycházející Měsíc pohledem astronautů raketoplánu během letu STS-35 (prosinec 1990). Foto: NASA.

1. Astronomické zoo

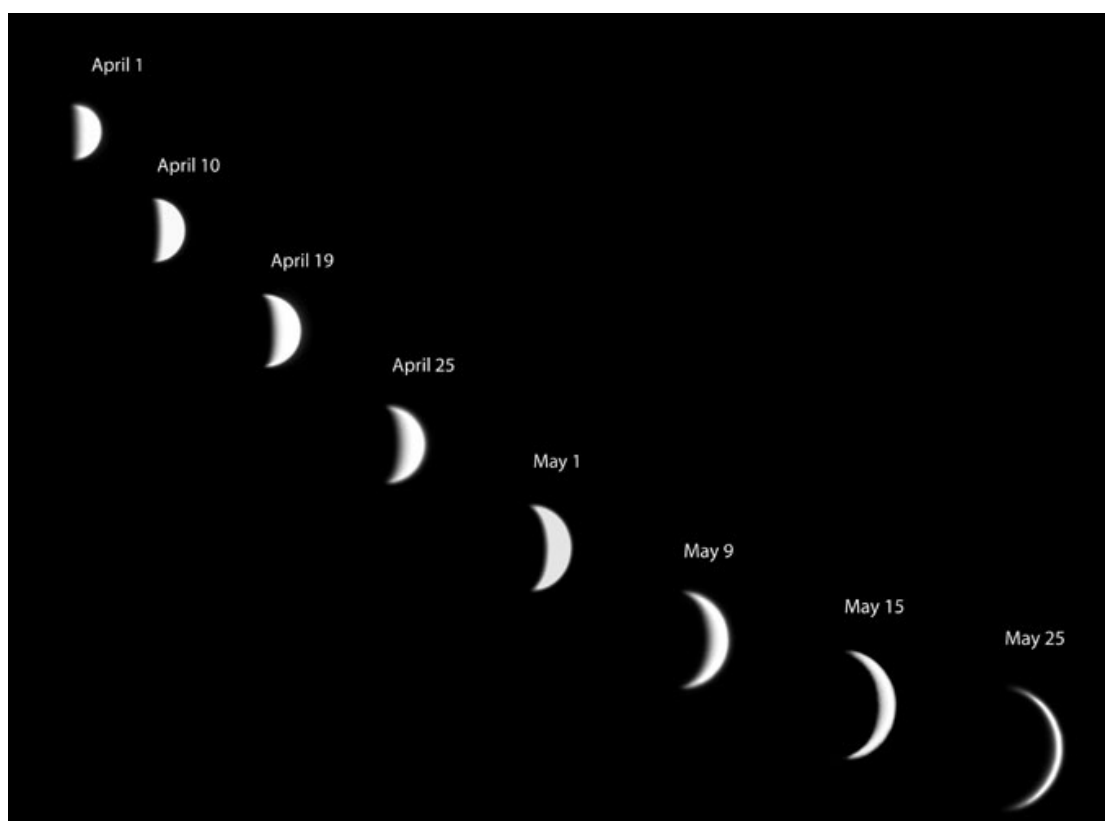
Planety na hvězdném nebi

Jen zkušený znalec hvězdného nebe už při letmém pohledu pouhýma očima na oblohu rozezná, která z jasných „hvězd“ je ve skutečnosti planetou. Nám k rozpoznání postačí několik jednoduchých pravidel. Především: planety budeme hledat jen v *těsném okolí ekliptiky*, jinde být nemohou. Víme též, že planety *svítí klidným světlem*. Je tomu tak proto, že planety jsou plošné zdroje světla, i když žádnou z nich pouhým okem jako kotouček nevidíme. Každý bod této plošky sice bliká podobně jako hvězdy nízko nad obzorem, neboť světlo ovlivňují nestejnorození zemské atmosféry, ale takových bodů je v plošce víc. Změny jasnosti jednotlivých bodů nastávají v různých okamžicích nezávisle na sobě, takže výsledkem je téměř klidné, neměnicí se světlo planet.

Nicméně nejspolehlivějším způsobem identifikace je sledování *poloh planet mezi hvězdami* v průběhu týdnů a měsíců – každá planeta neustále mění svou polohu mezi hvězdami a tím ji spolehlivě odlišíme od hvězd ¹⁾).

Jitřenky, Večernice a ty další

Nyní si planety roztřídíme. Způsobů třídění je mnoho, my si je však rozdělíme jen do dvou skupin. První budou tvořit planety *vnitřní*: sem patří Merkur a Venuše, obě tělesa se nacházejí uvnitř zemské dráhy. Všechny ostatní planety pak tvoří skupinu planet *vnějších*. Sám název napovídá, že sem spadá Mars a další planety, ještě vzdálenější od Slunce.



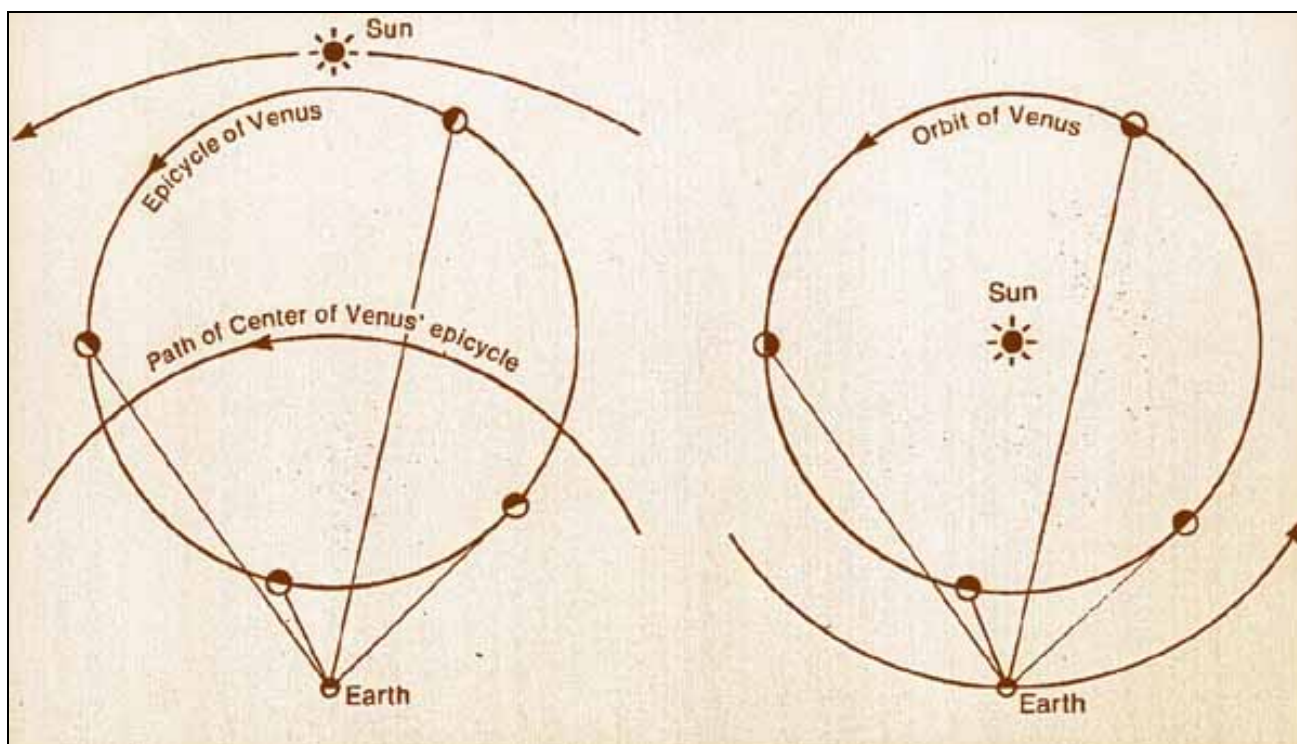
Fáze Venuše, jak je během dubna a května 2004 zaznamenal John Rummel.

¹⁾ Drobné doplnění: slovo *planeta* je řeckého původu – *planétés* znamená tulák, kolem bloudící. Jak známo, planety se na hvězdné obloze pohybují často velmi nerovnoměrně a jakoby bezcílně, proto je onen název velice příhodný.

1. Astronomické zoo

Proč právě takové třídění? Skupiny se navzájem liší tím, kdy tyto planety můžeme ze Země pozorovat. Zatímco vnitřní planety jsou vidět jen zrána nebo zvečera (vzpomeňte, že Venuši podle toho říkáme Jitřenka nebo Večernice), vnější planety jsou viditelné třeba i o půlnoci. Navíc u vnitřních planet můžeme v dalekohledu rozeznat zřetelné *fáze* od novu až po úplněk, což u vnějších planet nenastává.

Fáze Venuše objevil Galileo Galilei v roce 1610. Tvrdí se, že kdyby Venuše a Slunce obíhaly kolem Země, jak to vyžaduje geocentrická soustava, ke střídání fází by nedocházelo. Pohledem na následující obrázek sami můžete rozhodnout, zda toto tvrzení je či není správné.



V Ptolemaiově soustavě se Zemí v centru (vlevo) se Venuše pohybuje vždy mezi Zemí a Sluncem, takže nikdy neuvidíme zcela osvětlený kotouček této planety. V Koperníkově systému (vpravo) Venuše ukazuje všechny své fáze, podobně jako Měsíc.

1. Astronomické zoo



Každá myšlenka je vržení kostek.

Stéphane Mallarmé, básník (1842 – 1898)

otázky a příklady

Otázka 1.2.1. Pojmenujeme-li fáze Venuše podobně jako měsíční (nov, první čtvrt,...), v jaké fázi bude tato planeta, bude-li od Země nejdále? Můžeme Venuši v tu dobu pozorovat?

Otázka 1.2.2. Kolikrát více (přibližně) slunečního záření dopadá na čtvereční metr plochy Země (kolmé na směr šíření slunečních paprsků) než na čtvereční metr plochy Marsu?

Otázka 1.2.3. Mění-li Mars svůj úhlový průměr od 13" do 26", v jakém poměru se mění vzdálenost Marsu od Země? a) v poměru $26:13 = 2:1$; b) v poměru $(26:13)^2 = 4:1$.

1. Astronomické zoo



čítanka

Zdeněk Pokorný: Falešný důkaz

Historikové uvádějí, že první pozorování fází Venuše pochází od slavného Galilea Galileiho, který je sledoval dalekohledem. Nu budiž – jsou sice jedinci, kteří prý fáze Venuše vidí pouhýma očima, nicméně nikdo před Galileim o tom nezanechal zprávu, natož vysvětlení.

Galilei byl ovšem prvním učencem, který si zasluhuje označení vědec. Postupoval totiž stylem moderního vědce: nejdříve si sám sestrojil přístroj (dalekohled), pozoroval s ním a výsledky svých výzkumů zveřejnil. V tomto případě byly výsledky publikovány způsobem neobvyklým, ale jen z našeho dnešního pohledu. Podle středověkého zvyku bylo předběžné sdělení zašifrováno do latinského anagramu, neboť autorovi se nezdály výsledky pozorování ze září roku 1610 ještě definitivní a zralé široké publicity.

Rozšifrovaný rébus oznamoval (volně přeloženo), že *planeta Venuše jeví fáze podobně jako Měsíc*. Tvrzení, které ve své době pozornost bezesporu zasluhovalo.

Proč? Byla to doba, kdy Ptolemaiov geocentrický systém dostával vážné trhliny. Nemělo být správné to, co se po staletí považovalo za zcela zřejmé. Středem vesmíru neměla být Země, kolem níž by postupně obíhaly Měsíc, Merkur, Venuše, Slunce, Mars, Jupiter a Saturn; středem všeho mělo být Slunce, zatímco Zemi byla přisouzena role pouhé planety, jedné z mnoha dalších. Šlo o změnu nejen geometrickou: rodila se nová fyzika, neboť ta stará – aristotelská – již nestačila. Tento revoluční převrat v pohledu na svět, dnes právem spojovaný se jménem Mikuláše Koperníka, potřeboval důkazy. Jedním z nich měla být právě pozorování fází Venuše. A tak se leckde dočteme, že Galileiho objev fází Venuše byl pádným důkazem ve prospěch heliocen-

Schema huius praeiiffae diuiffionis Sphaerarum .

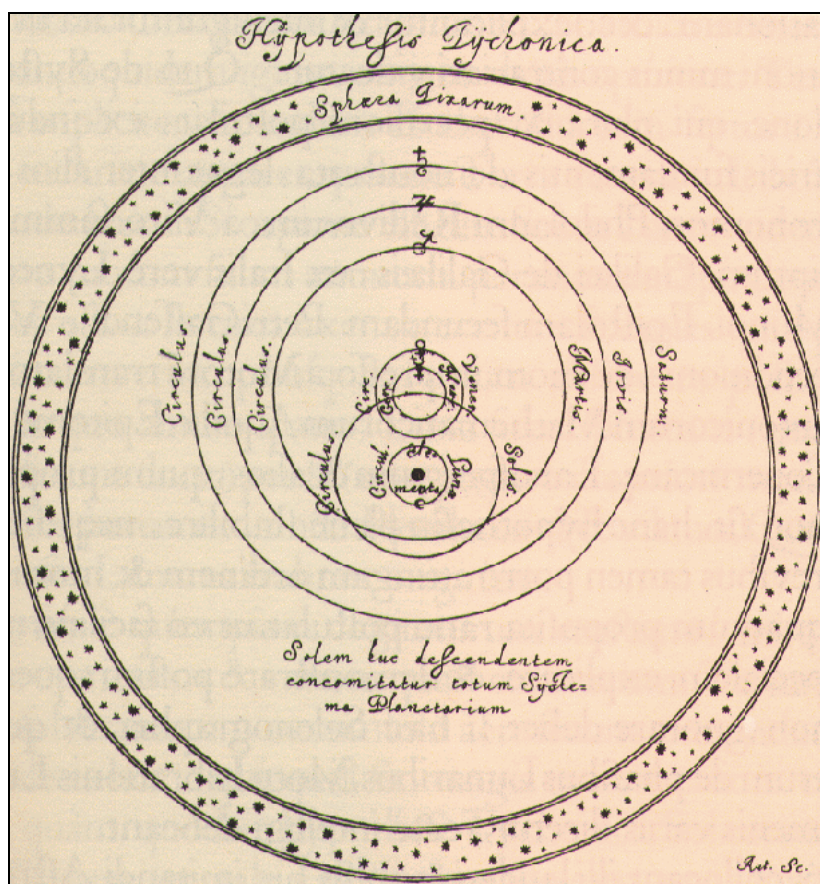


1. Astronomické zoo

trického systému. Jako by ve starém Ptolemaiově Venuše fáze mít neměla. To je přinejmenším nepřesné, vidíte?

Již při letném pohledu na Ptolemaiov model sluneční soustavy se Zemí uprostřed je zřejmé, že Venuše by fáze jevit měla. Protože však Venuše byla svou polohou vázána na Slunce tak jako ve skutečnosti, nemůžeme ze Země vidět fáze všechny. Úhlová vzdálenost mezi Venuší a Sluncem nikdy nepřevyšší 47 stupňů, takže Venuše by mohla mít tvar úzkého srpku – střídavě na jednu i druhou stranu vypuklého – ale nikdy ne tvar čtvrti či dokonce úplňku. Jestliže Galilei pozoroval všechny fáze od úzkého srpku až po téměř celý kotouček, pak to opravdu bylo v rozporu s Ptolemaiovým modelem.

Ale co tak model konkurenční – Tychonův? Vynikající astronom-pozorovatel Tycho Brahe ve snaze využít výhod Koperníkova heliocentrismu, ale ponechat nehybnou Zemi, přišel s kompromisní představou: planety Merkur, Venuše, Mars, Jupiter a Saturn obíhají sice kolem Slunce, ale Měsíc a Slunce (s celou družinou planet) jsou nuceny obíhat kolem Země. Jak je to zde s fázemi Venuše?



Od Ptolemaiova uspořádání sluneční soustavy (obrázek na str. 1) se model Tychona Brahe vyznačuje tím, že Země je v centru vesmíru, kolem ní obíhá Měsíc a Slunce, a kolem Slunce pak další planety.

Po krátkém zamyšlení dojdete jistě k závěru, že v tomto případě se situace nijak neliší od Koperníkova heliocentrického modelu. I v modelu Tychonově bude Venuše ukazovat všechny fáze od srpečku až po úplněk, navíc tak, jak má být ve skutečnosti: úzký srpek bude úhlově větší než celý kotouček, neboť v době kolem novu bude Venuše blíže k Zemi než v období kolem úplňku. Inu, s důkazy to nebývá snadné, zvláště, mají-li být jednoznačné za všech okolností.

Úryvek z knihy *100+1 záhadných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).

1. Astronomické zoo



speciální otázka

Vyznáte se na Měsíci?

Není to tak snadné, vyznat se na Měsíci – podobně jako při cestě cizím městem. I když si myslíte, že nemůžete „zabloudit“, bez dobré mapy se často neobejdete. Možná ji budete potřebovat i nyní. Naše úloha je však jednoduchá: uvádíme v abecedním pořádku názvy pěti výrazných kráterů na Měsíci. Když je seřadíte tak, jak se postupně objevují pozorovatelé v době *od novu k úplňku*, pak *první* písmena napsaná za sebou dávají jméno dalšího kráteru o průměru 90 km, který se nachází v severovýchodní části přivrácené strany Měsíce. Zde jsou jména oněch pěti kráterů: *Aristarchus, Aristoteles, Longomontanus, Schickard, Tycho*.



Foto: A. Cidadao.



čítanka

Petr Jakeš: Langrenův omyl

Psal se rok 1645, když byla v belgickém městě Bruselu uveřejněna první mapa Měsíce. Vyšla z tiskárny slavného rodu tehdejších kartografů a tiskařů map van Langrenů. Jejím autorem byl M. F. van Langren – latinsky nazývaný prostě Langrenus. Na mapě se objevila i jména měsíčních útvarů, jména charakterizující tehdejší dobu i Langrenův poměr k okolnímu světu. Téměř vše z této mapy je dnes již zapomenuto – a bylo zapomenuto velice brzy potom, co mapa vyšla. Jména králů, vládců i princezen, i jména Langrenových současníků a přátel. Přišli totiž jiní tvůrci map, jiní tiskaři a kartografové. Jména panovníků bylo třeba vyměnit. To jediné, co se uchovalo z Langrenových pojmenování, byl velký omyl, a právě tento archaický omyl způsobil později mnoho zmatků.

Langrenus, tak jako jeho současníci a předchůdci a později ještě celé generace badatelů, věřil, že tmavé skvrny, které vidíme na Měsíci i pouhým okem, jsou moře a oceány. Neměli bychom z tohoto omylu nikoho vinit, protože podoba tmavých skvrn i jejich tvary jsou natolik sugestivní, že se analogie s pozemskými oceány musela objevit. Kdyby to neudělal Langrenus, byl by tuto podobnost zdůraznil každý z následujících pečlivých pozorovatelů a přírodovědců.

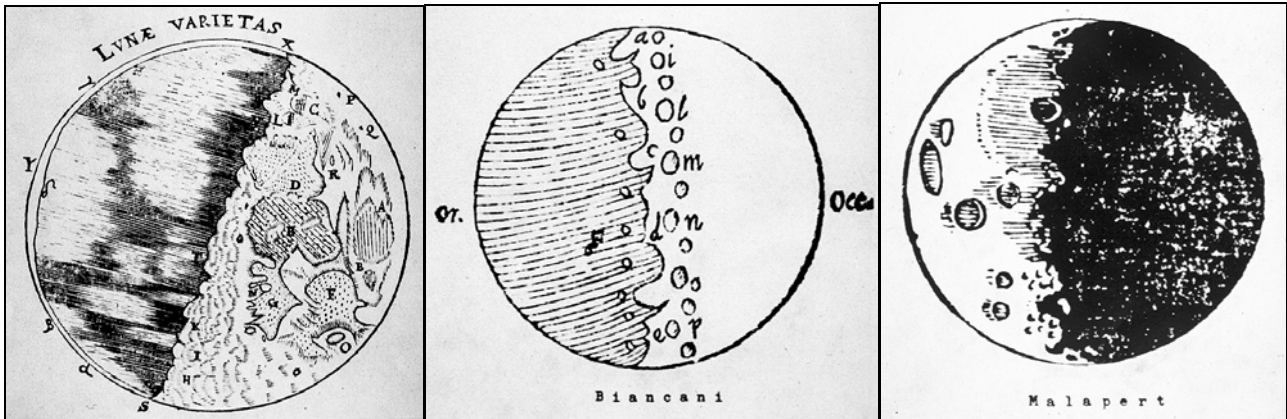
Protože vynález dalekohledu otevřel v první polovině sedmnáctého století nové průhledy do vesmíru, byly objeveny kromě měsíčních moří i měsíční pevniny a hory. Je to zcela přirozené. Protipólem moří a oceánů jsou přece pevniny s horami. Pojmenování měsíčních hor se mohou zdát velice nevynalézavá, neromantická, vlastně jen okopírovaná z pozemských: Alpy, Apeniny, Pyreneje, Karpaty, ale jejich tvůrci Heveliovi zněla jistě alespoň tak romanticky, jako nám zní Tahiti, Havaj nebo Společenské ostrovy. Je to trochu ironie osudu, že většinu měsíčních pohoří pojmenoval člověk, který žil stovky mil vzdálen od nejbližších horských krajin, na pobřeží Baltského moře, gdaňský astronom Hevelius. Ve srovnání s Langrenovými jmény podle panovníků byla Heveliova nepolitická pojmenování dvojnásob šťastná. Ujala se a nebyla zapomenuta, a navíc nedošlo k žádným větším omylům jako v případě Langrenově. Hory na Měsíci jsou – a dokonce se podobají Alpám, Apeninám či Karpatům; ne sice svým vznikem, ale aspoň svou výškou – nechybějí tu dvoutisícovky ani třítisícovky. Chybí tu jen mořská hladina.

Většinu měsíčních jmen, která dnes používáme, však vymyslel italský jezuita Giovanni Riccioli ¹⁾; ten zhotovil jinou mapu Měsíce již v roce 1651, tedy pouhé čtyři roky po Heveliovi. Riccioli byl zřejmě velmi vzdělaný jezuita, žádný suchopár, a vybral pro měsíční útvary jména jak se sluší a patří na vzdělaného básní-

¹⁾ Čti: *džovany ričiolí*.

1. Astronomické zoo

ka, a ač jsou původně latinská, i v češtině znějí velice poeticky: Moře dešťů, Oceán bouří, Moře klidu, Moře úrodnosti, Moře krizí, Moře par, Moře mraků, Jezero snů, Moře chladu, Duhový záliv. Jiná jména zvolená Ricciolim připomínají významné učence, např. nejstarší učence z období antiky, jako jsou Ptolemaios, Plinius, Plutarchos, Eukleidés nebo Thalés. Jména Vasco da Gama, Tycho, Kepler nebo Koperník prozrazují Riccioliho poměr k bádání a objevům.



Kresby Měsíce, pořízené Scheinerem (1614), Biancanim (1620) a Malapertem (1619).

Mýtus přítomnosti vody na Měsíci přežíval velmi dlouho. Nepomohly ani silné a ještě silnější dalekohledy, objevující se postupně v následujících třech stoletích. Snad to bylo vlivem krásných, poetických jmen, která Riccioli vymyslel, snad to bylo i vztahem lidí k vodě, ale názor, že na Měsíci existuje moře, se udržoval mezi přírodovědci dlouhou dobu, a mezi méně informovanou veřejností se udržuje dodnes. Možná že i skutečnost, že voda je právě „životabudící“ element, tento názor dostatečně živila. Vždyť Měsíc bez vody znamená i Měsíc bez života, a Měsíc bez života je vlastně nezajímavé, pusté a nevhledné těleso. Bude-li Měsíc bez vody, lidské představivosti se ulomí křídla. Názvy však přežily, a tak zůstalo moře mořem i se všemi představami, které jsou s ním spjaty.

Ukázka z knihy *Létavice a lunatici* (Mladá fronta, Praha 1978).

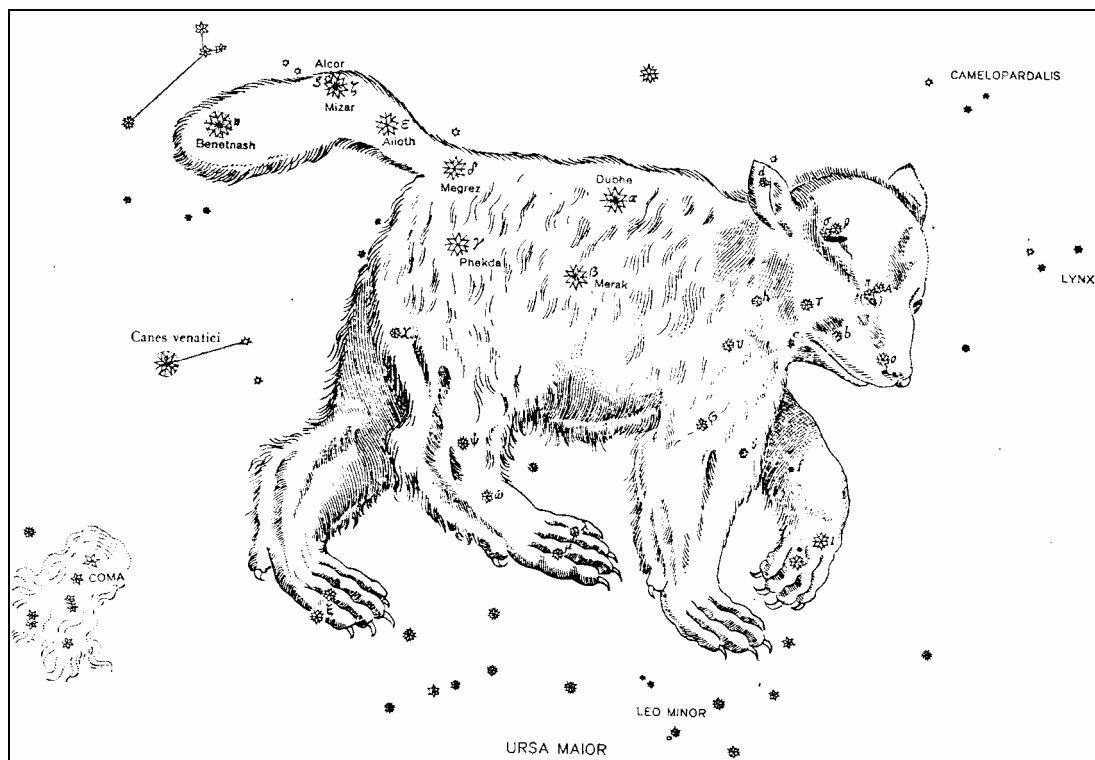
1.3. Noční nebe: hvězdy a souhvězdí

Začněme „inventurou“ toho, co můžeme z hvězdného světa pozorovat pouhými očima na hvězdném nebi. I když nebudeme uvádět desítky vlastních jmen nejjasnějších hvězd ani seznam všech 88 souhvězdí, právě o tyto hvězdy a souhvězdí nyní půjde.

Co jsou hvězdy, a co souhvězdí?

Neobávejte se příliš složitých definic. *Hvězdy* jsou samostatná kulová tělesa o hmotnostech 0,05 až 60 hmotností Slunce, která udržuje pohromadě vlastní gravitace. Na hvězdné obloze jich pouhými očima spatříme několik tisíc.

Pro snazší orientaci byla na nočním nebi vytvořena souhvězdí. V dnešním pojetí představuje souhvězdí určitou část hvězdné oblohy, vymezenou přesně hranicemi. Návrh hranic vypracoval pro Mezinárodní astronomickou unii v roce 1930 Eugene Delporte ¹⁾, když v nezbytné míře respektoval situaci, která se vytvořila historicky. Hranice souhvězdí jsou tak obdobou hranic států, včetně jejich složitých tvarů. Celá hvězdná obloha je rozdělena do 88 souhvězdí.



Souhvězdí Velké medvědice v atlasu *Uranometria* Johanna Bayera ze 17. století.

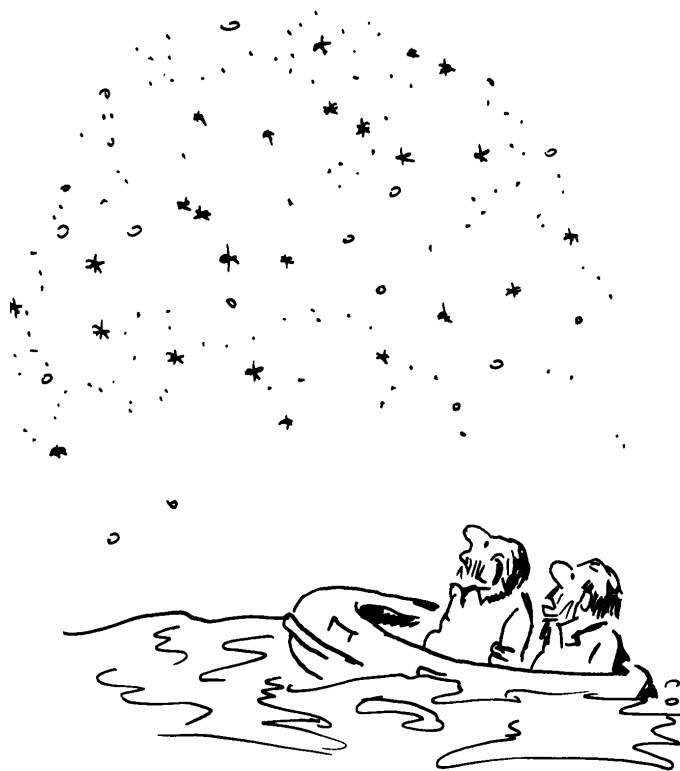
¹⁾ Čti: ežen delpórt.

1. Astronomické zoo

<i>Souhvězdí:</i>	<i>Rozloha ve čtverečních stupních:</i>
Hydra	1303
Panna	1294
Velká medvědice	1280
Velryba	1230
Šíp	80
Koníček	72
Kříž (Jižní kříž)	68

Poznámka: celá hvězdná obloha zaujímá přibližně 41 250 čtverečních stupňů ²⁾.

Zdá se, že starověcí hvězdáři nejdříve jednotlivé hvězdy pojmenovali a teprve potom některé z nich pospojovali do obrazců, vzdáleně připomínajících nějaký předmět, zvíře či mytologickou bytost. Ve svém díle *Almagest* alexandrijský astronom Klaudios Ptolemaios (2. století n. l.) uvádí 48 souhvězdí, nám dnes většinou dobře známých. Prázdná místa a oblast kolem jižního pólu rozparcelovali pak středověcí astronomové.



TAK - A TEĎ SE POKUS NAJÍT NĚCO,
CO VYPADÁ JAKO NĚJAKEJ VŮZ NEBO PES

(Podle *Mercury* Jan./Feb. 1979, 21)

²⁾ Viz otázka 2.1.26.

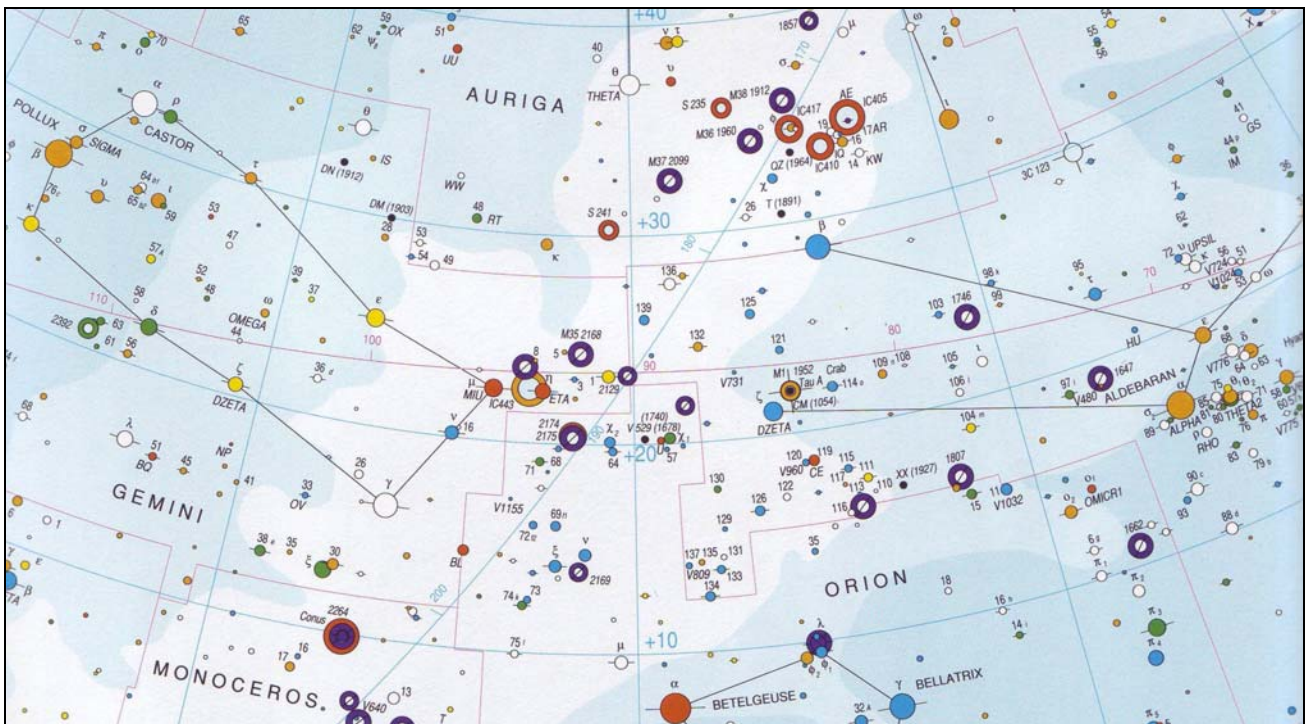
1. Astronomické zoo

Rozmach astronomie v renesanci zaznamenal i vlnu přejmenování (když se kupříkladu někteří chtěli zavděčit svým mecenášům zanesením jejich jmen do hvězdné mapy), jiní astronomové požadovali úplné zrušení souhvězdí. Nakonec přece jen zvítězila tradice, takže používáme většinou starověké historické názvy. Daní za to je však složitost, se kterou se potýkají nejen mladí adepti astronomie, ale i profesionálové.

Označování hvězd

Je dost komplikované, což ale jistě pochopíme, neboť se utvářelo v průběhu dlouhých věků, kdy způsob označování hvězd nikdo nereguloval. Starými historickými jmény je označena sotva stovka nejjasnějších hvězd (Sirius, Vega, Deneb...). Jasně hvězdy běžně označujeme malými písmeny řecké abecedy, ke kterým přidáváme jméno souhvězdí (nejčastěji je to třípísmenná zkratka latinského názvu souhvězdí nebo latinský název souhvězdí ve 2. pádu jednotného čísla – např. δ Cyg nebo δ Cygni, ϵ UMA apod.). Hvězdy viditelné pouhým zrakem často mívají také malé písmeno latinské abecedy (a, b, ...) nebo číslici (51 Pegasi apod.). Hvězdy také bývají nazvány podle svého objevitele (např. Lalande 21185, Ross 154, Barnardova hvězda...) nebo katalogu, ve kterém jsou uvedeny (HD 5513³). Existují desítky rozsáhlých katalogů hvězd a stovky katalogů specializovaných.

V žádném případě neexistuje možnost nechat si „pojmenovat hvězdu“ svým či jiným jménem, jak nabízejí některé agentury. Je to zcela podvodná záležitost a astronomická komunita taková označení nikdy nebrala v úvahu a jistě ani v budoucnu brát nebude.



Ukázka Mapy oblohy 2000.0 (O. Hlad et al., Praha 1995)

³) HD značí hvězdy z katalogu nazvaného *Henry Draper Catalogue* (čti: *henry drejpr katalog*).

Je třeba znát všechna souhvězdí?

Souhvězdí je celkem 88. Někteří si jistě myslí, že by každý adept astronomie měl znát *všechna* souhvězdí nazpaměť (možná by je měl vyjmenovat v abecedním pořádku, možná jinak). Zda by je měl umět také vyhledat na noční obloze, v tom již tak kategorický bývá jen málokdo. Buďme realisty: biflovat se 88 názvů česky, latinsky a k tomu latinské 2. pády mnoho užitku nepřinese – platí zde: lehce nabyt, lehce pozbyl. Smysluplné je jen postupné prohlížení nočního nebe s atlasem v ruce, a v případech jižních souhvězdí, která od nás nejsou pozorovatelná, pak jen studium map, atlasů a snímků se zajímavými objekty. Po čase bychom měli bezpečně rozeznat, která souhvězdí doopravdy existují a která nikoli (platí to zejména pro jižní souhvězdí).

Totéž, co zde uvádíme o souhvězdích, platí také o hvězdách, případně dalších objektech. Pro astronoma rozhodně není žádnou hanbou, když dost často nahlíží do hvězdných map, atlasů či různých seznamů hvězd. Horší by bylo, kdyby sice dokázal ze sebe vychrlit jména hvězd a souhvězdí, ale netušil by, kdy a kde je může spatřit na skutečné obloze.

1. Astronomické zoo



Největší chybou je – nebýt si vědom žádné chyby.

Thomas Carlyle, spisovatel (1795 – 1881)

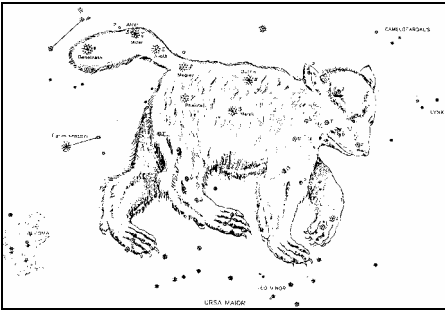
otázky a příklady

Otázka 1.3.1. Může se stát, že některá hvězda *nepatří* do žádného souhvězdí?

Otázka 1.3.2. „Jestliže zvečera je ocas Velké medvědice namířen k východu,“ napsal čínský mudrc Ho-Koan-Tse ve 4. století n. l., „nastává jaro. Je-li ocas namířen k jihu, je léto, míří-li na západ, bývá podzim. Jestliže ocas směřuje na sever, v přírodě je zima.“ Platí toto tvrzení i pro naše kraje?

Otázka 1.3.3. Které (či která) souhvězdí *neexistuje(-i)*? a) Jednorožec; b) Nosorožec; c) Moucha; d) Komár.

1. Astronomické zoo



citát

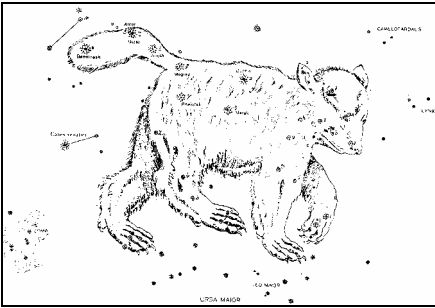
My, jednotlivci, vidíme vesmír pouze tak, jako vidí poutník v noci krajinu, ozářenou bleskem. Byla tu dávno předtím, a bude zde dlouho potom, co se nad ní temnota zavře. Ten záblesk je tak krátký, že po tu chvíli, co trvá, nerozeznáme v krajině žádné změny. Přesto však víme, že krajina beze změny není. Kdybychom ji osvětlili něčím méně pomíjivým než je blesk, viděli bychom ji jako věčně se měnící obraz růstu a zanikání.

James Jeans ¹⁾, britský astrofyzik první poloviny 20. století



¹⁾ Čti: džejmz džíns.

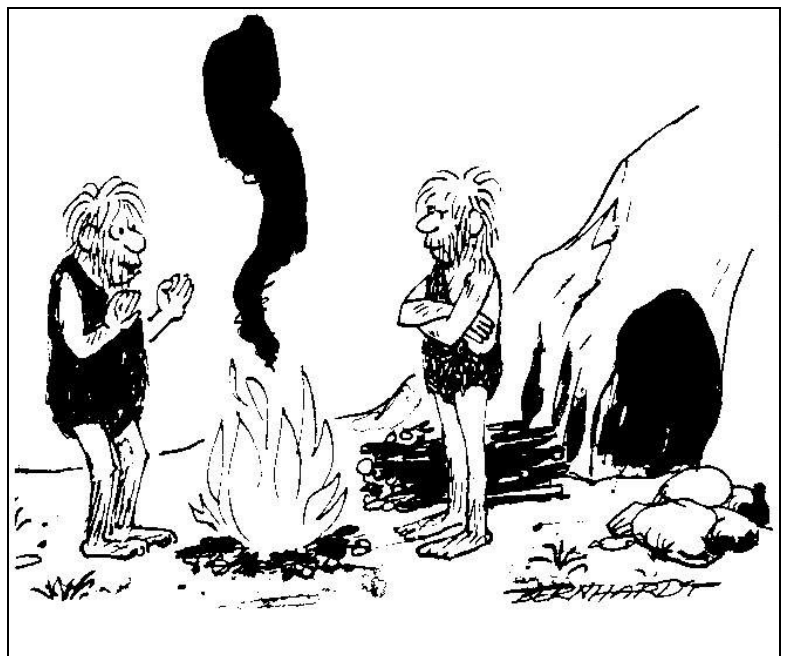
1. Astronomické zoo



rady a „drobnosti“

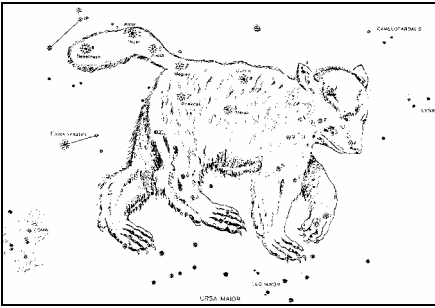
Výslovnost latinských slov

Pro astronoma je moderní latinou sice angličtina, ale co naplat, latinské názvy souhvězdí se musí naučit správně vyslovovat každý adept astronomie. Takže jen stručně: souhláska **c** se před e, ae, oe, i, y vyslovuje jako české **c**, tedy Cygnus [cy-], Atlas Coeli [cé-]. Jinak se vyslovuje jako **k**: Carina [ka-], Crux [kr-]. Dvojhlásku **ph** čteme jako **f**: Cepheus [-efe-]. **D, t, n** se vyslovují vždy tvrdě: Canis [-ny-], s čteme vždy jako **s**: Mensa, Perseus. Pravidla latinské výslovnosti jsou samozřejmě rozsáhlejší, ale to už musíme odkázat zájemce přímo na učebnici latiny.



Bezva vynález, ale – jak to zabalíme?

1. Astronomické zoo



čítanka

Zdeněk Pokorný: Miliardy hvězd na obloze

Kolik hvězd vidíme na obloze pouhýma očima, jestliže je průzračně tmavá noc bez měsíčního svitu? Připusťme, že miliardy uvedené v názvu to nejsou, ale statisíce či miliony...? Vždyť se díváme na hotovou záplavu hvězd, zvláště poblíž Mléčné dráhy!



Kopule čtyřmetrového teleskopu na observatoři Cerro Tololo (Chile) s Mléčnou drahou a Magellanovými oblaky v pozadí (toto není složený snímek!). Foto: Roger Smith/NOAO/AURA/NSF.

1. Astronomické zoo

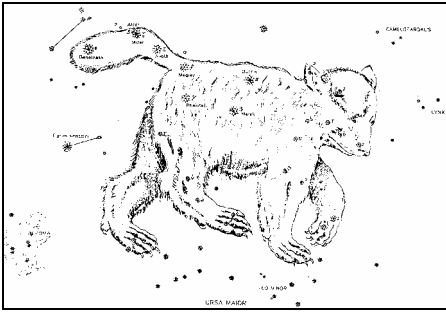
Je možné dojít jednoduchými prostředky k nějakému určitějšímu odhadu? Sčítat hvězdu po hvězdě? Pročpak by to nešlo!? Překonáme-li počáteční nechuť pustit se do takové na první pohled nekonečné práce, zjistíme, že je to snazší, než bychom očekávali.

Hvězd, které na *celé* hvězdné obloze lze spatřit za běžných pozorovacích podmínek pouhýma očima, je pouze čtyři až pět tisíc. Lidé s výborným zrakem uvidí asi 6000 hvězd, a toto číslo obvykle najdeme v astronomických příručkách. Když tedy uvážíme, že vždy hledíme jen na polovinu hvězdné oblohy, neuvidíme na ní více než dva až tři tisíce hvězd. Naše představa o obloze plné hvězd je opravdu klamná, vždyť v oblasti o ploše téměř 40 úplňků Měsíce se v průměru vyskytuje jedna jediná hvězda viditelná pouhýma očima! Vasilij J. Struve, zakladatel Pulkovské hvězdárny, napsal v „Etudách hvězdné astronomie“ (1847), proč jsou odhady laiků tak přemrštěné: „*Je to dáno částečně tím, že hvězdy jsou na obloze rozmístěny nepravidelně a neexistují zde nějaké hranice. Svůj podíl má však i způsob, jakým se vzhled hvězdné oblohy přenáší do našich představ.*“

Pozorujeme-li dalekohledem, je situace ovšemže jiná. Počet hvězd, jež můžeme vidět malými dalekohledy (například triedrem), je mnohonásobně vyšší, než je množství hvězd dostupných pozorování bez dalekohledu: odhadem je jich na 200 000. A tento počet naroste na miliony až desítky milionů, použijeme-li k prohlídce hvězdné oblohy středně velký dalekohled.

Z knihy *Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru* (Svoboda, Praha 1988).

1. Astronomické zoo



čítanka

Zdeněk Mikulášek: Proč nevidíme ve dne hvězdy?

Hvězdičky svítí celičkou noc a pak, když nadejde den, jsou už tak unavené, že se jim začnou klížit očička a jdou na kutě. Hned po setmění se ale budí, aby opět celou noc pěkně svítily ... S touto pohádkou vystačíme jen u hodně malých dětí. Jaká je však správná odpověď?

Hvězdy jsou velice samostatnými objekty, které si rozhodně nedají mluvit do toho, kdy mají či nemají svítit. Září přirozeně i ve dne, na denní obloze. Proč je tedy nevidíme? Prostě proto, že si jich nevšimneme.

I když je obloha úplně čistá, doslova vymetená, silně září rozptýleným slunečním světlem. V běžný sluneční den přichází 80 procent světla od Slunce a 20 procent z oblohy. Čtvereček oblohy o rozměrech 1 úhlové minuty září stokrát více než dejme tomu Vega, Arktur nebo Kapella. A jedna úhlová minuta – to je nejmenší úhel, pod kterým jsme ještě schopni pouhýma očima rozlišit dva světelné zdroje. V takové záplavě rozptýleného světla se i tak kontrastní zdroje světla, jimiž hvězdy jsou, docela ztratí. Navíc – lidské vidění se ve dne přizpůsobuje velkému přídělu světla – citlivost oka se oproti nočnímu režimu zmenší tisíckrát. Oko se ve dne přepne na jiný rozsah.

Je tu ještě jeden moment, daný tím, že člověk vidí ostře a zřetelně jen v rozmezí několika stupňů. Chce-li si něco prohlédnout důkladně, musí zamířit svůj zrak přímo tam. Hledat očima něco, co na sebe neupoutá pozornost okamžitě, je úmorná, vyčerpávající a mnohdy zcela marná práce. Týká se to třeba vyhledávání jasných hvězd či planet na soumrakovém nebi. Víte, že už teď by něco mělo být vidět, ale nevidíte nic. Prohlížíte-li oblohu velmi důkladně, doslova píď po pídi, máte jistou šanci, že na hledanou hvězdu narazíte. Najednou ji vidíte na-



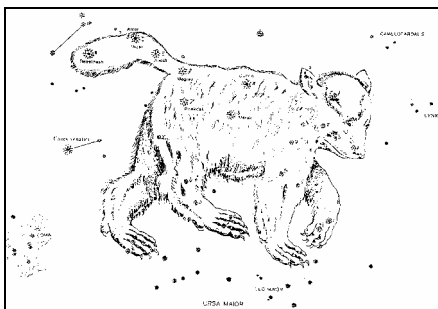
1. Astronomické zoo

prosto jasně a zřetelně. Jako by ji tam někdo právě teď rozsvítil. Ale zkuste se podívat někam jinam, zase ji ztratíte. Obloha je prostě beznadějně rozlehlá a pokud jsou hvězdy vůči svému pozadí nenápadné, postřehneme je jenom s potížemi.

Chcete ve dne spatřit hvězdy? Pořídte si řádně zvětšující dalekohled, který podstatně zvýší vaši rozlišovací schopnost a současně sníží jas pozadí denní oblohy. Jenže ani dalekohledem neuvidíte ve dne jiné hvězdy, než ty nejjasnější. A už vůbec není jednoduché zamířit dalekohled přímo na některou z jasných hvězd. Pokud nevíte zcela přesně, kde se právě teď na obloze nachází, pokud nemáte k dispozici žádné opěrné body, pak je její hledání předem odsouzeno k neúspěchu. Po půlhodině planého zírání do okulárů toho necháte a počkáte si na večer.

Z knihy *100+1 záhadných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).

1. Astronomické zoo

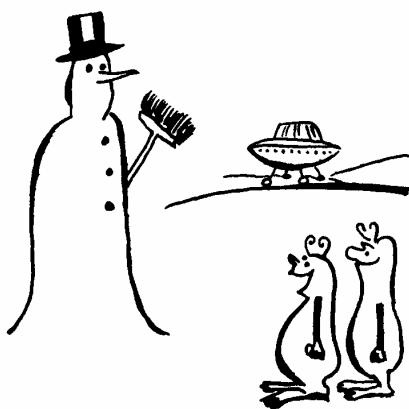


„luštěniny“

Znáte souhvězdí?

V každém sloupci je tucet názvů souhvězdí – v levém jsou latinské, v pravém české názvy. V seznamu je osm sobě odpovídajících dvojic (např. *PISCES* – *RYBY*). Najděte je a vyškrtejte. Pak vám v každém sloupci zůstane čtveřice názvů souhvězdí, které *nemají* v protějším sloupci svůj překlad. Vypišete-li **první** písmena z těchto názvů (v pořadí odshora latinský název, český název, latinský, ...), vyjde vám označení proslulé učebnice astronomie, jejímž autorem byl Klaudios Ptolemaios (2. století n. l.). Přesněji řečeno, jde o arabskou zkomoleninu řeckého názvu „Megale syntaxis“. Dílo obsahuje vše, co tehdejší doba věděla o astronomii.

AQUARIUS	LEV
CYGNUS	VOZKA
MONOCEROS	ANDROMEDA
AURIGA	OREL
AQUILA	ERIDANUS
GEMINI	LIŠTIČKA
CRUX	KŘÍŽ
SAGITTARIUS	RAK
VULPECULA	LABUŤ
CANCER	BERAN
VELA	TROJÚHELNÍK
ARIES	PLACHTY



PROMIŇTE PROSÍM! RÁDI
BYCHOM ZA PANEM DÁNIKENEM

(Podle *Sterne und Weltraum* 1/1982, 39)

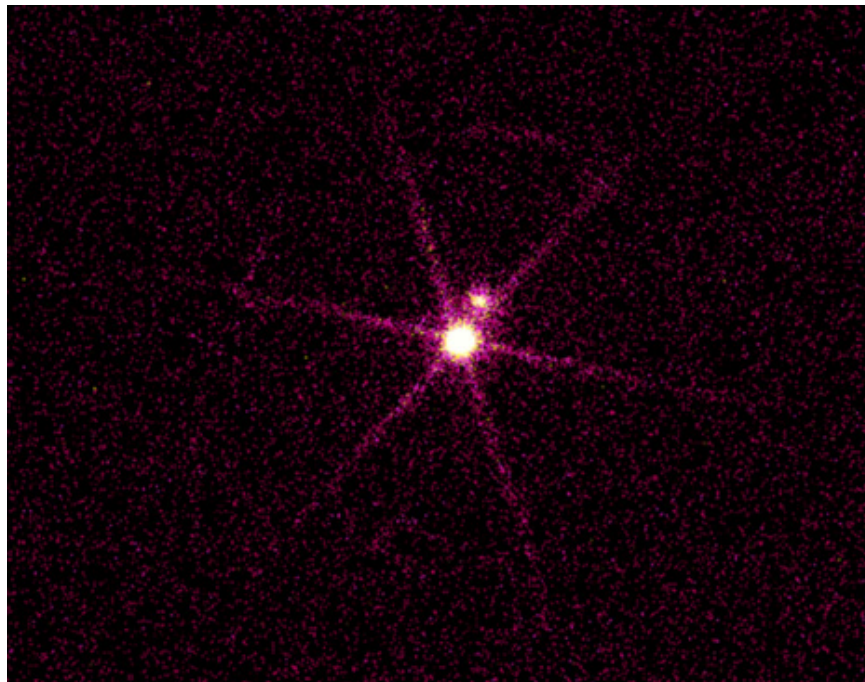
1.4. Hvězdy dvojité a nestálé stálice

Nyní máme na mysli především dvojhvězdy a proměnné hvězdy. I pouhým zrakem je jich vidět celá řada. Tento druh objektů z hvězdného světa patří mezi astrofyzikálně nejzajímavější, a proto se jimi budeme často zabývat i my.

Dvojhvězdy

Když se pozorně zadíváte na některé hvězdy, rozlišíte i pouhým zrakem dvě složky. Tvoří tedy *dvojhvězdu*. Nejznámější dvojhvězdou jsou bezesporu hvězda ζ Velké medvědice a hvězda číslo 80 ze stejného souhvězdí, běžně známé jako *Mizar* a *Alcor*¹⁾. Jde o prostřední hvězdu v oji Velkého vozu či v držadle pánve. Hvězdy dělí od sebe úhlová vzdálenost asi 12 úhlových minut.

Některé dvojice hvězd vznikají náhodně tím, že se dvě hvězdy nacházejí téměř ve stejném směru od nás, i když jejich vzdálenosti jsou přitom různé. Označujeme je jako *optické dvojhvězdy*. Mnohem častější jsou ale *dvojhvězdy fyzické*, jejichž složky jsou gravitačně vázány a obíhají kolem středu hmotnosti soustavy.



Dvojhvězda Sirius A a B na rentgenovém záběru, který pořídila 28. 10. 1999 družice Chandra. Foto: NASA/SAO/CXC.

¹⁾ Na dvojhvězdě Mizar a Alcor si můžete otestovat kvalitu vašeho zraku: vidíte-li obě hvězdy bez potíží, máte zrak v pořádku. Stačí však krátkozrakost nebo dalekozrakost jedné dioptrie a Alcor od Mizaru již neoddělíte.

1. Astronomické zoo

Je dvojhvězd mnoho?

Dvojhvězdy, které spatříme pouhýma očima, spočítáme na prstech jedné ruky. Jenže už malým dalekohledem jsou jich vidět stovky, možná tisíce. Ani tak to ovšem nejsou všechny dvojhvězdy, jež ve vesmíru existují. Do katalogů dvojhvězd je zaneseno hodně soustav, které sice nelze „rozštípnout“ na složky ani největšími dalekohledy, projevují se však nepřímo periodickými změnami ve spektrech nebo změnami jasnosti. Necht' vás proto nepřekvapí, že přibližně každých šest ze sedmi hvězd, jež se nacházejí v širokém okolí Slunce, je vázáno ve dvojhvězdách, trojhvězdách nebo vícenásobných soustavách. *Dvojhvězd je tedy opravdu hodně.*

Na každých 100 soustav hvězd připadá přibližně:

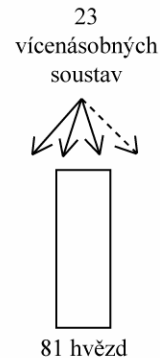
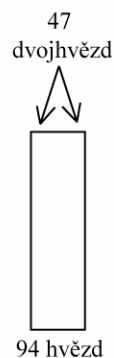
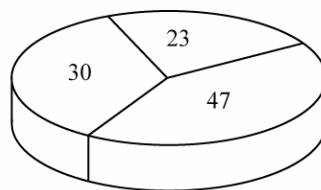
30 jednotlivých hvězd

47 dvojhvězd = 94 hvězd

23 vícenásobných hvězd = 81 hvězd

Ve stovce soustav se tak nachází asi 205 hvězd.

na každých 100 soustav hvězd připadá



ve 100 soustavách se nachází 205 hvězd

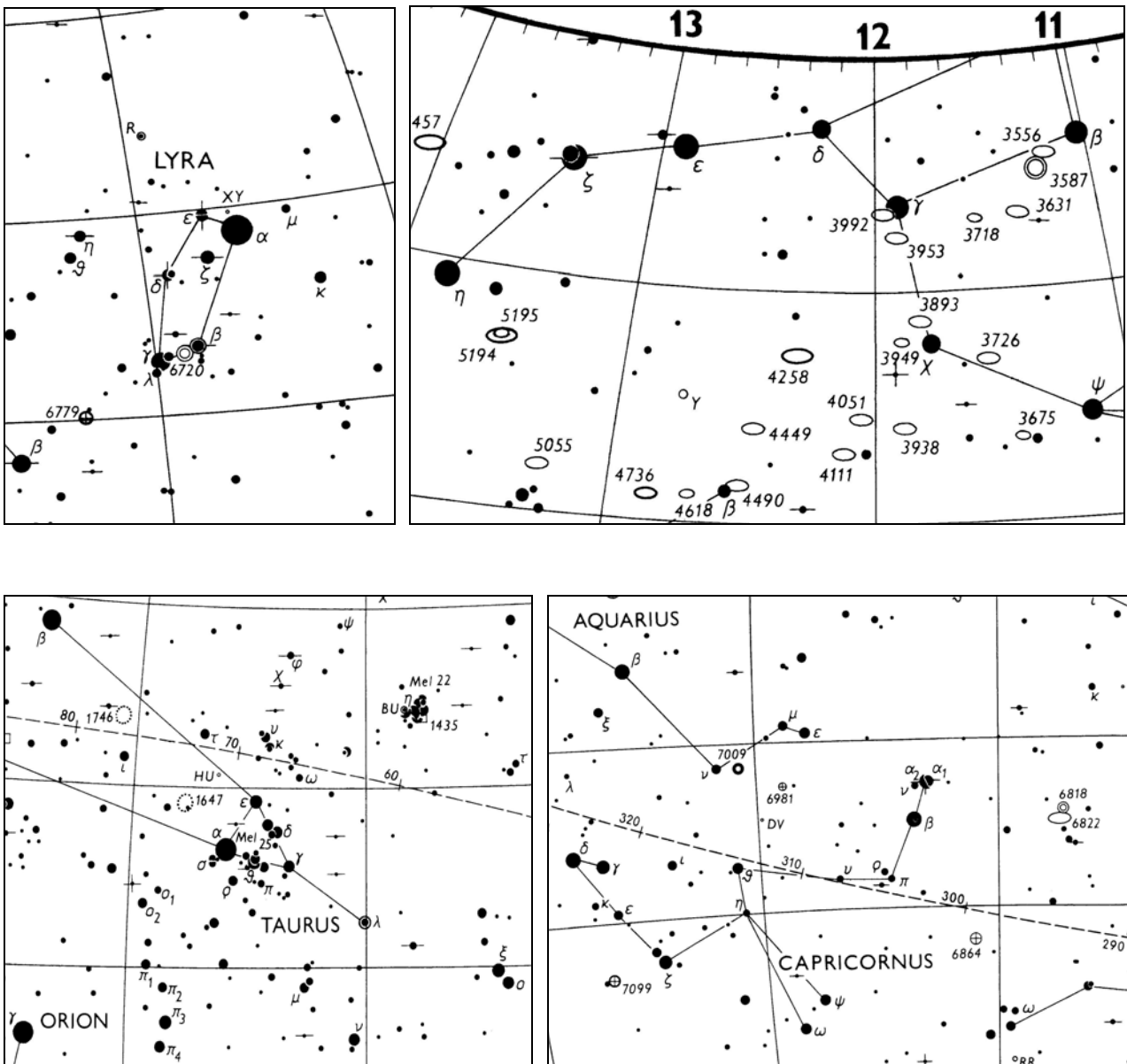
Četnost výskytu dvojhvězd.

Proměnné hvězdy

Takto označujeme hvězdy, u nichž v průběhu několika hodin až stovek dnů pozorujeme změny jasnosti. Několik desítek jasných proměnných hvězd můžeme sledovat i pouhýma očima.

Příčiny pozorovaných světelných změn bývají velmi rozmanité: například to mohou být *pulsace* hvězd (s tím jsou spojené změny povrchové teploty a tedy i množství záření, vysílaného do okolí), nebo *vzájemné zakrývání* hvězd, tvoří-li docela těsnou dvojhvězdu. Jindy je příčinou obrovský *výbuch (erupce) na povrchu* či dokonce *exploze hvězdy*. V současné době (konec roku 2005) astronomové označili téměř padesát tisíc proměnných hvězd, ale tento počet se neustále rychle zvyšuje.

1. Astronomické zoo



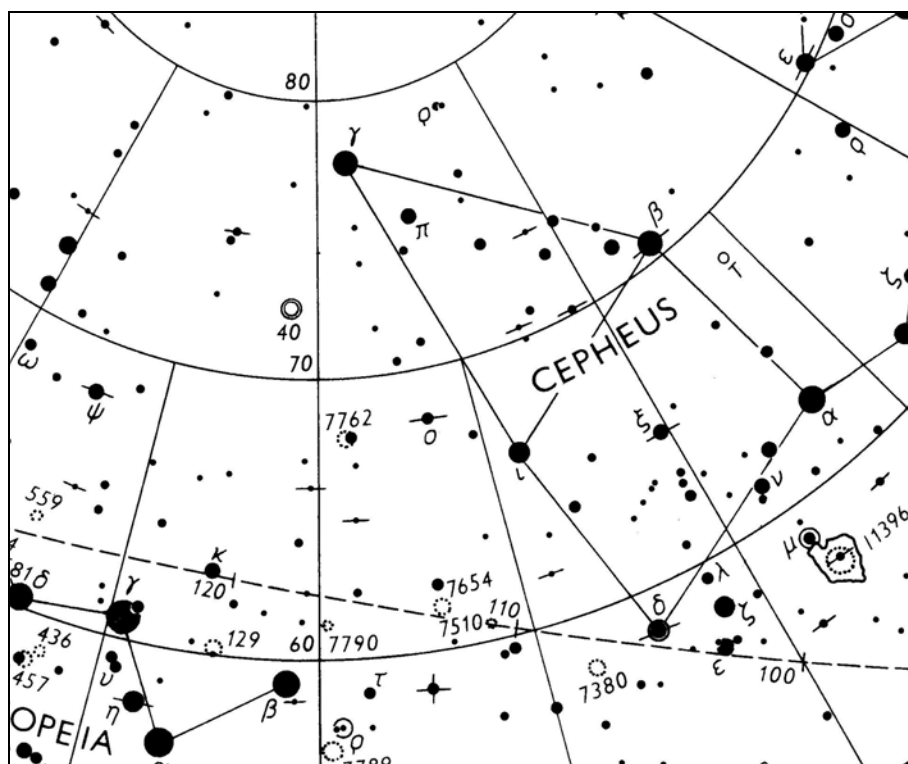
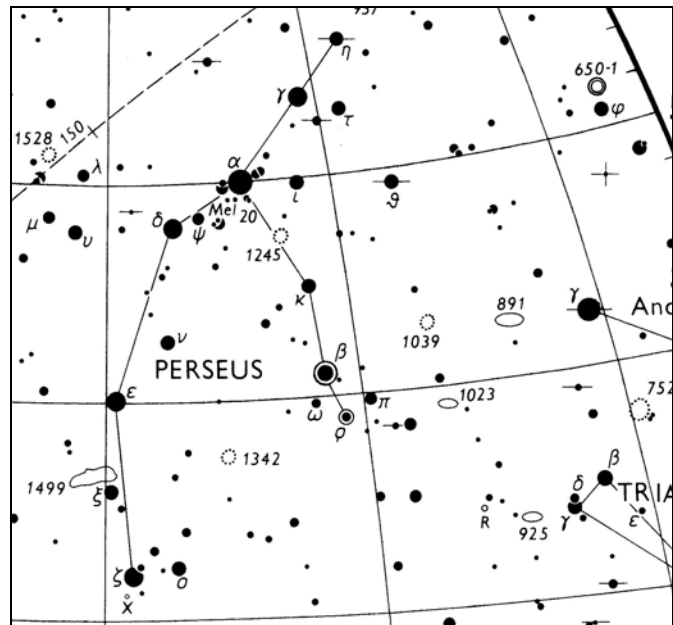
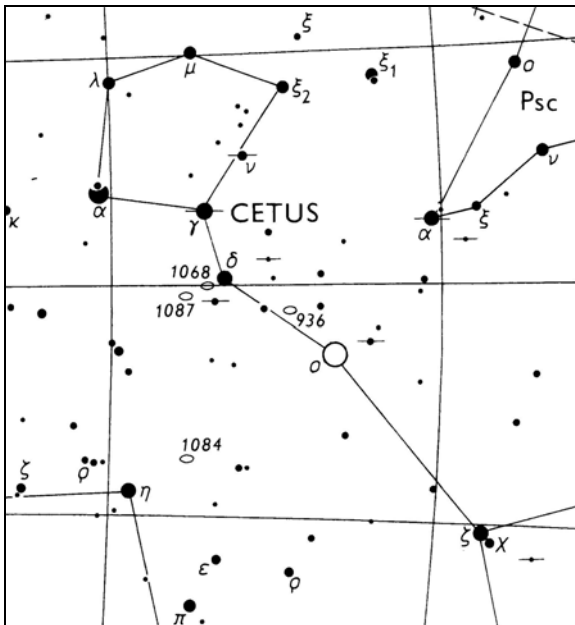
Okolí snadno pozorovatelných dvojhvězd ϵ Lyr, ζ UMa (Mizar a Alcor), ϑ Tau a α Cap (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

Označování proměnných hvězd

Způsob označování proměnných hvězd je obzvlášť komplikovaný. Německý astronom Friedrich Argelander v roce 1844 navrhl označovat proměnné hvězdy velkým písmenem latinské abecedy počínaje R a zkratkou souhvězdí, v němž se hvězda nalézá (např. R Leo). Kombinace písmen od R do Z se ale brzy vyčerpala, a tak na návrh Ernsta Hartwiga se k písmenu R přiřazuje další od R do Z, k S od S do Z atd. (tedy RR, RS, ..., RZ, SS, ..., SZ, TT, ..., ZZ). Po vyčerpání 54 možností se začíná od kombinace AA, ale písmeno J se vynechává (tedy AA, AB, ..., AZ, BB, ..., BZ, CC, ..., QZ).

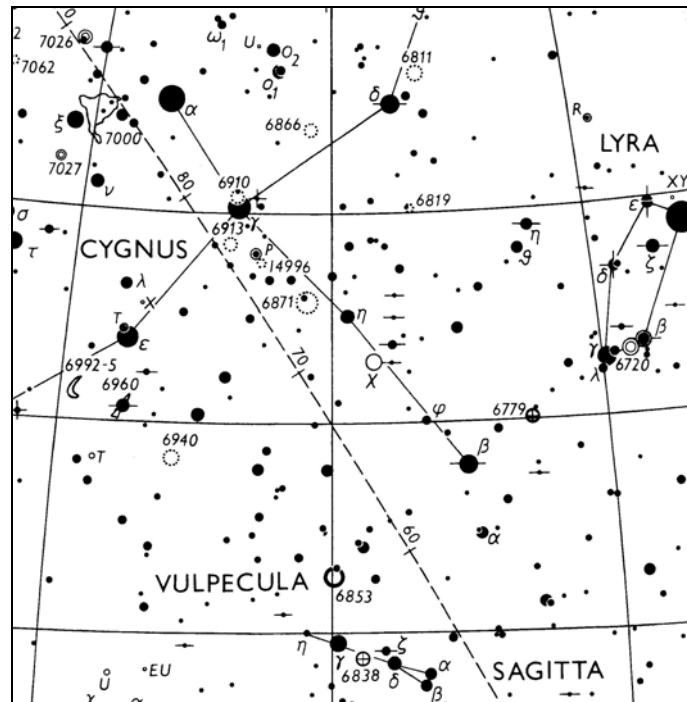
1. Astronomické zoo

Když v daném souhvězdí nestačí všech 334 možností, jsou další proměnné hvězdy označeny V 335, V 336, ... plus název souhvězdí. Setkáme se tak s proměnnými hvězdami kupř.: Y Cam, AB Cas, V 1068 Cyg. Dokážete si představit složitější způsob označování? ²⁾

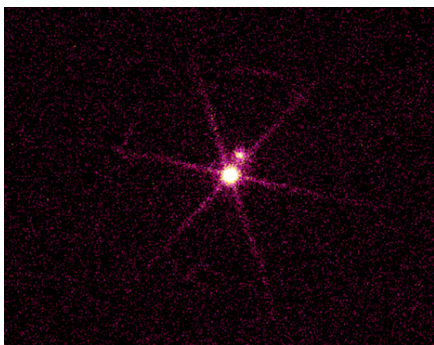


²⁾ Úkol pro náruživé programátory: vytvořte algoritmus pro seřazení proměnných hvězd podle jejich „abecedy“.

1. Astronomické zoo



Okolí snadno pozorovatelných proměnných hvězd o Cet, β Per, δ Cep a χ Cyg (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).



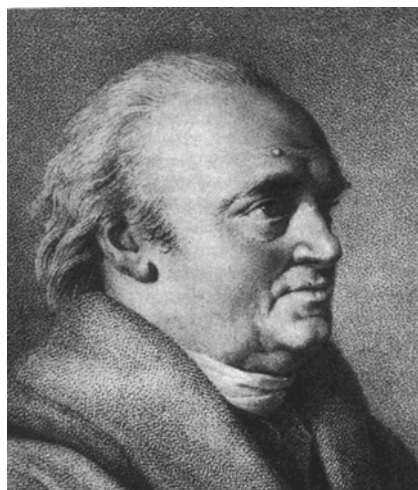
čítanka

Zdeněk Mikulášek: Dvojhvězdy nesmějí existovat

Už od doby vynálezu dalekohledu patří dvojhvězdy a vícenásobné hvězdné skupiny k nejvyhledávanějším a nejvděčnějším objektům na obloze. Celé generace obdivovatelů krás hvězdného nebe se nechávaly unášet nádherou a rozmanitostí světa dvojhvězd, jenž v sobě zahrnuje těsné i vzdálenější páry, dvojice navlas stejných hvězd i „nerovné páry“ hvězd rozdílně jasných a různě zbarvených.

Až do poloviny 18. století se však astronomové utvrzovali v názoru, že ve skutečnosti žádné dvojhvězdy neexistují. Pozorované dvojice prý k sobě patří jen zdánlivě. Složky dvojhvězdy jsou od nás různě daleko a společného mají jen to, že shodou okolností jsou na obloze poblíž sebe.

Zpočátku byl seznam dvojhvězd poměrně chudý, postupně se však rozrůstal náhodnými objevy dalších a dalších hvězdných dvojic. Už v roce 1767 anglický reverend John Michell ¹⁾ usoudil, že pozorovaných dvojhvězd je příliš mnoho na to, aby se to dalo vysvětlit pouhou náhodou. Mnohem spíše tu jde o reálné hvězdné páry, které vytvářejí fyzickou soustavu dvou skutečně blízkých hvězd.



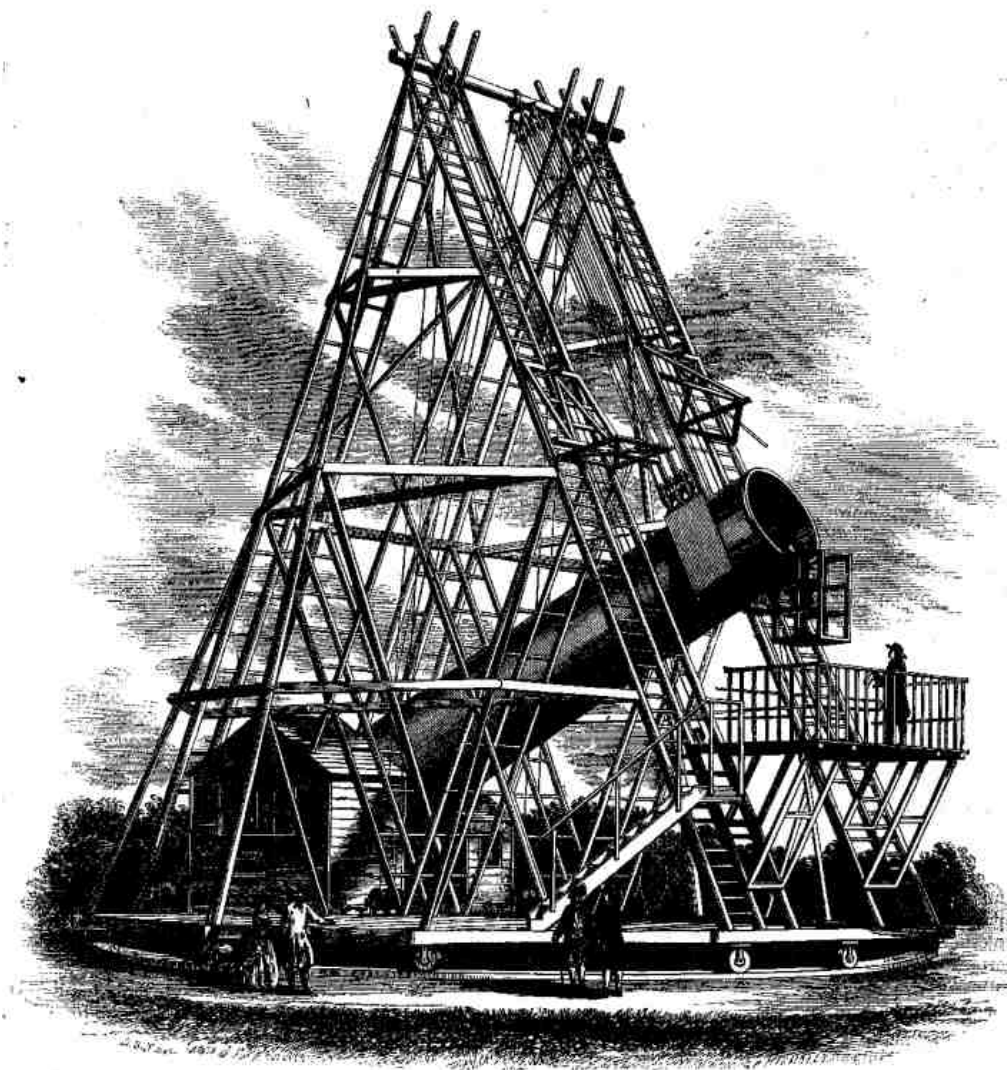
William Herschel.

Michellovy názory však takřka nikdo nebral vážně – vůbec totiž nezapadaly do koncepce tehdejších představ o účelnosti uspořádání světa. Všeobecně se věřilo, že hvězdy jsou ve všem všudy podobné našemu Slunci, že i kolem nich krouží planety. Planetám se přisuzovala funkce nositelek života, hvězdy tu pak byly od toho, aby svým planetárním rodinám poskytovaly životodárné světlo a teplo. K čemu by pak byly dvojhvězdy? Vždyť v soustavě dvou sluncí obíhající kolem společného těžiště by dráhy případných planet musely mít tvar složitých, neuzavřených křivek. Planety by se na své pouti střídavě přibližovaly hned k jedné, hned ke druhé hvězdě, jindy by se od svých hvězd velice vzdalovaly. Výkyvy teplot na těchto planetách by musely být tak značné, že život na nich by byl zcela vyloučen. Existence skutečných dvojhvězd by pak byla samoučelná, a to nelze připustit! Ne. Dvojhvězdy nesmějí existovat!

¹⁾ Čti: *džon mičel*.

1. Astronomické zoo

Podobně smýšlel i William Herschel ²⁾, když v roce 1774 započal svou grandiózní přehlídku hvězdné oblohy právě vyhledáváním dvojhvězd. Tuto práci však nepodnikal proto, že by ho nějak zvlášť zajímaly dvojhvězdy samotné, ale proto, že chtěl konečně rozřešit základní úkol hvězdné astronomie – chtěl změřit vzdálenosti hvězd. Princip metody měření vzdáleností byl znám už od starověku: pohyb Země kolem Slunce, vztahený ke vzdáleným hvězdám, se zrcadlí v tzv. paralaktickém pohybu blízkých hvězd po hvězdné obloze. Hvězdy na ní opisují malé elipsy, jejichž úhlové rozměry jsou nepřímo úměrné vzdálenosti hvězdy.



Zrcadlový dalekohled o průměru jednoho metru, s nímž pozoroval William Herschel. Příklad se nezachoval, k dispozici je pouze jeho nákres.

O změření roční paralaxy se již před Herschelem pokoušela řada vynikajících pozorovatelů, všichni však bezúspěšně. Bylo zřejmé, že paralaktické elipsy musí být natolik nepatrné, že se běžnými pozorovacími postupy nedají odhalit. Bylo třeba podstatně zpřesnit měření, což zaručovala vtipná metoda, kterou již před lety navrhl Galileo Galilei. Ten doporučoval měřit vzájemné posuvy hvězd různě jasných, které jsou na obloze blízko sebe. Slabší, a tedy patrně i vzdálenější složka by se pak vůči hvězdné obloze takřka nepohybovala a mohla by tak sloužit jako vynikající opěrný bod pro přesné měření paralaktického pohybu hvězdy bližší.

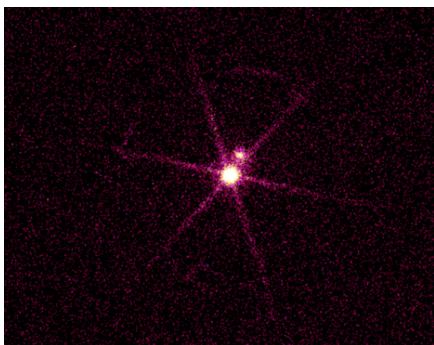
²⁾ Čti: *viliam heršl*.

1. Astronomické zoo

To tedy bylo motivací Herschelova zájmu o dvojhvězdy. Svou práci vzal snad až příliš důkladně. Místo toho, aby se spokojil s nalezením několika vhodných párů, jež by pak podrobil pečlivému zkoumání, publikuje v roce 1782 hned celý katalog 282 dvojhvězd, který o dva roky později doplnil o dalších 434 objektů. U každé dvojice hvězd udal vzájemnou úhlovou vzdálenost složek a úhel jejich natočení. Na základě Herschelova bohatého pozorovacího materiálu John Michell znovu, a tentokrát statisticky nezvratně dokázal, že je vyloučeno, aby existence tak velkého počtu těsných dvojic byla jen dílem náhody. Myšlenka, že slabší hvězdy ve dvojhvězdách jsou souputníky hvězd jasnějších, se vnucovala stále neodbytněji. Jsou-li však hvězdy v soustavě od nás stejně daleko, pak vykazují stejný paralaktický pohyb a k určování vzdáleností se vůbec nehodí!

Ze stejnojmenné kapitoly knihy *Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru* (Svoboda, Praha 1988; autoři: Z. Horský, Z. Mikulášek a Z. Pokorný).

1. Astronomické zoo



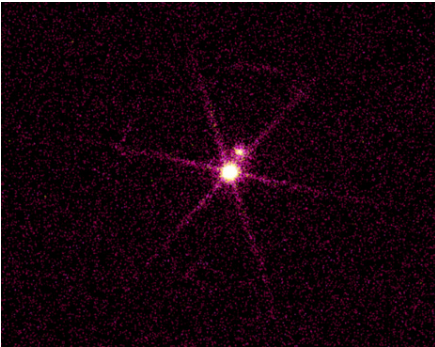
„luštěniny“

Znáte jména hvězd?

Nyní si to můžete ověřit: v každém řádku je uvedeno vždy jedno jméno hvězdy, přičemž uvnitř tohoto jména chybí jedno písmeno. Zbytek řádku je pak doplněn náhodně různými písmeny. Dopište chybějící písmena a vyznačte názvy hvězd v jednotlivých řádcích. Doplníte-li správně všechna chybějící písmena, dovíte se jméno hvězdy, jež je jednou z nejbližších a nejjasnějších dvojhvězd (mimořádně: toto jméno není jediné, které hvězda má).

B	E	L	L	A	N		A	R	E	S	U	S
A	R	G	A	E	P		L	L	U	X	O	S
A	N	R	E	G	U		U	S	I	S	A	T
C	R	E	S	I	R		U	S	A	L	T	E
U	R	G	O	F	O		A	L	H	A	U	T
K	A	L	D	E	B		R	A	N	N	U	S
K	I	Z	I	D	E		E	B	O	N	T	E

1. Astronomické zoo



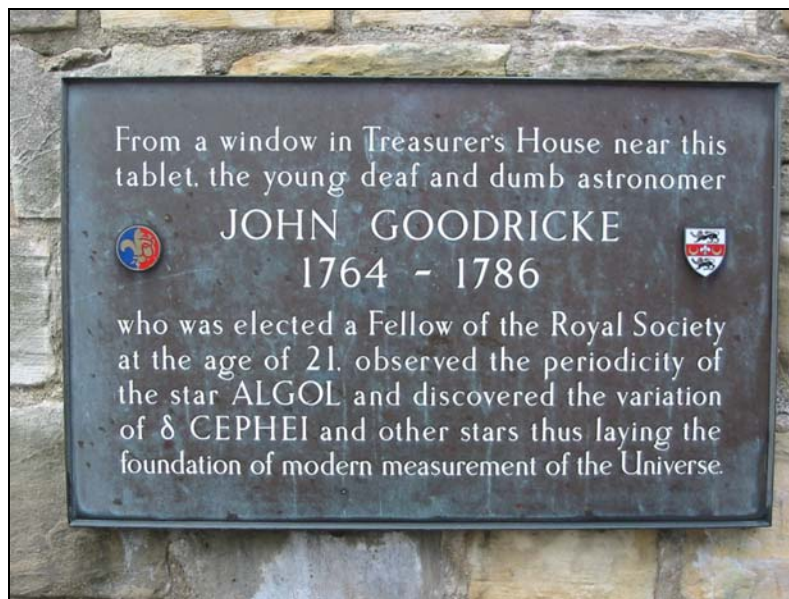
medailon

John Goodricke ¹⁾

(17. 9. 1764 – 20. 4. 1786)

Psalo se sedmnáctého září roku 1764 a v německém Groningenu se členům staroanglického rodu Goodricků z Yorku právě narodil syn, kterého v anglikánském kostele pokřtili podle jeho dědečka – John. Porod však neproběhl tak jak měl a malý John záhy onemocněl zimnicí. Osud mu ale přál a přežil, jenže záhy se ukázalo, že zimnice si přece jen vybrala svou daň: John přišel o sluch a stal se tak až do konce svého života hluchoněmým.

John Goodricke, kdyby mohl mluvit, jistě by nám vyprávěl, jaké měl přes svůj handicap vlastně štěstí. Kdyby se býval narodil o nějakých pár desítek let dříve, nikdy by neměl šanci rozvinout svůj talent pro astronomii, fyziku a matematiku. Do poloviny 18. století se totiž hluchota považovala za projev neléčitelné debility a demence.



¹⁾ Čti: *džon gudrik*.

1. Astronomické zoo

Johnův otec Henry Goodricke z Yorku, diplomat Jeho Veličenstva britského krále Jiřího II. v Holandsku, však nezastával tmářské myšlenky svých předků a dal svého syna do speciální školy (Braidwood Academy), kde ho naučili odezírání ze rtů a posuňkové řeči. První taková škola v britské monarchii byla založena v Edinburghu pouhé čtyři roky před Johnovým narozením. Péče rodičů byla korunována úspěchem: chlapec projevoval značné nadání pro přírodní vědy.

Z přírodních věd nejvíce Johnu Goodrickemu imponovala astronomie, a v ní především problematika hvězd proměnných. Zaujal ho Algol (tehdy nazývaný též Blikající démon) a změny jeho jasnosti. Pravidelně tuto hvězdu ze souhvězdí Persea pozoroval a zjistil, že jasnost se mění s železnou pravidelností tří dnů. Po mnoha úvahách, co tyto pravidelné změny může způsobovat, správně usoudil, že za změnami stojí druhá nepozorovatelná hvězda, která Algol zakrývá. Tato svá pozorování a závěr zveřejnil v roce 1782; to mu bylo osmnáct let. O rok později mu byla Královskou astronomickou společností udělena prestižní cena Godfrey Copleye.

by the following table; the first column of which shows the days, and exact time of the day, when Algol was observed to be very near, or at its least brightness; the 2d column marks the different intervals of time elapsed between the several observations; the 3d exhibits the quotient arising from a division of these intervals by a certain number of revolutions, each of 2 days and 21 hours, which number of revolutions are expressed in the last column.

	The day and time when Algol was observed at or near its least brightness	The different intervals between the several observations	The quotients of the divisions of the second column by the fourth	Number of revolutions
1782	Nov. 12 ^d 8 ¹ / ₂ ^h			
	Dec. 28 5 ¹ / ₂	45 ^d 21 ^h	2 ^d 20.8 ^h	16
1783	Jan. 14 9 ¹ / ₄	17 3 ³ / ₄	2 20.6	6
	31 14 ¹ / ₂	17 5	2 20.8	6
	Feb. 6 8	5 17 ³ / ₄	2 21	2
	23 12 +	17 4	2 20.6	6
	26 9 ¹ / ₂	2 21 ¹ / ₂	2 21.5	1
	Mar. 21 8 ¹ / ₂	22 23	2 20.9	8
	Apr. 10 10 +	20 1 ¹ / ₂	2 20.8	7
	13 8	2 22	2 22	1
	May 3 9 ¹ / ₄	20 1	2 20.7	7

The results in the 3d column agree so nearly, that there is the greatest probability, not to say certainty, that the singular and quick variation of this star, during the space of 7 hours, as above-mentioned, recurs regularly and periodically about every 2 days and nearly 20³/₄ hours

Od Královské společnosti se sice Johnu Goodrickemu dostalo uznání za svou pozorovatelskou činnost, ale osud zasáhl do jeho života podruhé. Tehdy již velmi vážený astronom William Herschel pokládal za nemožné, aby jedna hvězda obíhala okolo druhé; skutečnost, že se pravidelně mění jasnost Algolu vysvětloval tím, že na povrchu hvězdy se pohybují temné skvrny. To mělo za následek, že Goodrickovo vysvětlení upadlo bezmála na sto let v zapomnění. Teprve roku 1880 tuto myšlenku oprášíl a potvrdil Edward Pickering.

John Goodricke umřel sychravého dubnového dne roku 1786 v nedožitých dvaadvaceti letech, pouhých čtrnáct dní před svým jmenováním na místo vědeckého pracovníka Královské astronomické společnosti. Byl pochován do nově vystavěné rodinné hrobky v Hunsingore, Yorkshire. Tak skončil krátký, ale velice pestrý život významného astronoma a neúnavného člověka, který navzdory nepřízni osudu nerezignoval a dokázal na svou dobu nemožné.

Autorem medailonu je Štěpán Ledvinka.

1.5. Hvězdokupy a mlhoviny

Název kapitoly je jasný: v tomto oddílu se zmiňujeme o otevřených a kulových hvězdokupách, ale také o hvězdokupách pohybových, o mlhovinách svítících a temných... Přitom i pouhýma očima lze uvidět na nočním nebi prakticky v kteroukoli roční dobu alespoň jednoho zástupce každé skupiny kosmických objektů.

Když je hvězd pohromadě více

Poměrně snadno – i pouhýma očima – spatříme na noční obloze několik desítek *otevřených hvězdokup*. Pravou povahu těchto seskupení rozpoznáme ovšem až při sledování dalekohledem. Otevřené hvězdokupy čítají obvykle desítky až stovky hvězd, jejich průměr dosahuje deseti světelných let a hmotnost 15 až 250 hmotností Slunce.

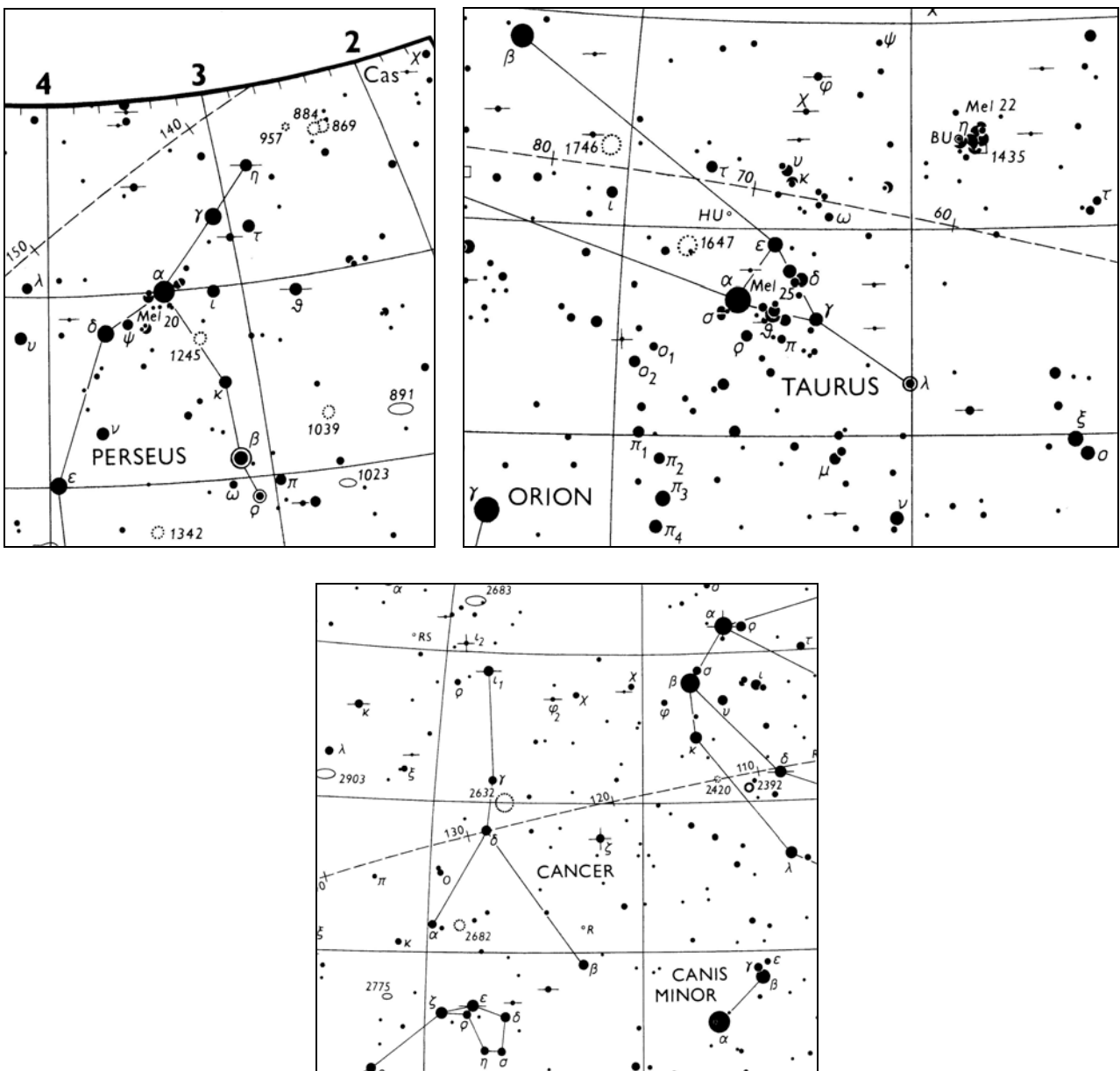


Otevřená hvězdokupa M 45 (Plejády) v souhvězdí Býka. Svislé a vodorovné světlé úsečky u jasných hvězd vytvořila difrakce světla na uchycení pomocného zrcátka dalekohledu.

1. Astronomické zoo

Registrováno je více než tisíc otevřených hvězdokup, přičemž se odhaduje, že v naší Galaxii je jich asi 100 000. Jsou to nestabilní útvary, které se postupně rozpadají a mísí s hvězdami ve svém okolí. Otevřenými hvězdokupami jsou např. Plejády, Praesepe, dvojitá hvězdokupa χ a h (čti „chí a há“) v Perseovi.

Pouhýma očima uvidíme také několik *kulových hvězdokup*. Celkem jich známe asi 150, ale podle odhadu je jich v Galaxii asi 500 až 1000. Jsou to gravitačně velmi silně vázané soustavy desítek až milionů hvězd. Mají výrazně kulovitý tvar a silnou koncentraci ke středu. Střední průměr kulové hvězdokupy dosahuje 50 světelných let. Nejznámějšími kulovými hvězdokupami jsou 47 Tucanae, M 13 v Herkulovi, ω Cen.



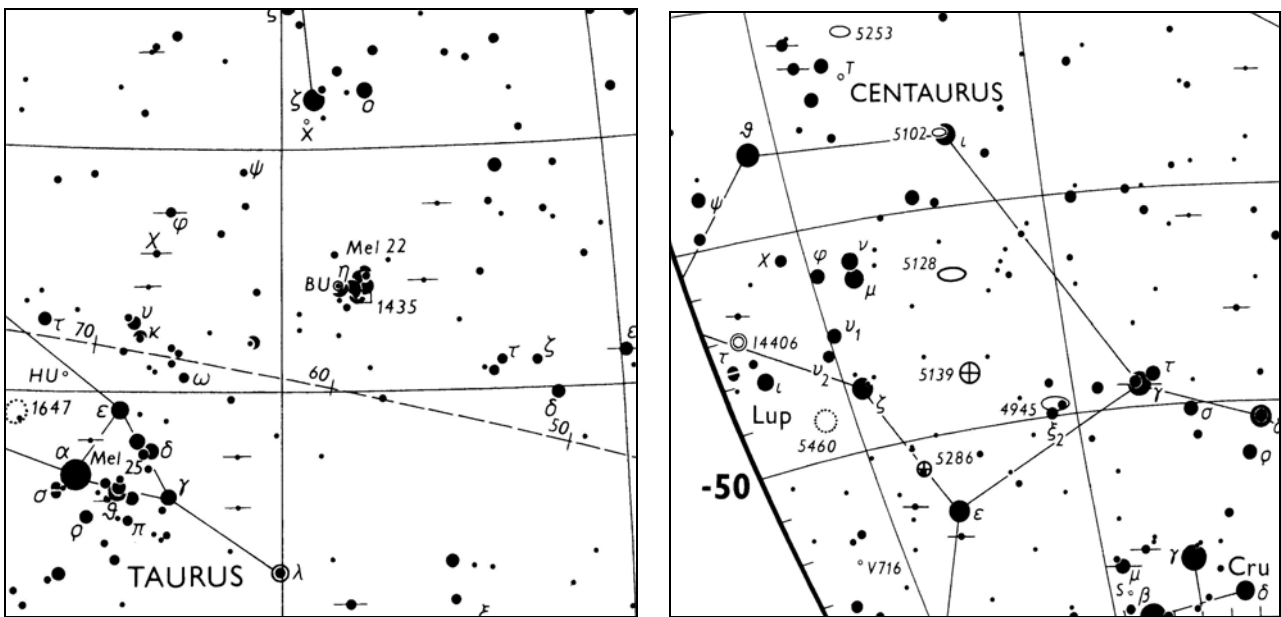
Otevřené hvězdokupy χ a h Per, Hyády (Mel 25) a Praesepe (M 44 = NGC 2632) (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

1. Astronomické zoo

Pohybové hvězdokupy

Asi u desítky otevřených hvězdokup, které jsou k nám nejbližší, můžeme u jednotlivých hvězd měřit změny jejich poloh vůči vzdálenějším hvězdám, tzv. „hvězdám pole“. Takovým hvězdokupám říkáme *pohybové*, neboť se pozvolna pohybují na pozadí dalekých hvězd. Patří mezi ně například Plejády, Hyády, Praesepe.

Mnohé pohybové hvězdokupy ani nevidíme jako kompaktní útvar, prozradí se jen společným pohybem hvězd v prostoru (takovou hvězdokupou je například pět jasných hvězd z Velkého vozu, Sirius a několik dalších slabších hvězd, rozestých po hvězdné obloze). Studium pohybových hvězdokup můžeme poměrně dosti přesně zjistit vzdálenost těchto kosmických útvarů.

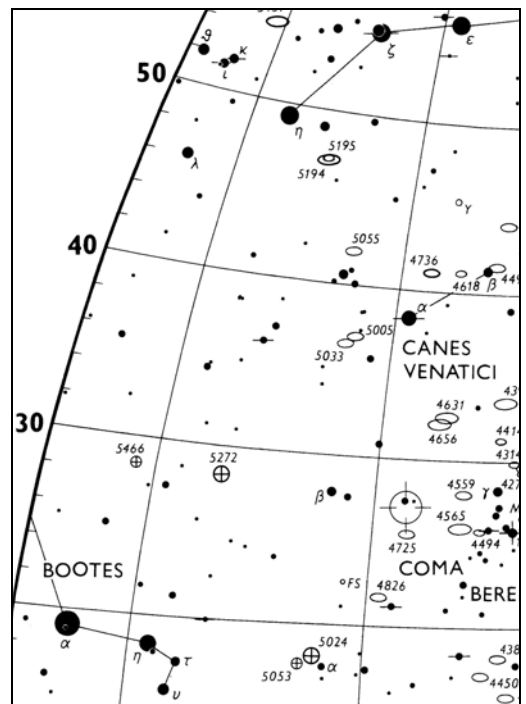
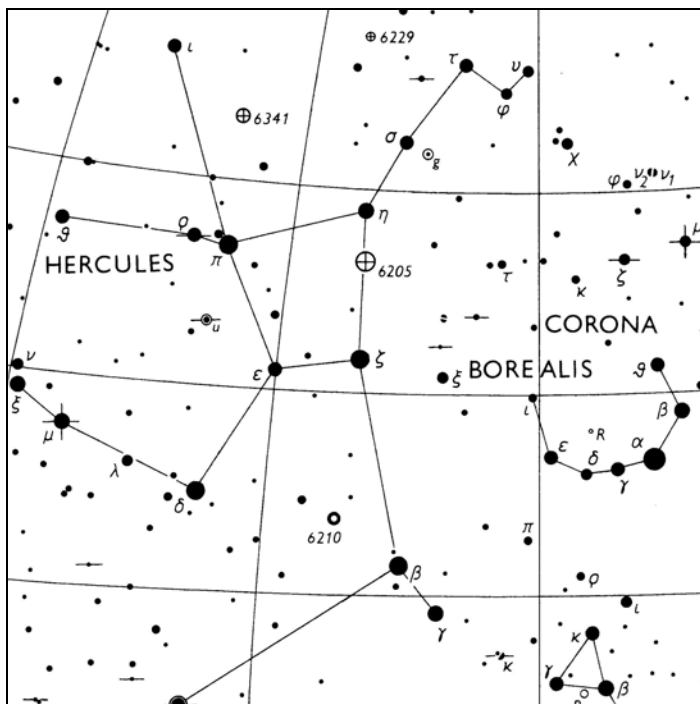


Otevřená hvězdokupa Plejády (Mel 22 = M 45) a kulová hvězdokupa ω Cen (NGC 5139) (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

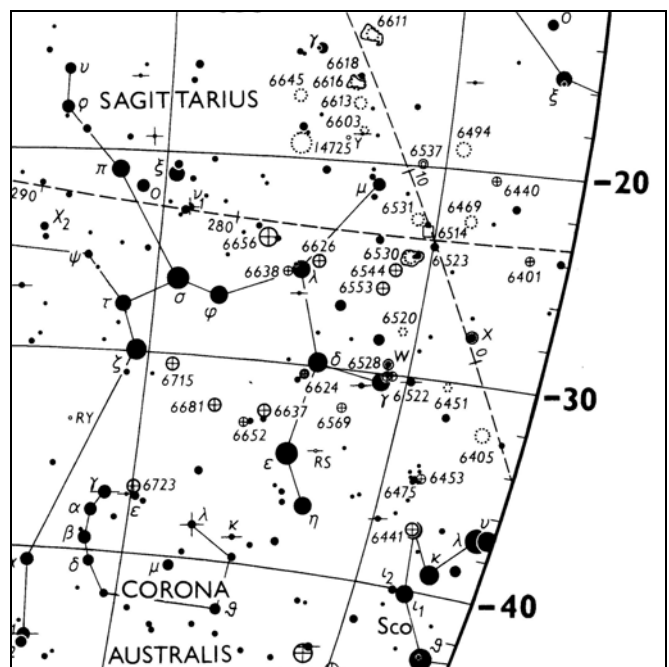
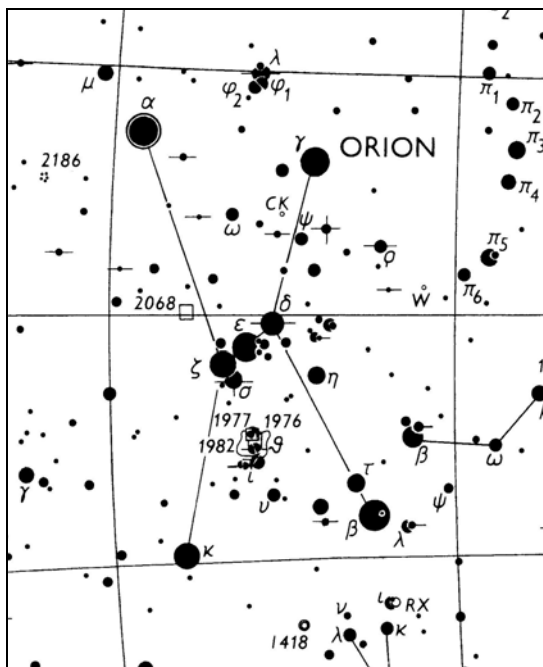
Mezi hvězdami

Prostor mezi hvězdami není pochopitelně zcela prázdný. Nachází se tu plyn i prachové částice; souhrnně hovoříme o *mezihvězdné látce*. Tato látka se projevuje *zeslabováním* neboli *extinkcí* světla. Již v minulých stoletích pozorovatelé rozdělili mezihvězdnou látku na *temná mračna* a *svítící mlhoviny*. Zatímco hustší temná mračna lze spatřit jen na světlejším pozadí (případně se projeví tak, že na určitém místě oblohy je nápadně méně hvězd než jinde v okolí), svítící mlhoviny jsou vidět samy o sobě: buď rozptylují světlo blízkých hvězd, nebo samy září, když byly k záření vybudeny blízkými horkými hvězdami.

1. Astronomické zoo



Kulové hvězdokupy M 13 (NGC 6205) v Herkulovi a M 3 (NGC 5272) v Honicích psech (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).



Mlhoviny M 42 v Orionu (NGC 1976, 1977 a 1982) a M 8 (NGC 6523, přezdívána Laguna) ve Střelci (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).



čítanka

David Allen: Nezapomenutelný zážitek

Observatoř Cerro las Campanas ¹⁾ v chilských Andách byla v roce 1972 teprve v zárodku; zařízení ještě nebyla hotová, i stravovat se dalo jen obtížné. Také moje španělština se zatím omezovala jen na pár tuctů slov. Nicméně byl jsem jeden z prvních, kdo s detektorem infračerveného záření smýčil po jižním hvězdném nebi. Podařilo se mi několik báječných objevů, a tak jsem pokračoval ve výzkumech. Musím také připomenout vroucnost Chilanů, pro něž jsem byl nejdůležitější osobou v těchto horách a kteří mi byli ochotni vyhovět opravdu ve všem.



¹⁾ Čti: *sero las kampánas*.

1. Astronomické zoo

Po čtyřech nebo pěti nocích měření hvězd jsem naléhavě pocítil, že bych měl 40palcový dalekohled namířit na něco opravdu velmi krásného. Ve vhodné přestávce během pozorování jsem proto vyhledal souřadnice kulové hvězdokupy omega Centauri a bez prodlevy jsem údaje nastavil na stupnicích. Ve středně velkých dalekohledech jsem si už dříve prohlédl skoro všechny kulové hvězdokupy ze severního nebe, takže jsem se domníval, že vím, co teď spatřím v okuláru dalekohledu.

Ale jak jsem se hluboce mýlil! Jakmile mi do očí padl paprsek světla z dalekohledu, poznal jsem pravý význam slova „omráčen“. Ano – byl jsem tím pohledem doslova omráčen. Celé zorné pole bylo poseto tisíci hvězdami. Nikde ani stopy po středovém zhuštění, nikde nebyl ani okraj hvězdokupy. Zmáčkl jsem tlačítko jemného pohybu dalekohledu: stovka hvězd zmizela za jedním okrajem zorného pole, ale současně se na druhé straně objevila stovka hvězd dalších. Podržel jsem tlačítko pohybu zmáčknuté: hvězd postupně ubývalo. Při pohybu opačným směrem jsem si myslel, že za chvíli uvidím výrazné zhuštění hvězd u středu, ale nic takového tam nebylo. V trvalém úžasu jsem mnohokrát projížděl celou hvězdokupou v různých směrech.

Během své vědecké kariéry jsem zažil řadu objevů, při nichž se tak říká srdce zastavovalo. Ale přesto si ponejvíce připomínám události podobné této, které sice nepřinášejí ani věhlas, ani jmění, jsou však nefalšovaným uměním ve světě vědy!

Uveřejněno v časopise *Sky and Telescope*, 1992, August, 135. Přeložil Zdeněk Pokorný.

1. Astronomické zoo



*Zdá se, že existuje zcela fundamentální vztah:
mnoho peněz << dobré myšlenky.*

Henrik Christoffel van de Hulst, radioastronom
(1918 – 2000).

otázky a příklady

Otázka 1.5.1. Pohybovými hvězdokupami nazýváme: a) nejmladší, právě vzniklé otevřené hvězdokupy; b) nejbližší otevřené hvězdokupy; c) otevřené hvězdokupy, které jsou na hvězdy nejbohatší.

Otázka 1.5.2. Když na běžném snímku hvězdného nebe spatříme místa, kde je výrazně méně hvězd než v jiných částech záběru, můžeme z toho usoudit, že v místech s menším počtem hvězd: a) hledíme do vzdálenějších částí vesmíru s nižší hustotou hvězd; b) vzniklo méně hvězd než jinde ve vesmíru; c) ve výhledu dál do vesmíru nám brání mezihvězdná látka, kterou přímo nevidíme.

Otázka 1.5.3. Vysvětlete, proč velká tělesa, jako například cizí planety nebo vyhaslé hvězdy (pokud existují), nám prakticky nebrání ve výhledu do vesmíru, zatímco látka o stejné hmotnosti, rozptýlená jako mikroskopický prach, nám ve výhledu brání.

1. Astronomické zoo



„luštěniny“

Znáte vlastní jména hvězd?

K vyřešení této doplňovačky budete zřejmě potřebovat dobrý atlas hvězdného nebe, kde jsou uvedena vlastní jména hvězd. Pokud si vystačíte sami, pak „klobouk dolů“. Takže k věci: v tajence, vyznačené silným rámečkem, se po vyluštění objeví jméno nejjasnější hvězdy v souhvězdí Honicích psů. V překladu toto jméno znamená „Karlovo srdce“.

Je-li v legendě příslušného řádku uvedeno vlastní jméno hvězdy, doplníte *latinský* název souhvězdí (v 1. pádu), v němž se hvězda nachází. Je-li však v řádku napsáno označení hvězdy řeckým písmenem a třípísmenovou zkratkou souhvězdí, doplníte vlastní jméno hvězdy (v latinské podobě, v jaké se používá na mezinárodních mapách hvězdné oblohy).

Legenda:

									Mira
									Rigel
									Algol
									η Tau
									Toliman
									α UMi
									α Pav
									α Ari
									σ Sgr



medailon

Charles Messier ¹⁾

(26. 6. 1730 – 12. 4. 1817)

Tento francouzský astronom neměl žádné formální astronomické či jiné vzdělání. Přesto do dějin astronomie vstoupil jako úspěšný objevitel mnoha komet – a autor katalogu mlhovin. Když v roce 1751 – jako 21letý – přišel po úmrtí svých rodičů z rodné vesnice Badonvillier ²⁾ v Lotrinsku do Paříže a stal se pomocníkem astronoma Delisleho ³⁾, bylo známo stěží 50 komet. A on sám jich objevil 21 – z toho patnáct zcela nových – a pozoroval téměř 50 různých komet! Messier byl nejdříve zaměstnán jako zapisovatel, ale postupně se vypracoval na pozorovatele, takže od roku 1754 vykonával téměř všechna pozorování v Delisleho ústavu. Byla to námořní hvězdárna, umístěná na střeše pevné osmihranné věže pařížského hotelu de Cluny ⁴⁾.

Svou první kometu objevil Messier roku 1758, a během příštích dvou desetiletí byly všechny objevy komet výlučně jeho záležitostí. Současně však byl Messier i horlivým pozorovatelem zákrytů hvězd Měsícem, zatmění a slunečních skvrn, vykonal také mnoho meteorologických pozorování.

Pověstný katalog mlhovinných objektů vznikl poznenáhlu. Obsahuje jasnější objekty severní hvězdné oblohy a části hvězdné oblohy jižní, takové, u nichž hrozí záměna s kometou. Pořadí objektů v katalogu nijak nerespektuje polohu na hvězdné obloze, je to jen pořadí objevu. První objekt – Krabí mlhovinu – zaznamenal 12. září 1758, když sledoval kometu objevenou před dvěma týdny. Zanesl jej, stejně jako všechny následující objekty, přesně do hvězdné mapy, kterou používal při pozorování komet.

Druhý objekt – kulová hvězdokupa ve Vodnáři – se nalézal na mapě, s níž hledal Halleyovu kometu. Ale teprve roku 1764 vyhledával Messier podobné objekty poněkud usilovněji a za sedm měsíců jich uvádí již 38. V lednu 1765 náhodou našel hvězdokupu jižně od Siria (M 41) a v březnu určil polohy tří dlouho známých objektů: velké mlhoviny v Orionu (M 42 a M 43), hvězdokup Praesepe (M 44) a Plejády (M 45). I když Messier většinu z těchto 45 objektů sám našel nezávisle na předchozích pozorovatelích, je zřejmé, že mnohé z nich byly známy již z dřívějších.

Brzy po roku 1780 vešlo ve známost jméno dalšího úspěšného lovce komet – byl jím Pierre Méchain ⁵⁾. Nebyl jen pozorovatelem, ale i teoretikem. V roce 1781 objevil dvě nové komety, a během jejich hledání našel asi 30 ještě neoznačených mlhovinných objektů. Mezi oběma vynikajícími pozorovateli – Messierem a Méchainem – kupodivu nevznikla žádná žárlivost, ale naopak: Méchain sděloval své objevy mlhovinných objektů svému staršímu kolegovi. Mes-

¹⁾ Čti: *čárls mesjé*.

²⁾ Čti: *badóvíjé*.

³⁾ Čti: *delileho*.

⁴⁾ Čti: *de klyny*.

⁵⁾ Čti: *pjér méšen*.

1. Astronomické zoo

sier prověřil udané polohy a očísloval objekty podle pořadí, v jakém je vyhledával na obloze. Méchain se zaměřil zejména na slabé mlhoviny ve Vlasech Bereniky a Panně. Messier během jedné noci (bylo to 18. března 1781) potvrdil jeho objevy a sám zaznamenal ještě devět nových mlhovin.

Dne 13. dubna 1781 dokončil Messier svůj dodatek ke katalogu, když do něj zařadil i 24 objektů objevených původně Méchainem. Tím bylo dosaženo čísla 100. Celý katalog byl roku 1781 publikován v ročence *Connaissance des Temps*⁶⁾ pro rok 1783.

Messierova práce byla v listopadu 1781 přerušena těžkou nehodou. Při procházce parkem v Monceau⁷⁾ považoval jednu otevřenou bránu za vchod do jeskyně, bez otálení tam vstoupil – a zřítíl se do sedmimetrové hloubky sklepa s ledem! Naštěstí nehoda byla brzy objevena a pomocí žebříku a lan byl Messier vytažen na denní světlo. V nemocnici zjistili zlomené rameno, páteř, stehenní kost a též několik žeber. Pobyl v ní téměř rok.

Ale rok a tři dny po osudném pádu byl opět na své hvězdárně, aby se připravil na pozorování přechodu Merkuru přes sluneční disk. Pustil se s vervou i do dalších pozorování. Prověřoval také polohy dalších mlhovinných objektů, které mu mezitím zaslal Méchain ke kontrole. Celý revidovaný katalog měl být zveřejněn v roce 1790.

Události francouzské revoluce roku 1789 tomu však zabránily. Inflace peněz byla tak veliká, že k publikaci nebyly prostředky. Messier přišel o své příjmy z členství v Akademii věd, příspěvek na provoz hvězdárny byl zrušen. Také úspory dlouho nevydržely. Situace byla natolik zlá, že občas byl nucen vypůjčit si od astronoma Lalandeho i petrolej do své pozorovací lampičky. Také Méchain ztratil všechno své jmění a úspory. Ale Messier pozoroval stále a v září 1793 opět objevil kometu. Pozorování zaslal svému příteli, vynikajícímu matematikovi Saronovi do vězení, který tam propočítal dráhu komety (krátce nato byl Saron popraven).

Po stabilizaci poměrů se oběma astronomům dostalo zaslouženého uznání. Méchain se stal ředitelem pařížské hvězdárny, oba pak členy obnovené Akademie věd. Charles Messier prožil dlouhý a plodný život. Zemřel 12. dubna 1817 ve věku 86 let, jeho katalog však přežil desítky astronomických generací a používá se stále.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (zpracováno volně podle článku Paula Ahnerta: *Charles Messier und sein Nebelkatalog*, Kalender für Sternfreunde 1955, J. A. Barth, Leipzig 1954, 137-148).

Zajímavá poznámka nakonec: Když si v nějakém katalogu hvězdokup, mlhovin a galaxií důkladně prohlédnete kompletní seznam objektů podle Messiera, zjistíte, že tam některé položky jednoduše chybí. Proč tomu tak je, není ve všech případech stoprocentně známo. U objektu číslo 40 šlo o dvojhvězdu bez mlhoviny. Položky M 47 a M 48 nebyly posléze spolehlivě identifikovány, ačkoli udané polohy spadají do oblasti relativně chudé na hvězdy. Objekt M 91 také nebyl později nikdy nalezen, zřejmě proto, že Messier pozoroval skutečnou kometu. To je opravdu kuriózní případ – i zkušeného pozorovatele komet pomátla nějaká neznámá kometa! (Dnes se pod tímto označením skrývá jedna slabší galaxie.) Konečně objekt zapsaný jako M 101 je totožný s M 102, a číslo M 103 označuje nevýraznou hvězdokupu v Kasiopeji.



⁶⁾ Čti: *konesáns de temp.*

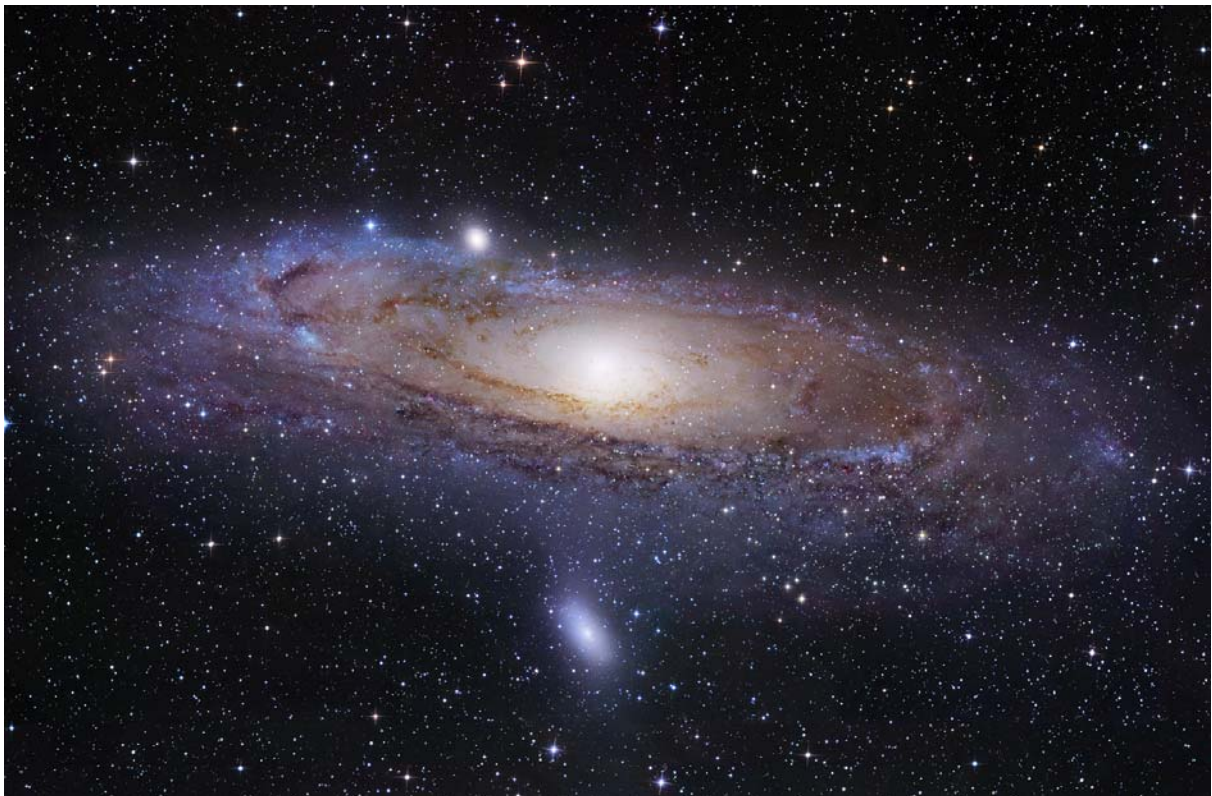
⁷⁾ Čti: *monsó.*

1.6. Naše a cizí galaxie

Cizích galaxií pouhýma očima mnoho nespatříme, ale několik jich přece jen najdeme. A pak je tu přece Mléčná dráha – součást naší Galaxie. Začněme nejdříve s ní, i když – nejdříve pár slov k původu slova galaxie: řecky *gálaktos* označuje mléko. Ve starém Řecku to bylo pojmenování pro Mléčnou dráhu (protože o soustavě hvězd – Galaxii v dnešním pojetí – tehdy nic netušili). Dnes pojmy Galaxie a Mléčná dráha rozlišujeme, jak poznáte hned z prvních vět následujících odstavců textu.

Mléčná dráha

Mléčnou dráhu dnešní obyvatelé velkých měst již prakticky neznají. Na přesvětlené obloze nebývá vidět onen světlounký pás, táhnoucí se přes celé nebe, pás s nepravidelnými okraji, často se větvící, s řadou tmavších míst uvnitř.



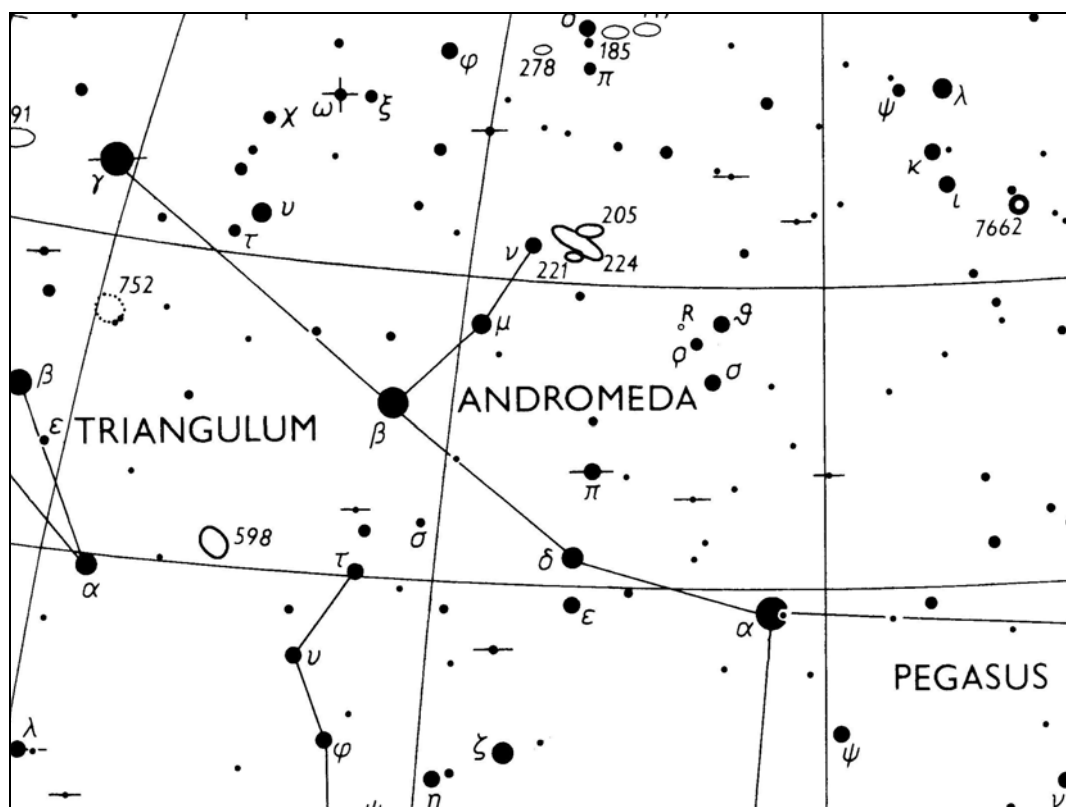
Galaxie M 31 v souhvězdí Andromedy (pod ní je ve tvaru malé eliptické skvrnky její průvodce M 32).

1. Astronomické zoo

Od dob prvních teleskopických pozorování Galilea víme, že se jedná o slabé hvězdy, jež se ale při pohledu pouhým zrakem slévají v onu mlžnou stuhu. Jde o hvězdnou soustavu, přesněji o část hvězdné soustavy. Tu nazýváme *Galaxie* (a píšeme s velkým počátečním písmenem), patří do ní všechny hvězdy z Mléčné dráhy, ale i Slunce, hvězdy ležící mimo tento pás i hvězdy našimi přístroji nepozorovatelné. Galaxie je zkrátka víc než Mléčná dráha, a proto se vyplatí oba pojmy rozlišovat.

Nejvzdálenější světy

Galaxií, jako je naše, se ve vesmíru nachází bezpočet. Jakkoli se nám zdá být toto tvrzení samozřejmé, nebylo ještě před sto lety jasné, zda všechny mlhoviny jsou doopravdy „mlhovinami“, nebo jestli některé z nich nejsou cizími hvězdnými soustavami. Rozhodla až nová pozorovací technika: na fotografiích některých „mlhovin“, pořízených tehdy největším dalekohledem o průměru zrcadla 2,5 metru na Mount Wilsonu, se podařilo rozeznat jednotlivé hvězdy. Dodejme, že pouhýma očima je vidět jen několik nejbližších galaxií.



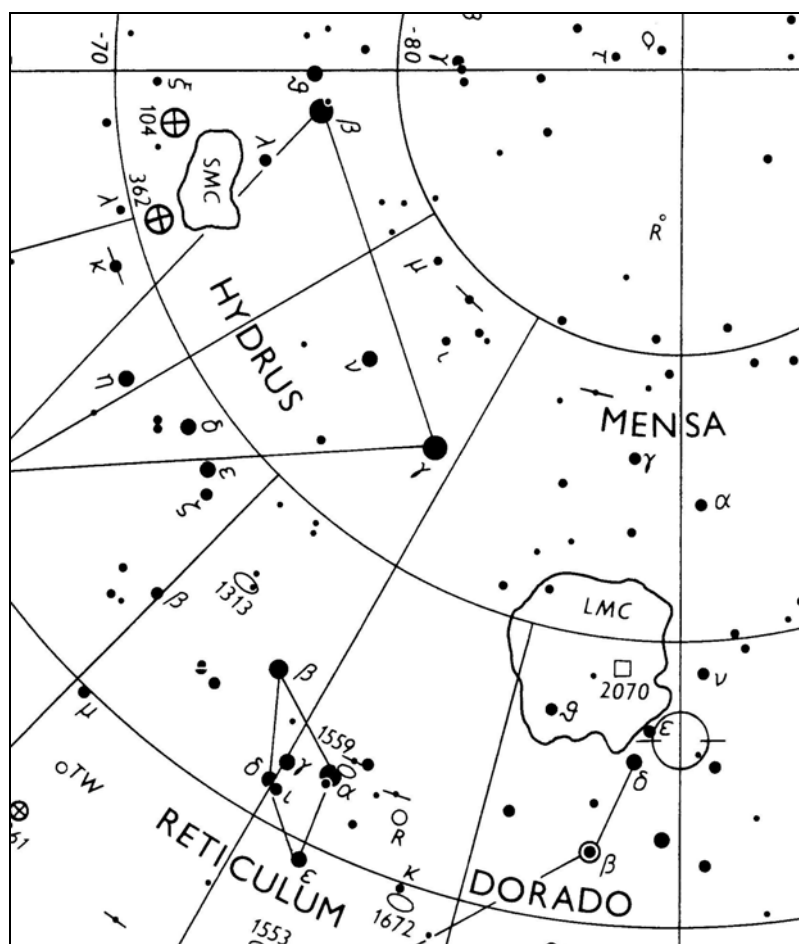
Galaxie M 31 (NGC 224) v Andromedě a M 33 (NGC 598) v Trojúhelníku (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

Katalogy

Polohy a vzhled mlhovin, hvězdokup a galaxií pozorovatelé zprvu zaznamenávali zejména proto, aby se tyto „nehvězdné“ objekty nepletly s kometami. Později jednoduše proto, aby na obloze „byl

1. Astronomické zoo

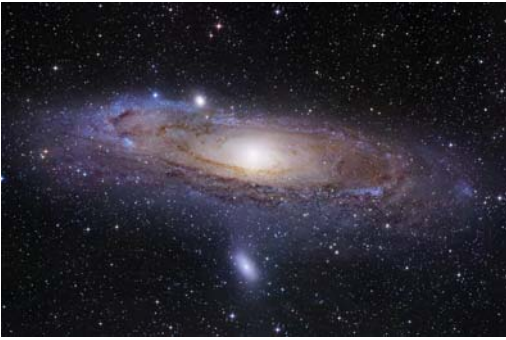
pořádek“. Jak již víme z předchozí kapitoly, velmi známým seznamem takových objektů je katalog, sestavený ve druhé polovině 18. století francouzským astronomem Charlesem Messierem. V něm jsou označeny objekty písmenem M a číslem, např. M 31. Velmi podrobný je *New General Catalogue*¹⁾ (ve zkratce NGC), který se dvěma doplňky (tzv. *Index Catalogue*, ve zkratce IC) obsahuje více než 13 000 objektů. Sestavil ho a roku 1888 uveřejnil dánský astronom Johann Dreyer.



Galaxie Velký Magellanův oblak (Large Magellanic Cloud – LMC) a Malý Magellanův oblak (Small Magellanic Cloud – SMC) (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

¹⁾ Čti: *ňjú džener(a)l katalog*.

1. Astronomické zoo



Čeho kdo nezná, po tom nedychtí.

Jan Amos Komenský, filozof, teolog a pedagog
(1592 – 1670)

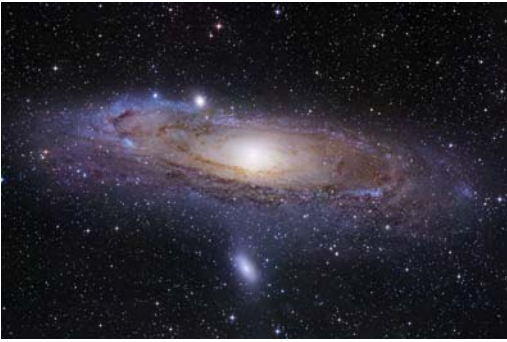
otázky a příklady

Otázka 1.6.1. Pro tuto chvíli předpokládejme, že všechny hvězdy září stejně. Jedna z nich, označme ji **A**, se nalézá v jedné z „děr“ v Mléčné dráze, leží tedy ve směru silného zeslabování světla. Jinou hvězdu, označme ji **B**, najdeme ve směru, kde je zeslabování světla poměrně malé. Obě hvězdy se nám však zdají být stejně jasné. Jestliže nejsou shodou okolností v našem bezprostředním okolí, budou od nás nepochybně různě daleko. Která z těchto hvězd je od nás pravděpodobně dál a proč?

Otázka 1.6.2. Chcete-li studovat velmi vzdálené objekty mimo naši Galaxii, musíte dalekohled namířit *mimo* oblasti, kde se nachází Mléčná dráha. Proto je vhodné vědět, kterými souhvězdími Mléčná dráha prochází (pokud si nejste jisti, podívejte se do nějaké mapy hvězdné oblohy). Která z následujících souhvězdí jsou *mimo* Mléčnou dráhu? a) Severní koruna; b) Blíženci; c) Jednorozec; d) Ryby.

Otázka 1.6.3. Které z následujících tvrzení *není* pravdivé? a) Pouhýma očima spatříme mnohem víc otevřených hvězdokup než kulových. b) I když uvidíme dvě hvězdy úhlově blízko u sebe, neznamená to automaticky, že tvoří gravitačně vázanou soustavu hvězd. c) Mnohé mlhoviny nelze ani pohledem do dalekohledu rozeznat od galaxií. d) Galaxie M 31 v souhvězdí Andromedy je nejvzdálenějším objektem ve vesmíru, který můžeme vidět pouhým zrakem. e) Messierův katalog objektů z 18. století zahrnuje otevřené a kulové hvězdokupy, dvojhvězdy, mlhoviny a galaxie.

1. Astronomické zoo



citát

Ještě v polovině 20. století se hvězdy astronomům jevily jako divoká sbírka druhů, v níž lze stěží nalézt systém. Hvězdné nebe bylo zaplněno téměř zoologickou rozmanitostí objektů, jejichž charakteristiky jsme sice mohli měřit a popisovat, ale sotva pochopit. Nyní, ač některé jevy stále zůstávají tajemstvím a nové typy hvězd se vynořují, se zdá, že chaos na hvězdném nebi dostal přece jen jakýsi řád.

George H. Herbig (Scientific American, srpen 1967).



Docela zvláštní proměnná hvězda V838 Monocerotis s prachovou obálkou. Foto: NASA a Hubble Heritage Team (AURA/STScI).



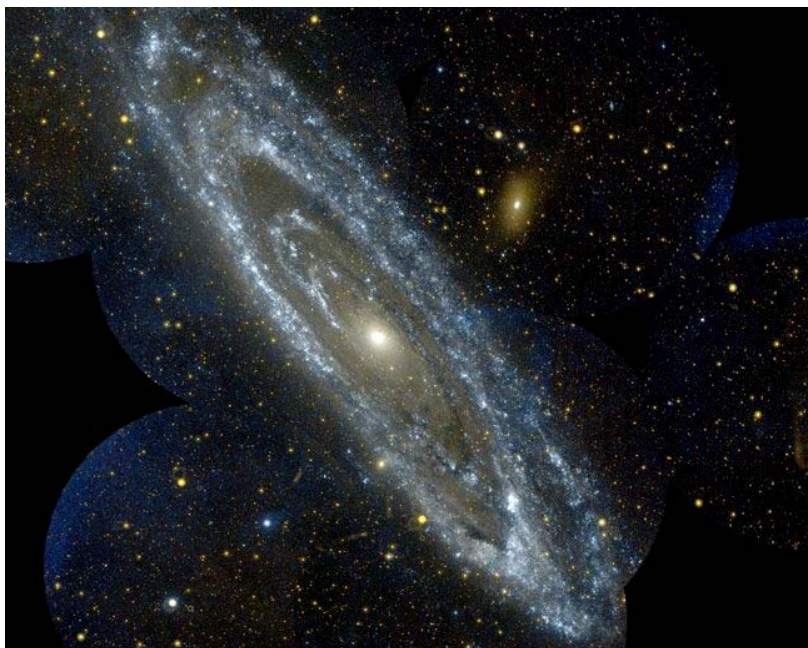
čítanka

Zdeněk Pokorný: Odkud vychází nejstarší světlo viditelné pouhýma očima?

Pohled do vesmíru je vždy pohledem do minulosti. Foton, který právě teď dopadl na sítnici oka ze směru, kde je Měsíc, byl ve skutečnosti od Měsíce vyslán před více než sekundou. To je samozřejmě tak krátká doba, že jsme ochotni nad problémem mávnout rukou asi tak, jako když nám na zem upadne padesátník a nechceme se pro něj shýbat. Když byli kosmonauti na Měsíci, umožňovalo komunikaci se Zemí krátké písknutí ve sluchátkách, které se ozvalo vždy s prodlevou oné sekundy, po kterou putovala zpráva ze Země na Měsíc nebo nazpátek. Až po zapísknutí mělo smysl hovořit, jinak by jedni mluvili, aniž by předtím vyslechli ty druhé.

Sonda Voyager 2, která prolétla také kolem vzdáleného Neptunu, si podobný dialog se Zemí dovolit nemohla. Čtyři hodiny letěl signál k Zemi a další čtyři hodiny by letěl zpět, kdybychom chtěli se sondou komunikovat. Jenže zhruba stejně dlouho trval průlet sondy kolem planety. Činnost sondy musela být proto naprogramována předem, a pak – sonda dělej, co umíš!

Přitom toto vše je pouze blízké okolí Země. Od hvězd, které sledujeme na obloze pouhýma očima, letí světlo řádově desítky let, od některých stovky let, a je i pár takových, jejichž světlo – když k nám dorazí – je několik tisíc let



1. Astronomické zoo

staré. Tady už nemůžeme říkat, že jsme kousek za našimi humny. Ale stále jsme v naší Galaxii, lépe řečeno, rozhlížíme se po té její části, jež je mezi Sluncem a středem Galaxie. Pouhýma očima v naší Galaxii opravdu nevidíme daleko.

Máme vůbec šanci uvidět nějaký objekt mimo Galaxii? Ten by byl určitě dál než všechny hvězdy z naší soustavy, to by byl onen vzdálený objekt, který hledáme!

Jsou takové objekty, a hned tři. Nejde o hvězdy samotné, ale soustavy hvězd, tedy galaxie. Dvě bližší spatříme na jižní obloze – jsou to Velký a Malý Magellanův oblak. Třetím a nejbližším objektem z těchto tří je galaxie v Andromedě. Francouzský astronom Charles Messier jej 3. srpna 1764 zanesl do svého katalogu mlhovin (dodnes používaného) pod pořadovým číslem 31. Galaxie je na temné obloze vidět na první pohled, a proto nemá ani smysl pátrat po tom, kdo ji objevil. Můžeme se však ptát, kdo a kdy se o ní zmínil poprvé. Kupodivu to nebylo nijak dávno. Nejstarší dochovaná zpráva o tomto objektu pochází od perského astronoma Abu al-Sufiho z 10. století. Pochopitelně, tenkrát to byla pro hvězdáře jen *mlhovina*.

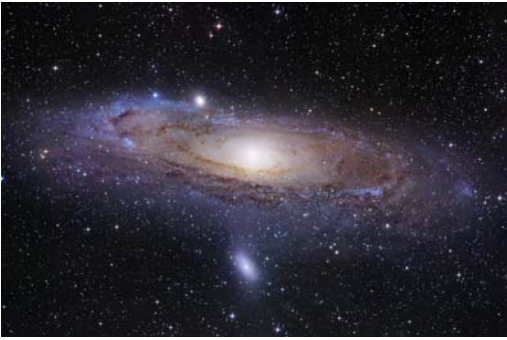
Galaxie v Andromedě je podle dnešních odhadů vzdálena dva miliony světelných let. Záření, které se před dvěma miliony let vydalo z této galaxie na cestu vesmírem, dnes lapáme do důmyslných detektorů, nebo se jen prostě díváme na tu mlhavou skvrnku, která je kousíček od hvězdy Mirach v souhvězdí Andromedy. Je to nejstarší světlo viditelné pouhýma očima. Ale jak je zároveň mladoučké proti světlu, které právě teď k nám dorazilo z kup galaxií, řádově více než desettisíckrát vzdálenějších než galaxie v Andromedě!

Z knihy *220 záhadných otázek z astronomie* (Rovnost, Brno 1996).



Dvě jádra galaxie v Andromedě (je zachycena oblast asi 30×40 světelných let). Foto: NASA/STScI. Snímek na předchozí straně ukazuje galaxii v Andromedě v ultrafialovém oboru spektra. Foto: GALEX Team, CalTech, NASA.

1. Astronomické zoo

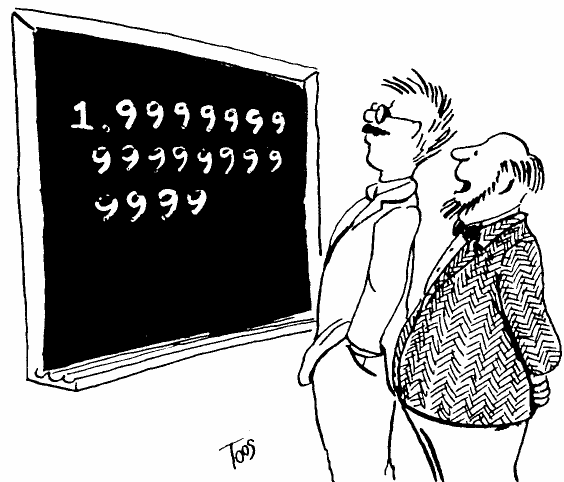


„luštěniny“

Ach, ty zkratky!

Znáte dobře oficiální třípísmenové zkratky souhvězdí? Nyní máte možnost se o tom přesvědčit. Jedno písmeno pro začátek stačí. Doplňte zbývajících osm písmen – do každého řádku a sloupce vepište jednu vhodnou zkratku (přitom žádná zkratka se při řešení neobjeví dvakrát).

		O



Tak to zaokrouhli, a jdeme na oběd!

1.7. Meteory a komety

Meteory na nočním nebi upoutají každého: náhle se na téměř neměnném nebi objeví prudký pohyb! Také pohled na jasnou kometu je prostě – úžasný. Nám půjde samozřejmě o to, abychom si vysvětlili, oč v případě meteorů a komet jde, jak tyto kosmické objekty spolu souvisejí, a kdy máme šanci spatřit nějaký meteor nebo jasnou kometu.

Padající hvězdy

Každý určitě nějakou „padající hvězdu“, tedy *meteor*, na vlastní oči viděl, a jistě také tuší, oč jde. Meteor je světelný jev v zemské atmosféře, k němuž dojde ve výškách menších než 120 kilometrů nad povrchem Země. Nastane tehdy, vlétno-li z kosmického prostoru do atmosféry částice o průměru alespoň několika desetin milimetru. Ta se sráží s atomy a molekulami ovzduší, zahřívá se a rozprašuje. Přitom září sloupec par pocházejících z meteorické částice.



Stopy Leonid – meteorického roje, který bývá aktivní v polovině listopadu vždy zhruba po 33 letech. Tento záběr pořídil Juraj Toth 16. 11 1998 na observatoři Modra u Bratislavy.

1. Astronomické zoo

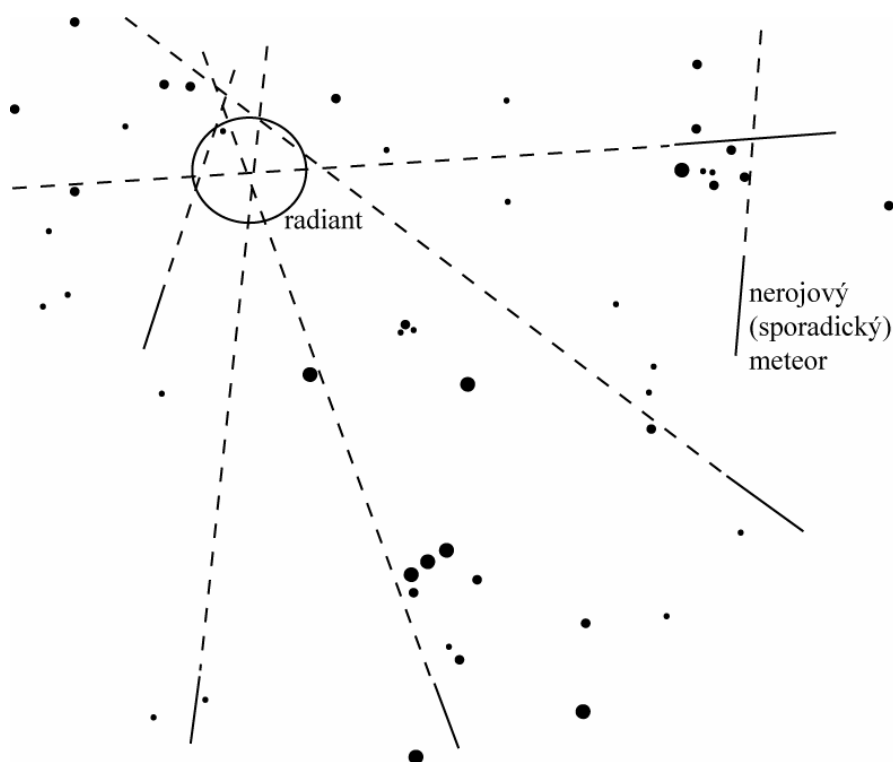
Jak bude meteor jasný, záleží na hmotnosti částice a na její rychlosti vůči Zemi. Meteory viditelné pouhými očima jsou způsobeny částicemi o hmotnosti řádově miligramy a větší. Meteor jasnější než Venuše v době své největší jasnosti označujeme jako *bolid*¹⁾. Velká meteorická tělesa mohou být odporem vzduchu zabržděna dříve, než se zcela vypaří. Po zbrzdění padá zbytek volným pádem k zemi, na zemský povrch dopadá *meteorit*.

Když se rojí meteory

Drobné částičky meziplanetární látky, s nimiž se Země neustále sráží, vlétají do atmosféry nahodile a samostatně, bez vztahu k jiným částicím. Meteory tohoto druhu nazýváme *sporadické*.

Když se však Země střetne se shlukem částic, které víceméně společně obíhají kolem Slunce, můžeme sledovat *rojové meteory*. Při průchodu Země meteorickým rojem pozorovatel vidí, jak meteory vylétují z jednoho místa na hvězdné obloze. Toto místo nazýváme *radiant*. Celý úkaz je vyvolán perspektivou: dráhy částic roje v atmosféře jsou přibližně rovnoběžné, a tak kdesi daleko od nás vylétují rojové meteory z jednoho bodu, podobně jako se v dále „spojují“ železniční koleje. Nejznámějším meteorickým rojem jsou zřejmě Perseidy (radiant leží v souhvězdí Persea, odtud název roje). Můžeme je sledovat každoročně v první polovině srpna.

Meteorické roje úzce souvisejí s kometami, jsou vlastně výsledkem pomalého rozpadu jejich jader. Částice jsou rozptýleny podél dráhy původní komety – tím rovnoměrněji, čím déle se kometa takto rozpadá.



Rojový a sporadický meteor.

¹⁾ Poznámka k původu slov „meteor“ a „bolid“: obě jsou řeckého původu. O prvním pojmu se dočtete více v čítance, zařazené do tohoto oddílu. Pojem „bolid“ souvisí s řeckým *bolídos*, což označuje metaci střelu; je to nepochybně šťastné pojmenování.

1. Astronomické zoo

Komety se představují

Každá *kometa* ve velkých vzdálenostech od Slunce je vlastně jen slepencem zmrzlých plynů a hornin. Toto tzv. *jádro komety* má rozměr řádově stovky metrů až desítky kilometrů. Jádro je natolik malé (a navíc tmavé), že je přímo nepozorujeme. Vidíme teprve tzv. *komu komety*²⁾. Tu tvoří plyny a prach uvolňovaný z jádra; rozsáhlejší koma vzniká při přiletu ke Slunci obvykle ve vzdálenostech 2 až 5 astronomických jednotek³⁾. Je-li kometa ještě blíže ke Slunci, vytváří se *ohon*. Ten je tvořen ionty a prachovými částicemi, původně uloženými v jádru komety.



Kometa Hale-Bopp, která dostala přezdívku „kometa dvacátého století“, měla dva ohony: prachový (načervenalý, širší), tvořený prachovými částicemi z jádra, a plazmový (namodralý, úzký), který míří přímo od Slunce. Foto: Alessandro Dimai a Davide Ghirardo, 16. 3. 1998.

Na lovu komet

Objevitel komety zažívá světskou slávu, zvláště když je kometa jasná či jinak zvláštní. Právo na pojmenování mají první dva nezávislí objevitelé. Jenže dopracovat se k objevu komety není nijak snadné. Pomineme-li náhodné objevy, pak takový „lovec komet“ potřebuje především trpělivost: až za několik set hodin čistého pozorovacího času se možná dopracuje k jednomu objevu. Pozoruje jen nedlouho po západu a před východem Slunce, protože komety v jeho blízkosti bývají nejjasnější a

²⁾ K původu slov *kometa*, *koma*: první je řeckého původu: *kométés* znamená dlouhovlasý. A druhé? Latinské slovo *coma* označuje kštici, hřívu.

³⁾ Astronomická jednotka je střední vzdálenost Země – Slunce (podrobněji viz kapitola 2.6. o měření vzdáleností).

1. Astronomické zoo

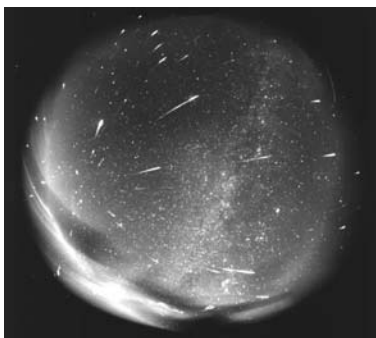
lovec komet má tudíž největší šanci na úspěch. Pozorovatel musí znát z paměti několik set podobně vyhlížejících mlhovin, hvězdokup a galaxií, aby se při prohlížení oblohy kousek po kousku zbytečně nezdržoval nahlížením do hvězdného atlasu. A pak také musí mít skvělé pozorovací podmínky – z města to určitě nejde!

V posledních letech dostávají ovšem tito „lovci komet“ nebývalou konkurenci, a ta – jak se zdá – je brzy zcela nahradí: v současnosti většinu komet objevují dokonale automatizované dalekohledy, specializované právě na sledování komet a planetek.

Hmotnosti těles sluneční soustavy:

<i>Těleso:</i>	<i>Hmotnost (celá sluneční soustava = 100 %):</i>
Slunce	99,866
planety	0,134
kometry	0,000 3
družice planet	0,000 04
planetky	0,000 000 1
meziplanetární prach	0,000 000 000 001

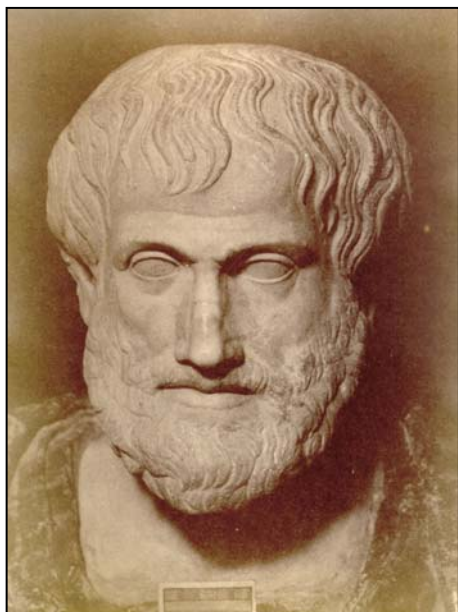
Poznámka: *planetky* jsou tělesa většinou kilometrových rozměrů, obíhající (až na malé výjimky) kolem Slunce v prostoru mezi Marsem a Jupiterem a nebo až za Neptunem. U více než 100 000 planetek známe dobře jejich dráhy (stav z roku 2005, toto číslo se prudce zvyšuje).



čítanka

Zdeněk Pokorný: Co mají společného meteory s meteorologií?

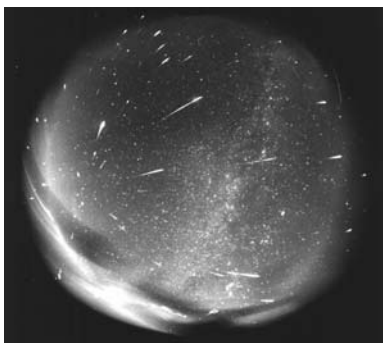
Podoba obou slov je nabíledni. Meteorologové pojmem meteory označují nejrůznější povětrnostní jevy jako vítr, déšť, bouřky či sněžení. Astronomové zas kraťoučký světelný jev, který nastane po vniknutí malého kosmického tělesa do atmosféry. Pro hlubší rozbor a vysvětlení sáhneme tedy po řecko-českém slovníku: *meteoros* znamená předmět ve výši, vysoko na nebi, ve vzduchu. Stopa tudíž vede neomylně do starého Řecka.



Byl to Aristoteles, který padajícím hvězdám přisoudil označení meteory, neboť usoudil, že jde o jevy atmosférické. Zcela správně! Jenže druhá strana téže mince je skutečnost, že jev meteoru má svůj původ v kosmu. To však Aristoteles popíral a tvrdil, že jde o jevy čistě atmosférické. Přece z nebe nemohou padat pozemské předměty jako jsou meteority, když nebe – vesmír nad námi – obsahuje jen předměty nebeské! Aristotelova autorita byla tak obrovská, že svůj omyl vnutil lidstvu na dobu celých dvou tisíciletí. Přitom ve starověku, před Aristotelem, byly meteory i meteority všeobecně považovány za mimozemské, za návštěvníky z nebe.

Výzkum meteorů (padajících hvězd) současní meteorologové už nemají tak říkajíc v popisu práce. Protože to nejdůležitější, co lze studiem meteorů poznat, není ona kratičká ohnivá chvíle, během níž meteor spatříme, ale dlouhé údobí předchozí existence. Jenže to je záležitost veskrze kosmická.

Část stejnojmenné kapitoly z knihy *100+1 záhadných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).



čítanka

Miroslav Plavec: Déšť světla

Když dne 9. října 1933 zapadalo Slunce a nad Evropou se pozvolna skláněl soumrak, zdálo se, že všechny věci v přírodě budou mít i tuto noc svůj přirozený chod jako v kteroukoli jinou noc. Ne, nestala se žádná katastrofa, Slunce druhý den ráno opět vyšlo a při jeho východu byl svět právě tak pokojný a právě tak nepokojný jako den předtím; a přece velmi mnozí na tuto noc nikdy nezapomenou.

Nad střední Evropou bylo téměř úplně zataženo, takže většina obyvatel nevěděla vůbec nic o tom, co se děje nad mraky. Vzpomínám na onen večer: seděli jsme u ohničku, oči byly téměř úplně oslepeny plamenem, nebe bylo téměř dokonale zamračené – a přece jsme se podívali zábleskům, které se v mracích občas objevily. Na blesky byla přece pokročilá roční doba, ostatně zjevy nebyly doprovázeny žádným zvukem.

V západní Evropě bylo téměř všude zcela jasno. Sotva se setmělo – to bylo kolem 19 hodin našeho času – bylo na nebi vidět neobyčejné množství slabých létavic. Jejich počet rychle stoupal a za necelou hodinu přešel úkaz v pravý déšť meteorů. Velmi pěkně popisuje jev astronom Touchet ¹⁾, který měl v Pyrenejích dokonalé pozorovací podmínky:

„Kolem 20. hodiny mne zavolali sousedé a uviděl jsem nejkrásnější divadlo za celou dobu své pozorovatelské činnosti v oboru meteorů: nádherný meteorický déšť. Bezprostřední dojem byl, že se všechny hvězdy uvolnily a padají k zemi. Uklidnil mne až pohled na známé skupiny hvězd, klidně zářící v pozadí deště. Na všech stranách neustále padaly létavice: oko se snažilo sledovat některé, zatím co se jiné objevovaly po desít-



¹⁾ Čti: *tušé*.

1. Astronomické zoo



kách. Padaly jednotlivě, po dvojicích, v celých sprškách...“
Jiný pozorovatel poznamenal: „V jednom okamžiku, dívaje se k Velkému vozu, měl jsem dojem, že hustě a pravidelně padá sníh.“

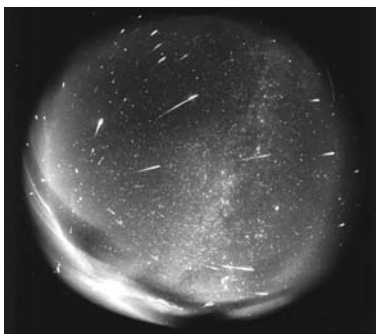
Na prosté lidi působil zjev neobyčejně mohutně; po ulicích měst i všude na venkově stáli lidé s hlavou obrácenou ke hvězdám a udiveně sledovali neočekávané a neznámé divadlo. V Portugalsku utíkali věřící do kostelů, domnívaje se, že nastává konec světa a nebe se řítí na zemi.

Mnozí astronomové přiznávají, že podívaná byla tak nepopsatelně krásná, že jim dalo mnoho práce, aby se odtrhli od pouhého dívání a začali jev systematicky sledovat. Ač velkou většinu pracovníků zastihl úkaz zcela nepřipraveni, přece jen byla vykonána cenná pozorování.

Výňatek z knihy *Komety a meteory* (Orbis, Praha 1957).

Oba obrázky jsou dobovými kresbami, které připomínají Leonidy v roce 1833, pozorované v Severní Americe.

1. Astronomické zoo



Myšlenky jsou beze cla.

William Shakespeare, dramatik (1564 – 1616)

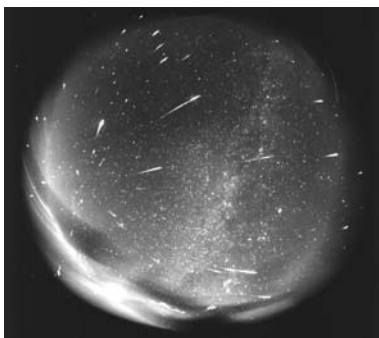
otázky a příklady

Otázka 1.7.1. Radiant meteorického roje nikdy není přesně bodový, ale jde o malou plošku na hvězdné obloze. Čím můžete tuto skutečnost vysvětlit? Nabízíme tyto možnosti: a) Dráhy meteorů v atmosféře nejsou zcela rovnoběžné. b) Meteorická tělíska mají různou hmotnost. c) Meteorická tělíska se při průletu atmosférou různě rychle rozprašují.

Otázka 1.7.2. Hmotnost „průměrné“ komety jsme dosud neuvodli. Přesto můžete správně odpovědět na naši otázku, když víte, že jedna z nabízených možností je určitě správná. Tedy: když hmotnost Slunce je rovna jedné, jaký díl sluneční hmotnosti připadá na jednu kometu? a) 10^{-33} ; b) 10^{-30} ; c) 10^{-15} .

Otázka 1.7.3. Který z meteorických rojů je starší – ten, jenž pozorujeme každoročně, nebo ten, který lze sledovat jen občas, např. jednou za 50 let?





čítanka

Jiří Dušek: Jak se vaří kometa?

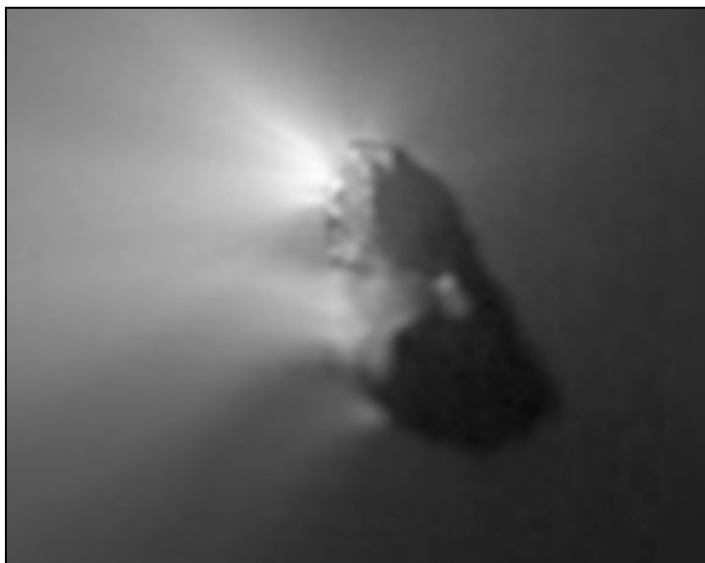
Co je to za bláznivý nápad, řeknete si možná. Uvařit si čaj, vajíčko natvrdo nebo polévku, prosím... Ale kometu? Věřte nebo nevěřte, ono to doopravdy jde.

Srdcem každé komety je jádro velké několik kilometrů. Je tak malé a tak tmavé, že jej ze Země nelze spatřit. Jakmile se ovšem přiblíží ke Slunci, začne se z jeho povrchu uvolňovat plyn a prach. Kolem se vytvoří přechodná velmi řídká obálka velikosti od stovek tisíc až po miliony kilometrů. Jádro se rázem zviditelní, na obloze se objeví kometa. Plynoprachová obálka je totiž nasvětlena Sluncem: díky tomu zde plyn svítí podobně jako v pozemských výbojkách, prach pak sluneční záření velmi účinně rozptyluje. Hmotnost přechodné atmosféry je však zcela zanedbatelná, veškerá hmota komety zůstává stále ukryta v jádru. Jestliže tedy chcete „uvařit kometu“, stačí, když dokážete uklohnit alespoň kousek jejího jádra. Zde je recept.

Potřebovat budete: *hrníček tuhého oxidu uhličitého (tzv. suchého ledu), hrníček vody (nejlépe špinavé), dvě až tři polévkové lžíce jemného písku či prachu, polévkovou lžící toneru do xeroxu, několik mililitrů čpavku, špetku organického materiálu, dva hrníčky s obsahem 2 decilitrů (mohou být i plastické), nepropustný, opravdu silný igelitový pytlík, dobře izolující rukavice, lžíci na míchání, ochranné brýle.*

Z pozemských i družicových pozorování vyplývá, že kometární jádra nejsou nic jiného než křehké slepence oxidu uhličitého, vodního ledu, prachu a nepatrného množství organického materiálu. Všechny tyto ingredience seženete velmi snadno. Pouze oxid uhličitý vám možná bude dělat problémy. Jako tzv. suchý led ho ale získáte v některých potravinářských zařízeních. Pamatujte přitom na to, že značně rychle sublimuje. Nebudete-li pokus provádět ihned, musíte ho sehnat větší množství.

Jak si tedy uvaříte vlastní napodobeninu kometárního jádra? Jednoduše: nejdříve vezmete kostku suchého ledu, zabalíte ji do novin a kladívkem rozdrtíte na jemný prášek, který zaplní asi jeden šálek na čaj. Při



1. Astronomické zoo

manipulaci buďte opatrní a vždy používejte rukavice! Suchý led má teplotu kolem $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, jeho kontakt s nechráněnou pokožkou proto může způsobit vážné popáleniny.

Do druhého hrníčku nalijte vodu s trochou jemného písku. V zimě s úspěchem využijete rozpuštěný špinavý sníh, který najdete podél silnic a chodníků. Přidejte pár mililitrů čpavku (je obsažen například v některých prostředcích na čištění oken), nepatrné množství organického materiálu (do roztoku můžete plivnout) a polévkovou lžící černého toneru do xeroxu. Ten směsi dodá matnou černou barvu. Kometární jádra jsou totiž velice tmavá.

Výsledný koktejl nalijte do nepropustného silnostěnného igelitového pytlíku a poté opatrně přisypte dobře rozdrčený suchý led. Zvnějšku, ovšem pořád s rukavicemi, směs neustále promíchávejte a hněťte, dokud vám po několika sekundách neztuhne a nevytvoří malou kompaktní hrudku. Chraňte si přitom oči, odpařující se oxid uhličitý bude intenzivně bublat a špinavý materiál drobně prskat ven z pytlíku.

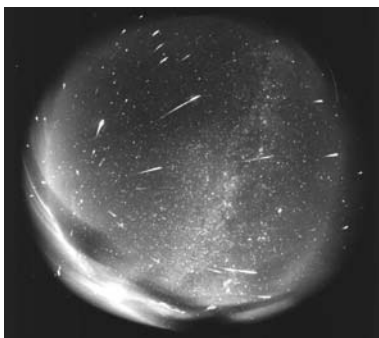
Hrudku po chvíli vytáhněte a pozorně si ji prohlédněte. Právě takto by vypadal úlomek nefalšovaného kometárního jádra: chladná porézní a velmi tmavá hmota, složená z oxidu uhličitého a vody. Z jejího povrchu se v podobě bílých obláček uvolňuje oxid uhličitý, který přechází z tuhého stavu rovnou do plynného (sublimuje). Obdobně se chovají i skutečné komety.

Kvůli přesnosti ale musíme zdůraznit, že pravé vlasatice, resp. jejich jádra, vznikala zcela jinak. Zformovala se ze zbytků zárodečné mlhoviny, ze které před více než čtyřmi a půl miliardami let vznikly Slunce, planety, naše Země i my.

Uveřejněno v *Záludných otázkách z astronomie*, sešit č. 6 (Paráda, Brno 1998).

Snímek na předchozí straně pořídila sonda Giotto v březnu 1986, když těsně prolétala kolem jádra Halleyovy komety. Ze snímku je patrné, že kometární jádro tvarem připomíná burský oříšek, dlouhé je asi 15 km a 7 až 10 km tlusté. Na povrchu jádra je několik míst, z nichž intenzivně tryská prach a plyn – nejvíce v místech mířících ke Slunci, nejméně na noční straně. Celkově je aktivní asi desetina povrchu jádra komety. Povrch je velice tmavý, o dost tmavší než třeba černé uhlí; je značně nepravidelný, plný různých pahorků a údolí. Materiál, který vyletuje z komety, tvoří z 80 procent voda, z 10 procent oxid uhelnatý, pak je zastoupen oxid uhličitý, metan a čpavek, stopově jsou přítomny různé uhlovodíky, železo či sodík.

1. Astronomické zoo



„luštěníny“

Co mají společného?

Vypadá to jako nějaká šifrovací tabulka, ale zdání klame. Chceme si jen ověřit, zda vám v paměti utkvěly latinské názvy souhvězdí – ty pro svou astronomickou praxi určitě budete často potřebovat. Tak tedy: v každém řádku je uvedeno několik latinských názvů souhvězdí (jsou napsána bez mezer). Doplníte-li chybějící písmena v každém řádku a pak je přečtete odshora dolů, dovíte se, co mají souhvězdí s vepsanými písmeny společného (poznáváme, že tajenkové slovo je uvedeno latinsky). A ještě jedna otázka: kolik názvů souhvězdí je v celé tabulce uvedeno?

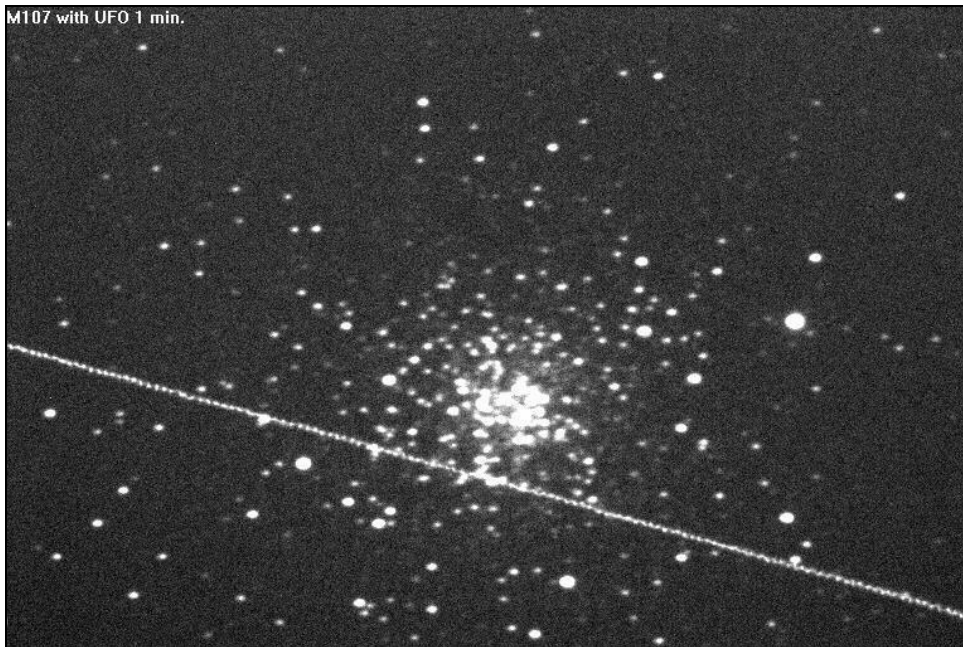
P	E	R	S	E	U	S	G		M	I	N	I	L	U	P	U	S
S	C	U	L	P	T	O	R		A	N	C	E	R	V	E	L	A
E	R	I	D	A	N	U	S		I	B	R	A	I	N	D	U	S
P	E	G	A	S	U	S	P		S	C	E	S	H	Y	D	R	A
P	A	V	O	S	C	O	R		I	U	S	O	C	T	A	N	S
H	E	R	C	U	L	E	S		A	U	R	U	S	A	P	U	S
P	Y	X	I	S	O	P	H		U	C	H	U	S	L	Y	R	A
L	E	O	C	A	P	R	I		O	R	N	U	S	C	R	U	X
C	O	L	U	M	B	A	S		G	I	T	T	A	R	I	U	S

1.8. Umělé družice na nočním nebi

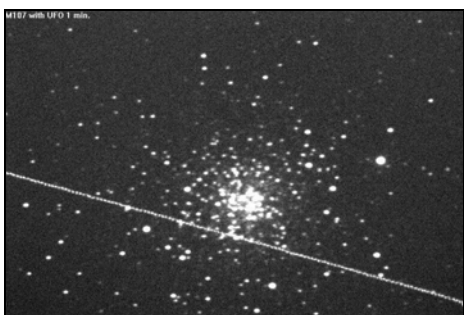
Ještě před půl stoletím přiváděly přelety jasných družic po nebi davy lidí k nadšení, nu a dnes přelet družice sotva koho vzruší víc než pohled na vysoko letící letadlo. Přesto je dobré, když umíte rozpoznat družici od meteoru.

Ani stálice, ani meteor...

... zato družice. Umělá, ovšemže. Na nočním nebi – především zvečera nebo nad ránem – jich můžete spatřit desítky, jen si jich všimnout. Vypadají jako světlé body, které se zcela nehlučně přesouvají mezi hvězdami. Přes celou oblohu přeletí většinou za několik minut. Není těžké přijít na to, proč je vůbec vidíme: každá družice přece odráží a rozptyluje sluneční světlo. Zatímco my dole na zemském povrchu máme již večerní tmu, ve výškách několika set kilometrů, kde většina družic létá, dosud svítí Slunce. Vlétne-li družice do zemského stínu, snadno to poznáme: družice během pár sekund pohasne a zmizí nám z dohledu.



Hvězdkupa M 107 a stopa umělé družice. Které? Při tak obrovském množství družic to je záležitost pro geniálního detektiva ...



čítanka

Jiří Dušek: Mají družice půlnoční pauzu?

Je poněkud paradoxní, že neznámější astronomické objekty, jako jsou kvasary, pulsary nebo černé díry, na skutečné obloze nikdy nespatříte. Přesto jsou tolik populární. Dokonce i galaxií a mlhovin, jejichž barevné snímky zdobí nejednu knížku, uvidíte bez dalekohledu jen málo. Na druhou stranu se běžně v noci setkáte se stovkami umělých satelitů Země. Většina příruček, dokonce i těch, které se věnují pozorování hvězdného nebe, o nich ovšem z neznámého důvodu mlčí.

V okolí Země se dnes pohybuje mnoho tisíc těles o průměru od několika centimetrů až po desítky metrů a jejich počet neustále roste. Řádově stovky z nich můžete spatřit i pouhýma očima. Poznat na tmavém nebi družici přitom není těžké. Vypadá jako světlý bod, který se nehlučně pohybuje mezi hvězdami a přeletí celou oblohu během několika minut. Vlastní zdroj světla družice ale nemají. Svítí díky odraženému slunečnímu světlu, podobně jako Měsíc. Většina z nich se otáčí, a vy proto můžete sledovat pravidelné či nepravidelné změny jasnosti. Poněkud obtížnější je říci, jak se která pozorovaná družice vlastně jmenuje. Jejich dráhy se totiž z různých příčin neustále mění. Předpovědi přeletů těch nejnápadnějších však získáte prostřednictvím počítačové sítě Internet.

Podívejme se teď na přelétávající družice tak říkajíc pod drobnohledem. Kdybyste si dali tu práci a počítali po celou noc množství spatřených satelitů řekněme vždy během jedné hodiny, zjistili byste zajímavou nesrovnalost: zatímco zvečera a nad ránem uvidíte během letní noci až deset družic za hodinu, kolem půlnoci jejich počet klesá na méně než polovinu. Je to snad proto, že by jich létalo méně? Nikoli.

Je totiž nutné si uvědomit, že družici uvidíte pouze tehdy, když vy budete ve tmě, ale ji bude Slunce dosud osvětlovat. Na tmavém pozadí pak vynikne. Aby byla do-



1. Astronomické zoo

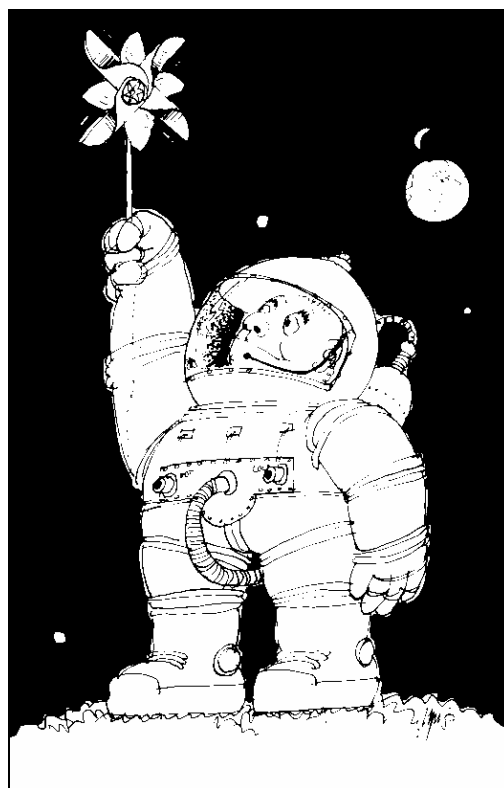
statečně jasná, musí se zároveň nacházet na nízké oběžné dráze. Jednoduše řečeno: čím bude blíže, tím bude jasnější. Samozřejmě záleží i na velikosti. Nejnápadnějšími umělými tělesy, která můžete spatřit, bývají raketoplán, Hubblův kosmický dalekohled či Mezinárodní kosmická stanice. Poloha Slunce se ale vůči nehybnému pozemskému pozorovateli během noci mění, stejně jako poloha zemského stínu. Podívejme se jak, a pro jednoduchost vezměme v potaz směr přímo nad hlavou, směr do zenitu.

Koncem července zapadá Slunce kolem půl osmé navečer místního času. O dvě a půl hodiny později, kdy už je dostatečná tma na sledování družic, sahá zemský stín nad vašimi hlavami do výšky sto kilometrů. Tělesa, která proletí v menší vzdálenosti, už Sluncem osvětlena nejsou a vy je nespátříte¹⁾. Za další hodinu Slunce klesne hlouběji pod obzor a ve stínu Země natrvalo zmizí družice s výškou menší než dvě stě kilometrů. Asi hodinu před místní půlnocí se naše mateřská hvězda dostane nejhluběji pod obzor a ve tmě zhasnou družice i ve výšce čtyři sta kilometrů. Většina nejjasnějších satelitů se přitom pohybuje právě ve vzdálenosti 200 až 400 kilometrů nad zemským povrchem. Kolem jedné hodiny ranní začne Slunce opět stoupat k obzoru a osvětlovat tělesa i na nižších drahách. Počet zpozorovaných družic vzroste.

Ještě větší rozdíly v počtu satelitů zjistíte v zimě, kdy Slunce klesá pod obzor mnohem hlouběji než v létě. Do výšky dvě stě kilometrů sahá zemský stín v zenitu začátkem prosince již v 18 hodin. Kolem 20. hodiny to je už 1500 kilometrů a kolem půlnoci dokonce 7000 kilometrů. Tak vzdálené družice spatříte bez dalekohledu jen výjimečně. Zimní noci jsou tudíž na družice velmi chudé, letní soumraky naopak bohaté.

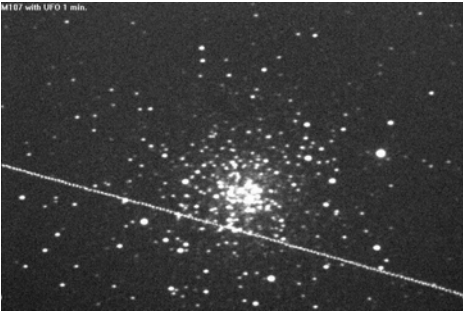
Příčinou půlnoční „pauzy“ družic je tudíž proměnlivá výška zemského stínu. Umělé satelity během ní ani neodpočívají, ani se nikde nezastavují. Létají neúnavně pořád dál, nic však na ně nesvítí a tak nám zůstávají ukryty ve tmě.

Uveřejněno v publikaci *Záludné otázky z astronomie*, 6. sešit (Paráda, Brno 1988).



¹⁾ V tak malých výškách se ovšem umělé družice nepohybují (pozn. Z. Pokorný).

1. Astronomické zoo



otázky a příklady

Otázka 1.8.1. Umělé družice Země lze vypustit na rozmanité dráhy. Jedna ze tří možností, které dále uvádíme, však možná není. Která? a) Sklon dráhy družice k rovníku je větší než 90° . b) Družice obíhá v rovině rovníku s takovou úhlovou rychlostí, s jakou se pod ní otáčí Země, tedy „stojí“ nad jedním místem rovníku. c) Družice obíhá ve dráze kolmé k rovníku tak, že poledník, který leží pod družicí, je stále stejný.

Otázka 1.8.2. Následují čtyři trojice pojmů, se kterými jste se seznámili v této kapitole „Astronomické zoo“. Jen jediná trojice obsahuje pojmy, které spolu nemají (!) *přímou* souvislost. Která trojice to je? a) galaxie, mezihvězdná látka, hvězdy; b) proměnná hvězda, pohybová hvězdokupa, souhvězdí. c) bolid, meteor, radiant; d) sluneční soustava, kometa, meteorický roj.

2.1. Hvězdářský zeměpis

Nevyhneme se mu, chceme-li přesně určit polohu kosmických objektů. Na první pohled je hvězdářský zeměpis komplikovaný: samé přímky, úhly, souřadnice a kdovíco ještě. Složitě je to ale to ale jen na první pohled. Když pochopíte princip, vše bude rázem jednoduché. Ostatně, je to jako s násobkou: tu zkrátka musíte znát, protože když ji neznáte, nemůžete se naučit derivovat nebo integrovat. Proto se nenechejte odradit tím, že tato kapitola je delší než ostatní, plná nových pojmů a souvislostí. Nespěchejte, postupujte vpřed pomalu – pomocí příkladů, otázek, praktika a dalších částí této lekce určitě vše správně pochopíte.

Obloha a hvězdná obloha

Nejdříve si vysvětlíme pojem, který v běžné řeči sice často používáme, ale nad jeho hlubším významem ani moc neuvažujeme. Jde o pojem *obloha*.

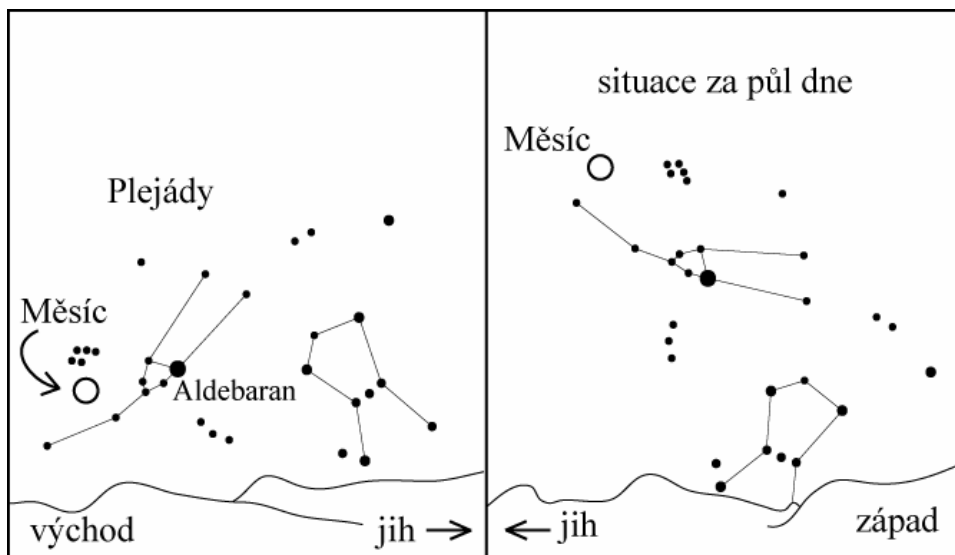


Na obloze nad jezerem může rodinka sledovat kosmické objekty (Měsíc, nalevo nahoru od něj je jasná Venuše, napravo od ní méně jasný Jupiter) i objekty pozemské (mraky, letadlo – krátká úsečka v pravé části obrazu). Foto: Michael Wilson.

2. Vše je v pohybu

Stojíme v krajině, hledíme kolem sebe. Krajinu – tedy budovy, stromy, kopce, jež jsou v našem dohledu – nazveme *obzorem*. Obzorem proto, že krajinu obzíráme, můžeme ji obhlédnout. Podívejme se ale trochu výš, nad náš obzor. Tam se můžeme dívat neomezeně mnoha směry ¹⁾. Právě *všechny směry, které míří nad obzor, tvoří naši oblohu*. Na obloze spatříme objekty nám dobře známé – pozemské (mraky, letadla), ale i objekty kosmické. O ty nám půjde především. *Obloha* je tedy množina všech směrů, které vycházejí z jednoho bodu (toho, kde se nalézá pozorovatel) a jež míří nad obzor ²⁾.

Kosmické objekty se po obloze pohybují od východního obzoru k západnímu ³⁾. Na první pohled se zdá, že se Slunce, Měsíc, planety i hvězdy pohybují po obloze naprosto stejně. Pečlivému pozorovateli však neujdou malé rozdíly: Slunce ani Měsíc či planety se *nepohybují přesně stejně rychle* jako hvězdy. Pak je ovšem užitečné vztáhnout pohyby blízkých těles (Slunce, Měsíce, planet) vůči hvězdám. Hovoříme o *hvězdné obloze*: vzdálené hvězdy vytvářejí jakousi síť, či chcete-li kulisu, a vzhledem k ní budeme posuzovat polohy relativně blízkých objektů ze sluneční soustavy.



Pohyb Měsíce na obloze.

¹⁾ Několikrát jsme již hovořili o směrech. Aby bylo vše stoprocentně jasné, uveďme, co tím přesně míníme: *směr* je pro nás polopřímka, spojující oči, kterými sledujeme svět kolem sebe, s daným objektem.

²⁾ Dodejme, že takto zavedený pojem *obzor* má svou nespornou logiku: obzor *není totéž* co vodorovná rovina, procházející místem pozorování, a rozlišovat oba pojmy má svůj význam: nějaký kosmický objekt může být totiž nad vodorovnou rovinou, ale přesto pod obzorem, chceme-li jej pozorovat např. z údolí. V literatuře se tyto pojmy často neodlišují – nenechte se tím mýlit!

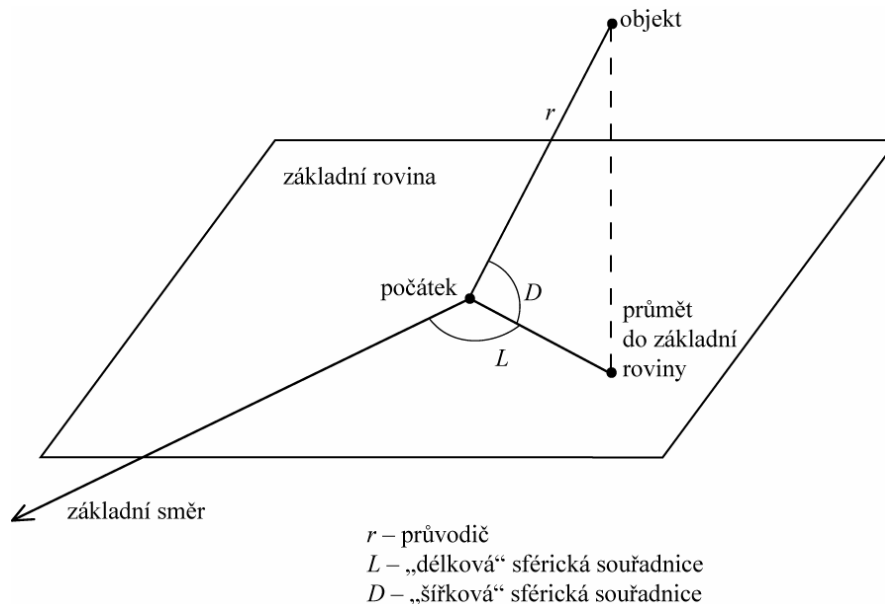
³⁾ V řadě publikací i učebnic se tento pohyb objektů označuje jako *zdánlivý*, protože *skutečný* pohyb je údajně pohybem na hvězdné obloze (viz o pár vět výkladu dále). **Nepoužívejte tohoto označení**, je fyzikálně naprosto nesmyslné! Zdánlivé je to, co se nám jen zdá, ale ve skutečnosti neexistuje (např. vidíme-li Měsíc v úplňku nízko nad obzorem, *zdá se* nám úhlově větší než když je vysoko nad obzorem – viz čítanka v kapitole 3.3.). Pohyb objektů *na obloze* je veskrze reálný (skutečný), můžeme ho pozorovat, fotografovat... Jedná se o pohyb tělesa v nějaké fyzikální vztažné soustavě, a žádná vztažná soustava nemůže být preferována na úkor druhé (pouze může být konkrétní vztažná soustava pro popis pohybu tělesa vhodnější či méně vhodná, ale to je vše).

2. Vše je v pohybu

Sférické soustavy souřadnic

Objekty se na obloze nacházejí v různých směrech. Protože většinou zjišťujeme *úhly* mezi dvěma směry, s výhodou používáme tzv. *sférické soustavy souřadnic*. V nich musíme definovat *počátek soustavy*, dva různé *základní směry* a způsob, jímž budeme určovat dvě *úhlové souřadnice* (třetí souřadnicí je vzdálenost objektu od počátku).

Jeden ze dvou základních směrů udává tzv. „pól“ soustavy. Rovina na něj kolmá, procházející počátkem, je „rovníkem“ soustavy. *Šířková souřadnice* je orientovaný úhel měřený od rovníku k pólu. K měření *délkové souřadnice* potřebujeme tzv. „poledník“: polorovinu danou dvěma směry – k pólu a k danému objektu. Délková souřadnice je orientovaný úhel mezi předem vybraným základním poledníkem (ten je určen dalším základním směrem) a tím poledníkem, kde je náš objekt. Případá vám to složité? Tak se rychle podívejte na následující obrázek.

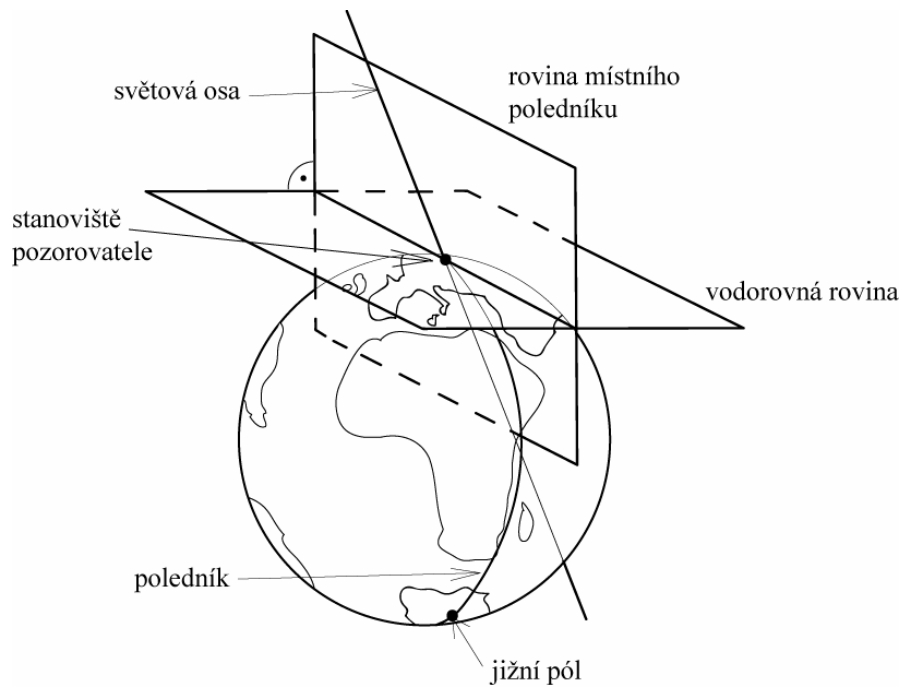


Sférická soustava souřadnic.

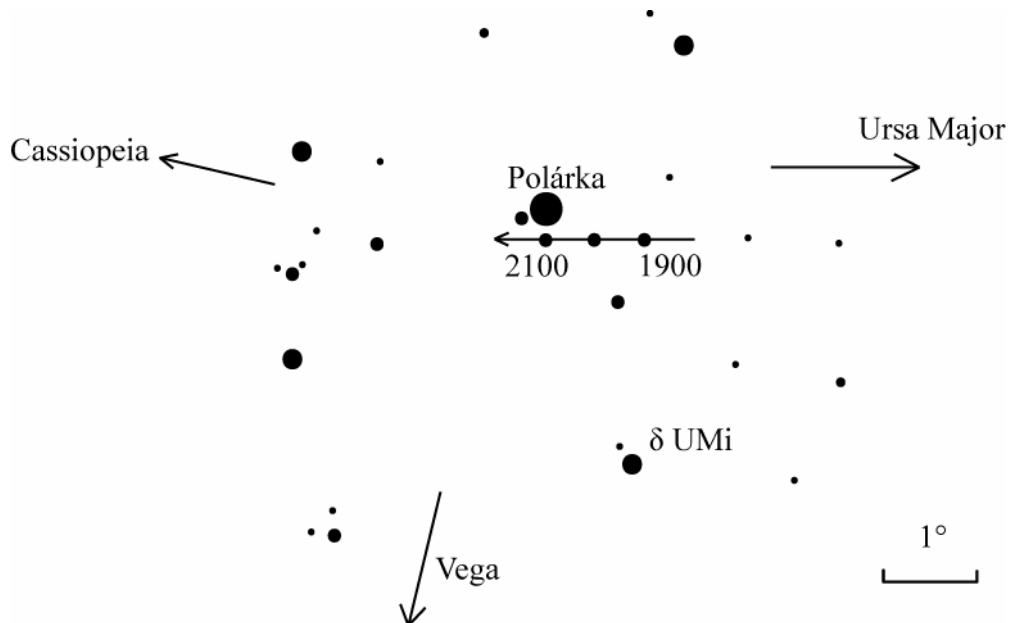
To ještě není vše, čeká nás další přiděl nových pojmů. Svislý směr vytyčíme v přírodě poměrně snadno. Směr opačný ke svislému směru nazveme *nadhlavník* (nebo *zenit*). Je jasné, že rovina kolmá k zenitu, která prochází místem pozorování, je *vodorovná rovina*. Přímkou rovnoběžnou s rotační osou Země, jež jde místem našeho pozorování, nazveme *světovou osou*. Tato přímka udává dva směry, které nazýváme *světovými póly*: jeden je severní, druhý jižní. Světová osa tak určuje *světové strany*. Rovina, která je kolmá na světovou osu a prochází stanovištěm pozorovatele, je *světový rovník*⁴⁾. Směr svislý a světová osa definují polorovinu, které říkáme *místní poledník*.

⁴⁾ Rozlišujte pojmy rotační osa × světová osa, (rotační) pól × světový pól, rovník × světový rovník. Není to hra se slovíčky.

2. Vše je v pohybu



K definicím některých pojmů.

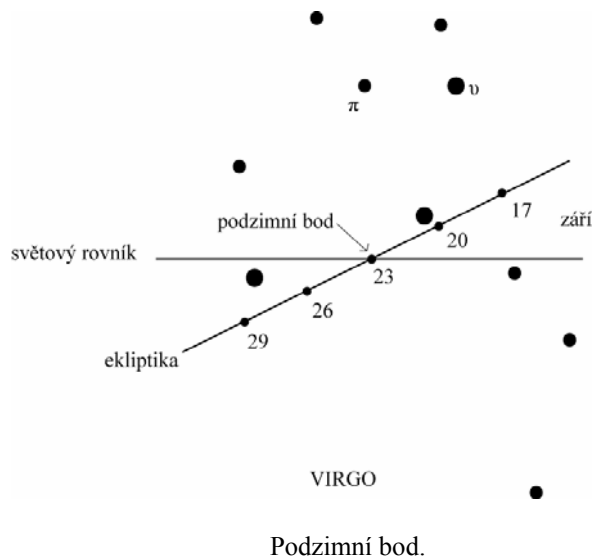
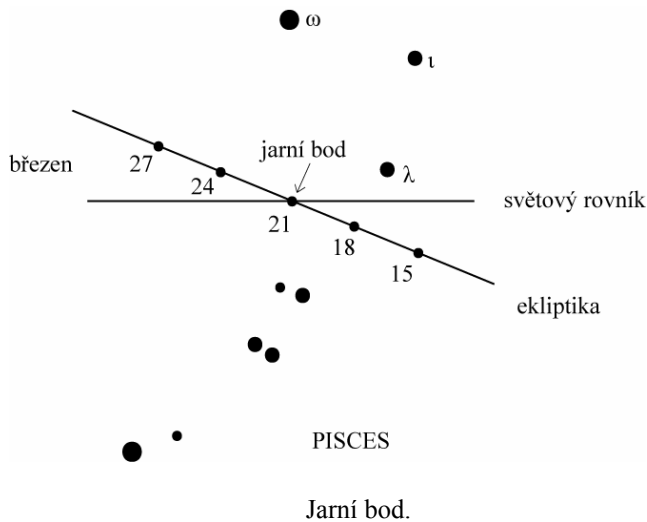


Poloha severního světového pólu.

Z kapitoly 1.1. o Slunci již víte, co je to *ekliptika*. Nyní si jen připomeneme, že je to množina všech směrů na obloze, ve kterých se Slunce v průběhu celého roku nachází. Z pozorování je zřej-

2. Vše je v pohybu

mé, že roviny ekliptiky a světového rovníku nejsou totožné – jsou navzájem skloněny a svírají úhel asi $23,5^\circ$. Proto mají společnou přímkou (vedoucí místem pozorování), a ta udává dva směry v prostoru: první se jmenuje *jarní bod*⁵⁾, druhý *podzimní bod*⁶⁾.



⁵⁾ Jak už název napovídá, v jarním bodě je Slunce na začátku astronomického jara (20. nebo 21. března), v podzimním na počátku astronomického podzimu (22. nebo 23. září). Snad vás nezmate historické označení „bod“ – tyto „body“ hvězdné oblohy jsou ve skutečnosti *směry* v prostoru.

⁶⁾ V celém tomto kursu se zásadně vyhýbáme vágnímu pojmu *nebeská sféra*, nehovoříme o průsečících s touto sférou, o bodech a kružnicích na ní. Je tomu tak proto, že pojem *nebeská sféra* bývá zaveden velmi neurčitě (jaký má poloměr?, jakým způsobem se promítá na tuto sféru?). Abychom nebeskou sféru mohli nějak graficky vyjádřit, zakresluje ji z vnějšího pohledu; ten však nijak neodpovídá naší každodenní zkušenosti! Složitou transformací mezi pohledem na oblohu, který máme, a pohledem „zvnějšku“, dokáže provést jen ten, kdo je s problémem dobře seznámen. Jak sami vidíte, bez nebeské sféry se obejdeme. Vše definujeme pomocí směrů, kam hledíme, odkud přichází záření apod. To odpovídá našim zkušenostem, vlastnímu pozorování oblohy pouhýma očima.

2. Vše je v pohybu

Souřadnicové soustavy v astronomii

V astronomii velmi často používáme sférické souřadnicové soustavy, které mají počátek v místě pozorování. Základní směry si jistě můžeme volit zcela libovolně, ale v praxi si vybíráme takové, které lze snadno vytyčit. Pro „póly“ a roviny „poledníkové“ či „rovníkové“ astronomové z historických důvodů často používají speciální pojmenování, stejně jako pro označení souřadnic. Koneckonců – posuďte sami na dvou nejužívanějších soustavách:

	<i>soustava obzorníková</i>	<i>soustava rovníková</i>
„pól“ soustavy	zenit	severní světový pól
„rovník“ soustavy	vodorovná rovina	světový rovník
směr, který určuje základní poledník	jižní	jarní bod
délková souřadnice	azimut ⁷⁾	rektascenze
šířková souřadnice	(úhlová) výška	deklinace
soustava je	levotočivá	pravotočivá

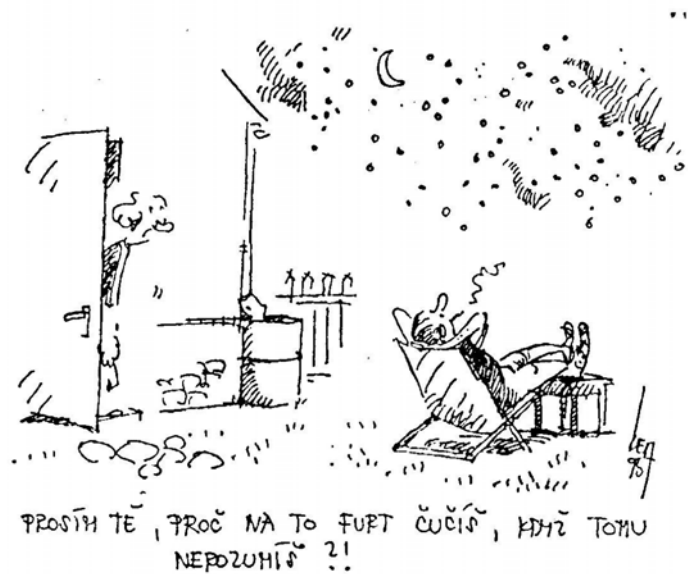
Existují a používají se samozřejmě i další souřadnicové soustavy; známe-li však princip, jak se takové soustavy vytvářejí, snadno si třeba už z názvu odvodíme řadu jejich vlastností. Např. *ekliptikální* souřadnicová soustava má jako „rovník“ ekliptiku. „Pólem“ je severní pól ekliptiky. Směr, který určuje základní poledník, je jarní bod, souřadnice se nazývají ekliptikální šířka a ekliptikální délka. Je to soustava pravotočivá.

Směr počítání délkové souřadnice určuje, jde-li o *pravotočivou* či *levotočivou* soustavu. To zjistíme např. takto: jestliže palec natažené ruky míří na „pól“ a paže ruky udává směr průniku roviny „rovníku“ a základního poledníku, pak zahnuté prsty ruky naznačují směr, kterým se délková souřadnice počítá kladně. Podle toho, jde-li o ruku pravou či levou, je souřadnicová soustava pravotočivá nebo levotočivá.

Mnohé názvy souřadnic znějí opravdu cizokrajně: slovo *zenit* je arabského původu, je to zkomolenina ze *zemt-arras* (směr hlavy). Také slovo *azimut* má arabský původ: *as-samt* je cesta slunce. Názvy *rektascenze* a *deklinace* pocházejí z latiny: v prvním případě jde o složeninu z *rectus* (rovný, přímý) a *ascensio* (výstup), ve druhém *declinatio* znamená odkloňovat, uchylovat.

⁷⁾ V astronomii se souřadnice zvaná azimut měří od jihu, v zeměpise podobná souřadnice od severu. Kdyby mohlo dojít k nedorozumění, je vhodné upřesnit, zda se jedná o *astronomický* azimut či *zeměpisný* azimut.

2. Vše je v pohybu



Kresba Miroslav Kemeš

Kdy kterou soustavu souřadnic?

Uvědomme si, že obzorníková soustava souřadnic je vázána na naše pozorovací stanoviště. Proto místo od místa na povrchu Země budou mít tytéž kosmické objekty – blízké i vzdálené – *různé* souřadnice (i ve stejný okamžik!).

Tato nevýhoda je do značné míry odstraněna u rovníkových souřadnic, neboť ty jsou vázány na hvězdnou oblohu. Vzhledem k velkým vzdálenostem kosmických těles od Země je téměř lhostejné, kde se na zemském povrchu nacházíme (rektascenze i deklinace vzdáleného objektu je v témž časovém okamžiku *stejná* pro všechna místa na Zemi). Přesněji řečeno, změny jsou tak malé, že je odhalíme až velmi přesným pozorováním. Výjimkou je pouze náš Měsíc – ten se ovšem nachází relativně velmi blízko u Země. Kdybychom měli možnost jej sledovat v tutéž dobu ze dvou různých míst na zeměkouli, zjistili bychom i pouhým okem změnu jeho polohy na hvězdné obloze.

Pro úplnost dodejme, že souřadnicové soustavy, které mají počátek souřadnic v místě pozorování, nazýváme *topocentrickými* (z řeckého *topos* – místo). Obzorníková soustava souřadnic je topocentrická. Je-li počátek souřadnicové soustavy v centru Země, jde o souřadnice geocentrické, je-li ve středu Slunce, jsou to souřadnice heliocentrické.

Souřadnicovou soustavu volíme vždy tak, aby řešení konkrétního problému ve vybrané soustavě bylo co nejjednodušší. Neexistuje žádná „lepší“ ani „horší“ souřadnicová soustava. Je nesmyslné tvrzení, že např. heliocentrická soustava je „správnější“ než soustava geocentrická. Dřívější historické spory o správnost geocentrické versus heliocentrické soustavy (Ptolemaios × Koperník) měly zcela jiný podtext – tam šlo o naprosto rozdílné chápání pohybu, o zcela jinou fyziku.

Cestujeme po zeměkouli

Jak vypadá hvězdná obloha odjinud, z jiných míst na Zemi? Změní se vůbec nějak? Určitě. Vzájemné seskupení hvězd se sice nijak nepromění, na to jsou rozměry Země doslova nepatrné, ale po-

2. Vše je v pohybu

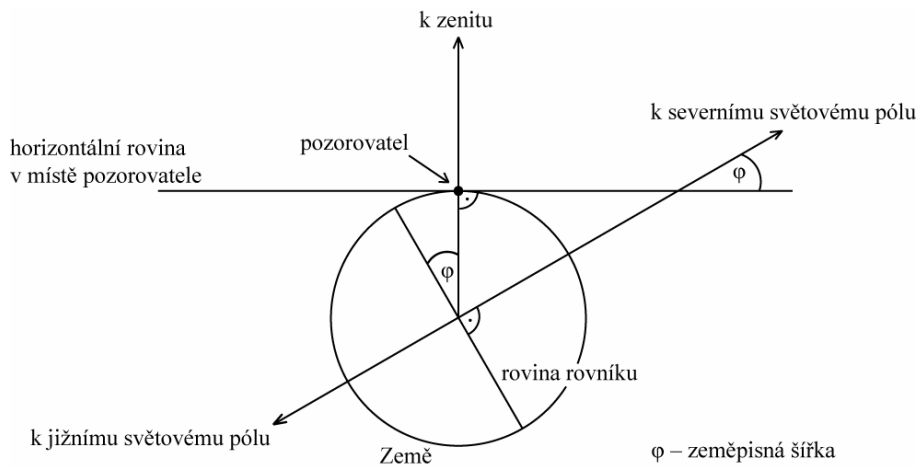
hyb hvězd *po obloze* ano. Nezapomínejme, že vesmír kolem nás sledujeme z *rotující* Země, takže musí záležet na tom, kde se na zeměkouli nacházíme.

Prohlédněte si pořádně následující snímek, který ukazuje pohyb hvězd na obloze nad severním obzorem. Je to záběr ze zeměpisné šířky asi 40 stupňů. Zakrátko poznáte, že právě zeměpisná šířka je důležitý údaj.



Foto: Dan Heller (Kalifornie).

Abychom zjistili, jak se budou pohybovat hvězdy po obloze, když ji budeme sledovat z různých míst na Zemi, musíme znát velikost úhlu, který svírá světová osa s vodorovnou rovinou. Jak již víme, směrem severním míří světová osa přibližně k Polárce. Chceme tedy zjistit, jaký úhel svírají směr k Polárce a vodorovný směr k severu. Odpovíme-li na tuto otázku, máme také vyřešen problém, jak se budou pohybovat hvězdy na obloze na různých místech na zeměkouli.



Výpočet výšky světového pólu.

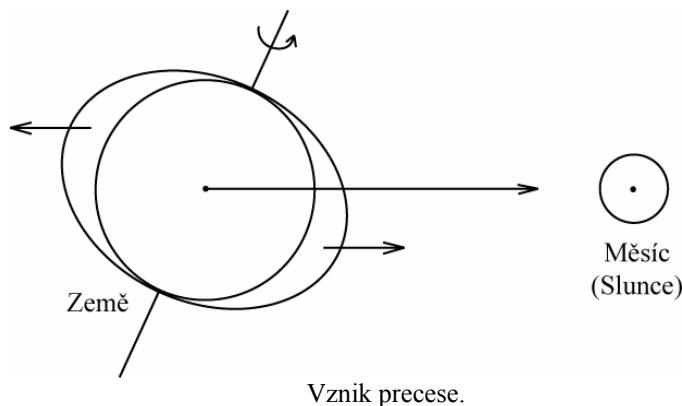
2. Vše je v pohybu

Výsledek: směr k Polárce svírá s vodorovnou rovinou úhel, který je roven *zeměpisné šířce* místa pozorování. Důkaz, že tomu tak je, vidíte na obrázku. K pochopení důkazu si jen připomeňme dva poznatky, které jistě znáte ze školy:

1. vrcholové úhly jsou shodné;
2. součet všech vnitřních úhlů v trojúhelníku je roven 180 stupňům.

Představa, že rotační osa Země míří neustále jedním směrem, platí jen jako první přiblížení skutečnosti. Z dlouhodobého hlediska tomu tak není – věděl to ostatně již starověký astronom Hipparchos asi 150 let př. n. l. Rovník i ekliptika (a tedy také jarní bod) jsou v neustálém, byť pomalém pohybu. Stáčí se především rovina rovníku vůči ekliptice – jarní bod se tudíž posouvá po ekliptice přibližně o 50,3"/rok. Mírně se stáčí také rovina ekliptiky, tedy mění se sklon rovníku k ekliptice o 0,5"/rok. Tento pohyb rotační osy Země označujeme jako *precesi*.

Čím je tento jev způsoben? Zemi si můžeme představit jako rotační elipsoid. Na *přebytek* látky v rovníkové oblasti elipsoidu („přebytek“ vůči stavu, kdy by Země měla tvar dokonalé koule) působí gravitační síly Měsíce a Slunce; ty se snaží narovnat rotační osu Země do směru kolmého ke spojnici střed Země – střed Měsíce (resp. Slunce). Tím vzniká dvojice rušivých sil, vyvolávající precesní pohyb zemské osy. Rotační osy opisuje v prostoru plášť kužele o vrcholovém úhlu rovném dvojnásobku vzájemného sklonu rovin ekliptiky a rovníku (tedy přibližně 47°).



Časově-úhlová míra

Rektascenze – jedna ze souřadnic na hvězdných mapách – představuje úhel. Přesto se však nevyjadřuje ve stupních (v běžné úhlové míře), ale v míře, která na první pohled připomíná čas: v hodinách, minutách a sekundách. Je to míra tzv. *časově-úhlová*. Používá se z důvodů historických: *čas* byl původně odvozován z rotace Země vůči Slunci a hvězdám, tedy na základě měření poloh hvězd (z měření *úhlů* mezi hvězdami). Dodejme, že jednotky této časově-úhlové míry píšeme jako exponenty (např. 6^h 30^m 15^s), protože úhlové jednotky se obvykle takto uvádějí. Přepočítání na běžné úhlové jednotky je sice jednoduché, ale musíme být pozorní:

$$1^{\text{h}} = 360^{\circ}/24 = 15^{\circ},$$

$$1^{\text{m}} = 15',$$

$$1^{\text{s}} = 15''.$$

2. Vše je v pohybu

Pozor: rozlišujte 1^m (časově úhlovou minutu), $1'$ (úhlovou minutu) a 1 min (časovou minutu). Kdo ví, zda se astronomové někdy zbaví tohoto archaického, značně nepohodlného vyjadřování velikostí úhlů.

2. Vše je v pohybu



Jestliže jste si stavěli vzdušné zámky, není vaše práce ztracena, postavíte-li pod ně nyní základy.

William Makepeace Thackeray, spisovatel (1811 – 1863)

otázky a příklady

Otázka 2.1.1. Polohy hvězd na obloze se neustále mění, protože je sledujeme ze Země, která vzhledem ke hvězdám rotuje. Je toto tvrzení správné nebo není? Když není, proč?

Otázka 2.1.2. Obvykle platí, že čím jsou kosmická tělesa blíže Zemi, tím se pohybují na hvězdné obloze (rychleji × pomaleji).

Otázka 2.1.3. Může mít nějaký objekt kladnou výšku a přesto jej nelze spatřit? a) Takový případ nenastane. b) Ano, jestliže je skryt pod obzorem (např. za kopci, vysokou budovou...). c) Otázka nedává žádný smysl.

Otázka 2.1.4. Tento problém vůbec není akademický, dříve či později se s ním setká každý pozorovatel: na obloze spatříte dalekohledem mlhavou skvrnku, která připomíná svítící mlhovinu. V žádné mapě hvězdné oblohy, kterou máte k dispozici, ale tato „mlhovina“ zakreslena není. Není to snad kometa bez ohonu? (Komety, jsou-li ještě daleko od Slunce, opravdu vypadají jako nějaká mlhovina.) Jak tento problém můžete rozhodnout, když nemáte možnost ani se někoho zeptat, ani si obstarat podrobnější mapy?

Otázka 2.1.5. Nových pojmů jsme uvedli opravdu hodně. Zda jim dobře rozumíte, to se prokáže nyní. Uvádíme čtyři skupiny vždy po třech pojmech. Ve které skupině (či kterých skupinách) jsou pojmy, jež spolu významově bezprostředně souvisejí? a) ekliptika, azimut, zenit; b) jarní bod, deklinace zenit; c) rovníková souřadnicová soustava, rektascenze, deklinace; d) světový rovník, obzor, ekliptika.

Otázka 2.1.6. Představte si, že jste se jako trosečníci ocitli na neznámém místě na zeměkouli. Nastala noc a na nebi je plno hvězd. Žádné známé souhvězdí nepoznáváte, nicméně podle pohybu hvězd na obloze můžete poznat, zda jste v rovníkových krajích nebo někde jinde. Je tomu doopravdy tak? Jak poznáte, že jste někde poblíž rovníku?

Otázka 2.1.7. Navažme na předchozí otázku: kdybyste ztroskotali v polární krajině poblíž některého z rotačních pólů, bude vám přibližná poloha jasná už z pohledu na led a sníh kolem. Nicméně: jak se tam pohybují hvězdy po obloze?

2. Vše je v pohybu

Otázka 2.1.8. Ke správnému zodpovězení této otázky budete potřebovat trochu prostorové představivosti, ale zvláště obtížný problém to není. Představte si, že v našich zeměpisných šířkách zapadá hvězda jihozápadním směrem. Kde bude přesně za 12 hodin – budeme mít možnost tuto hvězdu opět pozorovat? Změní se nějak situace, když se přesuneme na rovník a tam nastane tatáž situace?

Otázka 2.1.9. Předpokládejme, že nějaký kosmický objekt nemění svou polohu na hvězdné obloze (anebo trochu reálněji: za jeden den se změní „jen málo“, např. u planet). Když bude tento objekt kulminovat, kterým směrem (či směry?) ho spatříme?

Otázka 2.1.10. Jestliže určitá hvězda kulminuje dnes ve 20 h, kdy bude kulminovat za měsíc?

Otázka 2.1.11. Jaký (astronomický) azimut mají hvězdy, které u nás právě vycházejí? Platí to pro libovolné místo na Zemi?

Otázka 2.1.12. Astronaut přistál na neznámé planetě. Protože byla natolik velká, že snesla srovnání i s mnohými již známými tělesy ve sluneční soustavě, měla téměř dokonalý kulový tvar – to bylo astronautu zřejmé. Vydal se proto na první výzkumnou výpravu. Když po povrchu urazil 200 km směrem k severnímu rotačnímu pólu, zpozoroval, že tamní „Polárka“ (hvězda poblíž severního světového pólu) zvětšila svou výšku o 5° . Téměř okamžitě si spočítal, jak velká je planeta, na níž přistál. Dokážete to také?

Otázka 2.1.13. Množina směrů vzdálených 90° od zenitu tvoří: a) vodorovnou rovinu; b) světový rovník; c) ekliptiku; d) místní poledník.

Otázka 2.1.14. Hvězda zapadající na severozápadě má souřadnice: a) azimut 0° , výška 0° ; b) azimut 135° , výška 0° ; c) azimut 180° , výška 90° .

Otázka 2.1.15. Která z následujících souřadnic popisuje, zda se objekt nachází severně či jižně od světového rovníku? a) rektascenze; b) deklinace; c) azimut.

Otázka 2.1.16. Tato otázka prověří, zda jste se někdy pokoušel(a) o vlastní jednoduché pozorování, a nebo vás k němu alespoň navede. Tedy: zatnutá pěst při natažené paži vyznačuje úhel přibližně: a) jedné desetiny stupně; b) 2 stupňů; c) deseti stupňů.

Otázka 2.1.17. Jakou deklinaci má hvězda, která na našem pozorovacím stanovišti prochází zenitem? Platí toto pravidlo pro libovolné stanoviště na Zemi?

Otázka 2.1.18. Jak známo, jarní bod se vlivem precese posouvá po ekliptice o úhel zhruba $50,3''$ za rok. Za jak dlouho se stočí rovina světového rovníku jedenkrát dokola – tedy jak dlouho trvá, než rotační osy Země opíše plášť kužele o vrcholovém úhlu přibližně $2 \times 23,5^\circ$? (Je to tzv. platónský rok.)

Otázka 2.1.19. Když uvažujeme o precesním pohybu, bude severní pól ekliptiky *vždy* v souhvězdí Draka (jako je v současné době), nebo se vlivem precese přesune někam jinam?

Otázka 2.1.20. Když koncem června nastane letní slunovrat, je Slunce v tu dobu v souhvězdí Blíženců. Kdy byl naposledy v tomto souhvězdí jarní bod, tedy kdy tu bylo Slunce koncem března?

Otázka 2.1.21. Ve kterém souhvězdí se bude za 13 000 let nacházet jarní bod? Otázka vám možná připadá těžká, nicméně: nehledejte odpověď na hvězdné mapě a raději chvíli uvažujte.

Otázka 2.1.22. Tato otázka nepatří mezi nejlehčí. Máte najít *chybné* tvrzení. Napovíme však, že jen jedna z nabízených možností je chybná, takže pokud neznáte odpověď přímo, vylučujte ta tvrzení, jež zaručeně

2. Vše je v pohybu

platí. Tedy: byla by precese rychlejší, kdyby: a) Země byla více zploštělá? b) Měsíc byl blíže k Zemi? c) Země rychleji rotovala? (Ještě jednou: chceme znát tu variantu, na kterou odpověď zní: *ne*.)

Otázka 2.1.23. Existovala by precese, kdyby Země měla tvar dokonalé koule?

Otázka 2.1.24. Meteorický roj Leonid, který v současnosti pozorujeme kolem 18. 11., sledovali Arabové v roce 902 kolem 23. 10. Nevelká část tohoto posuvu je způsobena reálnou změnou trajektorií Leonid, hlavní příčina je však mnohem „pozemštější“. Čím to tedy je?

Otázka 2.1.25. Odhadněte, jaká bude *topocentrická* deklinace Měsíce, který budeme pozorovat ze severního pólu Země, jestliže *geocentrická* deklinace Měsíce je 0° . Vzdálenost Měsíce od Země je, jak známo, asi 60 poloměrů Země (přibližný výpočet lze provést z paměti).

Otázka 2.1.26. Pro statistické účely je mnohdy dobré znát, kolik čtverečních stupňů má celá hvězdná obloha. Vypočítejte tuto hodnotu.

2. Vše je v pohybu

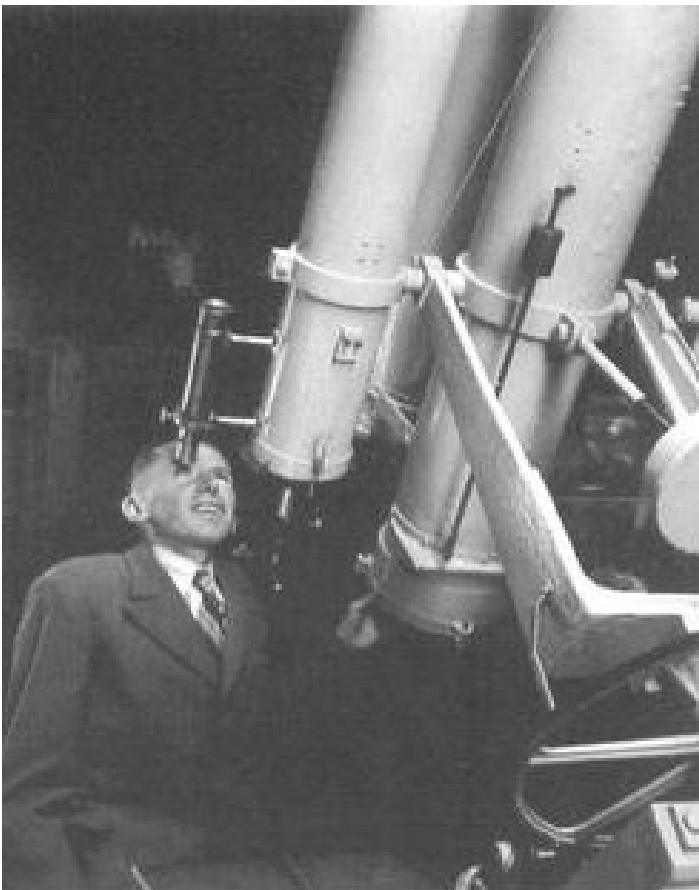


medailon

Antonín Bečvář

(10. 6. 1901 – 10. 1. 1965)

Tento český astronom a meteorolog je znám na celém světě. Proslavily jej unikátní a ve své době nedostižné atlasy hvězdné oblohy (Atlas Coeli, Atlas Borealis, Atlas Eclipticalis a Atlas Australis). Není snad astronoma, který by jméno Bečvář (či jak s oblibou říkají anglicky hovořící lidé – *bekvar*) neznal. Antonín Bečvář byl zakladatelem a prvním ředitelem (1943-1950) observatoře na Skalnatém plese ve Vysokých Tatrách. A je po něm pojmenován kráter na Měsíci.



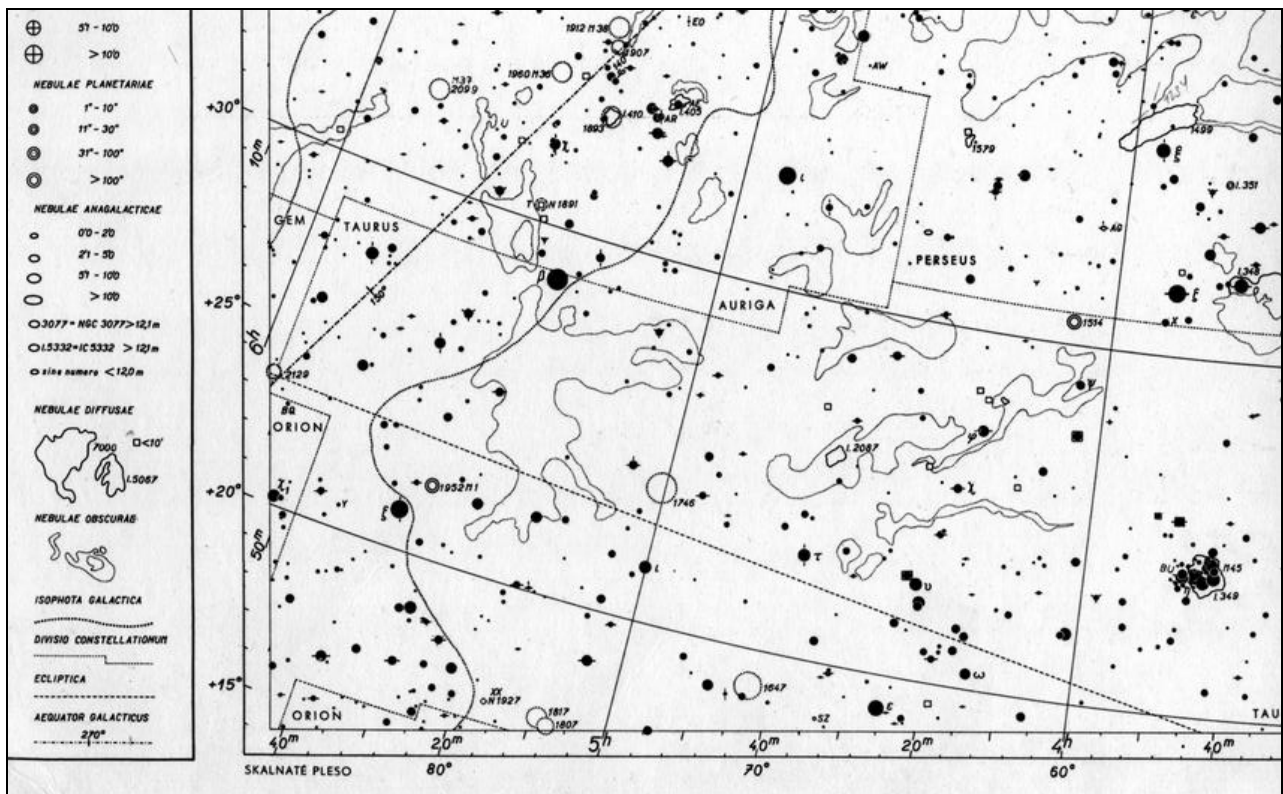
Bečvářova astronomická aktivita začala neokázale: na zahradě rodinné usedlosti v Brandýse nad Labem postavil roku 1927 svou první soukromou observatoř, spojenou s meteorologickou stanicí. Byla tu malá kopule se zrcadlovým dalekohledem o průměru 215 mm a později 240 mm, a nevelká temná fotokomora. Zrcadla si brousil sám. Měl také speciální dalekohled, tzv. hledač komet. Věnoval se sledování meteorů a fotografii oblohy, ale i popularizaci astronomie. V roce 1937 přesídlil na Štrbské Pleso, kde se věnoval klimatologii, pozorování mraků a měření slunečního záření.

Podařilo se mu přesvědčit slovenské autority, aby i v období druhé světové války vybudovali na Skalnatém Plese (v nadmořské výšce 1780 metrů) observatoř. Ta se po skončení války proslavila zejména objevy komet a Bečvářovým fotografickým atlasem oblohy. Bečvář také hvězdárnu při přechodu fronty zachránil před zničením odvážným vystoupením před německými důstojníky. V roce 1951, po svém nedobrovolném odchodu z observatoře na Skalnatém Plese, se navrácí do rodného Brandýsa, kde do-

2. Vše je v pohybu

končil své životní dílo – mapové atlasy celé oblohy. Ty byly v následujícím čtvrt století používány po celém světě astronomy-amatéry i profesionály a staly se uznávaným vzorem i pro dnešní mapy oblohy.

Autorem medailonu je Jiří Grygar (uveřejněno na CD Astro 2001 – Báječný vesmír, D-data s.r.o., Praha 1996, autoři: Zdeněk Pokorný a Jiří Grygar).



Ukázka černobílé verze Atlasu Coeli.

2.2. Hvězdy na obloze

Tento poněkud mnohoznačný název je třeba upřesnit: nyní půjde o čas odvozený z pohybu hvězd na obloze, ale také o čas sluneční (kterým se běžně řídíme) a o vztahy mezi těmito dvěma časy. Je to sice pokračování poněkud nezáživného „hvězdářského zeměpisu“, ale rozhodně tuto část nepřeskakujte, protože vyznat se v jednotlivých časech je věc nadmíru praktická a v životě užitečná.

Hvězdný čas

Jestliže se Země otočí o 360 stupňů vzhledem ke vzdáleným hvězdám, uvidí pozorovatel hvězdy na obloze opět ve stejných směrech jako předtím. Takto uplynul jeden *hvězdný den*. Budeme-li chtít definici upřesnit, řekneme, že je to doba mezi dvěma následujícími horními kulminacemi jarního bodu. (Připomeňme si pojem *kulminace*¹⁾: když má objekt největší úhlovou výšku nad vodorovnou rovinou, dochází k *horní* kulminaci. Při nejmenší výšce jde naopak o kulminaci *dolní*; v mnoha případech ovšem dolní kulminaci kosmického objektu nemůžeme sledovat, nastává totiž pod obzorem.)



Vychází souhvězdí Orion. Foto: Jimmy Westlake.

¹⁾ Slovo kulminace již přešlo do běžného jazyka. Znamená „vrcholit“, „vyvrcholení“, protože latinsky *culmen* je vrchol. V době kulminace tedy objekt na obloze „vrcholí“, ale to platí bezvýtku jen pro horní kulminaci.

2. Vše je v pohybu

Čas hvězdný a čas sluneční

Pozemský život se řídí střídáním dne a noci, což je dáno rotací Země *vzhledem ke Slunci* a nikoli vzhledem ke vzdáleným hvězdám. Používáme proto *sluneční čas*, právě na něj jsme biologicky nastaveni. Pravý sluneční den je doba mezi dvěma následujícími horními kulminacemi Slunce. Sluneční den tedy není stejně dlouhý jako hvězdný, *je delší*, neboť aby uplynul celý sluneční den, musí se Země otočit vůči vzdáleným hvězdám o úhel asi 361 stupňů.

Pro hvězdný a sluneční den platí tyto převodní vztahy:

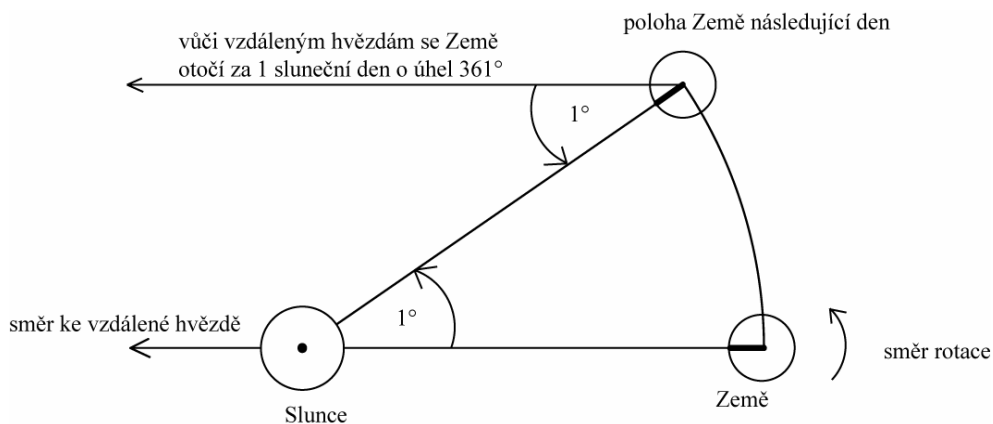
1 sluneční den = 24 h 3 min 57 s hvězdného času,

1 hvězdný den = 23 h 56 min 4 s slunečního času.

Jenže pozor:

1 hvězdný den = 24 h 0 min 0 s hvězdného (!) času,

1 sluneční den = 24 h 0 min 0 s slunečního (!) času.



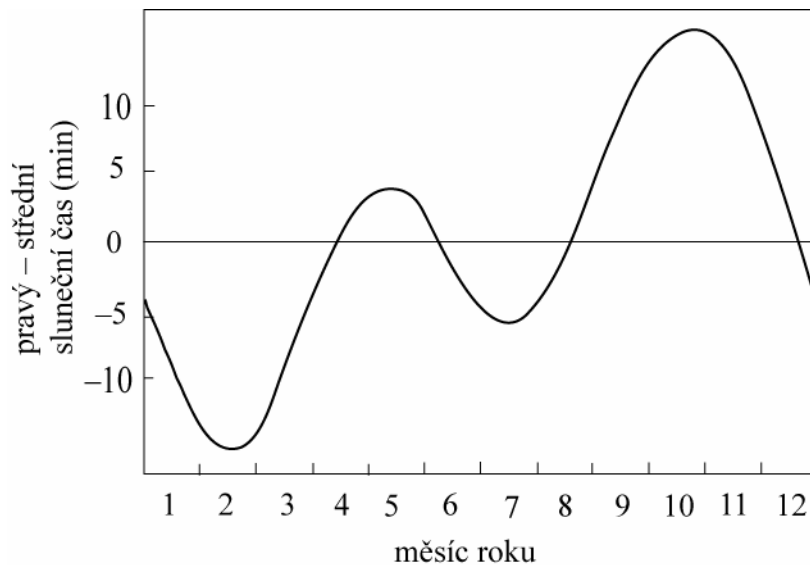
Rozdíl mezi hvězdným a slunečním dnem.

Časová rovnice

Problémy s časy se komplikují, neboť *pravý sluneční čas* (který můžeme odvodit přímo z pohybu Slunce po obloze) plyne nerovnoměrně. Příčiny jsou dvě: zaprvé – Země se pohybuje kolem Slunce nerovnoměrně (rychleji tehdy, je-li Slunci blíže, pomaleji, jestliže je dále než jistá střední vzdálenost). Zadruhé – rovina zemského rovníku je mírně skloněna k rovině, v níž Země obíhá kolem Slunce (tj. k ekliptice). V důsledku toho jsou sluneční dny v březnu a září kratší než v červnu a prosinci. Vyloučením obou těchto vlivů získáme rovnoměrně plynoucí *střední sluneční čas*. Rozdíl pravého a středního času astronomové tradičně označují jako *časovou rovnici*, tedy

$$\boxed{\text{časová rovnice} = \text{pravý sluneční čas} - \text{střední sluneční čas}}$$

2. Vše je v pohybu



Časová rovnice.

Časy místní

V našich úvahách o čase, ať již slunečním nebo hvězdném, šlo zatím vždy o tzv. časy *místní*, tedy o čas platný pro zeměpisný poledník, na němž se nacházíme. Na jiných polednících je v tutéž dobu odlišný místní čas. Přepočítání místních časů pro dvě různá místa na Zemi je poměrně jednoduché: *rozdíl místních časů* je roven *rozdílu zeměpisných délek* oněch dvou míst. Musíme si jen zapamatovat, že místa položená *východně* od našeho stanoviště mají *větší* místní čas (Slunce tam kulminuje dříve). Naopak místa položená *západně* mají místní čas menší než my.

Před několika staletími, kdy se cestovalo převážně povozy, nebyly tyto problémy pro většinu lidí nijak závažné. Nevadila ani obtížnost udržování přesného času. Byl to zlatý věk slunečních hodin. Ty prý ale – neukazovaly přesně! (Víc se dovíte v čítance *Sluneční hodiny neukazují přesně*).

Časy pásmové

Už koncem 19. století bylo jasné, že systém mnoha (vlastně nekonečného počtu) místních časů je nepraktický, zejména v železniční dopravě. Proto na návrh inženýra Kanadské pacifické dráhy Fleminga byly zavedeny *časy pásmové*: Země byla rozdělena podél poledníků na 24 páسů, každý zahrnoval 15 stupňů zeměpisné délky. Uvnitř časového pásma platí stejný pásmový čas, sousední pásma mají čas lišící se právě o jednu hodinu. Na světové konferenci ve Washingtonu bylo roku 1884 též rozhodnuto, že čas v pásmu podél greenwichského poledníku bude základní, tzv. *světový*, a k němu se budou vztahovat všechny ostatní časy.

Tolik teorie, praxe je však poněkud odlišná. Například v letním období celé skupiny států zavádějí z poněkud nejasných důvodů tzv. *letní čas*, o hodinu předbíhající čas pásmový (letní čas tedy odpovídá času pásma ležícího východně od nás). Někdy se chybně uvádí, že v době, kdy neplatí letní čas, máme čas zimní. *Ne*: v tu dobu máme normální pásmový čas. *Zimní čas* také existuje – je to čas v pásmu ležícím západně od pásma, do něhož spadáme. Tento čas se již dlouho nikde nezavedl.



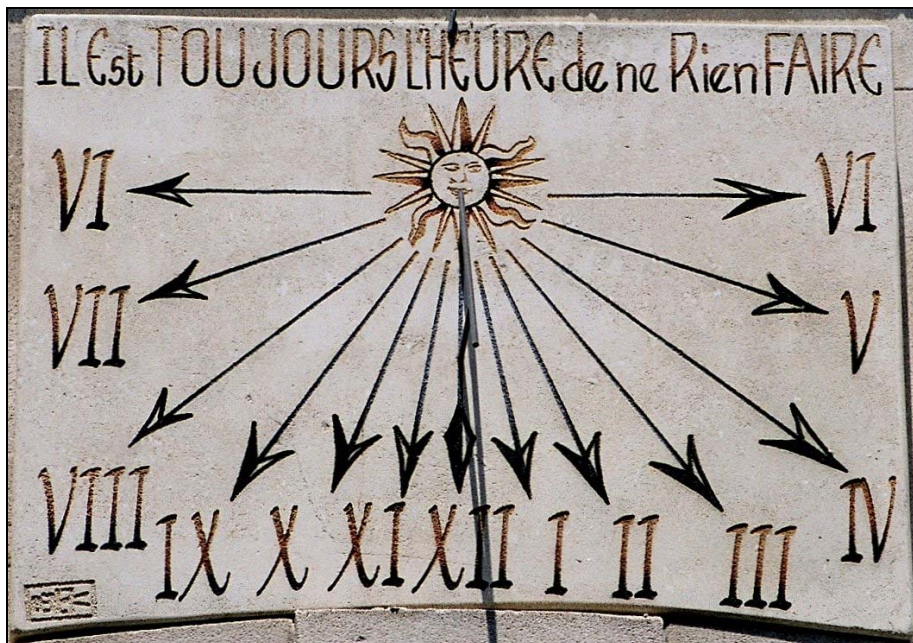
čítanka

Zdeněk Horský: Sluneční hodiny neukazují přesně

Posteskl si jeden můj přítel, že mezi slunečními hodinami na budovách viděl již několikery krásné a pěkně udržované, ale ani jedny že neukazovaly čas správně. Druhý známý je však považuje za naprostý přežitek, který snad ani tu dekorativní úlohu dnes nemá právo na sebe brát. Jedovatě dodává, že bývaly dobré tak někdy za starých časů, kdy si na ně v noci ponocný chodil lucernou svítit, aby se dověděl, kolik je hodin.

Tím ale slunečním hodinám nepěkně křivdíme. Nevíme sice, jak přesná byla konstrukce těch pro pohlednost chválených, tak těch ostatních vysmívaných, ale sluneční hodiny je možno konstruovat velice dokonale. Takové sluneční hodiny také čas velmi přesně ukazují.

Co je nám však platné říkat, že ukazují správně, když se jejich časové údaje se správným časem očividně rozcházejí! Srovnáním s dobrými hodinkami či s rozhlasovým signálem vychází stále najevo, že si sluneční hodiny chodí vždy jen tak, jak se jim zlíbí. Dokonce den ze dne je rozdíl mezi nimi a časovým signálem jiný!



2. Vše je v pohybu

Příčina je v tom, že tu srovnáváme dva různé časy. Dnes se nám představa přesného času již zcela spojila s tím časem, který je rozšiřován rozhlasem. A to je – jak již víme – sice čas sluneční, ale střední, a pocho-pitelně pásmový. Sluneční hodiny ukazují čas místní a pravý. Tyto časy jsou různé, za to ovšem sluneční ho-diny nemohou. To, co mají ukazovat, ukazují přesně. Lze sestrojiti i takové sluneční hodiny, které budou ukazovat střední sluneční čas, či přímo pásmový čas, jen jejich ciferník bude podstatně složitější. Existují dokonce sluneční hodiny, jejichž ciferník je možno pro danou dobu adjustovat tak, že ukazují v letním čase.

Takže sluneční hodiny nikterak nepodceňujme. V historii byly i přesným ukazatelem světových stran – tam, kde kompas selhával. A ještě nedávno byly jedním z mála zdrojů správného času. V dobách před roz-hlasovým signálem, tedy před dvacátými léty minulého století, bylo třeba se k nim utíkat všude tam, kam ne-dolehl polední signál vyzváněný na železniční stanici.

Sluneční hodiny měly také svou významnou úlohu historickou. Byly sestrojovány v nejrůznějších pro-vedeních – nástěnné, kabinetní i přenosné cestovní. Jejich teorie velmi podpořila rozvoj geometrie, zejména geometrie deskriptivní. Byly většinou nejen časoměrem, ale i výtvarným dílem. Měly svou určitou filozofii, připomínaly člověku jeho neustálou závislost na vesmírném dění. Tyto poslední schopnosti si zachovávají dodnes a je třeba si přát, aby stejně jako dřív byly opět využívány jako ozdoba budov i parků.

Část stejnojmenné kapitoly z knihy *Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru* (Svoboda, Praha 1988).



čítanka

Zdeněk Pokorný: Jaká je perioda rotace Země?

Co je na této otázce záludného, namítnete. Opravdu, téměř nic, ale záludnosti vznikají často nejen z podstaty věci samé, ale i z jejího nepochopení. Tak tomu je i v tomto případě. Na otázku, jak dlouhá je perioda rotace Země, školáci jedním dechem odpoví, že přece 24 hodin. Ti pilnější dodají, že 24 hodin je jen přibližná hodnota, přesně je to 23 hodin 56 minut a 4 sekundy (a ještě nějaké drobné). *Odkud to víte?*, máte neodolatelnou chuť se zeptat. *Tak je to přece napsáno v učebnici zeměpisu!* A je to. Vy máte přitom pocit, že po nich chcete, aby tvrdili, že dva krát dvě je pět. Proto se už neptejme. Třeba by je napadlo, že když tomu tak *doopravdy je* a den je o 3 minuty 56 sekund kratší než 24 hodin, co se děje třeba s vlaky, které mají odjezd stanovený na 23 hodin 58 minut?

Problém zprvu zcela průhledný se zamotal, ale vlastně jen proto, že hned na začátku jsme si jej špatně vymezili. *Fyzikálně špatně*. Když se totiž ptáme, jaká je perioda rotace Země – tedy za jak dlouho se naše planeta otočí – vždy musíme též říci, *vůči čemu* budeme toto otáčení posuzovat. Mohou to být třeba vzdálené hvězdy. Dobu otočení Země vzhledem ke vzdáleným hvězdám nazveme hvězdný den, a ten rozdělíme na 24 hvězdných hodin, každou hvězdnou hodinu pak na 60 hvězdných minut, hvězdnou minutu na 60 hvězdných sekund. Zde žádná nejasnost není. Až na to, jak tyto *hvězdné* hodiny, minuty a sekundy souvisejí s těmi, které běžně používáme.



2. Vše je v pohybu

V občanském životě se hvězdným časem neřídíme. Jsme biologicky nastaveni na jiný rytmus, na čas sluneční. Ale cožpak sluneční čas není stejný jako čas hvězdný? Ne, a není obtížné pochopit, proč.

Když se Země jedenkrát otočí do stejné pozice vůči vzdáleným hvězdám, není ještě ve stejné poloze vzhledem ke Slunci. Za ten právě uplynulý jeden den se Země totiž maloučko pohnula vůči hvězdám (vždyť též *obíhá kolem Slunce*), a tak, aby se Země dostala do stejné polohy vzhledem *ke Slunci*, je třeba, aby uběhlo ještě trochu času. Když délku hvězdného i slunečního dne budeme měřit stejnými hodinami, bude hvězdný den vždy *kratší* než den sluneční.

Jeden sluneční den je roven 24 slunečním hodinám, každá sluneční hodina 60 slunečním minutám atd. Právě tyto časové jednotky běžně používáme, a proto slovo *sluneční* vypouštíme. Ale kde je původ oněch magických 23 hodin 56 minut a 4 sekund? Už jistě tušíte: jeden *hvězdný* den, který je roven přesně 24 hvězdným hodinám, je roven také 23 slunečním hodinám, 56 slunečním minutám a 4 slunečním sekundám. Nebo opačně: jeden *sluneční* den, jenž má přesně 24 hodin slunečního času, se rovná také 24 hodinám, 3 minutám a 57 sekundám času hvězdného.

Celý problém s periodou zemské rotace vznikl tedy tím, že jsme se výslovně nezeptali, vůči čemu máme otáčení Země posuzovat. Fyzikové by řekli, že jsme neurčili vztažnou soustavu. Jak je vidět, spoléhat se na intuici, počítat s tím, že každému dojde i to, co jsme nevyslovili, bývá ošidné.

Kapitola z knihy *100+1 záhadných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).

2. Vše je v pohybu



Žádný člověk není takový hlupák, aby nedošel úspěchu alespoň v jedné věci, je-li vytrvalý.

Leonardo da Vinci, polyhistor (1452 – 1519)

otázky a příklady

Otázka 2.2.1. Myslíte si, že i bez hodinek lze měřit čas? Dokážete za slunečného dne určit bez hodinek časový interval řekněme tří hodin? a) Ano, ale s jistým omezením: když se postavím přesně na severní nebo jižní pól zeměkoule, tak to jde určit. b) To vůbec nejde určit, museli bychom jen hádat. c) Ale ovšem – zabodnu do země svisle tyč. Stín tyče se za tři hodiny posune o úhel 45 stupňů. Ten zjistím například rozpůlením pravého úhlu.

Otázka 2.2.2. V Brně je 18 h 22 min místního času. Jaký je v tu dobu místní čas v Jihlavě? (Toto město se nachází asi 1 stupeň zeměpisné délky západně od Brna, takže výpočet lze snadno provést z paměti.)

Otázka 2.2.3. Hvězda Rigel ze souhvězdí Orionu vychází u nás ve volné krajině v polovině listopadu ve 21 hodin. Kdy bude vycházet o měsíc později, tedy v polovině prosince? a) v 19 h; b) v 21 h; c) ve 23 h. Platí tato odpověď pro libovolné místo na Zemi, nebo jen pro situaci u nás?

Otázka 2.2.4. Obyvatelé města Quito (v Ekvádoru, leží téměř přesně na rovníku) spatří Slunce přímo v nadhlavníku: a) každý den; b) ve dnech jarní a podzimní rovnodennosti; c) 21. června; d) v době obou slunovratů.

Otázka 2.2.5. Slunce se na *hvězdné* obloze pohybuje východním směrem úhlovou rychlostí a) 15° za hodinu; b) 1° za hodinu; c) 1° za den; d) 1° za rok.

Otázka 2.2.6. Roční doby na Zemi vznikají v důsledku toho, že: a) dráha Země je výstředná, takže jsme ke Slunci blíže v létě a dále od něj v zimě; b) rotační osa Země se v průběhu roku natáčí do různých směrů v prostoru; c) rotační osa Země je skloněna k ekliptice a velikost tohoto sklonu i poloha v prostoru se v čase srovnatelném s délkou roku prakticky nemění.

Otázka 2.2.7. Předpokládejme, že ekliptika není skloněna vůči světovému rovníku, obě roviny splývají. Jaký by byl azimut Slunce při jeho východu v průběhu roku? Jak by se měnil? A jaká by byla délka (bílého) dne a noci v průběhu roku?

Otázka 2.2.8. Jak se během roku mění deklinace Slunce – kdy je největší, kdy nejmenší a kdy je nulová?

2. Vše je v pohybu

Otázka 2.2.9. Jak se přibližně změní rektascenze Slunce za měsíc? Změní se vůbec? Když ano, vzroste či poklesne, a je tato změna rektascenze stejná každý měsíc?

Otázka 2.2.10. Kdy mívá Slunce rektascenzi 6^h ? Kolik stupňů činí v tu dobu deklinace Slunce? Pokud si nejste jist(a) svou odpovědí, podívejte se na mapu hvězdné oblohy a uvažte, kde se Slunce nachází v průběhu roku; z toho odvoďte výsledek (náповěda č. 2: podívejte se do kterékoli astronomické ročenky, kde jsou uvedeny polohy Slunce během roku).

Otázka 2.2.11. Jestliže by rotační osa Země byla kolmá k rovině ekliptiky, pak: a) den a noc by byly stejně dlouhé všude na Zemi a nedocházelo by ke střídání ročních období; b) roční období by trvala různě dlouhou dobu; c) situace by byla obdobná jako nyní při letním nebo zimním slunovratu.

Otázka 2.2.12. Která pozorování svědčí o skutečnosti, že trajektorii Země při oběhu kolem Slunce není kružnice, ale mírně výstředná elipsa?

Otázka 2.2.13. Pomocí mapy hvězdné oblohy tuto otázku hravě zvládnete: mezi kterými hvězdami bychom měli hledat „Polárku“, kdyby rotační osa Země byla kolmá k rovině ekliptiky (asi jako u Venuše), nebo naopak ležela v rovině ekliptiky (asi jako u Uranu)?

Otázka 2.2.14. Na první pohled to vypadá, jako by se tato otázka ani nedala zodpovědět. To je ovšem jen zdání, jak určitě sami naznáte. Tak tedy: Mars se ocitl v opozici se Sluncem 28. září. Ve kterém souhvězdí se nacházel? a) v souhvězdí Labutě; b) v souhvězdí Ryb; c) v souhvězdí Panny; d) v souhvězdí Orionu.

Otázka 2.2.15. Pokud jste v předchozí otázce 2.2.14. pouze nehádali, jistě můžete popsat důvod vaší volby souhvězdí.

Otázka 2.2.16. Toto je snadná otázka: když se Slunce nachází právě v jarním bodě, jakou má rektascenzi a jakou deklinaci?

Otázka 2.2.17. Na kterém místě na Zemi všechny kosmické objekty v průběhu jednoho dne vycházejí a zapadají? a) Takové místo na Zemi neexistuje. b) Na severním nebo jižním pólu. c) Na zemském rovníku.

Otázka 2.2.18. Brno se nachází v místech se zeměpisnou šířkou přibližně 50° . Aby nějaká hvězda byla v Brně vždy pozorovatelná na nočním nebi, musí být její deklinace: a) větší než 40° ; b) právě rovna zeměpisné šířce; c) kladná; d) nelze jednoznačně říci, chybí údaj o hvězdném čase.

Otázka 2.2.19. Čím je způsoben soumrak?

Otázka 2.2.20. Může někdy a někde pro určitý objekt na obloze platit, že se jeho azimut od okamžiku východu až po kulminaci nebude měnit?

Otázka 2.2.21. U kterých hvězd, jež můžeme u nás pozorovat, nemůže být (astronomický) azimut nikdy nulový? a) u všech objektů, které jsou v principu vždy pozorovatelné na nočním nebi (tzv. cirkumpolární objekty); b) u těch objektů, jež kulminují na sever od zenitu; c) pro každý objekt je jednou denně astronomický azimut nulový.

2. Vše je v pohybu



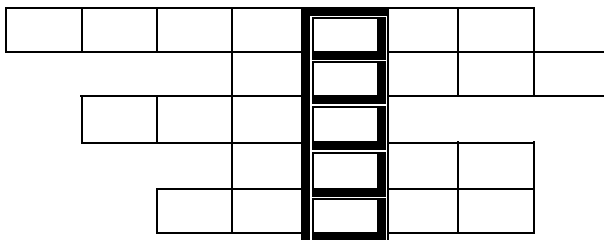
„luštěniny“

Objev silvestrovské noci

Jméno italského astronoma, které je skryto v tajence vyznačené silným rámečkem, by dnes už asi nebylo příliš známé, nebýt jeho objevu první planety Ceres. Stalo se tak doslova na přelomu 18. a 19. století, v noci z 31. prosince 1800 na 1. ledna 1801.



O kterého astronoma se jedná? Stačí doplnit jména hvězd, jak je vyznačeno v tabulce.



druhá nejjasnější hvězda na hvězdné obloze
nejjasnější hvězda v Orionu
hvězda o Ceti, latinsky „Podivuhodná“
překrásná dvojhvězda ϵ Boo
tvoří dvojhvězdu s Alcorem

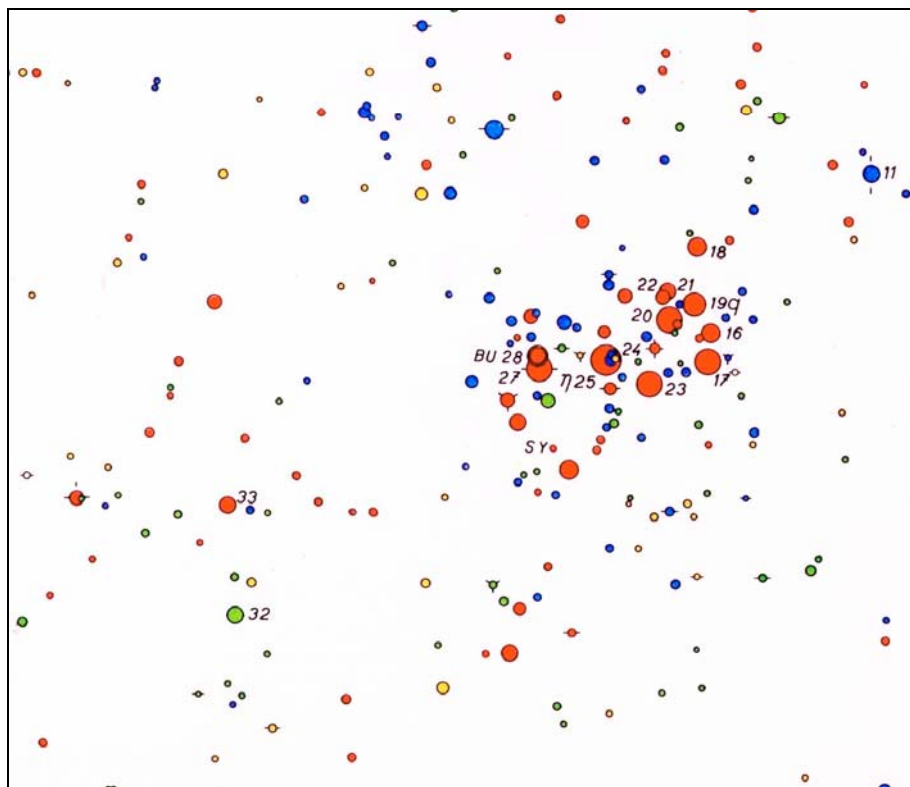
2. Vše je v pohybu



praktikum

Zhotovení mapky Plejád

Mapy hvězdné oblohy jsou nepostradatelnou pomůckou pro každého astronoma. Používáme je – a někdy také vytváříme. Není nijak obtížné nakreslit mapu malé části hvězdné oblohy, známe-li souřadnice a jasnosti hvězd (případně dalších objektů). Jestliže však počet zakreslovaných hvězd přesahuje několik stovek, jde o práci zdlouhavou a úmornou. Během celé práce je přitom třeba dodržet předem stanovený standard přesnosti. Není divu, že precizních map (atlasů) hvězdné oblohy je nevelký počet. Ke špičkovým dílům z tohoto oboru patří světoznámé atlasy Antonína Bečváře (*Atlas Coeli*, *Atlas Borealis*, *Atlas Eclipticalis* a *Atlas Australis* – viz následující ukázka z *Atlasu Eclipticalis*).



2. Vše je v pohybu

V současnosti se rozsáhlejší mapy kreslí pomocí počítače. To však nezabavuje autora povinnosti navrhnout koncepci mapy či celého atlasu, promyslet, jak budou velikosti kotoučků hvězd odstupňované podle jasností, aby pohled na mapu co nejlépe odpovídal skutečnému pohledu na noční oblohu, jak budou vyřešeny případy hvězd, které jsou téměř v tomtéž směru od nás apod. (takových problémů je celá řada a zkušený autor mapy je pozná až praxí). Tak jako je vhodné, aby se budoucí výrobce obuvi pokusil nějakou botu „ušíť“ sám, i když pak se budou boty vyrábět strojově, je nanejvýš užitečné, aby se každý adept pokusil o sestavení mapky malé části hvězdné oblohy ručně, i když v další praxi přenechá nudnou kreslicí práci počítači a nějakému grafickému zařízení.

Naším úkolem je nakreslit mapku otevřené hvězdokupy M 45 (Plejády).

Pracovní postup

V tabulce 1 jsou vypsány všechny hvězdy jasnější než 7,0 mag, nacházející se v oblasti Plejád. Souřadnice (rektascenze α a deklinace δ) se vztahují k epoše 2000. Jejich polohy zakreslete do obr. 2. Doporučený postup:

1. Stanovte rozsah kreslené oblasti v rektascenzi α a deklinaci δ ; je třeba zakreslit všechny hvězdy z tabulky 1 a dodržet stejná měřítka v obou osách ($1^h = 15^\circ$)¹⁾. Rektascenze narůstá směrem doleva. (Výsledky označte do připravených řádků pod tabulkou 1.)

2. Zobrazujeme jen malou část hvězdné oblohy nedaleko světového rovníku a proto jsme zvolili pravoúhlou soustavu souřadnic pro rektascenzi a deklinaci. Počátek soustavy položte do levého spodního rohu obrázku 2. Označte, jakých souřadnic nabývají rohové body obr. 2. Pro každou hvězdu pak vypočítejte pravoúhlé souřadnice x, y s přesností na desetinu milimetru a výsledky zapisujte do tabulky 1.

3. Je třeba sestavit vhodnou škálu velikostí kotoučků hvězd na mapce. Jak plyne z praxe, je vhodné, když rozdíly ve velikostech kotoučků hvězd jsou *větší* u hvězd *málo jasných* než u hvězd *jasných*. Kdybychom zachovávali stejný poměr průměrů nebo ploch kotoučků u hvězd lišících se např. o 1 magnitudu jak u hvězd slabých, tak i jasných, byly by kotoučky jasných hvězd příliš velké a rušilo by to.

Na obr. 1 je graficky znázorněn doporučený poměr velikostí kotoučků. Číslo na svislé ose udává průměr kotoučku hvězdy vyjádřený v jednotkách průměru nejmenšího kotoučku. Na vodorovné ose je uvedeno, o kolik magnitud je hvězda jasnější než nejslabší zakreslovaná hvězda. Tak např. hvězda o 2,0 magnitudy jasnější bude mít průměr kotoučku 3,3krát větší. Nejmenší průměr kotoučku doporučujeme zvolit v intervalu 1,0 až 1,5 mm.

Škála velikostí kotoučků hvězd bude odstupňována po půl magnitudě. Do tabulky 2 запиšte průměry jednotlivých kotoučků (odvozené z obr. 1) – zaokrouhlete je na desetinu milimetru. Příklad: průměr kotoučku č. 1 zvolíme 1,5 mm. Hvězdy s kotoučkem č. 5 jsou o 2 magnitudy jasnější než s kotoučkem č. 1. Z obr. 1 plyne, že pro hvězdy s rozdílem jasností odpovídajícím 2 magnitudám je doporučený poměr průměrů 3,3. Průměr kotoučku č. 5 je tedy $1,5 \cdot 3,3 = 5,0$ mm.

Ověřte si, že poměr průměrů (a ovšem i ploch) kotoučků hvězd lišících se o 1 magnitudu je jiný u hvězd slabých a jasných.

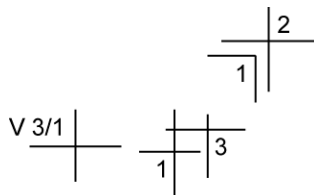
4. V tabulce 1 doplňte pořadová čísla kotoučků hvězd podle jejich hvězdné velikosti (použijte údaje z tabulky 2).

5. Polohu každé hvězdy (v pravoúhlých souřadnicích x, y) zakreslete do obrázku 1 (na milimetrový papír). Použijte přitom ostrou tvrdou tužku (tvrdost 3H až 5H), snažte se dosáhnout přesnosti zákresu 0,1 až 0,2 mm. Hvězdu zakreslete jako křížek, u něhož uvedete pořadové číslo kotoučku. U hvězd ležících těsně u sebe často nelze vykreslit křížek celý. Zakreslete proto jen část křížku a dbejte na to, aby se nezaměnila pořadová čísla kotoučků (jsou-li různá). U proměnných hvězd uveďte pořadová čísla kotoučků odpovídající hvězdným

¹⁾ Použijeme nejjednodušší možné zobrazení – pravoúhlé se stejným měřítkem v obou osách. V případě Plejád je to zcela rozumná volba.

2. Vše je v pohybu

velikostem v maximum a minimumu jasnosti, hvězdu označte písmenem V (viz příklad). Zákresy poloh ještě jednou zkontrolujte (nejčastější chyba: křížek je zakreslen o 1 cm vedle).



6. Na obr. 2 připevněte pauzovací papír a tuší pomocí nulátka vykreslete kotoučky. Tato práce vyžaduje nemalou praxi v rýsování ²⁾. Dodržujte stanovené průměry kotoučků. Vykreslujte nejdříve kotoučky *menší* a postupně přecházejte k větším. Kotoučky hvězd, které by se překrývaly, nekreslete celé (při zákresu zvolte vhodný způsob oddělení – podle některého hvězdného atlasu či mapy).

7. Výslednou mapku doplňte označením nejjasnějších hvězd a zkontrolujte například s fotografií nebo kvalitní mapou Plejád.

Vstupní data, výsledky:

Tabulka 1. Hvězdy v Plejádách.

α	δ	x (mm)	y (mm)	Hvězdná velikost (mag)	Pořad. č. kotoučku	Poznámka
3 ^h 44 ^m 48 ^s	24° 17' 22"			5,45		16 Tau
3 44 53	24 06 48			3,70		17 Tau
3 45 10	24 50 21			5,65		18 Tau
3 45 12	24 28 02			4,30		19 Tau
3 45 49	23 08 48			6,85		
3 45 50	24 22 04			3,88		20 Tau
3 45 54	24 33 17			5,76		21 Tau
3 46 03	24 31 40			6,42		22 Tau
3 46 20	23 56 57			4,18		23 Tau
3 46 59	24 31 13			6,81		
3 47 21	23 48 13			6,99		
3 47 21	24 06 58			6,30		
3 47 29	24 06 18			2,87		25 η Tau
3 47 29	24 17 19			6,81		
3 48 07	24 59 19			6,46		

²⁾ Pokud ji nemáte, pak bohužel mapku nenakreslíte. Lepší je však přerušit práci v tomto okamžiku než se donekonečna potýkat s kaňkami tuže a jinými záludnostmi rýsování – kreslení mapy hvězdné oblohy určitě není nejlepší prostředek, jak se naučit preciznímu rýsování tuží.

2. Vše je v pohybu

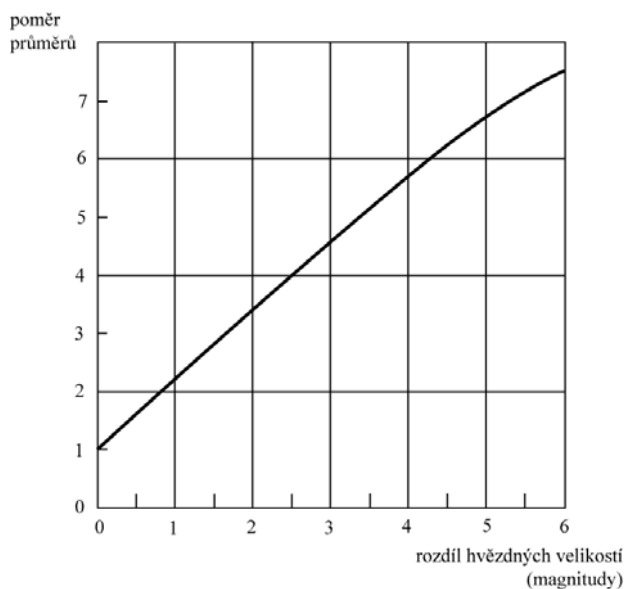
α	δ	x (mm)	y (mm)	Hvězdná velikost (mag)	Pořad. č. kotoučku	Poznámka
3 48 21	23 25 16			5,44		
3 48 30	24 20 43			6,94		
3 48 57	23 51 26			6,6		
3 49 10	24 03 12			3,63		27 Tau
3 49 11	24 08 12			4,9–5,3		28 Tau = BU Tau
3 49 22	24 22 50			6,62		
3 49 44	23 42 42			6,16		
3 49 58	23 50 55			6,74		
3 50 52	23 57 43			6,93		

$\alpha_{\text{začátku}} = \text{___}^{\text{h}} \text{___}^{\text{m}} = \text{___}^{\circ}$; $\alpha_{\text{konce}} = \text{___}^{\text{h}} \text{___}^{\text{m}} = \text{___}^{\circ}$;
 rozdíl $\alpha_{\text{konce}} - \alpha_{\text{začátku}} = \text{___}^{\circ} = \text{___} \text{ mm}$;

$\delta_{\text{začátku}} = \text{___}^{\circ}$; $\delta_{\text{konce}} = \text{___}^{\circ}$;
 rozdíl $\delta_{\text{konce}} - \delta_{\text{začátku}} = \text{___}^{\circ} = \text{___} \text{ mm}$.

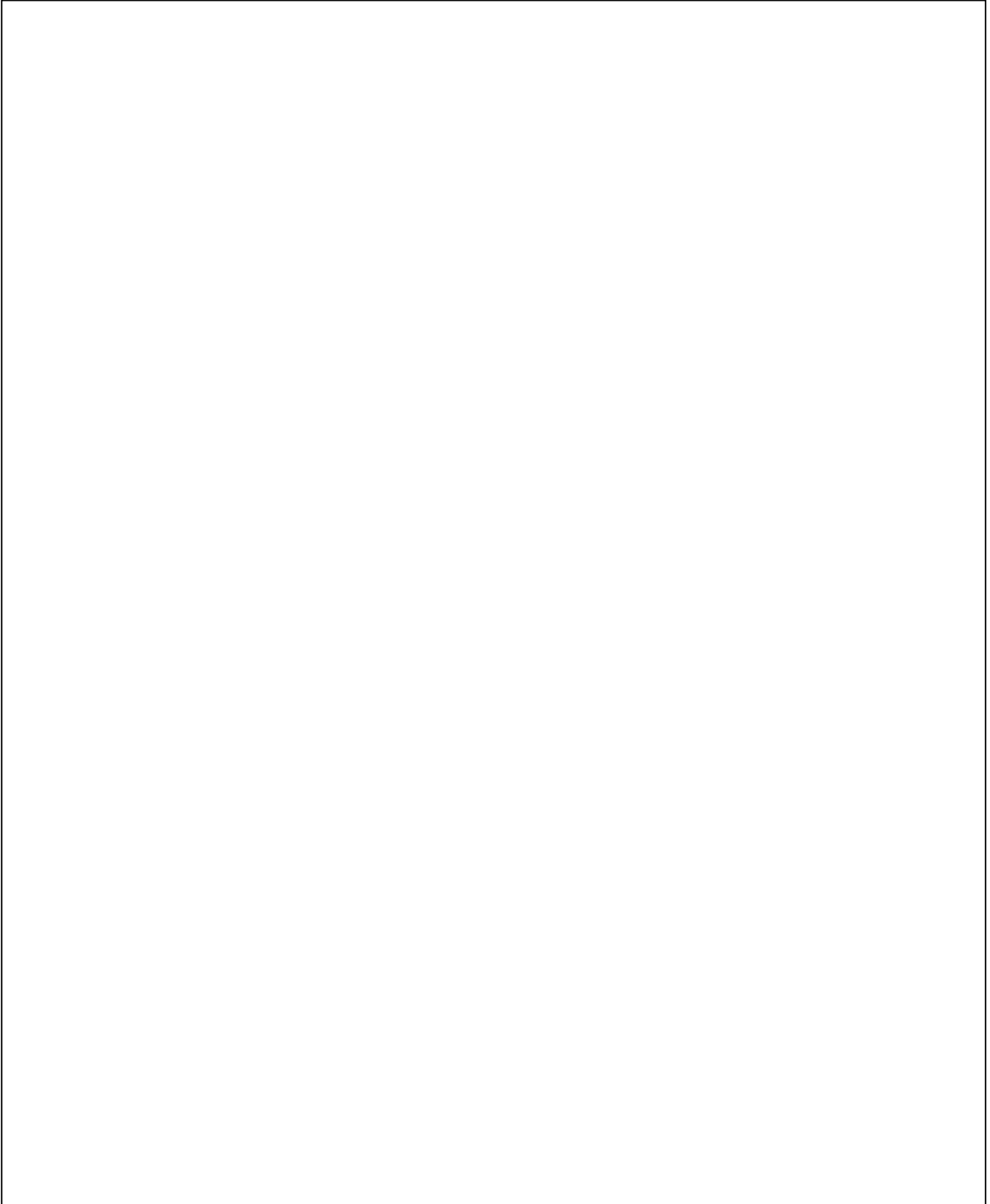
Tabulka 2. Průměry kotoučků hvězd.

Pořadové číslo kotoučku	Hvězdná velikost (mag)	Průměr (mm)
1	6,76 – 7,25	
2	6,26 – 6,75	
3	5,76 – 6,25	
4	5,26 – 5,75	
5	4,76 – 5,25	
6	4,26 – 4,75	
7	3,76 – 4,25	
8	3,26 – 3,75	
9	2,76 – 3,25	



Obr. 1. K odvození průměru kotoučku hvězdy

2. Vše je v pohybu



Obr. 2. Mapka Plejád (sem vlepte podklady pro mapku nakreslené na milimetrovém papíru a případně přiložte pauzovací papír s vykreslenou mapkou Plejád)

2. Vše je v pohybu



úloha k zamyšlení

Kde zapadne Slunce?

Dnes vyšlo Slunce přesně východním směrem. Až o půl dne později zapadne, kterým směrem to bude? Zapadne přesně západním směrem nebo nějak jinak? Neřešte tento problém číselně (není to ostatně nijak jednoduché), stačí jen základní úvaha. Pokuste se najít řešení nejen pro vaše pozorovací stanoviště, ale i pro další místa na Zemi.



Foto: Neil deGrasse Tyson.

2. Vše je v pohybu



úloha k zamyšlení

Slunce z Greenwiche ¹⁾

Posuďte následující úvahu: Pozorujeme-li ze staré hvězdárny v Greenwichi, máme výhodu, že čas na našich hodinkách je současně časem světovým (s výjimkou období, kdy je i tu zaveden letní čas). Nemusíme také brát v úvahu korekce na zeměpisnou délku pozorovacího stanoviště, neboť jsme přímo na poledníku středu časové zóny. A pozorujeme-li náhodou např. začátkem června, kdy časová rovnice je nulová, platí též, že v poledne (ve 12 hodin) pásmového času je Slunce přesně na jihu ²⁾, večer v 18 hodin pásmového času přesně na západě.

Je tato úvaha správná? Poslední tvrzení zřejmě neplatí. Vypočítejte tedy, v kolik hodin je Slunce přesně západním směrem. Číselné údaje: deklinace Slunce $\delta = 23^\circ 17'$, zeměpisná šířka Greenwiche $\phi = 51^\circ 29'$, časová rovnice 0,0 min.



¹⁾ Čti: *gryniče*.

²⁾ Podstatné je, že jde o *pásmový* čas, i když v tomto období na hodinkách budeme mít nastaven zřejmě letní čas.

2.3. Jak se pohybuje Měsíc?

Dokonalý popis pohybu Měsíce na hvězdné obloze patří sice mezi velmi obtížné astronomické úlohy, my se však nyní budeme zabývat jednoduššími problémy: jaké má Měsíc rozměry, jak obíhá kolem Země, jak je to s jeho rotací. Nejde o nic složitého, všechno si totiž můžete ověřit jednoduchým pozorováním.

Čísla o Měsíci

Měsíc je určitě pro každého z nás důvěrně známým kosmickým tělesem, znají ho dokonce i malé děti. Adepti astronomie by měli o Měsíci vědět též několik základních čísel, protože pak jej mohou snadno srovnávat s dalšími tělesy sluneční soustavy. Nuže, zde jsou čísla pro zapamatování:

vzdálenost od Země: asi 400 000 km (přesněji: mění se v rozmezí od 356 400 km do 406 700 km);

úhlový průměr: asi 0,5 stupně (přesněji: mění se od 29 do 33 úhlových minut);

průměr Měsíce dosahuje asi 3500 km (přesněji: 3476 km), je tedy ve srovnání se zemským asi čtvrtinový.



Složený snímek Měsíce a hvězd v pozadí (foto: T. A. Rector, I. P. Dell'Antonio)

2. Vše je v pohybu

Jak velký je Měsíc a jak daleko je od Země? Je Slunce stejně velké jako Měsíc, když na obloze mají obě tělesa téměř stejné úhlové průměry? Ačkoli jsme si již uvedli výsledky moderních měření, podvědomě tušíme, že pro starověké astronomy to musely být nelehké otázky. Kdo nemá za sebou zázemí v podobě mnoha staletí rozvoje vědy, kdo musí spoléhat jen a jen na svůj úsudek a jednoduchá pozorování, bude se dobírat k pravdě pomalu a s mnohými omyly.

Tak například podle iónského filozofa Anaxagora z Klazomen, který někdy v polovině 5. století před našim letopočtem přišel do Athén a začal tam přednášet svou přírodní filozofii, bylo Slunce „žhavý kámen velký jako Peloponnésos“. V odhadu velikosti Slunce se Anaxagorás ovšem krutě zmýlil. I když budeme hodně shovívaví, dáme starému filozofovi co největší výhodu a vezmeme v úvahu tu nejdelší úsečku, kterou je možno na peloponnéské pevnině naměřit, vyjde nám sotva 130 kilometrů. V tom případě by byl průměr Slunce právě tak stokrát menší než průměr Země ¹⁾.

Představy o velikostech vesmírných těles a o velikostech vesmíru vůbec byly na úsvitě antické vědy skutečně velmi chabé; celý vesmír byl jakousi domáckou, spíš meteorologickou než astronomickou záležitostí. Nesmíme ovšem křivdit a nesmíme přehlédnout onen velký krok kupředu, který tu Anaxagorás prosadil: o Slunci se začíná uvažovat jako o kusu běžné přírody a jako takové je zkoumáno. Jeho božství a tím i jeho nadpřirozenost nemá v tomto zkoumání už dál co činit.

Z dnešního pohledu vidíme, že historie někdy tropí poněkud jedovaté žerty. Spočetli jsme, že Anaxagorás, pokud jde o vzájemné velikosti Země a Slunce, se zcela náhodou střelil do poměru jedna ku stu. Ten poměr je číselně vlastně správný, ale platí právě v opačném smyslu, než jak si Anaxagorás představoval.

Fáze Měsíce

Vznik *fází Měsíce* jistě plně chápete ze školy. Ale přesto si připojme několik otázek. Například: jak dlouho trvá, než se vystřídají všechny fáze, třeba od první čtvrti znovu do první čtvrti? Nebo: když je Měsíc v poslední čtvrti, kdy vychází a kdy zapadá? Podobných otázek by bylo víc (jak je to s viditelností Měsíce v době první čtvrti, úplňku...), takže místo slovních odpovědí máte vše shrnuto v následující tabulce.

Kdy vychází a zapadá Měsíc:

Fáze	Kdy vychází	Kdy je nejvýše na obloze	Kdy zapadá
nov	ráno	v poledne	večer
první čtvrt	v poledne	večer	o půlnoci
úplněk	večer	o půlnoci	ráno
poslední čtvrt	o půlnoci	ráno	v poledne

¹⁾ Tato část o Anaxagorovi z Klazomen byla zpracována podle textu Zdeňka Horského v knize *Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru* (Svoboda, Praha 1988).

2. Vše je v pohybu



Měsíční fáze se střídají s periodou 29,53... dne (synodický měsíc). Foto: A. Cidadao.

2. Vše je v pohybu

Měsíc siderický a měsíc synodický

Měsíc nenajdeme vždy přesně na ekliptice. Rovina měsíční dráhy je totiž k ekliptice skloněna pod úhlem asi 5 stupňů, Měsíc tedy může být poněkud *nad* nebo *pod* rovinou ekliptiky. Proto u Měsíce pozorujeme během roku výraznější změny ve výšce než u Slunce. Měsíc je natolik blízko u Země, že můžeme docela snadno sledovat jeho pohyb po hvězdné obloze. Měřením jeho oběžné doby vůči hvězdám zjistíme, že činí 27,32... dne. Je to tzv. *siderický měsíc*. Víme však, že měsíční fáze se střídají (např. od novu k novu) za dobu *delší* než je siderický měsíc: za 29,53... dne, což je tzv. *synodický měsíc*²⁾.

Měsíční „tvář“

Určitě víte, že Měsíc přivrací k Zemi stále stejnou část povrchu. Už jsme si zvykli na rozložení oněch charakteristických tmavých skvrn po kotoučku; některým z nás skvrny v době úplňku připomínají lidskou tvář. Způsob rotace, při níž se k pozorovateli neustále natáčí jen jedna polokoule nějakého kosmického tělesa, označujeme jako tzv. *vázanou* nebo *synchronní* rotaci. U družic planet je to zcela běžný jev, naprostá většina družic natáčí ke svým planetám tutéž polokouli. Vázaná rotace vzniká dlouhodobým gravitačním působením planety na družici.



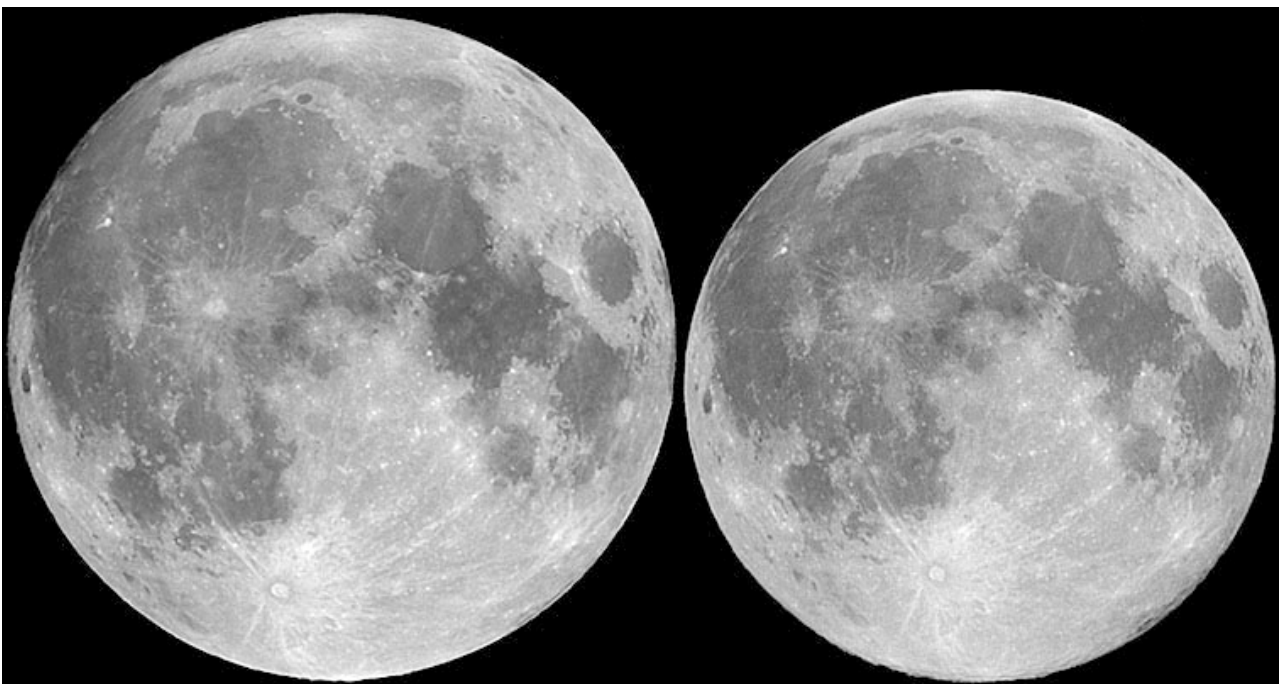
²⁾ Vysvětleme si původ slov siderický a synodický: první z nich znamená hvězdný, protože latinsky *sidus* je hvězda. Druhé slovo pochází z řečtiny, kde *sýnodos* označuje schůzku, shromáždění, soutok, společnost. Můžeme tedy parafrázovat: až se úplněk s úplněkem sejde, uplyne právě synodický měsíc.

2. Vše je v pohybu

Kývání Měsíce

Měsíc se vůči Zemi kývavě natáčí. Příčin tohoto mírného kývání, tzv. *librací*, je několik. Tu první pochopíme snadno: Měsíc rotuje – měřeno vůči vzdáleným hvězdám – zcela rovnoměrně, ale pohybuje se po mírně eliptické dráze, a to nerovnoměrně. Pak ovšem jeho natočení vzhledem k Zemi nemůže být vždy přesně stejné.

Další příčinou librací je nevelký sklon rotační osy Měsíce k rovině oběžné dráhy kolem Země. Měsíc, jak k nám přiklání střídavě severní a jižní pól, tedy umožňuje nahlédnout jednou poněkud za severní, podruhé za jižní okraj. Jinou příčinou kývání Měsíce je jeho poněkud vejčité tvar. Delší osa měsíčního tělesa, která směřuje přibližně k Zemi, je gravitačním působením naší planety poněkud vychylována ze směru přímo k centru Země.



Už při zběžném pohledu na levý a pravý snímek poznáte, že Měsíc vůči nám není ve zcela stejném postavení.

Měsíční zatmění

Země osvětlená Sluncem vleče za sebou kuželovitý stín dlouhý téměř 1,4 milionu kilometrů. Vstoupí-li do něj Měsíc, nastane *zatmění Měsíce*. Pozorovateli na Zemi se pak naskýtá nezvyklá podívaná. Měsíční úplňk začne z východní strany postupně ukrajovat neviditelná cirkulárka. Když už z jasného disku nezbude ani kousíček, končí *částečné* a začíná *úplné* zatmění Měsíce. To může trvat až jednu a tři čtvrtě hodiny. Pak se na západě objeví nejprve uzoučký srpek osvětleného Měsíce. Srpek neustále tloustne a mohutní, až se nakonec rozšíří na celý měsíční kotouč. Zatmění končí.

Zatmění Měsíce při každém úplňku?

Jak dobře víme, nic takového se neděje. Aby k měsíčnímu zatmění došlo, musí být Měsíc v úplňku a zároveň se musí nacházet v rovině oběžné dráhy Země kolem Slunce. Měsíční oběžná dráha je přitom k té zemské skloněna o úhel asi 5 stupňů, a navíc nemá v prostoru stálou polohu – stáčí se.

2. Vše je v pohybu

To je důsledek gravitačních poruch, způsobovaných především Sluncem. Proto měsíční zatmění nepatří mezi časté úkazy na našem nebi. Rozhodně si žádné z nich nenechejte ujít!



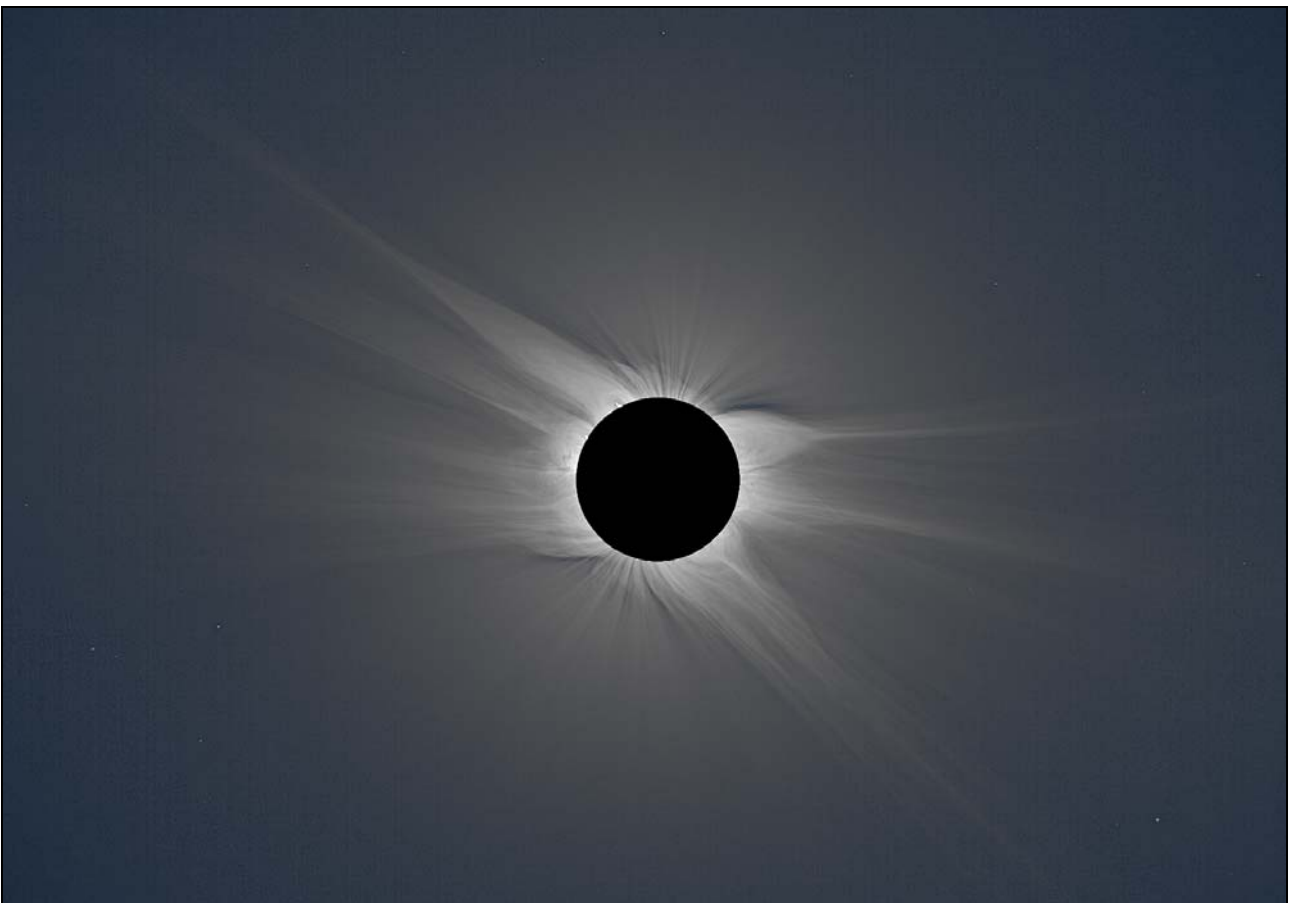
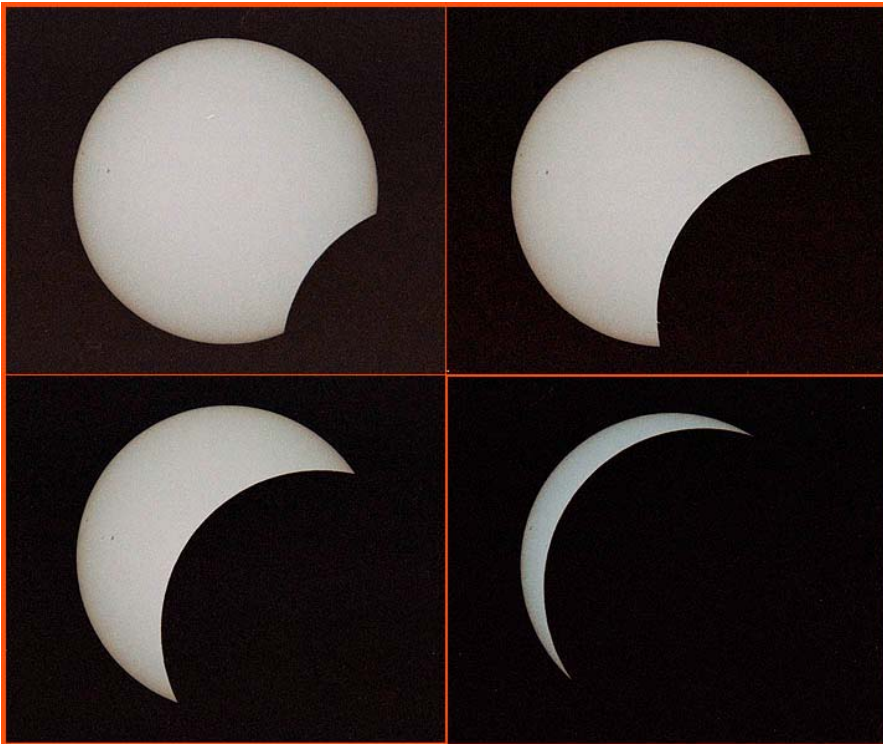
Tři snímky z konce fáze úplného zatmění Měsíce 24. 10. 2004 (začíná fáze částečného zatmění).

Zatmění Slunce

Nastává ve chvíli, kdy se Měsíc ocitne na spojnici Země a Slunce. Vzhledem k téměř stejným úhlovým průměrům obou těles náš Měsíc zakryje zářivý sluneční kotouč a na krátkou dobu (obvykle několika minut) umožní z určitého místa na Zemi (kterým prochází plný stín Měsíc) sledovat sluneční atmosféru. Stříbřitou atmosféru kolem potmělého kotoučku Slunce, kterou spatříme na několik minut při úplném zatmění, nebyla vždy připisována Slunci. Johannes Kepler ji jednoznačně přisoudil Měsíci, a tak po několik staletí byla považována za měsíční atmosféru, která je viditelná jen tehdy, je-li při zatmění zezadu nasvětlena zakrytým Sluncem. Tato kuriózní domněnka padla definitivně až v polovině 19. století, kdy se prokázalo, že během zákrytu se kotouč Měsíce pohybuje na pozadí této atmosféry.

I když nedávné úplné zatmění Slunce (11. 8. 1999) procházelo hustě obydlenými částmi Evropy a mnohým se poštěstilo úkaz sledovat, stále ještě drtivá většina lidí tento nádherný přírodní jev na vlastní oči nikdy neviděla. Ti šťastní, kteří úplné zatmění již pozorovali, se shodují v jednom: něco takového se nedá popsat, to je nutné zažít...

2. Vše je v pohybu



Částečné a úplné zatmění Slunce (snímek úplného zatmění je z 29. 3. 2006 a pořídil ho Miloslav Druckmüller).

2. Vše je v pohybu

První předpověď úplného zatmění Slunce

Pochází od řeckého filozofa Thalety z Milétu. Zatmění předpověděl na 25. května roku 585 př. n. l. Předpověď sice vyšla, ale zdá se, že mnohem víc dílem šťastné náhody než Thaletovou zásluhou. V té době již bylo známo, s jakou periodou se zatmění opakují (tuto periodu 6585,3 dne znali již Babylóňané a nazývali ji *saros*). Perioda *saros* ovšem určuje pouze možnost, že zatmění Slunce může nastat. Že zatmění skutečně nastalo a navíc bylo pozorovatelné v Malé Asii, a tedy i z Thaletova působiště v Milétu, je opravdu jen shoda příznivých okolností.

Výpravy za slunečním zatměním

Při úplném zatmění Slunce zakryje Měsíc na několik málo minut žhavý sluneční kotouč a dychtivý pozorovatel má možnost spatřit nádhernou stříbřitou sluneční atmosféru, tzv. korónu. I v současnosti jsou taková pozorování cenným zdrojem nových informací, protože natolik dokonalé zakrytí Slunce, jaké uskutečňuje Měsíc, nejde na Zemi uměle napodobit.

Úplné zatmění lze ovšem sledovat jen z území tvaru úzkého pásu (tzv. *pásu totality*), táhnoucího se často nepřístupnými místy, územím z těch či jiných příčin nebezpečným. Navíc nikdo nezaručí, že v den *D* se do té doby čistá obloha nepotáhne vrstvou mraků, která rázem a definitivně zhatí dlouhé měsíce příprav na tento vzácný úkaz. Přesto astronomové expedice za zatmělým Sluncem podnikají. Podstupovali je v minulosti a pokračují v nich i nyní, protože některá pozorování jindy uskutečnit nelze.



čítanka

Zdeněk Pokorný: Platí mnemotechnická pomůcka o dorůstajícím nebo couvajícím Měsíci vždy a všude?

Pavidlo je jednoduché a zná je už každý školák: úzký srpek Měsíce, který spatříme večer nad západním obzorem, den po dni *přibývá*. Měsíc dorůstá a v první čtvrti svým tvarem připomíná písmeno **D**. Pak asi za týden nastane úplněk; zcela kulatý Měsíc se v dalších dnech promění opět v srpek a po poslední čtvrti vypadá jako písmeno **C**. Lidově řečeno couvá.

Tak rozlišujeme fáze Měsíce my. Francouzi mají jinou mnemotechnickou pomůcku: ke špičkám půlměsíce si přimyslí úsečku, která jednou vytváří písmeno **p** a podruhé **d**. Písmenem **p** začíná slovo *premier* – tedy první, což značí, že Měsíc je v první čtvrti. Písmenem **d** začíná slovo *dernier* – poslední, takže to je případ čtvrti poslední.

Ve Středomoří nebo ještě jižněji tato pravidla začínají selhávat. Srpek Měsíce tu bývá natolik nakloněn na stranu, že připomíná – je-li nízko u obzoru – spíše jakousi gondolu nebo zářící oblouk. Je to tím, že obloha v rovníkových oblastech vypadá trochu jinak než u nás: Slunce, Měsíc i hvězdy se pohybují během dne rovnou vzhůru nebo dolů, nikoli šikmo k vodorovnému obzoru jako v našich krajích. Na jižní polokouli, řekněme na Novém Zélandě, je tomu zase jinak.

Děti na novozélandských školách se nemohou učit pravidlo o dorůstajícím a couvajícím Měsíci, a to nejen z jazykových důvodů. Tam je to s tvarem Měsíce právě naopak: je-li večer západním směrem, nevypadá jako písmeno **D**, ale **C**. Naopak ráno, východním směrem, bude Měsíc připomínat **D**, ačkoli je doba poslední čtvrti a do novoluní zbývá jen několik málo dní.

Na jižní polokouli na nás čeká více takových překvapení. Třeba jak se pohybuje Slunce po obloze? Od východního obzoru k západnímu. Jenže je to pohyb opačný, než na jaký jsme zvyklí! Zde se během dne za Sluncem otáčíme doleva, kdežto u nás doma – doprava. Ještě jeden rozdíl tu je: chceme-li doma spatřit v poledne Slunce, otáčíme se k jihu, oni k severu. Obyvatelé Nového Zélandu takové změny astronomické orientace ani nevnímají – proč také, vždyť je to z jejich hlediska zcela normální. Architekti navrhují domy s výhledem na teplý sever, vinaři pěstují nejlepší hrozny na severních úbočích kopců, od jihu foukají často nepříjemně studené větry. Ano – jak je vidět, vše je relativní. To, co nám připadá prapodivné, je zde na jižní polokouli docela normální.

Stejnomená kapitola z knihy *100+1 záhadných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).



čítanka

Zdeněk Pokorný: Jak dlouho trvá východ Země na Měsíci?

Na naší obloze vychází Měsíc asi dvě tři minuty. Měsíc oběhne kolem Země za necelý měsíc... Jak dlouho tedy vychází Země pro pozorovatele, stojícího na měsíčním povrchu? Pokud prokouknete lest a je vám vše jasné, do žádných výpočtů se určitě nebudete pouštět. Měsíc k naší Zemi obrací stále stejnou polokouli, má vázanou rotaci (ostatně jako převážná většina přirozených družic planet). Budeme-li tedy na té části povrchu, jež je k Zemi přivrácena, uvidíme naši planetu vždy, a samozřejmě vycházet ani zapadat nikdy nebude. Na straně odvrácené pak naši Zemi nespátříme nikdy.



2. Vše je v pohybu

Ale pozor! To neznamená, že můžeme jen tak bez dalšího vysvětlování říci, že Měsíc nerotuje. Vždy musíme předem uvést, *vůči čemu* budeme rotaci uvažovat. Jestliže vůči vzdáleným hvězdám, doba rotace Měsíce činí 27 dní 7 hodin 43 minut a 12 sekund (to je tzv. siderický měsíc). Pokud rotaci Měsíce vztáhneme ke Slunci, pak trvá 29 dní 12 hodin 44 minut a 3 sekundy (tzv. synodický měsíc). Nu a vzhledem k Zemi ... Měsíc opravdu nerotuje.

Jenže málokdy bývají věci tak jednoduché, jak se na první pohled jeví. Ani Země, pozorována z povrchu Měsíce, nezůstává na jediném místě měsíční oblohy. Mírně na ní mění svou polohu, Měsíc se tedy vůči Zemi kývá.

Astronomové označují tyto kývavé pohyby Měsíce jako librace. Je to docela příhodné označení – latinsky *libra* jsou dvouramenné váhy, a měsíční pohyb kývání jazýčku na vahách kolem rovnovážné polohy velmi připomíná. Vlivem librací můžeme ze Země spatřit nikoli 50 procent, ale až 59 procent celého povrchu (jistěže postupně!). Znamená to taky, že asi pro 1/7 celého měsíčního povrchu platí, že tu Země vychází a zapadá, pro 3/7 povrchu je naše planeta neustále nad obzorem a pro zbylé 3/7 je vždy pod obzorem.

Jak tedy vyhlíží Země z těch míst Měsíce, kde ji lze vidět bez problémů? Je úhlově čtyřikrát větší než Měsíc na naší obloze (úhlový průměr dosahuje dvou stupňů) a střídá fáze v 29,5denním rytmu. Pohybuje se přitom ve čtyřúhelníku, který ve směru severojižním má úhlovou velikost 14 stupňů, ve směru východozápadním 16 stupňů. Země na měsíční obloze opisuje v tomto nevelkém čtyřúhelníku složité křivky. Musí to být kouzelný pohled na naši modrou planetu: neustále mění svou podobu, a přece jen je v něčem stále stejná – v místě, kde ji na měsíční obloze vždy najdeme.

Úryvek z knihy *220 záhadných otázek z astronomie* (Rovnost, Brno 1996).

Poznámka k obrázku na předchozí straně, který pořídili astronauti Apolla 8 v prosinci 1968 při obletu Měsíce: pro ně, pokud nepřistáli na povrchu Měsíce, naše Země pochopitelně vycházela nad měsíční obzor i zapadala za něj, a je myslím jasné proč: jejich kosmická loď vůči Měsíci i Zemi neustále měnila svou polohu. Kdyby však přistáli na povrchu, platilo by to, co jste si přečetli v čítance.



čítanka

Adalbert Stifter: Zázitek, na který nelze zapomenout

Jsou věci, o kterých člověk velmi dobře ví, ale přesto, když nastanou, užasne nad jejich velikostí a hrůzou. Pocítil jsem to při úplném zatmění Slunce, které jsem prožil ve Vídni v časných ranních hodinách 8. července 1842. Stanul jsem v pět hodin ráno ve městě na věži domu číslo 495, odkud lze přehlédnout nejen celé město, ale i krajinu až ke vzdálenému obzoru, na němž jako hebké vzdušné obrazy dřímaly uherské kopce. Slunce právě vycházelo a přívětivě se lesklo na zamžených dunajských luzích, zrcadlilo se na vodě i na rozličných siluetách města.

Přístroje byly připraveny, sluneční skla pohotově po ruce. Konečně – v předpověděné minutě – takřka jako od neviditelného anděla přijalo Slunce hebký polibek smrti.

Tenký proužek jeho světla couvl před dechem tohoto polibku. Zvláštní ale bylo, že tato hrozivá, znetvořená, tmavá postupující věc, která Slunce pomalu pohlcovala, měla být naším Měsícem, tím pěkným, hebkým Měsícem, který jinak



2. Vše je v pohybu

temné noci tak stříbřitě ozařuje.

Konečně byly účinky také na Zemi viditelné, a to tím víc, čím užší byl žhoucí srpek na nebi: řeka se už netřpytila, byl to jen šedý pás, matné stíny ležely kolem dokola, vlaštovky byly neklidné, pěkný, hebký jas oblohy vyhasl, ledový vzduch se zvedal a stoupal proti nám. Byl tu klid, ale ne klid spánku, nýbrž mdloby. Bledost se rozlila po celé krajině – stíny našich postav si lehaly na zdivo prázdné a bezobsažné, obličej zpopelavěly – vzrušující bylo toto pozvolné umírání uprostřed svěžesti rána, která tu panovala ještě před malou chvílí. Napětí stoupalo na nejvyšší míru. Jako poslední jiskra zhasínajícího knotu rozplynula se právě i poslední jiskra sluneční. Měsíc stál uprostřed Slunce, ale ne už jako černý kotouč, nýbrž takřka napůl průsvitný, jak přetékal slabým ocelovým třpytem, kolem něho nebyl okraj Slunce, ale nádherný krásně zářící kruh, namodralý, načervenalý, v lomených paprscích, nahoře stojící Slunce jakoby vylévalo své světlo dolů na Měsíc a on je rozstříkoval kolem dokola – to nejkouzelnější, co jsem ze světelných jevů kdy viděl! Mohu jen líčit celou událost, ale špatně, pocity ještě hůře, ale vůbec nemohu vyjádřit nevýslovně tragickou hudbu barev a světel, která se rozprostírala celou oblohou.

Ale tak jako všechno má svou pravou míru, měl ji i tento jev – trval naštěstí velmi krátce. Najednou zmizel onen svět a zdejší byl opět tu, jedna jediná světelná kapka vytryskla na horním okraji jako bělavý kov, a my jsme zase měli náš svět – prodíral se dopředu, tato kapka jako by říkala, že Slunce samo bylo rádo, že to překonalo, jeden paprsek vystřelil hned prostorem, druhý si už dělal místo. Věci opět vrhaly stíny, voda se leskla, stromy byly zelené, viděli jsme si do očí – vítězně přicházel paprsek za paprskem.

Vy, kteří to v míře nejvyšší znovu procítíte, buďte shovívaví k těmto chudým slovům, jež se to pokusila vylíčit a tak daleko zaostala za skutečností. Kdybych byl Beethoven, řekl bych to hudbou – a myslím, že tak bych to uměl lépe.

Přeložila Irena Vykoupilová.

2. Vše je v pohybu



Nejlepší omyly jsou ty nejkratší.

Molière, dramatik a herec (1622 – 1673)

otázky a příklady

Otázka 2.3.1. Je konec března, Měsíc je v úplňku. Jakou má přibližně rektascenzi? Nabízíme tyto možnosti: a) $0^{\text{h}} = 0^{\circ}$; b) $12^{\text{h}} = 180^{\circ}$; c) je třeba uvést ještě hvězdný čas, jinak úlohu nelze vyřešit.

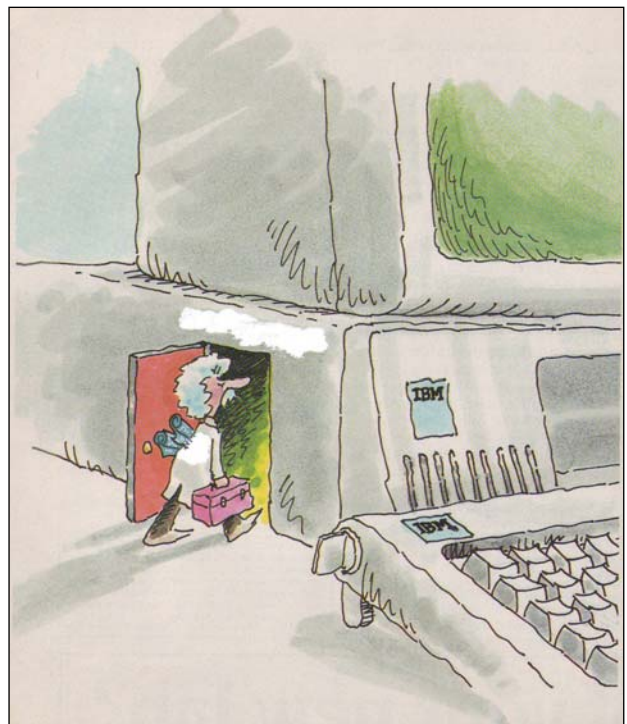
Otázka 2.3.2. Přenesme se alespoň v myšlenkách na měsíční povrch. Stojíme někde na jeho přivrácené straně a sledujeme Zemi. Jak velký úhlový průměr má Země?

Otázka 2.3.3. O kolik stupňů se posune Měsíc vůči hvězdám za jednu hodinu? Vyberte jednu z nabízených možností. a) O úhel přibližně rovný svému průměru, tedy asi o půl stupně. b) O 15 stupňů. c) Je to pouhýma očima nepostřehnutelný úhel, protože Měsíc se vzhledem ke vzdáleným hvězdám téměř nehýbe.

Otázka 2.3.4. I když na chvíli odhlédneme od skutečnosti, že rovina měsíční dráhy a ekliptika nejsou totožné, pozorujeme během roku velmi výrazné změny ve výšce Měsíce v době horní kulminace. Představte si Měsíc v úplňku. Ve které roční době bude Měsíc u nás (ve středních zeměpisných šířkách) nejvýše nad vodorovnou rovinou?

Otázka 2.3.5. Tmavé skvrny na Měsíci, tzv. měsíční moře (latinsky *mare*), jsou vidět: a) Jen dalekohledem; proto je spatřil jako první až Galileo Galilei v roce 1610. b) Takřka vždy a bez problémů, právě moře určují onu typickou „tvář“ Měsíce. c) Jen za výborné viditelnosti, má-li přitom Měsíc tvar plného kotoučku, tedy když je v úplňku.

Otázka 2.3.6. Zvědavá otázka k rotaci Měsíce: kolikrát se Měsíc otočí vzhledem ke Slunci za jeden kalendářní rok? a) Ani jednou, Měsíc natáčí ke Slunci stále stejnou polokouli. b) Přesně 12krát, vždyť kalendářní rok má 12 měsíců. c) Bude to asi 12,5krát.



2. Vše je v pohybu

Otázka 2.3.7. Pokud jste správně odpověděli na předchozí otázku, bude se vám tato zdát zbytečná. Ale přesto: stojíte někde uprostřed přivrácené strany Měsíce a chcete vědět, jak dlouhá doba uplyne mezi dvěma po sobě následujícími východy Slunce. Vyberte si jednu z nabízených možností: a) 27,3 dne; b) 29,5 dne; c) otázka nemá smysl, protože na Měsíci k východům a západům Slunce nedochází.

Otázka 2.3.8. Další zvědavá otázka: pro pozorovatele na Zemi vychází Měsíc po dobu asi 2 minut. Jak dlouho vychází Země pro pozorovatele, který je na povrchu Měsíce? a) také asi dvě minuty; b) přibližně $2 \cdot 29,5 = 59$ minut; c) otázka nemá smysl.

Otázka 2.3.9. Měsíc právě teď vyšel v Brně. Můžeme jej ve stejnou dobu pozorovat v Kyjevě a v Paříži?

Otázka 2.3.10. Jestliže pozorujeme úplné měsíční zatmění, představme si, že na zatmělém povrchu Měsíce právě stojí kosmonauti a hledí na Zemi. Co v tu dobu spatří?

Otázka 2.3.11. Za jakých ze tří dále vyjmenovaných okolností můžeme sledovat Měsíc v úplňku? a) Za soumraku vysoko na obloze. b) O půlnoci, když právě vychází. c) Za slunečního západu, jak vychází.

Otázka 2.3.12. Astronauti, když přistáli na povrchu Měsíce, mohli si experimentálně ověřit, že dvě různě hmotná tělesa (např. kladívko a peří), jež současně upustíme, dopadnou na povrch zaráz. Co tímto pokusem ověřujeme? Proč je měsíční povrch vhodným místem pro takový experiment? (Poznámka: tento pokus doopravdy předvedl astronaut David Scott během expedice Apollo 15.)

Otázka 2.3.13. Srovnajte, jak daleko je vzdálen obzor pro kosmonauta stojícího v ploché krajině na Měsíci, Marsu a Zemi (výšku očí nad povrchem předpokládejme 1,7 m).

2. Vše je v pohybu



úloha k zamyšlení

Měsíc pozorovaný ze zemských pólů

Jak známo, na severním nebo jižním pólu Země je Slunce pozorovatelné nepřetržitě půl roku, dalšího půl roku je pod obzorem. „Bílé“ dny jsou, stejně jako noci, na pólech pořádně dlouhé. Dobrá, ale jak je tomu s Měsícem? Jak dlouho je Měsíc v polárních krajinách nad vodorovnou rovinou, a jak dlouho je pod ní skryt?



Půlnoční Slunce.



čítanka

Zdeněk Horský: Průsvitný Měsíc

Skoro vás ani nenapadne o té průsvitnosti nějak pochybovat. Jasně září Sluncem osvětlený srpek, ale jak se sluneční světlo noří do křišťálového měsíčního těla, celým jím prostupuje, a proto svítí celý povrch Měsíce, celá koule, i když zdaleka ne tak zářivě jako část přímo nasvícená Sluncem. Skutečně, zcela proti očekávání nevidíte pouze srpek, ale kromě svítícího srpku i ostatní povrch, který je zřetelně o dost jasnější než temná obloha kolem. Je to úkaz velmi krásný, snad přímo poetický, a není proto divu, že poetické je i jeho pojmenování, které v astronomii platí dodnes. Česky se tento úkaz nazývá „popelavý svit Měsíce“.



Popelavý svit Měsíce i Plejády. Foto: Vincent Jacques.

2. Vše je v pohybu

Ti, kdo věřili, že nebeská tělesa jsou na rozdíl od tmavých pozemských prvků z jasného éteru, si nemohli přát názornější argument pro své přesvědčení. Mnozí astronomové ještě v 16. století definovali hvězdy jako „hustší části sféry“. Protože sféra měla být křišťálová, byly i hvězdy křišťálové. A tedy i Měsíc byl křišťálový, protože také nebyl ničím jiným než zhuštěnou částí své sféry. Kdo nevěří, ať se podívá.

Oč názornější byl tento „důkaz“, o to obtížnější bylo nalézt jeho chybu a správné vysvětlení.

Astronomové, kteří hájili přesvědčení, že Měsíc je ve všem všudy druhou Zemí, tady naráželi na tvrdý oříšek. Kde se jen to světlo na Měsíci bere? Správnou odpověď, pokud víme, jako první vyslovil Leonardo da Vinci. Měsíc přece umí na Zemi vydatně svítit. Však za zimního úplňku je možno po zasněžené krajině skutečně chodit jako ve dne. A je-li Měsíc ve všem všudy druhá Země a svítí-li takto Měsíc na Zemi, musí také svítit Země na Měsíc. Jde jen o to, umět se aspoň v myšlenkách přenést na Měsíc a odtud se podívat na zemskou kouli. Měsíc bezpochyby svítí na Zemi nejvíc, je-li blízko úplňku. A naopak v době těsně před nebo po měsíčním novu, tedy v době, kdy pozorujeme Měsíc právě jako uzounký srpek, musí zas Země být vůči Měsíci skoro v úplňku. Závěr je tedy jednoduchý a snadný, byť možná i trochu překvapivý: popelavý svit Měsíce je zemské světlo rozptýlené od Měsíce zase zpět k Zemi.

Úryvek z knihy *Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru* (Svoboda, Praha 1988).

2. Vše je v pohybu



úloha k zamyšlení

Hmotnost Země z pohybu Měsíce

Na hvězdné obloze se Měsíc přesune (vůči vzdáleným hvězdám) o úhel $13,2^\circ$ za den (to je střední hodnota). Střední vzdálenost Měsíce od Země činí $r = 384\,000$ km. Lze z těchto dvou údajů, jež jsou přímo měřitelné, vypočítat hmotnost Země? Pokud ano, vypočítejte ji, pokud ne, uveďte, která další pozorovací data jsou k výpočtu zapotřebí.



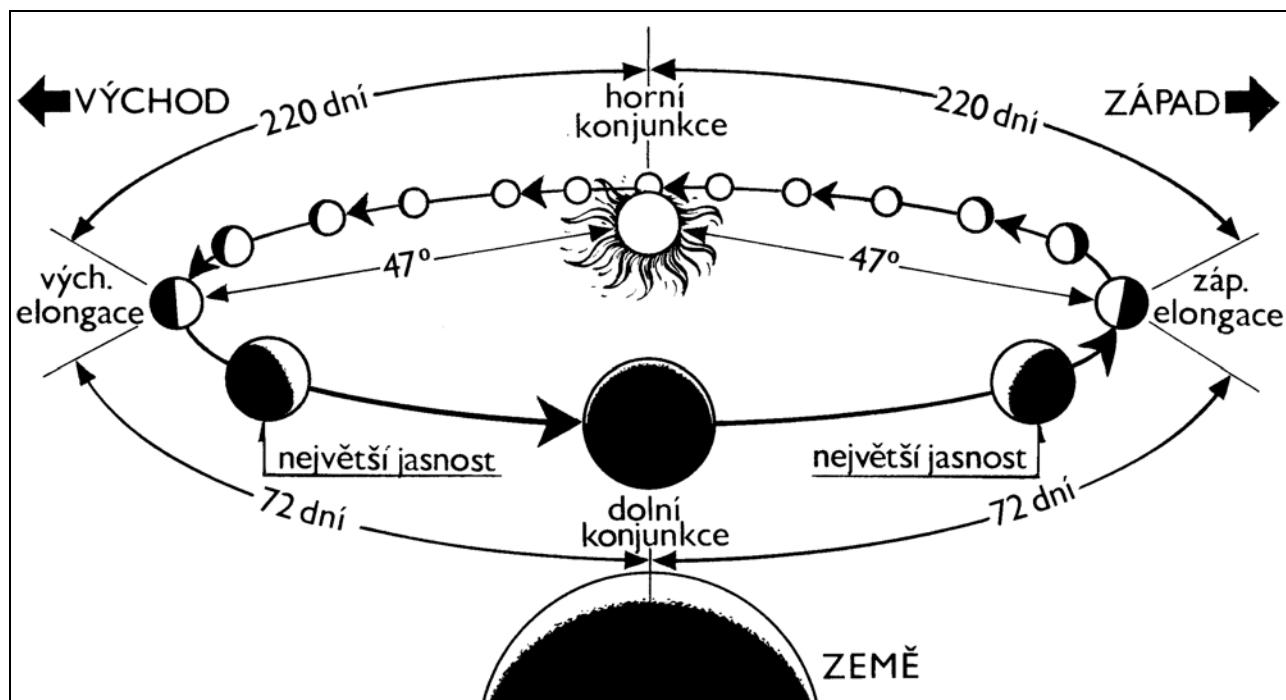
PANE KOLEGO, TĚCH 301 000
KILOMETRŮ ZA VTEŘINU JE
KRAJNĚ PODEZŘELÝ VÝSLEDEK

2.4. Tanec planet

Planety se na hvězdné obloze pohybují docela zvláštním způsobem, takže mnohemu laiku to může připomínat tanec či divoký rej. Nic proti takové představě, jenže i tanec má svá pevná pravidla. Také zde půjde o jistá pravidla: budeme rozebírat, jak se planety pohybují po obloze či hvězdné obloze, a hlavně – proč se jejich pohyb jeví tak složitý?

Kde najdeme planety?

Na první pohled je patrné, že planety se nacházejí vždy poblíž ekliptiky. Oběžné roviny planet jsou vzhledem k ekliptice skloněny opravdu jen velmi málo – nanejvýš o několik stupňů. Proto planety nikdy nespatříme například v souhvězdí Draka, Labutě či Sochaře, ale vždy jen v některém ze souhvězdí ekliptikálních, kterých je celkem třináct.

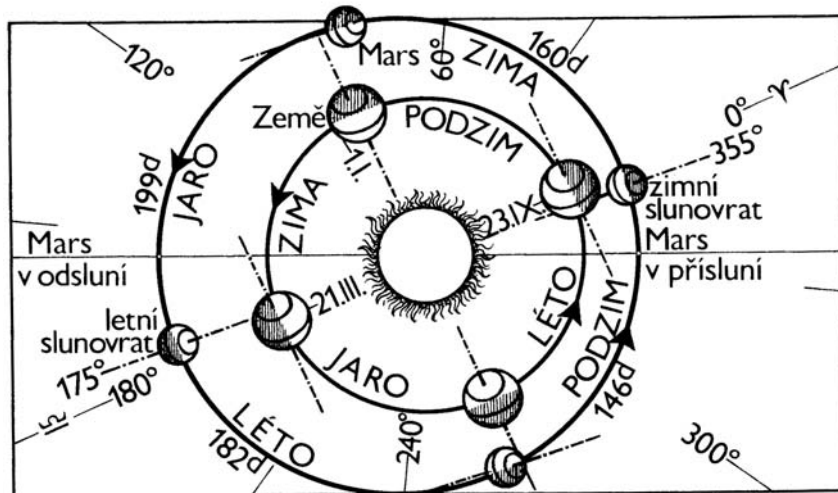


Dráha, fáze a úhlová velikost Venuše při pozorování ze Země během jednoho oběhu planety kolem Slunce. Velikosti kotoučků Venuše ve srovnání s úhlovým průměrem Slunce jsou 60krát zvětšeny. Kresba: Pavel Příhoda.

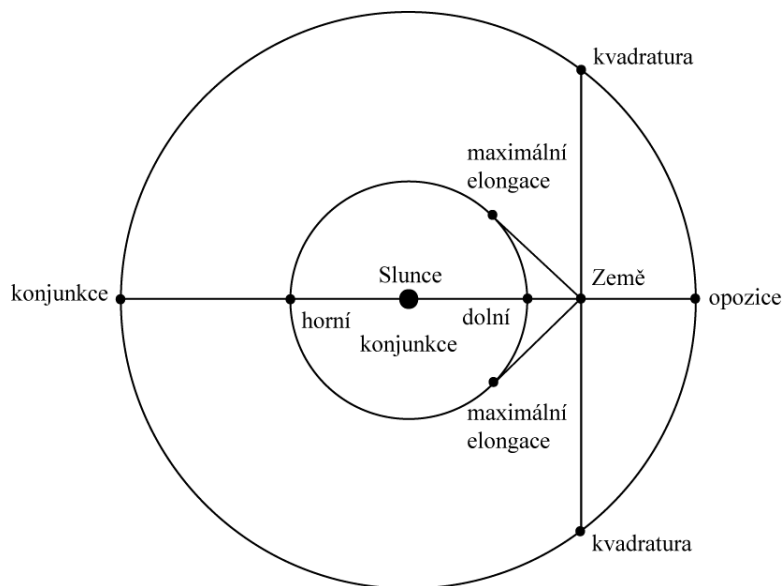
Z hlediska pozemského pozorovatele se planety mohou ocitnout v některé z význačných poloh. Tyto polohy dostaly svá speciální pojmenování už ve starověku a my je používáme dodnes, protože jde o praktickou věc. Jsou-li od nás dvě planety (či obecně dvě různá tělesa) stejným směrem, jsou

2. Vše je v pohybu

v *konjunkci*. Přesněji: tato dvě tělesa mají stejnou rektascenzi. Nacházejí-li se ve směrech opačných, jsou v *opozici* (opět přesnější definice: rozdíl rektascenzí těchto těles je roven 180°). Opozice je tedy opakem konjunkce.



Úhlovou vzdálenost planety od Slunce pak označujeme jako *elongaci*¹⁾. Je jasné, že Merkur a Venuše nikdy nemohou být v opozici se Sluncem. Dosáhnou jen určité elongace od Slunce, takže je spatříme buď večer nebo ráno.



Významné polohy planet vzhledem k Zemi.

¹⁾ Pro ty, kterým latina nepřišla k srdci, musím vysvětlit původ cizích slov, jež jsme teď uvedli. Latinsky *coniunctio* znamená spojení, takže význam slova konjunkce je jasný. Přejdeme k opozici: *oppositus* má význam „naproti postavený“. A konečně elongace pochází z latinského *elongatio*, což znamená prodlužovat.

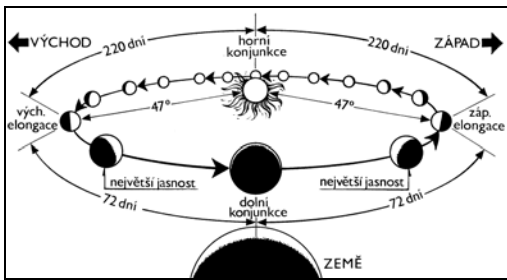
2. Vše je v pohybu

Smyčky a kličky planet

Pohyb planet na hvězdné obloze nám může připadat prapodivný: často sledujeme, jak planety v průběhu týdnů a měsíců vytvářejí jakési smyčky nebo kličky rozmanitých tvarů. Příčina těchto pohybů je ale jednoduchá: jak Země (tj. naše pozorovací stanoviště), tak i všechny ostatní planety se vůči hvězdám pohybují. Skládáním těchto pohybů vznikají právě ony kličky a smyčky.

S pohybem planet na hvězdné obloze souvisejí ještě dva další pojmy: *siderická* a *synodická* oběžná doba. Siderická označuje oběžnou dobu planety vzhledem ke hvězdám. Synodická doba oběhu se u vnitřních planet obvykle počítá jako časový interval, který uplyne mezi dvěma po sobě následujícími stejnými konjunkcemi. U vnějších planet je to doba mezi dvěma po sobě jdoucími opozicemi.

2. Vše je v pohybu

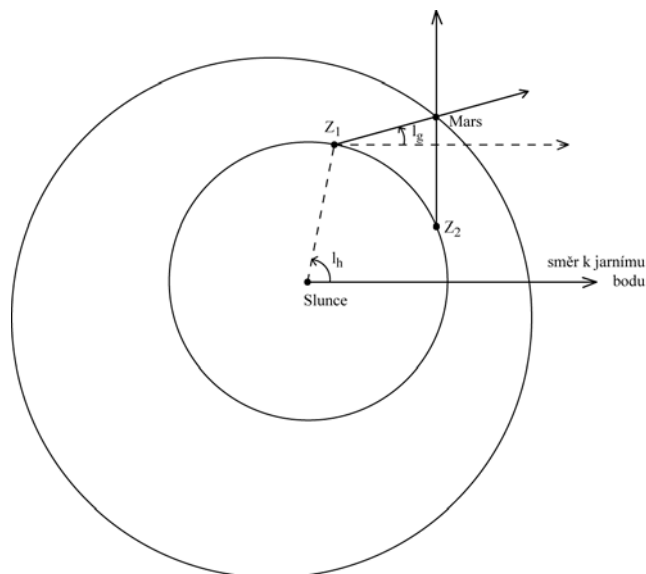


praktikum

Oběh Marsu kolem Slunce (podle Keplerů)

V době Johannese Keplera nebylo ještě známo, jakou geometrickou podobu mají trajektorie planet (jsou to kružnice se středem ve Slunci či mimo něj?, ovály?, elipsy?). Teprve zásluhou Keplerovou se podařilo zjistit přesný stav věci. Kepler přitom využil velmi přesných pozorování poloh planety Mars, která nashromáždil dánský astronom Tycho Brahe. V tomto praktiku se pokusíme o krátkou rekonstrukci Keplerova postupu.

Kepler věděl, že Mars oběhne kolem Slunce (a dostane se tudíž do stejné polohy vůči hvězdám) za 687 dní¹⁾. Za tu dobu Země uskuteční téměř dva oběhy – přesněji jeden a 5/6 druhého. Budeme-li tedy pozorovat ze Země planetu Mars v určité poloze vůči hvězdám (na obr. 1 je poloha Země vyznačena Z_1), bude Mars za 687 dní vzhledem ke Slunci i vzdáleným hvězdám ve stejném místě, avšak Země v jiném (je označeno Z_2). Mars tedy uvidíme ze Země jiným směrem než byl před 687 dní. Z oněch dvou směrů, ve kterých máme možnost pozorovat Mars, když se evidentně nachází ve stejné pozici ve sluneční soustavě, můžeme jednoduchou triangulací zjistit jeho polohu – určíme tak jeden bod na jeho trajektorii kolem Slunce. Budeme-li mít podobných dvojic bodů více, lze krok za krokem určit celou trajektorii planety.



Obr. 1.

¹⁾ Vyřešíte-li správně příklad 2.4.5 v této kapitole, budete to vědět taky.

2. Vše je v pohybu

Jistě jste zaznamenali, že mlčky předpokládáme některé skutečnosti: zaprvé, případ posuzujeme ve vztažné soustavě spojené s „nehybným“ Sluncem (vůči vzdáleným hvězdám). Zadruhé: trajektorie obou planet leží ve stejné rovině (v rovině ekliptiky). Tento předpoklad zhruba platí – oběžné roviny jsou navzájem skloněny o necelé dva stupně.

Pracovní postup:

1. Do středu obr. č. 2 umístěte Slunce a vyznačte vodorovně doprava směr k jarnímu bodu (podobně je tomu u obr. 1). Zakreslete trajektorii Země jako kružnici o poloměru 50 mm (měřítko je tedy 1 AU = 50 mm).

2. V tabulce 1 jsou uvedeny dvojice poloh Země, které odpovídají téže poloze Marsu ve sluneční soustavě. Nalezneme je v Keplerově díle *Astronomia nova*. Uvedené hodnoty jsou založeny na Tychonových pozorováních, i když někdy Kepler polohu pro příslušné datum interpoloval, jestliže nebyla přímo k dispozici. Pomocí úhlooměru zakreslete první polohu Země (k tomu slouží *heliocentrická délka Země* l_h ; počítá se v matematicky kladném směru od jarního bodu, viz obr. 1). K vyznačení směru, ve kterém ze Země vidíme Mars, slouží *geocentrická délka Marsu* l_g . I ta se počítá v matematicky kladném směru od jarního bodu ²⁾.

3. Dva směry ze Země k Marsu určují jeho polohu. Takto získáte pět poloh Marsu na jeho trajektorii. Už na první pohled je patrné, že vzdálenost Marsu od Slunce se během oběhu mění. První dvě polohy shodou okolností odpovídají situaci, kdy je planeta Slunci nejbližší a nejdále (přibližně).

4. Spojte polohy Marsu, kdy je ke Slunci nejbližší a nejdále, přímkou. Měla by též procházet Sluncem. Dobrou aproximací trajektorie Marsu bude v našem případě kružnice se středem ležícím na této přímce a průměrem rovným vzdálenosti prvních dvou poloh Marsu (v nejbližším a v nejvzdálenějším bodě trajektorie vzhledem ke Slunci).

Zakreslete do obr. 2 takovou kružnici. Její poloměr můžeme považovat za střední vzdálenost planety od Slunce. Uveďte ji v astronomických jednotkách!

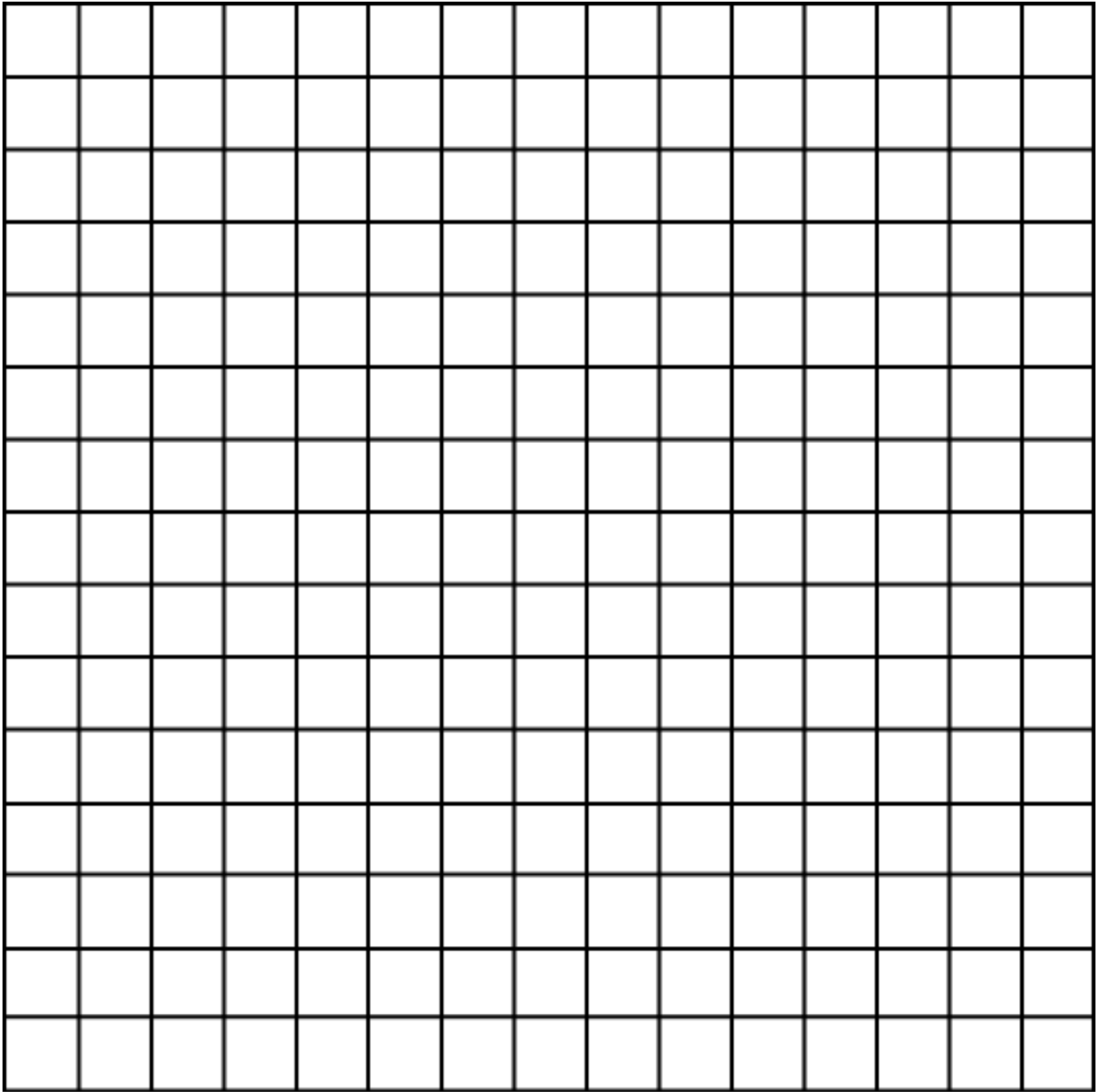
Vstupní data, výsledky:

Tabulka 1. Tychonova pozorování planety Mars.

Datum	Heliocentrická délka Země l_h	Geocentrická délka Marsu l_g
17. 2. 1585	159° 23'	135° 12'
5. 1. 1587	115° 21'	182° 08'
19. 9. 1591	5° 47'	284° 18'
6. 8. 1583	323° 26'	346° 56'
7. 12. 1593	85° 53'	3° 04'
25. 10. 1595	41° 42'	49° 42'
28. 3. 1587	196° 50'	168° 12'
12. 2. 1589	153° 42'	218° 48'
10. 3. 1585	179° 41'	131° 48'
26. 1. 1587	136° 06'	184° 42'

²⁾ Při vynášení tohoto úhlu dbejte na to, aby základna úhlooměru opravdu byla *rovnoběžná* se směrem k jarnímu bodu.

2. Vše je v pohybu

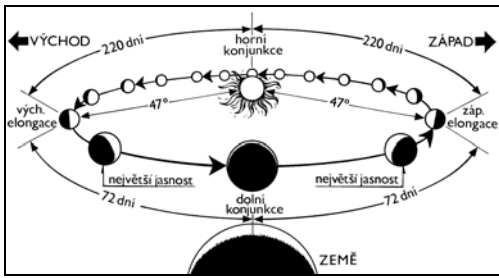


Obr. 2.

Střední vzdálenost Marsu od Slunce činí _____ AU.

Praktikum bylo připraveno s použitím článku O. Gingeriche: *Laboratory Exercises in Astronomy – The Orbit of Mars* (Sky and Telescope, October 1983, 300–302).

2. Vše je v pohybu



Slovy se vyznává jenom láska. O práci je třeba psát.

Petr Leonidovič Kapica, fyzik (1894 – 1984)

otázky a příklady

Otázka 2.4.1. Zde tak trochu spoléháme na vaši vlastní zkušenost. Jak rozpoznáte při pozorování oblohy pouhýma očima, když je na ní vidět spousta zářivých, jasných „teček“, planetu od hvězdy? Vyberte některou z nabízených možností: a) Planetu vidíme jako malý kotouček, hvězdu jen jako svítící bod. b) Planety patří vždy mezi nejjasnější objekty na obloze. c) Planeta, na rozdíl od hvězdy, se jeví zpravidla jako klidně svítící těleso, nebliká a nemihotá se.

Otázka 2.4.2. Když se Venuše nebo Merkur nacházejí v největší západní nebo východní elongaci, vidíme osvětlenou právě polovinu kotouče planety. Souhlasí to?

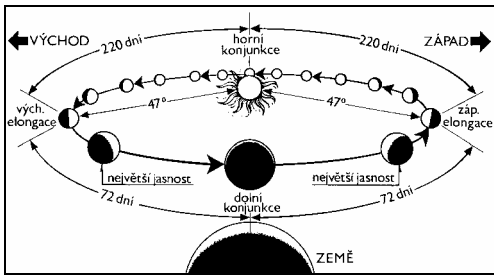
Otázka 2.4.3. Synodickou oběžnou dobu vnější planety počítáme obvykle od opozice k následující opozici. Můžeme za výchozí bod, od kterého periodu počítáme, použít nikoli opozici, ale např. horní konjunkci nebo nějakou jinou význačnou polohu?

Otázka 2.4.4. Jak známo, vnitřní planety Merkur a Venuše se nemohou ocitnout v opozici se Sluncem, mohou dosáhnout jen jisté maximální elongace. U Venuše je to $46,5^\circ$. Lze z tohoto údaje, který plyne z pozorování, vypočítat, jak daleko od Slunce Venuše obíhá? Když ano, pokuste se o tento výpočet, když ne, uveďte, který další údaj je pro vyřešení tohoto problému zapotřebí.

Otázka 2.4.5. Nahlédnutím do několika astronomických ročenek zjistíte, že opozice Marsu se opakují každých 780 dní. Lze z tohoto faktu vypočítat periodu oběhu Marsu kolem Slunce (měřenou vůči vzdáleným hvězdám)? Když ano, určete ji, když ne, uveďte, které další údaje, jež běžně nejsou známy, pro výpočet potřebujete.

Otázka 2.4.6. Tato otázka zní přímo anekdoticky: jistý Albánec, který byl proslulý ostrotí svého zraku, tvrdil, že i ve dne viděl ze dna hluboké studny planetu Venuši. Myslíte, že jeho tvrzení je důvěryhodné? Nehádejte, ale zdůvodněte svůj názor.

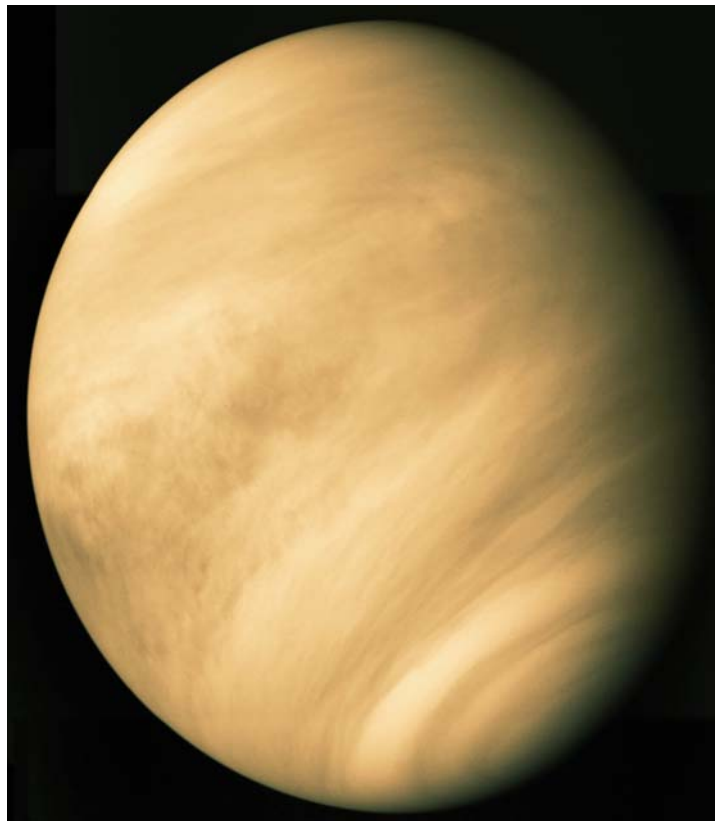
2. Vše je v pohybu



úloha k zamyšlení

Den na Venuši

Z radiolokačních pozorování planety Venuše vyplývá, že siderická perioda rotace Venuše – tedy doba rotace, měřená vůči hvězdám – činí 243,1 dne. Venušin siderický rok (doba oběhu Venuše kolem Slunce, vztažená ke vzdáleným hvězdám) trvá však jen 224,7 dne. Lze z těchto údajů vypočítat, kolik pozemských dní uplyne na Venuši od jednoho východu Slunce k následujícímu? Jinými slovy: jak dlouhý je sluneční den na Venuši, vyjádřený v pozemských dnech?



Snímek Venuše, který pořídila sonda Mariner 10 při průletu kolem planety.

2.5. Keplerovy zákony

Doba, kdy Johannes Kepler formuloval své tři zákony pohybu planet, je velmi důležitou částí historie vědy. Kepler totiž svými zákony nejen vysvětlil pohyb planet ve sluneční soustavě, ale spolu s dalšími učenici položil též základy nové fyziky, kterou používáme dodnes.

Kepler a ti druzí

Pohyb planet (a ovšemže i dalších těles sluneční soustavy) je dán fyzikálními zákony pohybu těles v gravitačním poli. Tyto zákony mechaniky a gravitační zákon formuloval teprve ve druhé polovině 17. století Isaac Newton. Zákonitosti pohybu planet však objevil o více než půl století dříve Johannes Kepler. Vycházel z pozorování poloh Marsu na hvězdné obloze, která koncem 16. století vykonal vynikající pozorovatel, dánský astronom Tycho Brahe. Keplerovy zákony, jak jsou dnes všeobecně označovány, byly tedy objeveny zkusmo (empiricky, bez zdůvodnění *proč*): na počátku tedy byla přesná pozorování, z nichž Kepler odvodil ony empirické zákony pohybu planet. Svůj pravý fyzikální obsah dostaly tyto zákony až později.



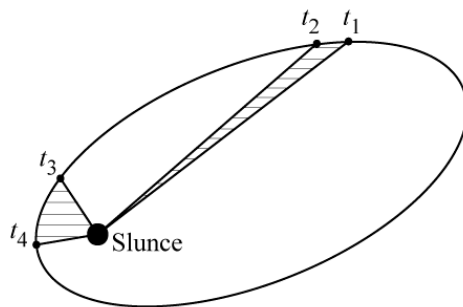
2. Vše je v pohybu

První Keplerův zákon

V současné moderní formulaci první Keplerův zákon zní: *dráhy planet jsou elipsy*¹⁾, v jejichž jednom (společném) ohnisku se nachází Slunce. Z tohoto zákona vyplývá, že dráha planety leží v rovině, která obsahuje Slunce; poloha této roviny v prostoru (vůči vzdáleným hvězdám) je stálá (oběžné roviny jednotlivých planet však nemusí být a ani nejsou totožné!)²⁾.

Druhý Keplerův zákon

Tento zákon popisuje, jak se planety po elipse pohybují: *průvodič planety (tedy spojnice planety se Sluncem) opíše za stejné doby stejně velké plochy*. Důsledkem tohoto zákona je konstatování, že pohyb planety po elipse je nepravidelný: planeta se pohybuje nejrychleji v perihelu, nejpomaleji v afelu. Čím výstřednější je elipsa, tím větší jsou rozdíly rychlostí³⁾.



$$t_2 - t_1 = t_4 - t_3$$

t_1, \dots, t_4 jsou časové okamžiky

Průvodič planety opíše za stejné doby stejně velké plochy.

Druhý Keplerův zákon.

Třetí Keplerův zákon

I z dnešní moderní formulace je patrné, že tento zákon je ze tří Keplerových zákonů nejsložitější. Zákon zní: *Poměr druhých mocnin oběžných dob libovolných dvou planet je roven poměru třetích mocnin velkých poloos jejich drah*. Musíme dodat, co Kepler netušil: v této podobě platí zákon za předpokladu, že hmotnost centrálního tělesa (Slunce) je mnohem větší než hmotnosti planet. Tento předpoklad ve sluneční soustavě docela dobře platí⁴⁾.

Možná, že vám slovní vyjádření třetího Keplerova zákona připadá dost nesrozumitelné. Pak jistě oceníte jednoduchost a eleganci matematického zápisu:

$$a_2^3/a_1^3 = T_2^2/T_1^2,$$

¹⁾ Pokud si nejste zcela jisti pojmy elipsa, ohnisko apod., pročtěte si nejdříve *řady a „drobnosti“* o kuželosečkách v této kapitole.

²⁾ Historická zajímavost: tento „první“ zákon formuloval Kepler až jako *druhý* roku 1605, neboť nejdříve objevil ten, který dnes označujeme jako jeho druhý zákon.

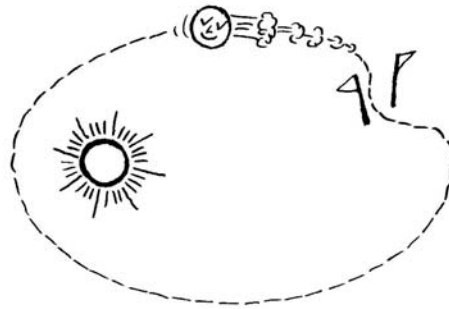
³⁾ Druhý zákon, označovaný někdy jako *zákon (stejných) ploch*, popsal Kepler ve svém díle „Astronomia nova“, vydaném v roce 1609. Znal jej však už od roku 1602, je to tedy nejstarší z Keplerových zákonů.

⁴⁾ Třetí zákon, označovaný též jako *harmonický*, hledal Kepler nejdéle. Po úporné snaze nalézt vztah mezi velikostí dráhy a dobou oběhu planety dospěl ke správnému výsledku teprve 15. května 1618. Bylo to dlouhé období hledání pravdy, s mnoha slepými cestami a omyly.

2. Vše je v pohybu

kde a_1 , T_1 jsou velká poloosa oběžné elipsy a doba oběhu Země kolem Slunce, a_2 , T_2 totéž pro další těleso (planetu).

Ještě jednou uvedme, že třetí Keplerův zákon v tomto tvaru platí za předpokladu, že hmotnost centrálního tělesa značně převyšuje hmotnost dalšího tělesa. V kapitole 5.2. se seznámíme s tímto zákonem v tzv. *přesném tvaru* – pak již předpoklad o značně rozdílných hmotnostech těles nemusí platit.



ČTVRTÝ KEPLERŮV ZÁKON

Podle *Orion*, 183, 1981, 45.



čítanka

Miroslav Plavec: Praha – astronomické hlavní město světa

O bávám se, že dvě hodiny v kině se mnohým, velmi mnohým vryjí do paměti daleko více než desítky hodin dějepisu ve škole. Zmíním-li se o Rudolfovi II., přemnohému se okamžitě vybaví v mysli zhýralý, prostopášný a omezený Pekařův císař, karikovaný Janem Werichem: neschopný vládce, kterého každý šejdř, vydávající se za učence, snadno napálí. Nemám v úmyslu tvrdit, že Rudolf tyto vlastnosti neměl. Ale obraz není při nejmenším úplný, a každý astronom má Rudolfa II. v hluboké úctě proto, že svým porozuměním pro vědu předčil desítky jiných panovníků.

Roku 1598 pozval Rudolf II. do Prahy dánského šlechtice Tycho Brahe, který věnoval většinu svého dosavadního života astronomickým pozorováním. Tycho měl v Praze známého a spolupracovníka, Tadeáše Hájka z Hájku, s nímž se poznal v Římě roku 1575 a s nímž spolupracoval na pozorování komety z roku 1577. Přátelství mezi oběma učenými muži jistě přispělo k pozvání do Prahy, i když Hájek Tycho Braheho občas škádlil: Tycho totiž už roku 1566 přišel v souboji o větší část nosu a nahradil jej stříbrnou protézou, a Hájek mu k narozeninám posílal balíček šňupavého tabáku...

Rudolf II. koupil pro věhlasného astronoma, kterého sám přivítal, Curtiův dům na Hradčanech s velkou zahradou, kde Tycho postavil své přístroje a začal pozorovat. Ale v živé Praze neměl dosti klidu. Dostal proto královský zámek v Benátkách nad Jizerou, kam přestěhoval i rodinu. Ale po několika měsících se vrátil do Prahy, pozoroval v letohrádku Belvederu a zase v Curtiově domě. Ač se tedy ještě nikde řádně neusadil, začal znovu vyvíjet svou myšlenku o vybudování velkého astronomického střediska. Žáci se opět začali scházet. Praha se stávala středem astronomického světa. Tu náhle v říjnu 1601 Tycho po hostině u Petra Voka z Rožmberka onemocněl a zemřel.

Naštěstí tu byl důstojný nástupce, i když zcela jinak zaměřený. Vskutku lze si těžko představit dva lidi tak protichůdné jako Tycho a jeho „příručí astronomie“ Johannes Kepler. Tycho byl důstojný, statný a bojovný šlechtic (vůbec nic takového jako pan profesor Tycho ve Werichově filmu!), Kepler byl slabý, věčně nemocný chudý synek; Tycho byl výborný pozorovatel, ale teorii nemiloval, podceňoval ji, a abstraktně myslel nerad; Kepler se k pozorování nehodil, ale miloval čísla, výpočty, hledání vztahů mezi jevy. Navíc byl Kepler již při příchodu do Prahy (roku 1599 – byl tehdy osmadvacetiletý) přesvědčeným stoupencem Koperníka, kdežto Tycho vymyslel svůj systém, kompromis mezi Ptolemaiem a Koperníkem: planety obíhaly ko-

2. Vše je v pohybu

lem Slunce, ale Slunce obíhalo kolem nehybné Země. Tychonova soustava byla nedomyšlená a zapadla bez ohlasu.

Johannes Kepler měl jedinečný talent pro hledání vztahů mezi jevy v přírodě a pro jejich matematické vyjadřování. Ve všem hledal harmonii, souzvuk věcí a dějů. Je to podivuhodný životní názor u muže, který harmonie v životě zažil pramálo.



Pomník, vybudovaný na počest obou významných astronomů na místě, kde stával dům místokancléře Jakuba Kurze ze Senftenavy (Praha – Hradčany).

Kepler se začal zabývat pohybem planety Marsu, kterého Tycho téměř čtvrt století velmi pečlivě pozoroval. To byla šťastná volba: dnes víme, že Mars má poměrně velmi výstřednou dráhu a kromě toho se jeho odchylky od rovnoměrného pohybu snáze prozradí, protože je blízko Zemi. Kepler brzy poznal, že ani Koperníkova teorie nevyhovuje přesným měřením Tychonovým. Předpoklad o tom, že Mars se pohybuje rovnoměrně po kružnici (třeba výstředně položené), byl neudržitelný. Kepler usoudil, že síla, která nutí planety obíhat, sídlí ve Slunci; proto bylo přirozené předpokládat, že je tím slabší, čím je planeta dále. Proto i předpokládal, že v bodech, kde je Mars dále od Slunce, se pohybuje pomaleji.

Po osmiletém únavném hledání, plném nadějí a zase zklamání, odhalil Kepler pravé zákony pohybu planet a dokonale opravil nedostatky Koperníkova systému.

Výňatky ze stejnojmenné kapitoly knihy *Člověk a hvězdy* (Orbis, Praha 1960).



čítanka

Zdeněk Horský: Hudba sfér

Ten pojem je ještě živý, i když mnozí už nevědí, jaký vlastně má mít obsah. Často i v hovoru prohodíme „to je hudba sfér“ – a myslíme na něco dokonalého, někdy si myslíme případně totéž, jako kdybychom řekli „hudba budoucnosti“. Není to tak docela přesně. Co vlastně má být sféra? Řecky je to koule, ale ve staré astronomii se vždy myslela *dutá* koule. Dokud lidé věřili, že zeměkoule je nehybným středem vesmíru, bylo třeba vysvětlit, jak je vůbec možné, že to všechno, co na obloze vidíme, se stačí za jeden jediný den kolem zeměkoule otočit. Tady právě musela přistoupit představa sféry jako duté koule, v níž uprostřed se nachází naše Země. Hvězdy jsou upevněny v této pevné sféře, nemohou se tedy nijak přeházet ani pomíchat, protože sféra se otáčí kolem Země celá.

To však k vysvětlení jevů pozorovaných na obloze nestačilo. Jsou i jiné „hvězdy“, které mezi ostatními putují, tedy planety. Každá po svém, každá jinak. Nezbylo tedy než si pro každou planetu přimyslet další sféru. Taková sféra musí být dutá a musí být zcela čirá, průhledná, aby skrz ni bylo vidět na hvězdné nebe.

Proč však „hudba sfér“? Tato otázka je složitější. Musíme se vrátit až ke starověkým pýthagorovcům, tedy do 6. a 5. století př. n. l. Jejich filozofie hledala výklad světa v jeho matematické struktuře. Podle nich má být všechno ve vesmíru vytvořeno „matematicky“, tedy nikoli nahodile, ale skrytá struktura světa má sestávat z výjimečných, dokonalých, „hladkých“ matematických vztahů. Pravzor pro takové relace Pýthagorás zdánlivě našel v hudební akustice. Vychází se ze zkušenosti se strunným nástrojem. Zkrátíme-li napjatou strunu na polovinu, bude znít právě o oktávu výš. Rozezvučíme-li tři čtvrtiny této struny, ozve se tón o kvartu vyšší než původní, při dvou třetinách délky o kvintu vyšší a tak podobně. Tak byla hudební akustika povýšena na jakousi ideální vzorovou vědu, a to i pro astronomii. Ač jde o omyl, nebyl to omyl zcela nešťastný.

Pýthagorovci věřili, že sféry při věčném otáčení zvučí dokonalým akordem, jedinečnou harmonií, kterou však my smrtelníci můžeme vnímat jen rozumově, nikdy ji nemůžeme slyšet. Tak tedy měla původně vypadat hudba sfér, již se někdy říkalo i „harmonie sfér“.

Jak už to bývá, i náhled o hudbě sfér je půl pravdou a půl snem. Omyl s dobrým koncem, chcete-li. Johannes Kepler na počátku 17. století již na pravou hudbu sfér nevěřil, ale z původní pýthagorovské představy, se kterou velmi sympatizoval, hleděl vytěžít co nejvíc. Trval na jejich základním přesvědčení, že příroda je

2. Vše je v pohybu

utvořena podle matematického řádu, v přesných matematických vztazích. V nějakých podobných poměrech, jako platí v hudební harmonii.



Tak se Kepler začal s umíněnou úporností zabývat otázkou, jak jsou hudební intervaly uplatněny ve stavbě naší planetární soustavy. Jen díky nezdolné víře se mu nakonec podařilo takto odkrýt třetí zákon pohybu planet. Proto ne náhodou se tomuto zákonu říká „harmonický“. Dá se skutečně vyjádřit zcela jednoduchým matematickým vztahem: poměr třetí mocniny velké poloosy eliptické dráhy planety k druhé mocnině její oběžné doby je pro všechny planety týž.

Dodnes se ve fyzice o některých vzorcích a některých vztazích říká, že jsou „elegantní“. Jsou tím míněny jednoduché matematické vztahy, jakých je třetí Keplerův zákon příkladem. Dáváme jim přednost nejen proto, že jsou snadné k pamatování i k počítání, ale především z toho důvodu, že tam, kde je možno formulovat „elegantním“ způsobem, si děláme naději, že jsme přesněji postihli skutečnou povahu fyzikálního děje. Tato „elegance“ je tedy svým způsobem vzdáleným, ale pokrevním potomkem hudby sfér.

Výňatek ze stejnojmenné kapitoly knihy *Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru* (Svoboda, Praha 1988).

2. Vše je v pohybu



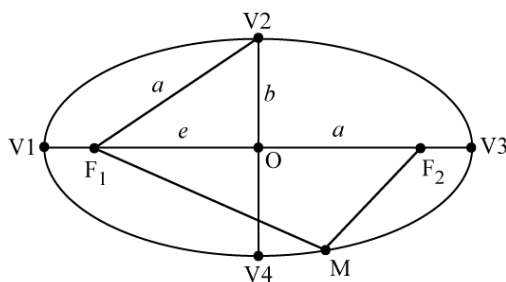
rady a „drobnosti“

Kuželosečky

Elipsa je definována jako množina bodů M , které mají od dvou daných bodů F_1 a F_2 – tzv. *ohnisek* elipsy – konstantní součet vzdáleností rovný $2a$ (a je *velká poloosa* elipsy, jak uvádíme vzápětí) (viz též obrázek). Tedy $F_1M + MF_2 = 2a$. Velká osa elipsy je přímka, procházející oběma ohnisky; často se tím rozumí *délka* úsečky mezi vrcholy V_1 a V_3 (viz obrázek). Poloviční vzdálenost je pak *velká poloosa* elipsy. Obdobně definujeme malou osu $2b$ (resp. *poloosu* b) elipsy.

Název *kuželosečky* pochází z představy, že na rotačním kuželu provedeme rovinný řez. Je-li rovina řezu skloněna k rotační ose kužele pod jistým obecným úhlem, má seříznutá plocha tvar elipsy, více či méně výstředné. Je-li řez kolmý na osu rotace, jde o speciální případ – *kružnici*, je-li řez rovnoběžný s rotační osou, dostáváme další mezní případ – *parabolu*.

Když je speciálním případem elipsy kružnice, pak jsou ohniska F_1 , F_2 a střed elipsy O totožné a tzv. výstřednost elipsy $e = OF_1 = OF_2$ je pochopitelně nulová.



Elipsa. V tomto obrázku je O ... střed elipsy, V_1 , V_3 ... hlavní vrcholy, V_2 , V_4 ... vedlejší vrcholy. Vzdálenost $OV_1 = OV_3 = a$... *velká poloosa*, $OV_2 = OV_4 = b$... *malá poloosa*, $OF_1 = OF_2 = e$... *výstřednost*, $OF_1/OV_1 = \varepsilon$... *číselná výstřednost*.

2. Vše je v pohybu

Hlavní vrcholy elipsy se v astronomii označují jako *apsidy*, jejich spojnice pak jako *přímka apsid*. Apsidy mají obvykle svá speciální, nicméně běžně používaná označení. Zde jsou některá z nich:

<i>centrální těleso</i>	<i>bod V_1</i>	<i>bod V_3</i>
Slunce	perihel	afel
Země	perigeum	apogeum
hvězda	periastron	apastron

Analogicky, tj. předponami *peri-* a *ap-* (*apo-*, *apa-*), se označují body i v případech, kdy centrálním objektem je jiné těleso, než jsme uvedli (např. Měsíc: periselenium ...). Poznamenejme též, že v astronomii se téměř výhradně používá namísto výstřednosti e , definované výše, tzv. *číselná výstřednost* (numerická excentricita) $\varepsilon = OF_1/OV_1$.

2. Vše je v pohybu



Jest vskutku nedůstojné vynikajících lidí, mařit čas otrockou prací počítání, kterou vhodný stroj může snadno přesně vykonávat.

Gottfried Wilhelm von Leibniz, matematik (1646 – 1716)

otázky a příklady

Otázka 2.5.1. Než postoupíte dál, zodpovězte tuto jednoduchou otázku: která ze tří vět, jež jsou zde uvedeny, je pravdivá? a) Všechny kosmické objekty (např. Slunce, Měsíc, planety, ale i hvězdy) se na obloze pohybují stejným způsobem: od východu k západu. b) Planety se na hvězdné obloze pohybují tak, že vytvářejí jakési smyčky nebo kličky. c) Polohy hvězd na obloze se neustále mění, protože je sledujeme ze Země, která vzhledem ke hvězdám rotuje.

Otázka 2.5.2. Kdyby kolem Země obíhala družice s dobou oběhu 5 měsíců, kolikrát by byla dále než náš Měsíc (přibližně)?

Otázka 2.5.3. Tato otázka vám možná připadne obtížná, proto nejdříve poradíme: neznáte-li správnou odpověď přímo, vylučujte zbývající chybné (a že jsou chybné, to určitě poznáte). *Otázka:* Čím vysvětlíte, že komety, jejichž dráhy jsou takřka stejné ve vzdálenostech řádově stovky milionů kilometrů od Slunce, mohou mít navzájem podstatně odlišné oběžné doby? a) projevuje se zde dosti rozdílná hmotnost komet; b) v různé míře se projevuje aktivita jader komet, a ta silně mění rychlost ve dráze a tedy i oběžnou dobu komety; c) pro komety vzhledem k jejich relativně malým hmotnostem třetí Keplerův zákon neplatí; d) při velkých výstřednostech, jež jsou pro dráhy komet typické, jsou elipsy poblíž ohniska, kde je Slunce, téměř stejné. Mohou však mít podstatně různé velké poloosy (a pak se ovšem výrazně liší i oběžné doby komet).

Otázka 2.5.4. Ve kterém bodu trajektorie je *okamžitá* oběžná rychlost planety rovna její *střední* rychlosti? Pokud se vám tato úloha zdá obtížnou, pak přijde vhod malá nápověda: uvažte, na čem závisí oběžná rychlost planety. Pak si jen uvědomte definici elipsy, představte (nebo nakreslete) si ji – a řešení je tu!

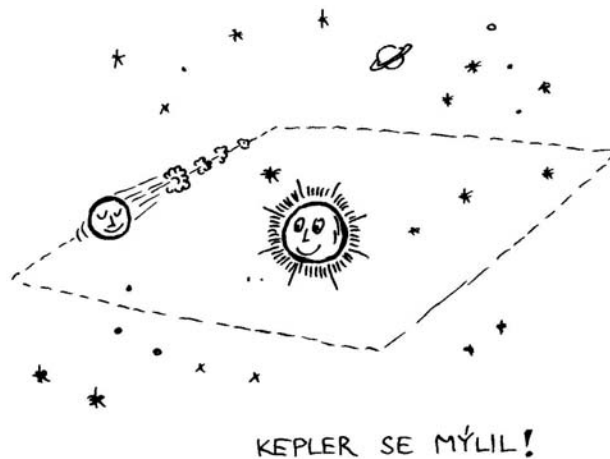
Otázka 2.5.5. Vypočítejte přitažlivou sílu, kterou na sebe působí matka a novorozeně (předpokládejte, že jejich vzájemná vzdálenost činí 0,5 m). Porovnejte ji s přitažlivou silou mezi novorozenětem a Sluncem, příp. Měsícem.

2. Vše je v pohybu

Otázka 2.5.6. Z třetího Keplerova zákona přímo vyplývá, že: a) trajektorie planet jsou rovinné křivky; b) vnitřní planety se pohybují kolem Slunce rychleji než planety vnější; c) planety se pohybují kolem Slunce po mírně výstředných drahách.

Otázka 2.5.7. Malé těleso obíhá po téměř kruhové trajektorii ve vzdálenosti 4 astronomických jednotek od Slunce. Jeho doba oběhu je rovna: a) asi 0,9 roku; b) 8 rokům; c) protože nebyla zadána hmotnost tělesa, nelze na otázku odpovědět.

Otázka 2.5.8. Jakou číselnou výstřednost má trajektorie planety, která se po ní pohybuje zcela rovnoměrně? Jaký geometrický tvar má tato trajektorie?



Otázka 2.5.9. Z třetího Keplerova zákona přímo plyne, že čím dál od Slunce obíhá nějaká planeta, tím delší je její siderická oběžná doba. Jde-li o planetu za drahou Země, je její synodická oběžná doba naopak kratší a kratší. Vnější planety s nejdelšími siderickými oběžnými dobami tak mají *nejkratší* synodické oběžné doby. Jak je tato synodická doba přibližně dlouhá?

Otázka 2.5.10. Jules Verne v románu *Cesta na Měsíc* napsal, že posádka cestující k Měsíci pocítovala beztlížný stav jen v okamžiku, kdy přecházela z oblasti gravitačního vlivu Země do oblasti gravitačního vlivu Měsíce. Jak by let musel probíhat, aby tato představa byla správná?

Otázka 2.5.11. Kosmonauti při letu např. v orbitální stanici kolem Země jsou po většinu doby ve stavu beztlíže. V beztlížném stavu se ovšem nacházejí i všechny předměty, které jsou v kabině. Kdyby si kosmonauti sebou vzali rtuťový teploměr, pružinový siloměr a ladičku, který (či které) z těchto přístrojů nemůže ve stavu beztlíže fungovat?

Otázka 2.5.12. O kolik procent se zvětší osvětlení nějaké plochy, kolmé ke slunečním paprskům v době, kdy Země prochází přísluním, oproti osvětlení téže plochy, jestliže Země je v odsluní? (Perihelová vzdálenost Země-Slunce činí $R_1 = 147 \cdot 10^6$ km, afelová $R_2 = 152 \cdot 10^6$ km.) Souvisí to se střídáním ročních období?

Otázka 2.5.13. Antény, které přijímají televizní signály z geostacionárních družic, u nás jsou nasměrovány jižním (či mírně jihovýchodním či jihozápadním) směrem. Proč míří právě tam, a ne např. severním směrem?

2. Vše je v pohybu



medailon

Tycho Brahe

(14. 12. 1546 – 24. 10. 1601)

Dánský šlechtic a astronom Tycho Brahe je považován za nejlepšího pozorovatele éry před vynálezem dalekohledu. V roce 1580 vybudoval na ostrově Hveen prvotřídní astronomickou observatoř Uraniborg. Kromě přístrojů k pozorování oblohy zde byla i knihovna, knihtiskárna, mlýn na papír, mechanická dílna a alchymistická laboratoř.

Roku 1572 pozoroval novou hvězdu v souhvězdí Kasiopoeje, o níž dnes víme, že byla jednou z několika málo supernov, pozorovaných v tomto tisíciletí uvnitř naší Galaxie. Vypráví se, jak při cestě z hvězdárny zastavoval vesničany, aby mu potvrdili, že ho nešálí zrak a hvězdu vidí také. V roce 1577 pozoroval jasnou kometu. Když nezjistil, že by se poloha komety vůči vzdáleným hvězdám měnila při pohledu odtud a z Prahy (tam ji ve stejnou dobu sledoval český přírodovědec Tadeáš Hájek z Hájku), usoudil správně, že komety jsou objekty vzdálené od Země alespoň desetkrát dále než Měsíc. Tím je vlastně zařadil mezi astronomická tělesa; až do té doby převládal totiž Aristotelův názor, že komety jsou smrduté výpary pozemského ovzduší.

V roce 1598 přijal Tycho Brahe pozvání císaře Rudolfa II., aby se stal jeho dvorním astronomem v Praze, vybudoval si zde pozorovatelnu v Benátkách nad Jizerou a spolupracoval s vynikajícím mladým teoretikem Johannem Keplerem. Tycho Brahe změřil též zeměpisnou šířku Prahy. K pozorování užíval tzv. zední kvadrant, který byl opatřen průzorem a hledím. Přesnost jeho astronomických pozorování poloh hvězd, planet i komet je udivující a převyšovala dokonce přesnost prvních pozorování dalekohledem.

Tycho Brahe však naneštěstí v Praze brzo zemřel; byl pochován v pražském chrámu Panny Marie před Týnem, kde



2. Vše je v pohybu

je dodnes jeho hrob. Na náhrobku je latinsky vyryto Tychonovo životní heslo, jež v překladu zní: „Ni moc, ni bohatství, jen vědění žezla trvají.“

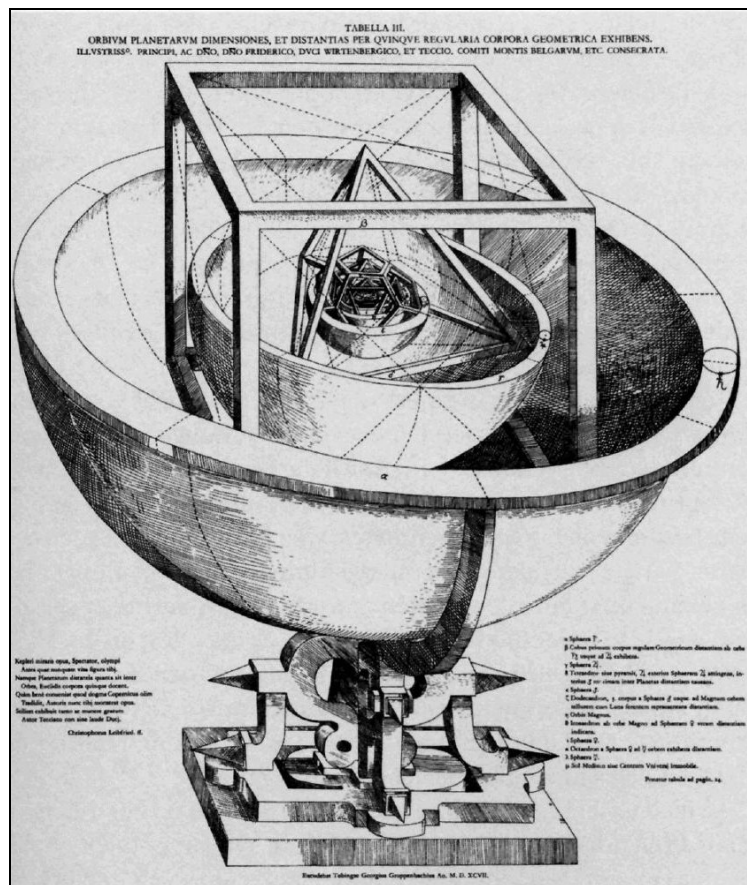
Johannes Kepler

27. 12. 1571 – 15. 11. 1630

Německý matematik a astronom nastoupil roku 1600 v Praze u dvora císaře Rudolfa II. jako královský matematik. Zde navázal úzkou spolupráci s dánským hvězdářem Tychem Brahem, jenž mu přenechal svá jedinečně přesná pozorování poloh planet, zejména Marsu. Na základě těchto měření Kepler po svízelných výpočtech a četných slepých uličkách postupně odvodil své slavné tři zákony o pohybu planet (později se ukázalo, že týmiž zákony lze popisovat i pohyby komet či hvězd ve dvojhvězdách; jde o zcela univerzálně platné pohybové zákony). Na jejich základě pak anglický fyzik Isaac Newton vypracoval klasickou teorii gravitace (1687).

Pro usnadnění výpočtů si Kepler sestavil logaritmické a rozličné astronomické tabulky. Zabýval se však i sestavováním a výkladem horoskopů. Byl tedy současně astronomem i astrologem. Jeho vztah k astrologii se však stával postupně stále více skeptickým, když si sám ověřil, jak málo se výklad horoskopů shoduje se skutečnými lidskými osudy. Dochoval se jeho výrok: „Co by si počala ctihodná matka astronomie, kdyby ji neživila děvka astrologie?“

Kepler byl na rozdíl od Tycho Brahe typickým teoretikem, jenž se pozorování vyhýbal pro chatrné zdraví. V díle *Rozvaha o pobytu v Čechách* sám Kepler napsal: „K pozorování mám chabý zrak, na mechanické věci nešikovné ruce, k domácím a politickým záležitostem mám povahu zvláštní, cholerickou, k neustálému vysedání (zejména na hostinách přes vhodný a slušný čas) jsem slabého těla, a to i tehdy, jsem-li zdrav. Často vstávám a procházím se...“ (překlad Zdeněk Horský).



2. Vše je v pohybu

Kepler zažil krutou životní zkoušku, když jeho matka byla obviněna z čarodějnictví. Svědčí o jeho statečnosti i důmyslu, že se mu podařilo soud přesvědčit o matčině nevině a tak jí zachránil život i svobodu.

Kepler také napsal spisek, který bychom mohli považovat za předobraz soudobé sci-fi literatury. Knižka se jmenovala *Sen čili měsíční astronomie* a popisovala život údajných Měsíčanů. Spisek však nezapadl – v 19. století se jím inspiroval spisovatel Svatopluk Čech, když napsal proslulý *Pravý výlet pana Broučka do Měsíce*.

Autorem obou medailonů je Jiří Grygar.

2. Vše je v pohybu



praktikum

Trajektorie planet

Nakreslíme si ve vhodném měřítku trajektorie Země, Venuše a Marsu a z nákresu odvodíme další údaje, které bychom jinak museli zjišťovat výpočty, např. vzájemné polohy a vzdálenosti těles v určitém okamžiku.

Trajektorie planet budeme určovat ve vztažné soustavě, kde Slunce je na místě a soustava nerotuje. Trajektorie planet, planetek a mnohých komet jsou v prvním přiblížení elipsy, v jejichž společném ohnisku leží Slunce. Tvar, rozměry, orientaci elips v prostoru a polohu tělesa plně určuje šest nezávislých veličin, tzv. *dráhových elementů*. Přímý výpočet polohy např. planety z dráhových elementů není sice složitý, nicméně pro některé astronomické úlohy je vhodnější řešení grafické, které si nyní předvedeme na případě trajektorií tří planet.

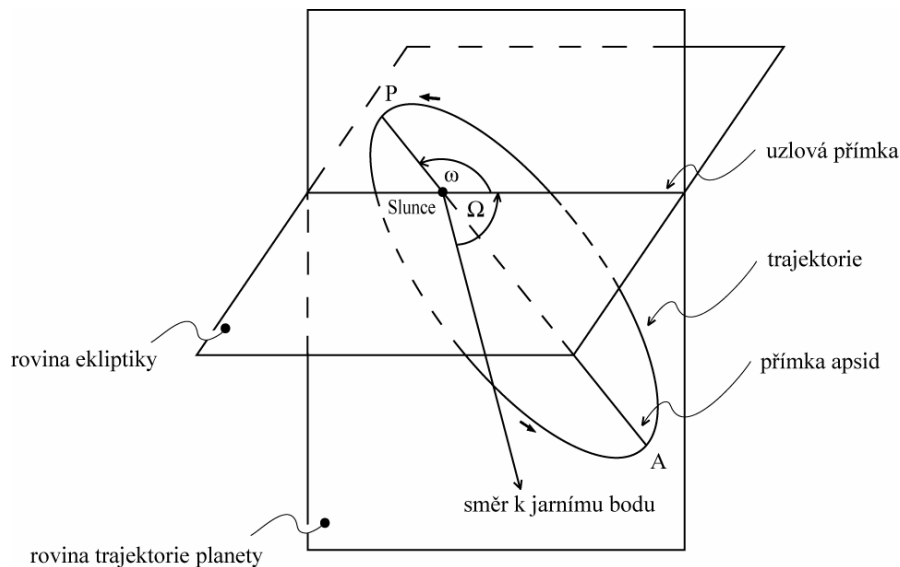
Pracovní postup:

1. Roviny trajektorií planet, které budeme kreslit, jsou navzájem natolik málo skloněné, že všechny trajektorie kreslete v rovině ekliptiky. Do středu obr. 2 zakreslete Slunce. Jako polopřímku vyznačte směr k jarnímu bodu (pro jednoduchost zvolte vodorovný směr doprava). Při kreslení použijte měřítko: 1 astronomická jednotka (AU) = 50 mm (což odpovídá měřítku přibližně 1 : 3 000 000 000 000).

2. I když trajektorie Venuše a Marsu jsou vůči ekliptice jen málo skloněné (sklon i uvádí tabulka 1), vyznačte přímkami procházejícími Sluncem tzv. uzlové přímky (uzlová přímka je průsečnice roviny trajektorie tělesa s ekliptikou, viz obr. 1). Délka výstupného uzlu Ω (bodu na trajektorii, kde těleso vystupuje „nad“ rovinu ekliptiky) je uvedena v tabulce 1; měří se od jarního bodu ve směru pohybu Země.

3. Do obr. 2 zakreslete přímky apsid pro všechny tři planety (přímka apsid je spojnice perihelu P a afelu A). Polohu perihelu P na trajektorii určuje úhel nazvaný vzdálenost perihelu ω ; měří se od směru výstupného uzlu (viz obr. 1).

2. Vše je v pohybu



Obr. 1. Dráhové elementy (definice).

4. Trajektorie všech tří planet jsou elipsy s malou výstředností. Při naší přesnosti zákresu postačí je vykreslit jako kružnice se středem poněkud mimo ohnisko (tj. Slunce). Střed kružnice zvolte na přímce apsid ve vzdálenosti $c = e a$ od Slunce směrem k afelu (e – výstřednost elipsy, a – délka velké poloosy, viz tabulka 1). Vzdálenost c , která vyjde v astronomických jednotkách, přepočítejte podle našeho měřítka na milimetry. Poloměr kružnice je roven a (opět přepočítejte na milimetry). Část trajektorie „nad“ rovinou ekliptiky (tedy severním směrem od ekliptiky) zakreslete plnou čarou, pod rovinou ekliptiky čárkovaně.

5. Ještě je nutné zadat polohu planety pro určitý časový okamžik t . Obvykle se uvádí doba průchodu planety perihelem. V roce 2005 nastal tento průchod pro Venuši, Zemi a Mars ve dnech 14. 6., 2. 1. a 17. 7. 2005 (viz tabulka 1). Ze siderické doby oběhu P se vypočítá střední denní pohyb $n = 360^\circ/P$ (ověřte si hodnoty n uvedené v tabulce 1!). Pomocí této veličiny vypočítejte a zakreslete polohu Země a Marsu vždy první den v kalendářním měsíci roku 2005. Odpovídá poloha Země okolo 21. 3. definici jarního bodu?

6. Z obr. 2 zjistěte, kdy přibližně nastala v roce 2005 opozice Marsu a jak v tu dobu byla tato planeta vzdálena od Země. Srovnajte svůj výsledek s údaji v astronomické ročence (máte-li ji k dispozici).

7. Kolik činí nejmenší a největší možná vzdálenost Marsu od Země, je-li planeta v opozici se Sluncem? (Odečtěte z obr. 2.)

8. Kolika stupňů dosahuje největší úhlová vzdálenost (maximální elongace) Venuše od Slunce pro pozemského pozorovatele? Jak velká je tato maximální elongace Země od Slunce pro pozorovatele na Marsu? (Opět odečtěte z obr. 2 nebo vypočítejte.)

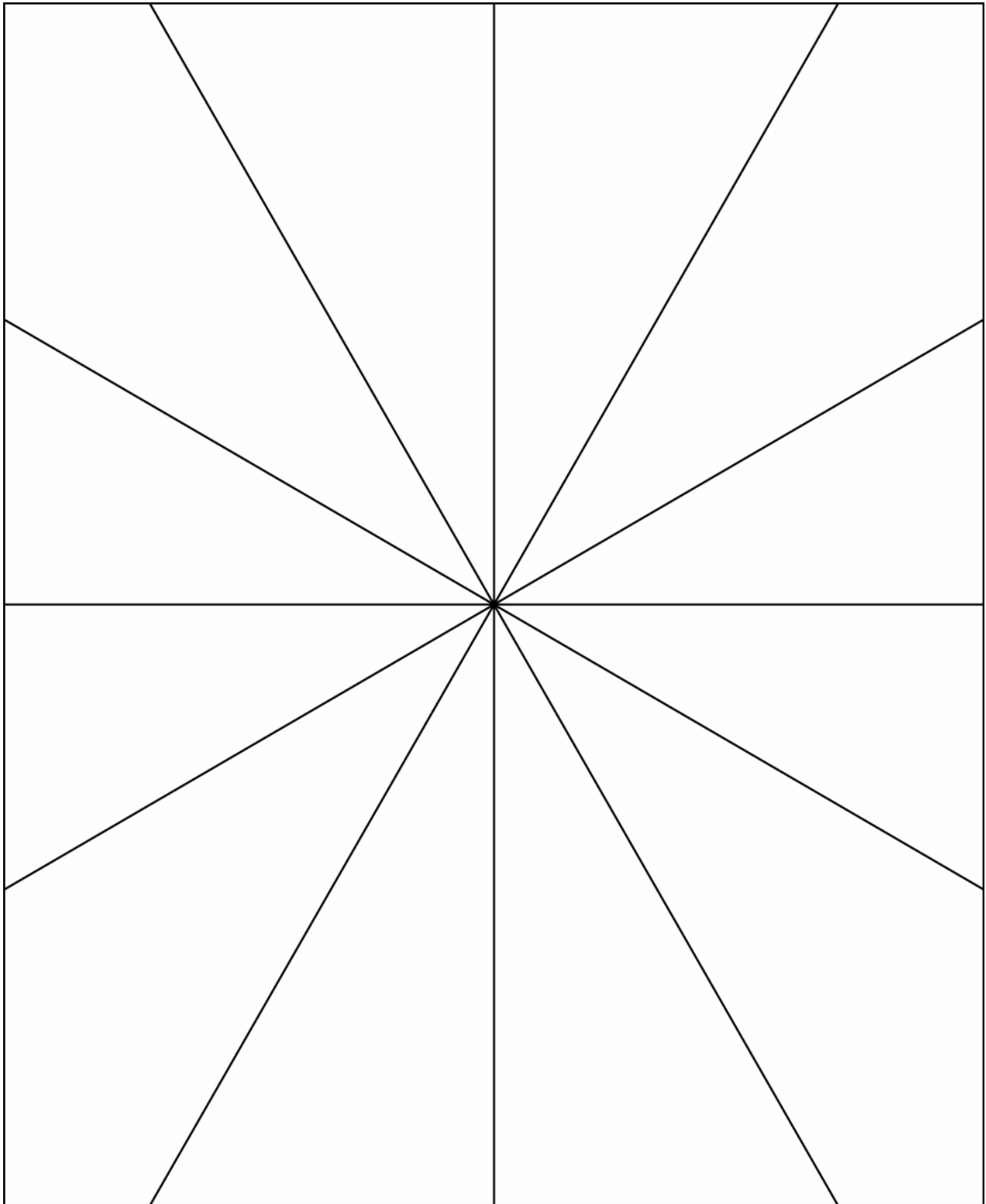
Vstupní data, výsledky:

Tabulka 1

Planeta	i ($^\circ$)	Ω ($^\circ$)	ω ($^\circ$)	e	a (AU)	t (datum)	n ($^\circ$ /den)
Venuše	3,4	76,7	54,9	0,0068	0,723	14.6.2005	1,602
Země	0,0	–	102,9	0,0167	1,000	2.1.2005	0,986
Mars	1,9	49,6	286,5	0,0934	1,524	17.7.2005	0,524

2. Vše je v pohybu

(Poznámka: dráhové elementy lze použít při přesnosti, která je uvedena v tabulce 1, pro období přinejmenším 1980 – 2020).



Obr. 2. Trajektorie Venuše, Země a Marsu v měřítku 1 : 3 000 000 000 000.

2. Vše je v pohybu

Opozice Marsu v roce 2005 nastala _____, planeta byla od Země vzdálena _____.

Největší a nejmenší možná vzdálenost Země od Marsu v době opozice je _____.

Maximální elongace Venuše od Slunce pro pozemského pozorovatele činí _____, pro pozorovatele na Marsu _____.

2. Vše je v pohybu



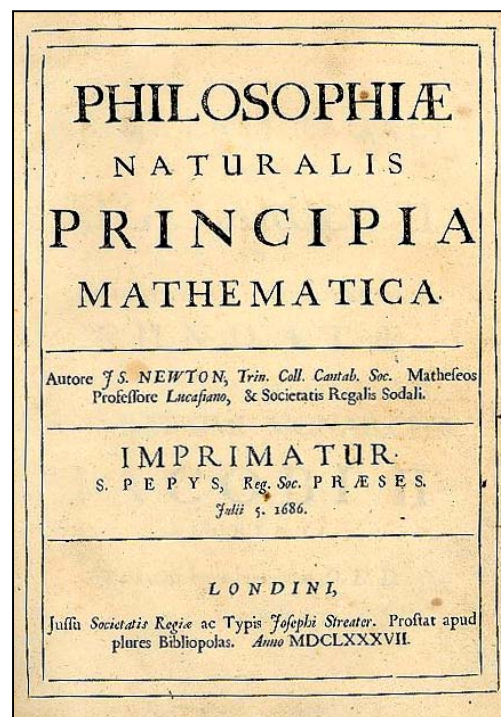
čítanka

Zdeněk Pokorný: Když jablko padá...

V záznamech anglické Královské společnosti si můžeme u data 28. dubna 1686 přečíst toto stručné oznámení: „Doktor Vincent předložil Společnosti rukopisné pojednání nazvané *Philosophiae naturalis principia mathematica*¹⁾ (Matematické základy přírodovědy), věnované Společnosti panem Isaacem Newtonem, který v něm podává matematický důkaz Koperníkovy hypotézy, jak ji předložil Kepler, a všechny nebeské pohyby se vyzývají z pouhého předpokladu gravitace ke středu Slunce, které ubývá nepřímo úměrně se čtvercem vzdálenosti od něho. Bylo rozhodnuto, aby panu Newtonovi byl napsán děkonný dopis; a že otázka vydání knihy bude předložena k úvaze výboru; a že zatím kniha bude dána do rukou pana Halleye, aby o ní mohl podat výboru zprávu.“

Odevzdání Newtonova rukopisu bylo událostí senzační navzdory tomu (nebo právě proto), že se očekávala déle než rok. V třísvazkovém díle, které v současnosti každý fyzik familiárně nazývá *Principia*, bylo vše, co označujeme jako newtonovská fyzika a co se stále učíme na školách a univerzitách. Byl zaveden pojem hmotnosti, zobecněn pojem síly, setkáme se zde se třemi základními pohybovými zákony – zákonem setrvačnosti, zákonem síly a zákonem akce a reakce. Nechybí samozřejmě ani Isaacem Newtonem objevený zákon všeobecné gravitace.

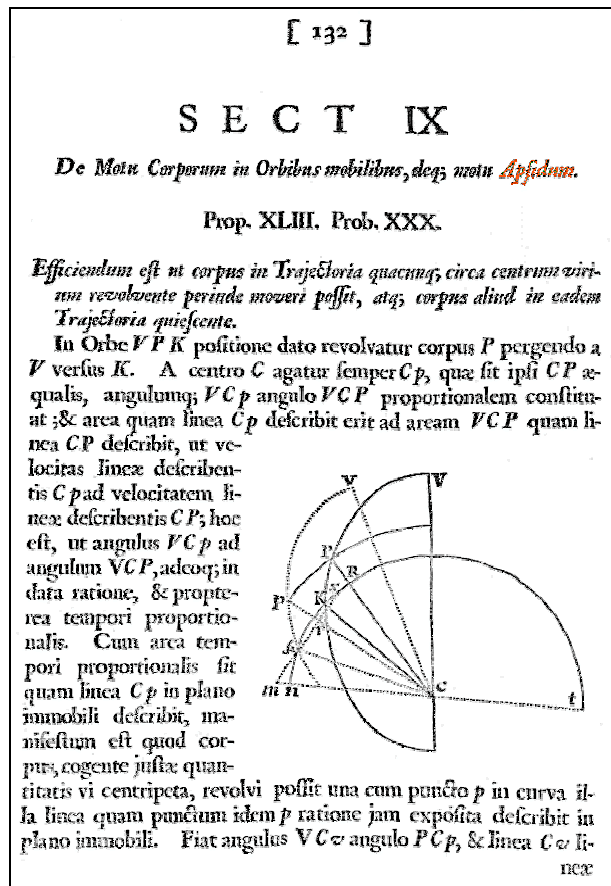
S odstupem doby vypadá výsledek Newtonova usilovného přemýšlení, výpočtů a experimentů nadmíru jednoduše, zejména když strohý popis doplníme některou z hojně citova-



¹⁾ Čti: *filosófijé naturális principija matemátika*.

2. Vše je v pohybu

ných historek. Kupříkladu tou, jak Newton seděl na zahradě v rodné vesnici Woolsthorpe²⁾ (kde žil od srpna 1665 do března 1667, když v Anglii řádl mor) a pojednou vedle něj ze stromu spadlo na zem jablko. Isaac Newton údajně ihned promýšlel, zda stejná síla může působit i na mnohem větší vzdálenosti, zda může ovlivnit třeba pohyb Měsíce. Sám Newton později, při vzpomínce na tuto situaci, prohlásil, že zákon všeobecné gravitace nebyl dílem náhlého nápadu, inspirovaného pádem jablka. „*Spíše jsem si tu situaci stále připomínal, až se mi pozvolna, krůček po krůčku, zjevila pravda v plném světě.*“



Dnes už také pomalu zapomínáme na obtíže, s nimiž se Newton setkával při prosazování svých myšlenek. Musel vyvracet chybné názory uznávaných myslitelů, například Descartovu³⁾ teorii éteru. Rozčilovaly ho neustálé invektivy Roberta Hookeho⁴⁾, který si nárokoval některé Newtonovy objevy pro sebe. Ani samotné vydání *Principií* se neobešlo bez komplikací: Královská společnost na svém zasedání 19. května sice dílo ocenila, ale nebyla schopna ho vydat. Vydání se proto ujal na vlastní náklady Edmond Halley. Newton přitom stále váhal, zda se mají vydat všechny tři svazky – chtěl vynechat třetí knihu, aby se vyhnul případným filozofickým diskusím (právě zde jsou cenné pasáže o planetárním pohybu). Nakonec dílo vyšlo v roce 1687 kompletní, ale v malém nákladu (odhaduje se, že činil od 250 do 400 exemplářů).

Za Newtonova života vyšla ještě další dvě vydání; autor v nich nejen opravoval tiskové chyby, ale občas též měnil formulace. Řečeno bez nadsázky, Newtonova práce na *Principiích* pokračovala až do jeho smrti.

Z knihy *Kalendárium – astronomie* (CP Books, Brno 2006).

²⁾ Čti: *vulstorp*.

³⁾ Čti: *dékartovu*.

⁴⁾ Čti: *húkeho*.



čítanka

Zdeněk Pokorný: Proč jsou kosmonauti v družici ve stavu beztíže?

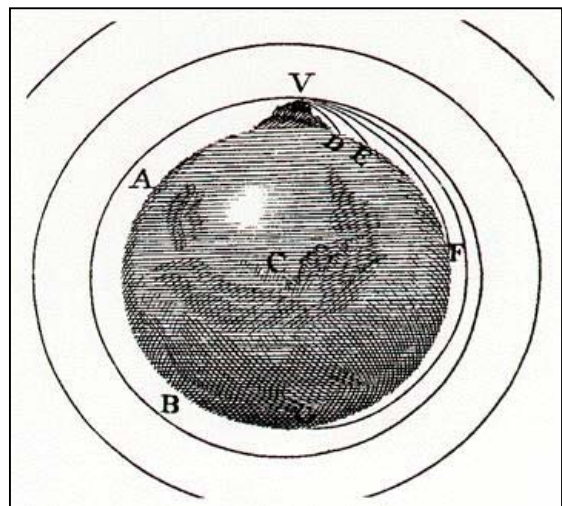
Na záběry, kdy kosmonauti volně plují v kosmických stanicích, jsme si určitě už zvykli. Patří to k tomuto povolání, stejně jako skafandr nebo raketa. Ale přece – i když jde o docela všední záležitost, dokážete vysvětlit, proč se kosmonauti nacházejí ve stavu beztíže?

Když odpovíte, že na ně už nepůsobí gravitační síla Země a proto si v družici plavně poletují, přistrkují si rozmanité předměty a pranic se přitom neunaví – nebude to odpověď správná. Vždyť družice létají kolem Země jen v několikasetkilometrových výškách, doslova za humny naší planety. Že by zde nepůsobila gravitační síla Země? Proč potom Měsíc, na 400 000 kilometrů vzdálený, se prostorem nepohybuje nezávisle na Zemi?

Ne – gravitační síly tu určitě působí. Musíme hledat jiné vysvětlení. Předpokládejme, že družice je natolik malá, že změny gravitačního pole jsou v prostoru srovnatelné s velikostí družice jen nepatrně. I když jsme hrdí na to, jak velké družice jsme již schopni vynést na oběžnou dráhu, jistě tato podmínka platí.

Další předpoklad pro vznik beztížného stavu: těleso se musí vůči Zemi pohybovat, jak říkají fyzikové, posuvným pohybem. Rozumějme tomu tak, že družice třeba nerotuje. Pohyb tělesa musí být takový, že síly gravitačního pole nezpůsobí vzájemné tlakové nebo tahové síly mezi částmi tělesa, ani žádné deformace. Ale to neznamená, že gravitační síla tu neexistuje!

Stav beztíže nemusíme zažít jen v družici. Budeme-li volně padat v gravitačním poli Země, budeme po dobu tohoto pádu v beztížném stavu. Jistě chápete, že takto vzniklý beztížný stav netrvá dlouho, a jak končí, je myslím také jasné.



2. Vše je v pohybu

Vraťme se však k případu umělé družice. Uveďme si vysvětlení, které poprvé použil slavný Isaac Newton v neméně věhlasném díle *Philosophiae naturalis principia mathematica*, vydaném v roce 1687. Uvažoval o střelbě z děla, které by stálo na nějaké vysoké hoře. Kdyby nebylo gravitace, uletěl by náboj po přímce pryč. V reálném světě je však jeho dráha zakřivena směrem k Zemi, náboj padá po oblouku elipsy a dříve nebo později narazí na zemský povrch. Jak daleko to bude od místa, kde stojí dělo, závisí jistě na rychlosti, kterou je náboj vypálen. Při větších rychlostech bude dopadat dál od děla.



Astronaut Mark Lee při výstupu do volného kosmického prostoru (raketoplán Discovery, 1994).

Při jisté mezní rychlosti poletí náboj tak rychle, že řekněme za jednu sekundu spadne k zemi právě o tolik metrů, o kolik se na vzdálenosti, kterou urazí za sekundu, zemský povrch zakříví. Náboj bude tedy neustále padat „vedle“ Země, bude se volně pohybovat v téže výšce nad povrchem. Konkrétně pro družici, která by létala řekněme 300 kilometrů nad zemským povrchem, je tato rychlost rovna 7,7 kilometru za sekundu. Budeme-li uvnitř takové nevelké družice a bude-li na ni působit pouze gravitační síla Země (tedy nebudou zapnuty nějaké korekční motorky apod.), zažijeme beztížný stav. Je to stav příjemný? Z vlastní zkušenosti nemohu posoudit, ale kosmonauti tvrdí, že alespoň zpočátku to většinou nic příjemného není. Jenže to už je jiný problém.

Z knihy *100+1 záludných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).

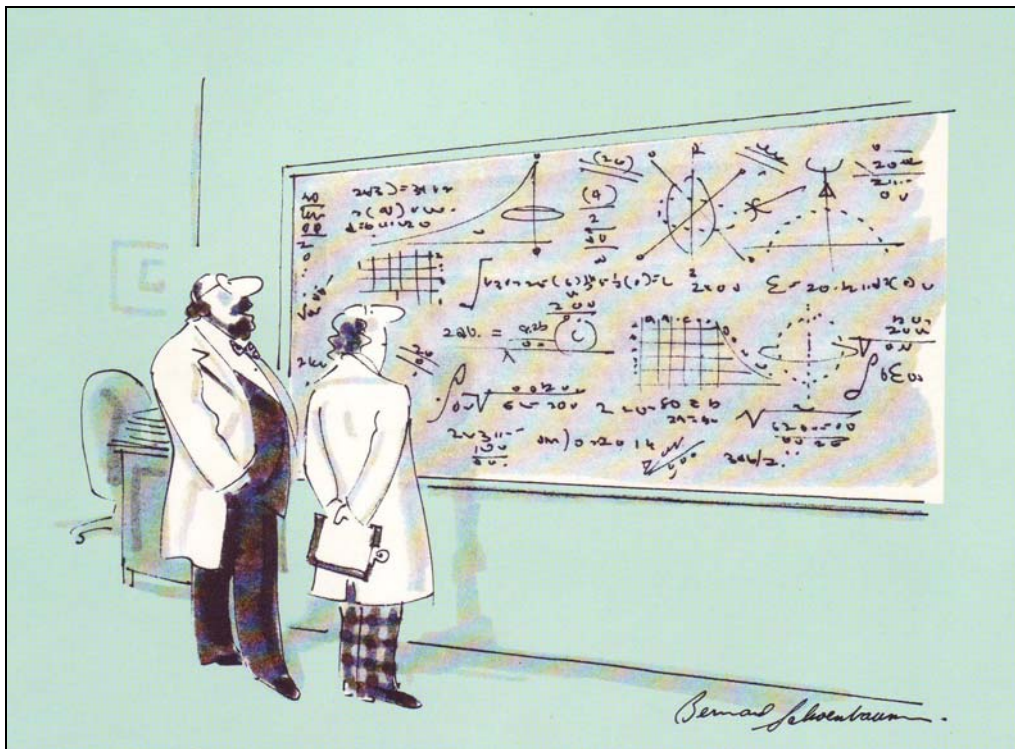
2. Vše je v pohybu



úloha k zamyšlení

Pád až na Slunce

Tato úloha není ani zdaleka tak obtížná, jak by se na první pohled mohlo zdát. Zjistěte, jak dlouho by padalo těleso volným pádem na Slunce ze vzdálenosti, kde se nachází Země (tj. ze vzdálenosti 1 AU)?



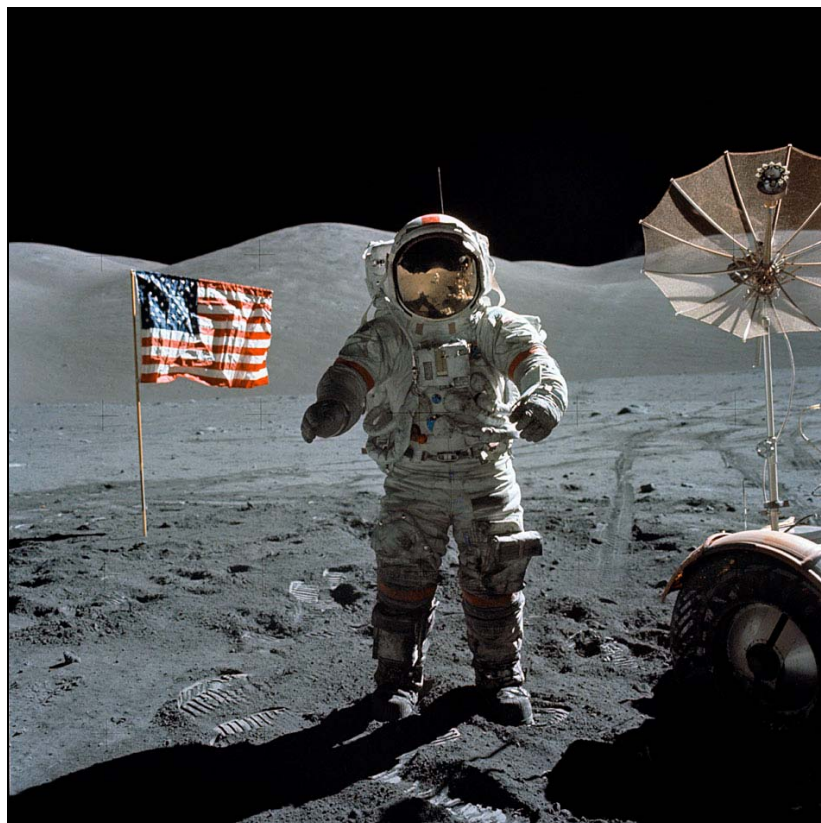
Ach, kéž by bylo vše tak snadné! (*The New Yorker Magazine*, 1987)

2.6. Jak jsou hvězdy daleko?

Otázka je jednoduchá, ale odpověď již tak snadná není. Musíme si vysvětlit, jak astronomové postupují, když se snaží zjistit vzdálenosti hvězd a dalších kosmických objektů. Je zajímavé, že v řadě případů používají stejné postupy jako „obyčejní lidé“ v každodenním životě.

Paralaxa

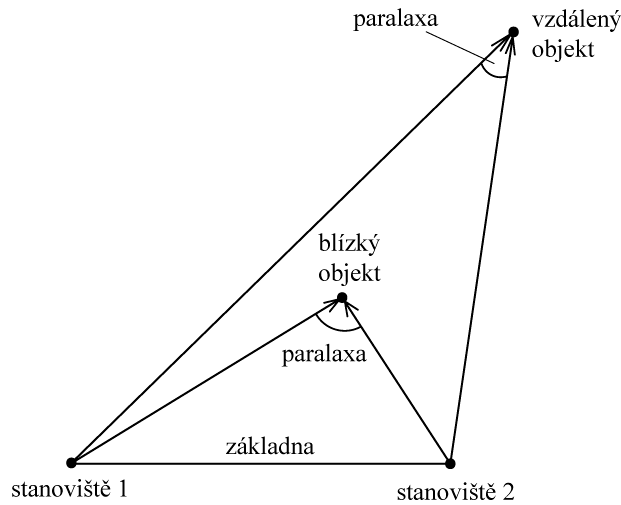
Když se rozhlížíme po okolí, vidíme svět kolem sebe trojrozměrně. To ovšem platí jen do vzdálenosti 30 až 50 metrů. Na větší vzdálenost bezprostřední prostorový vjem již nemáme. Ten totiž vzniká proto, že se díváme současně párem očí, které jsou od sebe vzdáleny 7 až 8 centimetrů. Na blízké předměty tedy hledíme ze dvou poněkud různých směrů; úhel mezi těmito směry nazýváme *paralaxa*¹⁾.



Dokážete odhadnout, jak daleko jsou hory za astronautem Eugenem Cernanem z Apolla 17?

¹⁾ Slovo *paralaxa* je řeckého původu: *para* znamená vedle, *allasein* – dělat jinak, měřit. Jinými slovy: pohnete-li hlavou, blízký předmět se pohne na jiné místo.

2. Vše je v pohybu



Paralaxa objektu.

Odhadujeme vzdálenosti

U předmětů, které jsou od nás dál než asi 50 metrů, je paralaxa již natolik malá, že ji nemůžeme postřehnout. Bezprostřední prostorový vjem se tak ztrácí. Přesto však umíme *odhadovat* vzdálenosti, tomu jsme se naučili praxí. Víme, jak asi velké jsou stromy, budovy, kopce, takže už z poměrné velikosti těchto objektů dokážeme jejich vzdálenost alespoň zhruba určit. V odhadu vzdáleností v přírodě velmi pomáhá běžné zamlžení vzdáleného obzoru. Pokud by atmosféra neexistovala a tento bělavý opar by zcela zmizel, měli bychom při odhadování vzdáleností velké obtíže. Ostatně – kosmonauti na Měsíci takové problémy měli.

Přímá měření vzdáleností

Pro přímá měření vzdáleností se v astronomii ²⁾ používá metoda známá z pozemní triangulace: ze dvou stanovišť budeme současně měřit směry, v nichž se objekt nachází. Z rozdílu směrů – tedy paralaxy objektu – lze při znalosti délky základny vypočítat jeho *vzdálenost*. Měřit můžeme současně ze dvou míst na Zemi (u objektů blízkých, tedy ze sluneční soustavy), případně z jediného místa na Zemi, ale s jistým časovým odstupem. Ve druhém případě je délka základny rovna vzdálenosti, kterou Země za tuto dobu urazila. Tuto metodu používáme při měřeních paralax hvězd.

Ve sluneční soustavě přichází v úvahu ještě další přímá metoda zjišťování vzdáleností – *radio-lokace*. Z doby mezi vysláním a příjmem rádiového impulsu lze při známé rychlosti šíření světla zjistit poměrně přesně vzdálenost „terče“, tedy objektu, od něhož se rádiové záření odrazilo.

²⁾ Možná vás napadlo, jakýmžto důmyslným postupem zjistili starověcí astronomové například to, že Mars je blíže než Jupiter? Vždyť o skutečných rozměrech sluneční soustavy neměli ani potuchy! Ve skutečnosti využili intuitivní představy, že *blíže* objekty se vůči nám pohybují *rychleji* než objekty vzdálenější. A tak i bez znalostí fyzikálních (proč a jak se objekty pohybují v gravitačním poli) usoudili, že rychlost pohybu planet vůči vzdáleným hvězdám (tedy jejich úhlová rychlost pohybu na hvězdné obloze) je nepřímě úměrná jejich vzdálenosti. *Prostorové* představy tedy opřeli o měření *časová*.

2. Vše je v pohybu

Když kilometr nestačí

Vzdálenosti kosmických objektů jsou z pozemského hlediska propastné; proto astronomové používají speciální délkové jednotky. Za základní jednotku vzdálenosti ve sluneční soustavě platí tzv. *astronomická jednotka* (AU – z anglického „astronomical unit“). Přibližně je to střední vzdálenost Země od Slunce (hodnota pro zapamatování: 1 AU je asi 150 milionů kilometrů³).

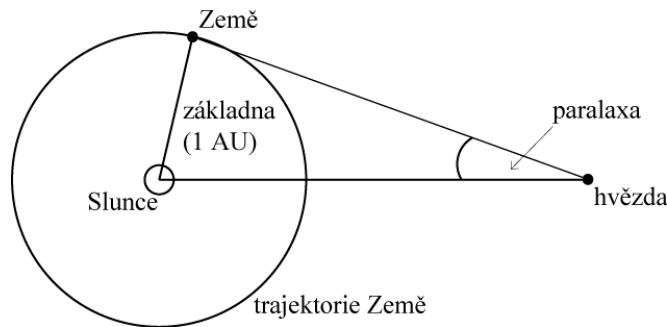
Ve světě hvězd a galaxií je základní jednotkou *parsek* (zkratka pc)⁴: je to vzdálenost, ze které je vidět úsečku o délce 1 AU (postavenou kolmo k zornému paprsku) pod úhlem jedné úhlové vteřiny. Jinak řečeno: paralaxa objektu, vzdáleného 1 parsek, je 1". Používá se také jednotka *světelný rok*; je to vzdálenost, kterou světlo šířící se vakuem urazí za jeden rok. Zkratkou pro světelný rok je ly (z anglického „light year“). Jednotka světelný rok je nejen tradiční, ale i značně názorná, a proto by bylo nerozumné ji vylučovat ze systému jednotek vzdáleností⁵).

Uveďme si trochu více čísel a převodních vztahů:

$$1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ AU} = 3,1 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ ly} = 0,307 \text{ pc}$$

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ ly}$$



K definici paralaxy hvězd.

Mezi paralaxou π vyjádřenou v úhlových vteřinách a vzdáleností r vyjádřenou v parsecích platí jednoduchý převodní vztah:

$$\pi = 1/r.$$

V mnoha případech je parsek docela „malou“ jednotkou; proto se i v astronomii běžně setkáváme s násobnými jednotkami: kiloparsek (kpc), megaparsek (Mpc), gigaparsek (Gpc).

³) Jak jsme uvedli, astronomická jednotka odpovídá s vysokou přesností střední vzdálenosti Země od Slunce, ale v současnosti je její délka *definována*: činí 149 597 870 km (přesně). Jinak to ani být nemůže, protože střední vzdálenost Země od Slunce se s časem poněkud mění, i když jen velmi málo. Je tu značná analogie s definicí metru dříve a nyní.

⁴) Poznámka k jednotce parsek: slovo vzniklo složením částí anglických slov „PARallax“ a „SECond“ (anglicky tedy *parsec*, česky *parsek*).

⁵) Světelný rok je velmi názorná délková jednotka. Vzhledem ke konečné rychlosti šíření světla je náš pohled do vesmíru *vždy pohledem do minulosti*. V pozemském měřítku se tato skutečnost projeví jen málokdy natolik výrazně, abychom ji museli brát v úvahu, v měřítku kosmickém se s ní střetáváme doslova na každém kroku.

2. Vše je v pohybu

Když neměříme – alespoň odhadujeme

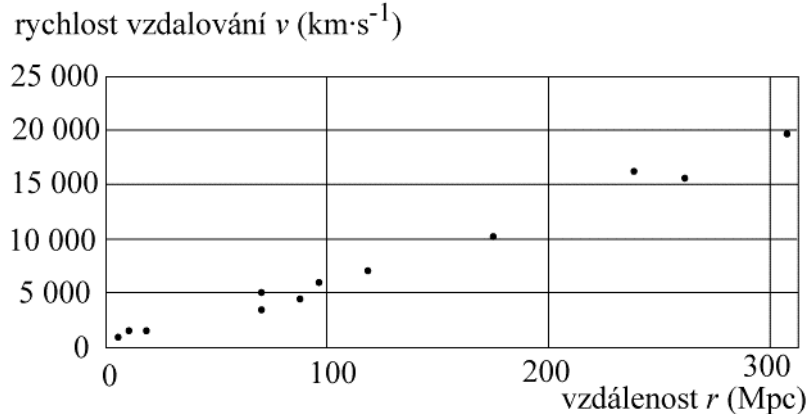
Přímá měření vzdáleností jsou zatím možná jen u blízkých hvězd. U vzdálenějších objektů jsme odkázáni pouze na uvážlivé *odhady* vzdáleností. Můžeme například předpokládat, že méně jasné hvězdy jsou od nás dál než hvězdy jasnější. Jenže pozor! Zde existují dva možné zdroje chyb. První: mlčky předpokládáme, že *všechny hvězdy jsou stejné*. To však neplatí. Přesto ale najdeme takové skupiny hvězd, o nichž můžeme prohlásit, že jsou téměř stejné. Pak lze tento způsob odhadu vzdálenosti použít.

Druhý zdroj chyb: v některých směrech nastává velmi výrazné *zeslabování* (tzv. *extinkce*) světla hvězd⁶⁾. V oblastech zeslabování se dokonce počet pozorovaných hvězd prudce snižuje, jako například v „dírách“ v Mléčné dráze, které jsou za bezměsíčné noci vidět i pouhým zrakem.

Hubblův vztah⁷⁾

Svět galaxií je natolik rozlehlý, že zde vůbec nepřichází v úvahu přímé měření paralaxy. Pro odhad vzdáleností lze předpokládat, že všechny galaxie jsou stejné. Pak úhlový rozměr nebo jasnost galaxie může být mírou vzdálenosti. Ale stejně jako v případě hvězd, ani u galaxií není tento předpoklad zcela na místě.

Naštěstí v roce 1929 zjistil americký astronom Edwin Hubble, že mezi vzdáleností r a rychlostí vzdalování objektů v platí lineární vztah $v = H \cdot r$, kde H je tzv. *Hubblova konstanta*. Tento vztah se dnes označuje jako *Hubblův vztah*. Platí ovšem pouze ve světě galaxií.



Hubblův vztah.

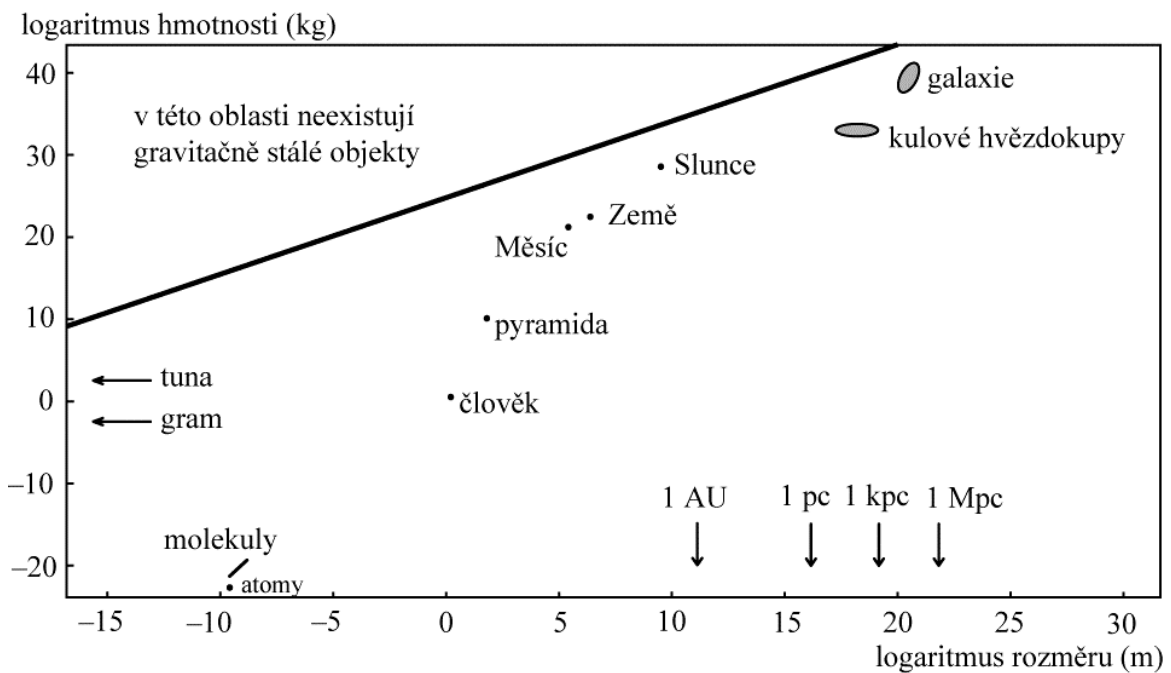
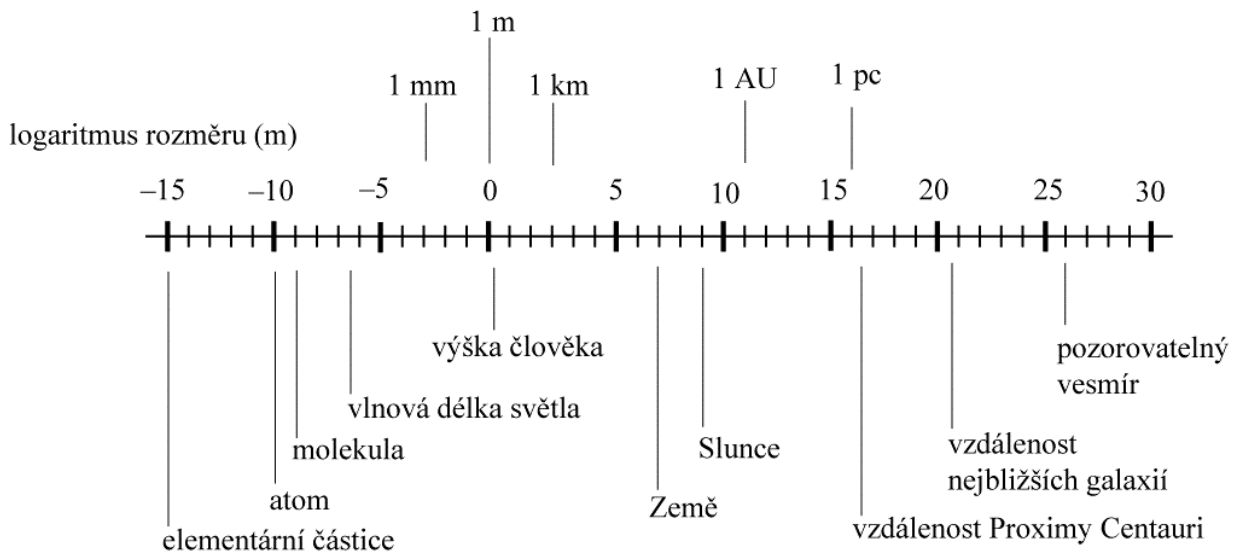
⁶⁾ Slovo *extinkce* pochází z latinského *extinctio* – zničení, zánik.

⁷⁾ Čti: *hablův*.

2. Vše je v pohybu

Typické velikosti a vzdálenosti objektů:

Objekt:	Typická velikost:	Typická vzdálenost:
elementární částice	10^{-15} m	
atom	10^{-10} m	
molekula	10^{-9} m	
člověk	1 m	
planeta	10^7 až 10^8 m	řádově AU
hvězda	10^8 až 10^9 m	řádově pc
galaxie	řádově 10^4 pc	řádově 10^5 pc



Rozměry a hmotnosti některých objektů ve vesmíru.

2. Vše je v pohybu



Nevíme, jaká data bude chtít znát příští generace astronomů, víme jen, že by je ráda znala co nejpřesněji.

Ejnar Hertzsprung, astronom (1873 – 1967)

otázky a příklady

Otázka 2.6.1. Bude mít větší paralaxu Měsíc nebo Mars, když je budeme současně pozorovat ze dvou míst řekněme 5000 km vzdálených?

Otázka 2.6.2. Jak úhlově daleko je Země od Slunce v případě, že ji pozorujeme z bezprostředního okolí hvězdy Proxima Centauri?

Otázka 2.6.3. Hvězda α Bootis (Arcturus) je od nás vzdálena přibližně 10 pc. Kdyby kolem této hvězdy obíhala planeta vzdálená stejně jako Saturn od Slunce (tj. asi 10 AU), jaká úhlová vzdálenost by ji dělila od hvězdy při pohledu ze Země?

Otázka 2.6.4. Nyní si ověříte svůj cit pro odhad velikostí a vzdáleností hvězd. Představte si sportovní halu velkou $20 \times 20 \times 20$ metrů. V ní je v měřítku zhotovený model Slunce a sedmi nejbližších hvězd, který se právě vměstnal do celé haly. Jak velké jsou asi kuličky znázorňující hvězdy? a) Jako drobný hrášek nebo bobulky rybízu. b) Jako maková zrníčka. c) Jako nejmenší viry, které lehce procházejí i bakteriálními filtry.

Otázka 2.6.5. Víte již, že i přes svůj poněkud matoucí název je světelný rok jednotkou délkovou, nikoli časovou. Vynásobíte-li bez chyby několik správných čísel, dostanete její délku například v kilometrech. Kolik kilometrů má jeden světelný rok?

Otázka 2.6.6. Kolika světelným minutám odpovídá jedna astronomická jednotka?

Otázka 2.6.7. V jakých jednotkách astronomové obvykle vyjadřují Hubbleovu konstantu? (To je snadná otázka – vyjděte z její definice.) a) $\text{Mpc} \cdot \text{km} \cdot \text{s}$; b) $\text{Mpc} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; c) $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$; d) $\text{Mpc}/\text{km} \cdot \text{s}$.

Otázka 2.6.8. Bližší hvězdy mění během roku svou polohu vůči relativně vzdálenějším hvězdám – bližší hvězdy „opisují“ na hvězdné obloze elipsu. Jak jsou tyto elipsy orientovány? Je orientace např. velké osy pro všechny hvězdy stejná? Kdy je *malá* osa takové elipsy největší a kdy naopak nejmenší?

2. Vše je v pohybu

Otázka 2.6.9. Paralaxa hvězdy udává vzdálenost hvězdy. Ale nejen to – samotná skutečnost, že paralaxy hvězd existují, je jedním z nejsilnějších pozorovacích důkazů toho, že: a) světlo se šíří konečnou rychlostí; b) Země vůči vzdáleným hvězdám rotuje; c) Země není vůči hvězdám v klidu, ale obíhá kolem Slunce.

Otázka 2.6.10. Předpokládejme, že na Jupiterově družici Kallistó je zřízena observatoř a měří se zde paralaxy hvězd podobně jako na Zemi. Jaké budou tyto paralaxy hvězd ve srovnání s těmi, jež měříme na Zemi? a) Nezměnily by se. b) Byly by podstatně menší, neboť Jupiterovy družice obíhají kolem planety blíže než obíhá Země kolem Slunce. c) Byly by asi 5krát větší, protože Jupiter obíhá kolem Slunce přibližně 5krát dál než Země.

Otázka 2.6.11. Přenesme se k blízké hvězdě α Centauri (je „pouze“ 1,33 pc daleko). Hvězdná obloha by tu měla vyhlížet zhruba stejně jako u nás, jen s jednou výjimkou: přibude zde jedna jasná hvězda (Slunce). Jaké bude mít Slunce souřadnice na hvězdné obloze u hvězdy α Centauri (v rovníkové souřadnicové soustavě), když Cen má na naší hvězdné obloze rektascenzi $\alpha = 14^{\text{h}} 40^{\text{m}}$ a deklinaci $\delta = -61^{\circ}$? Ve kterém souhvězdí se bude Slunce nacházet? (Zde asi musíte použít nějakou mapu hvězdné oblohy.)

Otázka 2.6.12. Vynikající astronom William Herschel se na konci 18. století pokoušel měřit paralaxy hvězd (tehdy – jak víme – ještě nezměřené) na základě pozorování dvojhvězd. Měřil polohu jedné složky vůči druhé. Dnes víme, že tehdy se nedařilo měřit polohy hvězd dostatečně přesně, a proto ani Herschel neuspěl. Ale i kdyby již tenkrát přesnost měření stačila, byl by Herschel úspěšný jen za určitého předpokladu. Jakého?

2. Vše je v pohybu



citát

O nahodilosti metru

Metr byl původně definován jako jistá libovolná část obvodu malé planety, jejíž hlavní astronomická důležitost spočívá v tom, že ji obývají všichni nám známí astronomové.

J. D. Mullholand (uvádí J. Grygar)



2. Vše je v pohybu



čítanka

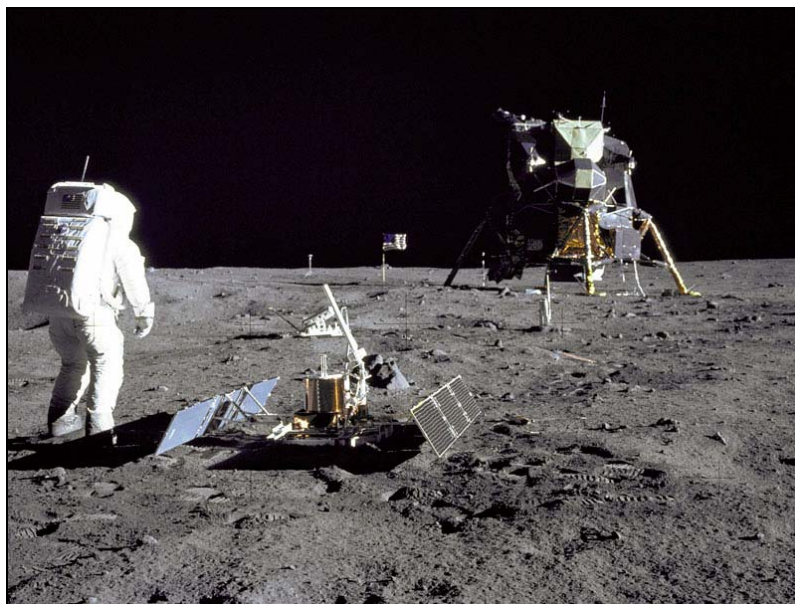
Norman Mailer: Nádherná pustina

Když Aldrin ¹⁾ sestoupil na Měsíc, udělal velký a přemrštěný skok zpátky na žebřík, jako by chtěl hned vyzkoušet požitek z jedné šestiny přitažlivosti. „Nádherné, nádherné,“ vykřikoval.

Armstrong: „Není to něco? Nádherný pohled tady dole.“

Aldrin: „Nádherná pustina.“

Dívali se na krajinu, která žila v tak jasném zaostření jako nic, co kdy viděli na Zemi. Nebyl tu samozřejmě vzduch a tedy také žádný vítr, mraky ani prach, dokonce ani to nejjemnější rozptýlení světla nejmenšími mikroskopickými částicemi za jasného dne na Zemi, ne, nic viditelného ani neviditelného se ve vakuu před nimi nepohybovalo.

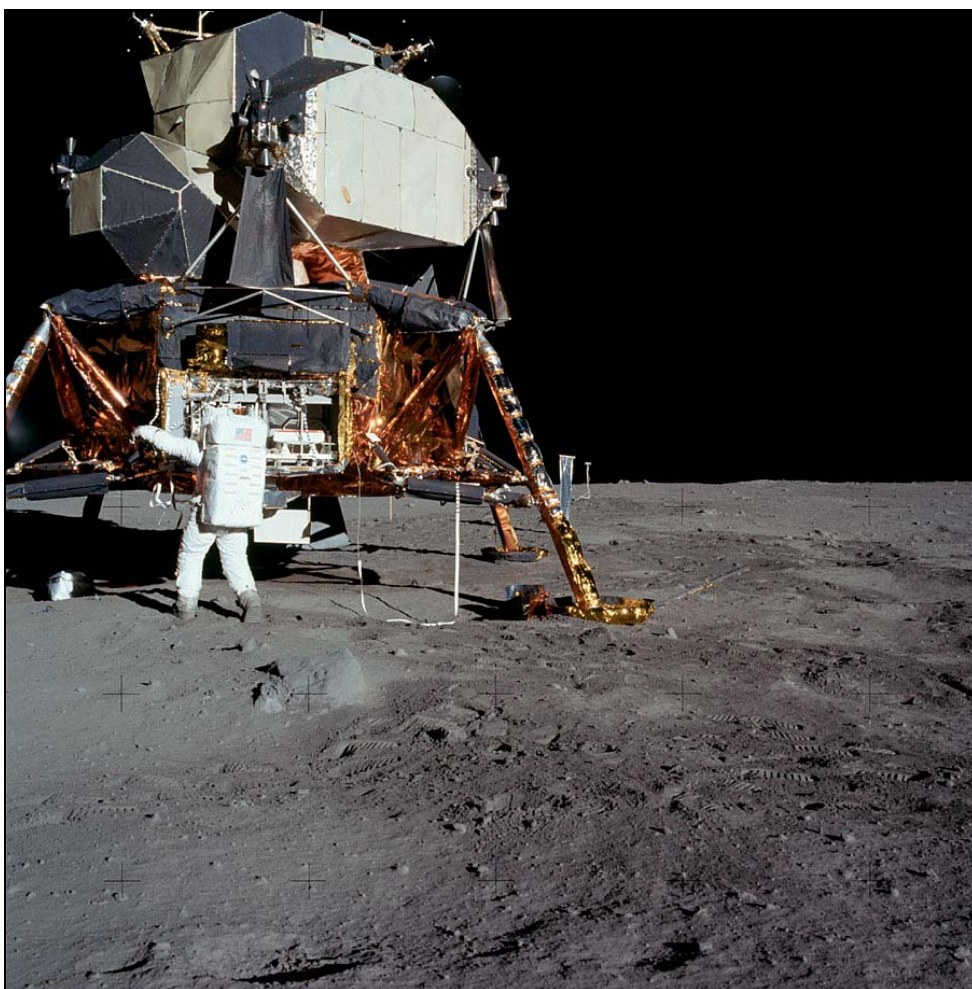


¹⁾ Čti: *óldrin*.

2. Vše je v pohybu

Všechno světlo bylo čisté. Žádná mlha, ani ne ten neviditelný opar nejkrásnějšího dne – a tak vzdálenější předměty neztrácely se vzdáleností ostrost. Když měl člověk dost dobré oči, byl předmět ve vzdálenosti sto metrů stejně zřetelný jako kámen ve vzdálenosti metru. A oni oči dost dobré měli! Tak jako se nedala určit výška, když byli nad Měsícem, z osmdesáti kilometrů ani z osmi, tak teď na povrchu pro ně neexistovala žádná skutečná vzdálenost, neboť předměty ve všech vzdálenostech měly schopnost vypadat stejně blízko, jako by se na ně člověk díval skrz klapky a neviděl detaily mezi předmětem a místem, kde on sám stojí. Znovu museli mít pocit, že jsou na jevišti anebo na osvětlené podlaze pokoje tak velkého, že člověk nevidí, kde začíná tmavý strop, protože tu nebyl nejmenší náznak, že by po sobě jdoucí vlny hřebenů začínaly mizet, naopak, každý obrys byl stejně ostrý jako předchozí, a protože byl povrch plný kráterů všech velikostí, od mravenčích děr k hrncům a od hrnců k prázdným bazénům, a protože obzor byl blízko, čtyřikrát blíže než na Zemi, a ostrý jako čára nakreslená tužkou, měsíční půda kolem nich klesala a stoupala ve všech směrech, „jako když člověk plave v oceánu s půldruhametrovými vlnami,“ řekl později Armstrong. „V takovém stavu člověk nevidí moc daleko z místa, kde je.“ Ale to, co viděli, viděli dokonale – v celé hloubce jejich zorného pole byla v každé chvíli ostrost naprostá.

Úryvek z knihy *Oheň na Měsíci* (Odeon, Praha 1981). Z anglického originálu *Of a Fire on the Moon* přeložil Michael Žantovský.



2. Vše je v pohybu



Jen blázni opakují staré chyby. A co dělají ti chytří? Dělají nové.

Andrej Nikolajevič Tupolev, konstruktér letadel
(1888 – 1972).

speciální otázky

Pravda a bludy

Nyní máte před sebou pět různých tvrzení. Některá z nich jsou správná, jiná nikoli. Určitě ta chybná rozpoznáte; poznáte si, které části (slova, věty, možná i celá tvrzení) jsou chybné, a připište, v čem chyba spočívá.

1. Světelný rok je velmi názorná délková jednotka. Vzhledem ke konečné rychlosti šíření světla nemůžeme *okamžitě* zaznamenat děje, které se udály kdekoli ve vesmíru, ale musíme vyčkat, až se fotony přemístí z oblasti svého vzniku k nám. V konečném důsledku to znamená, že pohledem do vesmíru *vždy* nahlížíme do minulosti, a to tím více, čím dále jsou od nás kosmické objekty.

2. Řekneme-li, že těleso vykonává keplerovský pohyb, máme tím na mysli, že se řídí Keplerovými zákony. Pro tento pohyb například platí, že čím *dále* obíhá jedno těleso kolem druhého, tím se pohybuje *menší* rychlostí (máme na mysli postupnou rychlost, ne například rychlost úhlovou či plošnou).

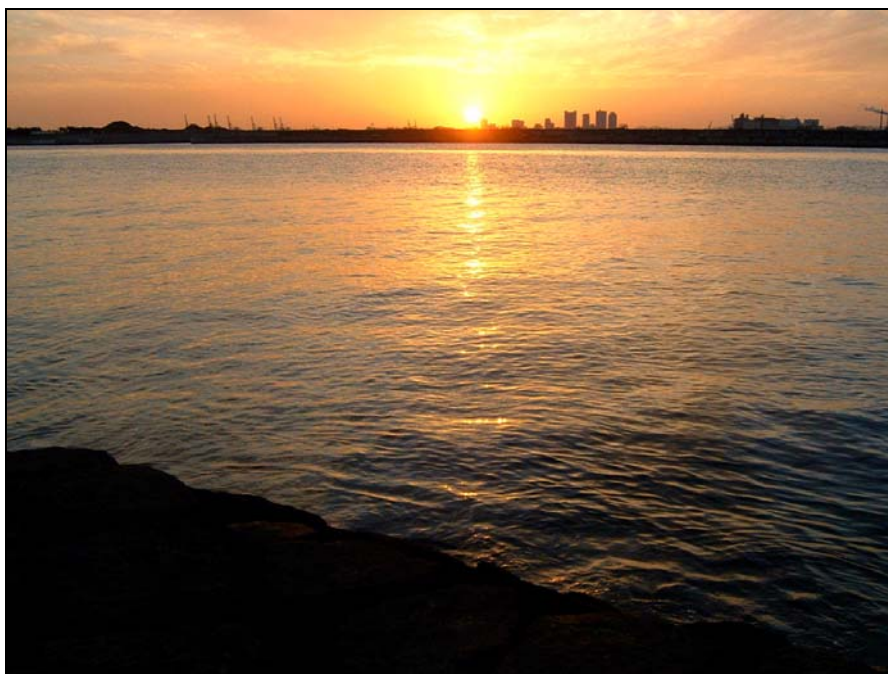
3. Svítí-li krátce po západu Slunce v místech, kde Slunce právě zapadá, nějaká jasná „hvězda“, je to určitě Venuše, protože jen tato planeta může být Večernicí (a nebo obdobně ráno Jitřenkou).

4. Zlí jazykové tvrdí, že zdravý člověk je jen špatně vyšetřený pacient. Podobně někteří astronomové si myslí, že vlastně každá hvězda musí být proměnná – to jen my zatím nejsme schopni ony proměny jasnosti našimi přístroji zaznamenat. Budiž... Z hlediska praktického ale zcela určitě mnohé hvězdy dlouhodobě nemění svou jasnost, takže je můžeme použít například jako etalony při fotometrických měřeních.

5. Pohybové hvězdokupy jsou mnohem mladší než ostatní otevřené hvězdokupy, protože u nich ještě můžeme pozorovat rychlý vzájemný pohyb jednotlivých hvězd. U „obyčejných“ otevřených hvězdokup, které jsou starší, tento pohyb ustává a my už žádný vzájemný pohyb hvězd nevidíme.

3.1. Co přináší informace o dění ve vesmíru?

Stručně bychom mohli říci, že potřebnou informaci o tom, co se děje ve vesmíru, přináší záření, meteority a vzorky hornin z některých sousedních těles ve sluneční soustavě. Ano, je tomu tak, nicméně drtivá většina informací pochází právě z elektromagnetického záření – přímý průzkum je zatím omezen opravdu jen na blízká tělesa.¹⁾ Nyní tedy bude řeč o vlastnostech tohoto elektromagnetického záření, zkrátka ponoříme se trochu do fyziky.



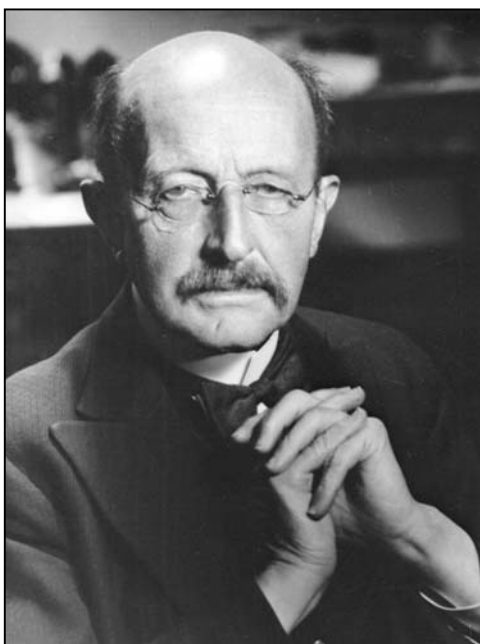
I když tento pohled na zapadající Slunce má roli spíše ilustrativní, je také připomenutím faktu, že za všechny naše pohledy do okolí vděčíme fotonům, dopadajícím na sítnici našich očí.

Vlna nebo částice?

Nechci, aby se z našeho výkladu vytratila astronomie, ale fyzice se v této části opravdu nevyhneme. Nejdříve si povězte, jak si můžeme záření představit: například jako *příčné vlnění*, tedy jakýsi proces kmitání závislý na poloze a času. Základní veličinou, která toto vlnění popisuje, je *kmitočet*

¹⁾ Kromě elektromagnetického záření se v astronomii setkáváme i s *kosmickým zářením*. Toto pojmenování je ovšem dosti nešťastné: fyzikálně je to něco zcela odlišného od záření elektromagnetického. Jde o proudy rychle se pohybujících částic, např. elektronů nebo jader atomů. Tyto částice mohou být různého původu. V případě kosmického záření (tzv. primárního, pozorovaného mimo zemskou atmosféru) není jeho původ zcela jasný. Existují ovšem i jiné proudy částic, například *sluneční vítr*. Zde je zdroj částic již zcela bezsporný.

3. Naše skleněné a rádiové oči



(frekvence), případně *vlnová délka*. Na elektromagnetické záření ovšem můžeme pohlížet také jako na *částice*, tzv. *fotony*, které mají svou energii a hybnost. Německý fyzik Max Planck v roce 1900 poprvé uvedl, že energie fotonu je úměrná kmitočtu záření. Řadu pozorovaných jevů můžeme vysvětlit jen za předpokladu vlnové povahy elektromagnetického záření (např. ohyb záření), jiné pouze pomocí představy, že záření má charakter částicový (např. fotoefekt).

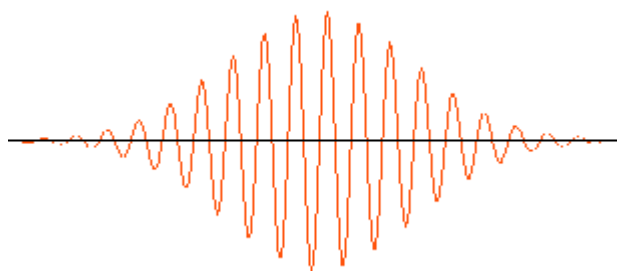
Jak vidíte, záření má povahu jak vlnovou, tak i částicovou, takže si je můžeme představit třeba jako vlnové klubko. Musíme ale připustit, že je to jen náš pohled (a nedokonalý pohled), který nám pomáhá pochopit, co je elektromagnetické záření. Představy podle „zdravého rozumu“ tu selhávají, protože s mikrosvětlem nemáme každodenní a bezprostřední zkušenost.

Uveďme si dva základní vztahy pro elektromagnetické záření, které svazují kmitočet ν a vlnovou délku λ , resp. kmitočet ν a energii fotonu E :

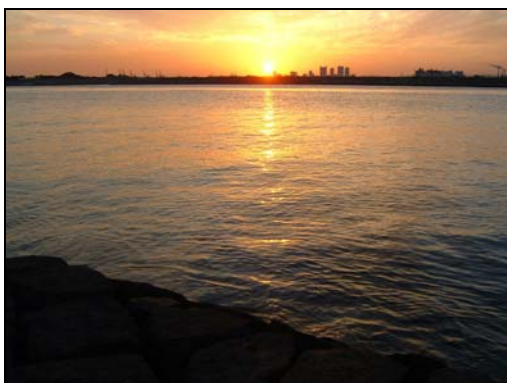
$$c = \lambda\nu, E = h\nu.$$

Poznamenejme ještě, že c je velikost rychlosti šíření světla v daném prostředí (ve vakuu c nabývá maximální možné hodnoty $299\,792,458\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), h je Planckova konstanta ($h = 6,626\cdot 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$).

Ze vztahu mezi energií fotonu a kmitočtem mimo jiné vyplývá, že energie fotonu nemůže být libovolná, ale nabývá jen některých hodnot, je tedy *kvantována*. Kvantum energie má přitom proměnnou velikost, závislou na kmitočtu záření.



Představa vlnového klubka.



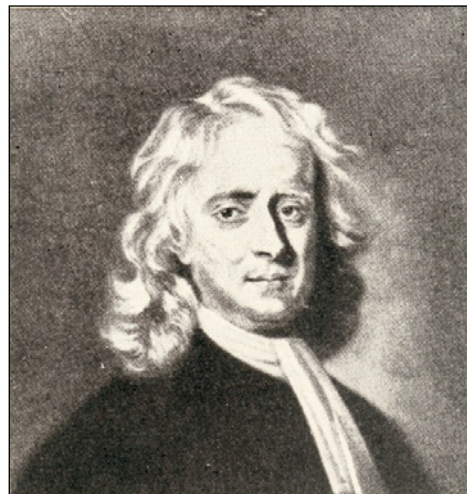
čítanka

Rudolf Kippenhahn: Huygens, nebo Newton?

Newton si představoval světlo jako proud malých částíček – korpuskulí, které letí přímočaře prostorem a v oku vyvolávají světelný vjem. Jeho současník Christian Huygens¹⁾ naproti tomu věřil, že světlo je kmitání vsepronikajícího média, něco jako vlny na vodní hladině. Dnes víme, že pravdu měli oba. Světlo se někdy chová jako složené z částíček, jindy zase jako vlny.

Na základě zkušeností z běžného života se takové tvrzení zdá nesmyslné. Co tedy světlo opravdu je – vlny, anebo částice? Odpověď našla fyzika teprve začátkem 20. století: není to ani jedno, ani druhé, ale obojí přístup můžeme někdy použít. Pod pojmem vlny se nám vybaví vodní hladina rozvlněná vhozeným kamenem. Částice jsou pro nás něco jako maličká kulatá a možná také tvrdá zrníčka, třeba něco jako broky. Vlny a částice podle těchto představ nemají nic společného. Jedno je rytmické vlnění prostředí, tekutiny anebo v případě zvukových vln také plynu, druhé je kousek hmoty, o niž bychom si mohli vylomit zub. Co tedy má znamenat, že Newtonovy částice jsou stejně správné jako Huygensovy vlny?

Řešení problému spočívá v tom, že světlo se vymyká názornému popisu běžnými pojmy. Vlastnosti světla vyjadřuje v úplnosti pouze fyzikální popis založený na matematickém formalismu, vzorcích a rovnicích. Jedině v této řeči můžeme postihnout vlastnosti světla tak, abychom mohli jeho projevy předvídat. Obvyklý hovorový jazyk je pro tento účel stejně nevhodný jako chemické vzorce pro zaznamenání symfonie. U některých vlastností světla vystačíme s docela jednoduchou matematikou, pro každou vlastnost bude ovšem jiná.



Isaac Newton

¹⁾ Čti: *hejchens*.

3. Naše skleněné a rádiové oči



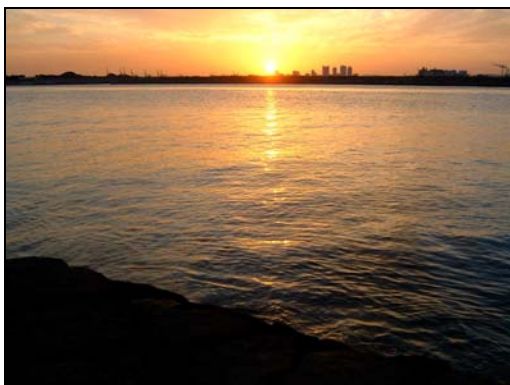
Christian Huygens

Především nás už nesmí mást, že světlo se jednou chová jako vlna a jindy jako houf broků. U jiné věci nás také nepřekvapí, že ji můžeme popisovat různě podle toho, o jakou její vlastnost nám zrovna jde.

Například stát lze chápat jako stavbu spočívající na několika sloupech – jedním sloupem je ekonomika, jiným zase síla armády. Stavba není špatný příklad. Když nastane státní bankrot a podlomí se jeden sloup, stát – podobně jako hroučící se budova – nakonec také skončí v troskách. Mluvíme-li o vztazích sousedních států, přikládáme státu spíše vlastnosti lidské – hovoříme o přátelské spolupráci, nedůvěře, odplatě nebo nepřátelství. Je tedy stát budova, anebo útvar s lidskými vlastnostmi? Přejde na to, jakým přirovnáním si pomáháme. A stejně je tomu se světlem. Některé jeho projevy může vysvětlit představa vln, jiné projevy představa částic.

Z knihy Rudolfa Kippenhahna *Odhalená tajemství Slunce* (Mladá fronta, Praha 1999, překlad: Martin Šolc).

3. Naše skleněné a rádiové oči



Dobrá rada

*Kdo vždy myslí, že se učí,
bude vlasti chloubou:
kdo si myslí, že dost umí,
začíná být trouba.*

Friedrich von Logau, básník (1604 – 1655),
překlad Karel Havlíček Borovský

otázky a příklady

Otázka 3.1.1. Čím je vlnová délka elektromagnetického záření kratší, tím je energie fotonů (menší × větší).

Otázka 3.1.2. Napište vztah mezi velikostí hybnosti fotonu a kmitočtem záření. Není to obtížné, poradíme vám: vyjděte z definice hybnosti p . Pak si uvědomte, že podle tzv. principu ekvivalence hmotnosti m a energie E platí vztah $E = m c^2$, kde c je velikost šíření rychlosti světla ve vakuu.

Otázka 3.1.3. Hovoříme nyní o energii fotonu. Určitě víte, které dvě ze čtyř nabízených fyzikálních jednotek jsou jednotkami energie: a) joule; b) watt; c) elektronvolt; d) joule za hodinu.

3. Naše skleněné a rádiové oči



úloha k zamyšlení

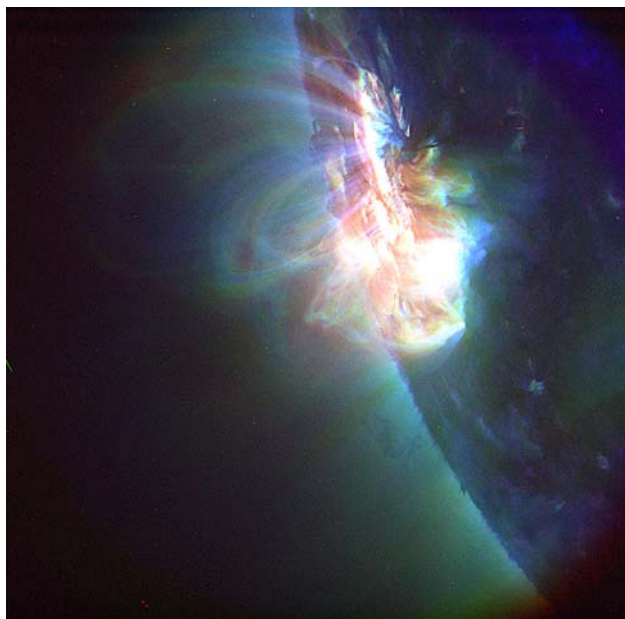
Sluneční fotony

Záření ze Slunce, které dopadá na Zemi na 1 m^2 plochy kolmé ke směru šíření záření, má výkon přibližně 1400 W .

a) Předpokládejme, že se sluneční záření skládá z fotonů výhradně o vlnové délce $\lambda = 550 \text{ nm}$. Kolik fotonů dopadá každou sekundu na 1 m^2 plochy kolmé ke směru šíření záření, umístěné na té části zeměkoule, která je přivrácena ke Slunci?

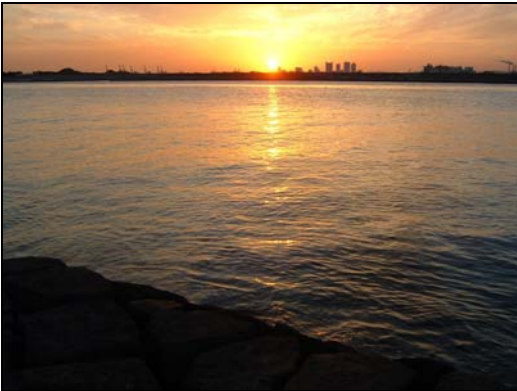
b) Střední vzdálenost Země od Slunce činí $r = 1 \text{ AU}$. Jaký je výkon Slunce (ve wattch) a kolik fotonů za sekundu Slunce vyzáří?

c) Kolik fotonů se vyskytuje v 1 m^3 prostoru v okolí Země?



Aktivní oblast na Slunci, jak ji zaznamenala družice TRACE (barvy na obrázku jsou falešné). Foto: NASA.

3. Naše skleněné a rádiové oči



úloha k zamyšlení

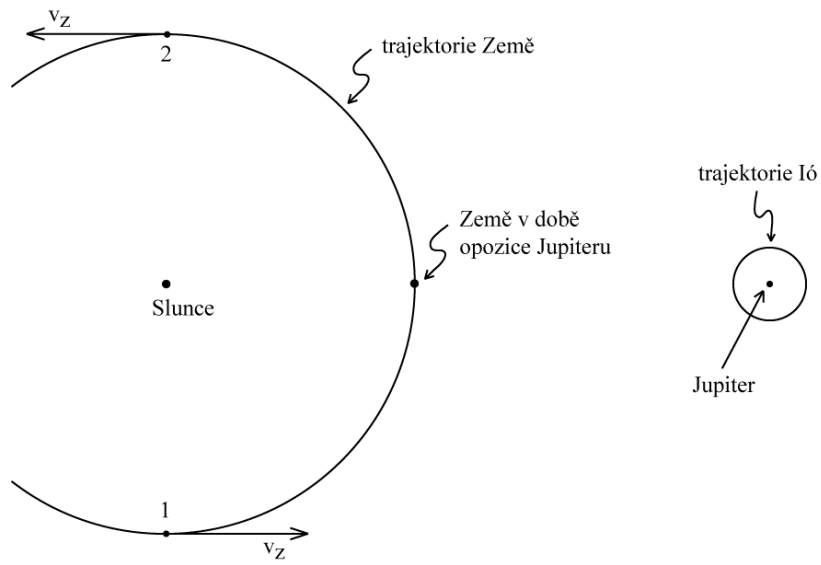
Zatmění Jupiterových družic

Doba mezi dvěma po sobě následujícími zatměními družice Ió planetou Jupiter se během období pozorovatelnosti planety, které trvá určitě nejméně tři čtvrtě roku, mění od minimální hodnoty $t_1 = 42$ h 28 min 21 s do maximální $t_2 = 42$ h 28 min 51 s. Určitě to nějak souvisí s konečnou rychlostí šíření světla. Pokuste se z těchto hodnot určit velikost rychlosti šíření světla.



Jupiterův satelit (vlevo vedle disku planety) a stín, který vrhá na planetu.

3. Naše skleněné a rádiové oči



Číselně: $c = 3,04 \cdot 10^5$ km/s (chyba asi 1 % ve výsledku je dána přesností měření časů t_1 a t_2).

3.2. Okna do vesmíru

Víte, co jsou „okna do vesmíru“? Není to obrazné pojmenování pro hvězdárny či dalekohledy; takto astronomové nazývají oblasti elektromagnetického záření, ve kterých získávají důležité informace o kosmických objektech. Na počátku 21. století jsou prakticky všechna tato „okna“ již otevřena.

Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření můžeme podle vlnových délek rozdělit na několik druhů záření, které si nyní popíšeme. Napoprvé není důležité si pamatovat jednotlivá čísla, později vám ale některá z nich určitě utkví v paměti.¹⁾



Plynná atmosféra je sice nezbytná pro náš život na této planetě, pro astronomy však představuje překážku při sledování kosmických objektů.

¹⁾ Viditelné záření je světlo v pravém slova smyslu. V souvislosti s ním poznamenejme, že se v astronomii u řady veličin používá přídavné jméno *vizuální* (např. vizuální dvojhvězda). Je to z latinského *visus*, což znamená pohled, oči, vidění. Rozlišujeme však slova *vizuální* a *optický*; to druhé znamená, že se ke studiu používá nějaké optiky, takže „opticky“ lze sledovat nejen viditelné záření (přístupné pro naše oči), ale i blízké ultrafialové a infračervené záření.

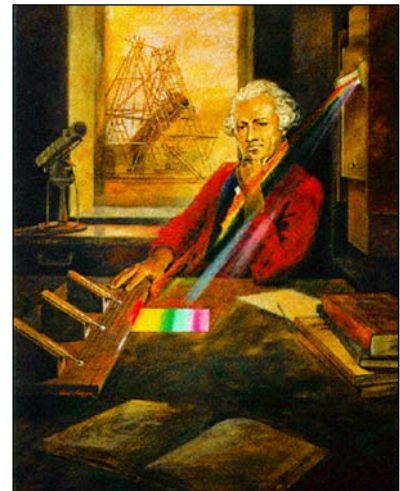
3. Naše skleněné a rádiové oči

Záření	Rozsah vlnových délek
rádiové	1 m až 100 km
mikrovlnné	1 mm až 1 m
infračervené	750 nm až 1 mm
viditelné	400 nm až 750 nm
ultrafialové	50 nm až 400 nm
rentgenové	0,00001 nm až 50 nm
gama	méně než 0,1 nm

Kdo byl první?

Za objev infračerveného záření vděčíme astronomu Williamu Herschelovi: roku 1800 zjistil, že rtuťový teploměr vložený do slunečního spektra ukazuje zvýšené hodnoty i za viditelným červeným okrajem spektra. Ultrafialové záření bylo objeveno krátce poté přírodovědcem Johannem Wilhelmem Ritterem.

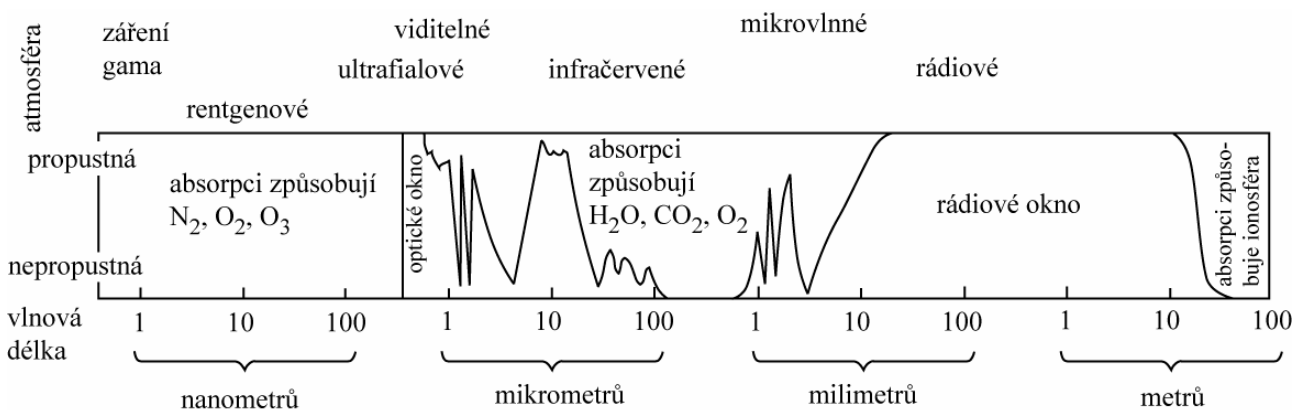
Rádiové záření, tak důležitý zdroj informací pro soudobou astrofyziku, jako první experimentálně studoval roku 1887 Heinrich Hertz. Bylo mu teprve 30 let, když se mu podařilo generovat záření o vlnové délce od 10 do 100 metrů pomocí jiskrového výboje mezi elektricky nabitou a uzemněnou koulí. Mimosvětové rádiové záření je známo od roku 1931, kdy inženýr Karl Jansky poprvé zachytil rádiové záření z centra Galaxie. Ani on v době objevu nepatřil mezi veterány: bylo mu teprve 26 let.



William Herschel a jeho objev infračerveného záření

Okna v atmosféře

Záření, přicházející k nám od kosmických objektů, lze na všech vlnových délkách sledovat bez obtíží jen mimo zemskou atmosféru. Ovzduší Země působí jako filtr: propouští jen některé oblasti spektra – to jsou tzv. *atmosférická okna*. Záření v jiných oborech spektra nepropouští vůbec, jinde jenom zčásti.



3. Naše skleněné a rádiové oči

Nyní konkrétně: záření s nejkratšími vlnovými délkami (gama až ultrafialové) pohlcuje především atmosférický ozon. Po úzkém *optickém oknu* následuje *infračervené okno*, které propouští záření pouze zčásti a jen v některých oblastech vlnových délek. Značná část infračerveného a mikrovlenného záření se na povrch Země nedostane vůbec, je pohlcena v atmosféře zejména molekulami vody a kyslíku. Rádiové záření kosmických objektů s vlnovými délkami řádově milimetrovými až dekametrovými pozorujeme v *rádiovém oknu*. Delší vlnové délky nepropouští zemská ionosféra ²⁾.

²⁾ *Ionosférou* nazýváme oblast v zemské atmosféře od 50 do několika set až jednoho tisíce kilometrů (není tu ostrá hranice). Vyznačuje se velkým množstvím iontů a elektronů, které vznikají působením slunečního záření.

3. Naše skleněné a rádiové oči



Kdo hledá, měl by vědět, jak pozná, že našel.

Stanislav Komenda, matematik (1936 –)

otázky a příklady

Otázka 3.2.1. Pro vyjádření vlnové délky záření se dříve hojně používala (zejména v optice) jednotka zvaná angström (Å). Za svůj název vděčí švédskému fyziku A. J. Ångströmovi. U nás tato jednotka již není povolena, nicméně ve starší literatuře se s ní můžete setkat. Platí, že $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$. Jaký je převodní vztah mezi angströmem a nanometrem?

Otázka 3.2.2. Pokud jste si jen trochu pozorněji prohlédli tabulku rozsahů vlnových délek jednotlivých druhů záření, určitě bez váhání vyřešíte i tento problém. Elektromagnetické záření o vlnové délce 1 nm označujeme jako: a) rentgenové; b) ultrafialové; c) mikrovlnné; d) rádiové.

Otázka 3.2.3. Je možné, aby se na vysokohorské observatoři v poušti Atacama (Chile) sledovaly vzdálené galaxie v oboru spektra: a) rentgenovém; b) ultrafialovém; c) vzdáleném infračerveném; d) infračerveném, blízkém k viditelnému záření?

Otázka 3.2.4. Zkoumáte jistý astrofyzikální problém u jedné galaxie. Nutně potřebujete vědět, zda a jak galaxie vyzařuje v rozmezí vlnových délek od 40 do 70 mikrometrů. Budete proto hledat v archivu dat, získaných: a) rentgenovým dalekohledem na družici; b) pozemním optickým dalekohledem; c) infračerveným dalekohledem na družici.



3. Naše skleněné a rádiové oči

Otázka 3.2.5. I když tzv. rádiové okno je dosti široké, přece jen některé části rádiového záření nelze z povrchu Země sledovat. Pozemní radioteleskopy tedy nemohou pozorovat v oboru vlnových délek: a) centimetrových; b) decimetrových; c) kilometrových.

Otázka 3.2.6. Proč ke sledování ultrafialového záření z vesmíru je zapotřebí družic nebo výškových raket, zatímco v případě infračerveného záření stačí pozorovat třeba jen z balonů?

3. Naše skleněné a rádiové oči

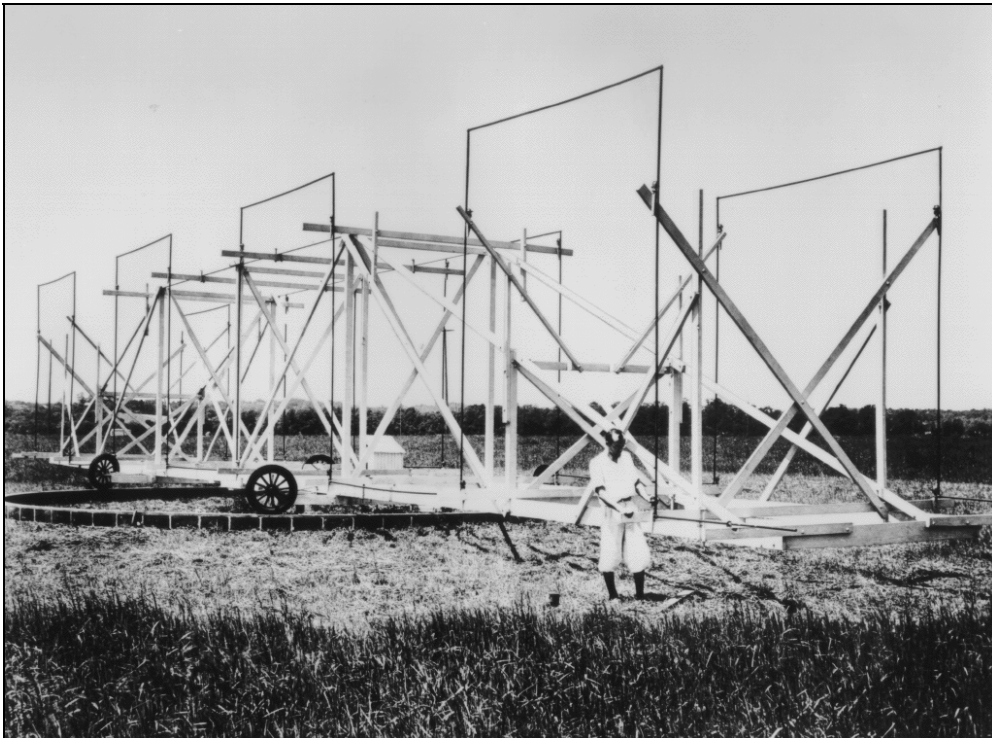


medailon

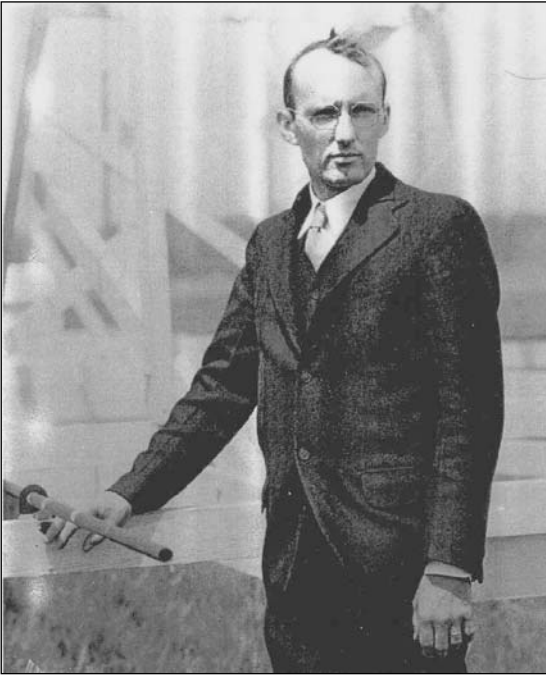
Karl Guthe Jansky

(22. 10. 1905 – 14. 2. 1950)

V našem příběhu, který se odehrává na přelomu 20. a 30. let dvacátého století, sehrál hlavní roli Karl Jansky, mladý elektroinženýr, který po ročním postgraduálním studiu nastoupil do Bellovy telefonní společnosti v létě roku 1928. Místem děje se stalo bramborové pole u Holmdelu, asi 50 kilometrů jižně od New Yorku. Zde koncem roku 1929 rostla do výšky i do šířky podivuhodná stavba: dráty a prkénky vyztužená směrová anténa, 30 metrů dlouhá a přes čtyři metry vysoká. Obsahovala téměř 130 metrů mosazných trubek a pracovala na vlnové délce 14,6 metru.



3. Naše skleněné a rádiové oči



Úkol, který Jansky řešil, můžeme vyjádřit jednou větou: měl zjistit zdroj rušení transatlantského rádiového spojení, které vadilo zákazníkům a Bellově společnosti tudíž kazilo obchody. „Nemůžeme chtít po zákazníkovi, aby platil 75 dolarů za třiminutový hovor, do kterého mu neustále něco syčí,“ prohlásil Janského nadřízený.

Monstrum, přezdívané Janského kolegy „kolotoč“, se doopravdy mohl natáčet doleva a doprava jako karusel. Na čtyřech kolech z fordky model T se celá anténa otočila třikrát za hodinu. Po řadě měsíců vylepšování přestavěl Jansky svou anténu tak, že mohla přijímat signály i ze směrů ležících poněkud nad horizontem. Mezitím čas doputoval do prosince 1931. Bylo již citelně chladno a „měřicí laboratoř“, což byla z prken sbitá bouda, neskýtala pražádný komfort. Jansky se ztuhlými prsty donekonečna justoval své přístroje. Většinou přijímal známé zdroje poruch, všelijaké pípání, kvílení a praskot. Byly to blízké i vzdálenější bouřky. Když náhle uslyšel – šum. Naprosto jednotvárný šum.

Jansky chtěl věci přijít na kloub během vánočních svátků. To nebude nikdo pracovat, mohu vyloučit průmyslové rušení, uvažoval. Štědrý večer strávil ještě se svými rodiči, ale již druhý den seděl u přístrojů. Náhle opět uslyšel onen šum. Po zesí-

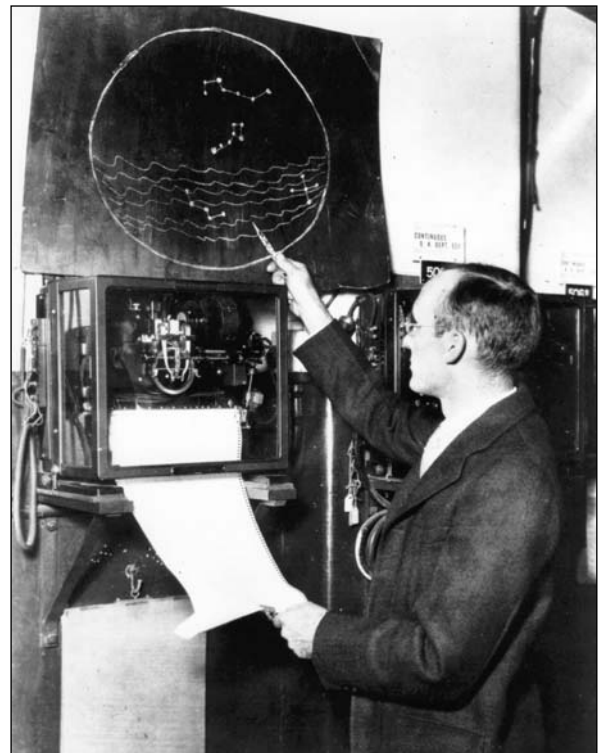
lení byl sykot chvílemi hlasitější, chvílemi trochu zeslábl. Po pěti minutách se ztratil docela.

Od 1. ledna 1932 si Karl Jansky zapisoval do tabulky doby, kdy záhadný šum uslyšel, a také jeho intenzitu. Ze získaných čísel ale vůbec nebyl chytrý. Tušil sice, že to nějak souvisí s vesmírem, jenže nevěděl jak. Znal však jednoho astronoma z Harvardovy univerzity, bratra kolegy z Bellovy společnosti. Ten po krátkém uvažování a výpočtech potvrdil Janského spekulaci: ano... snad by toto rušení mohlo přicházet ze souhvězdí Štělce. Tím směrem se nachází střed naší Galaxie. Když pak Jansky předal všechny své záznamy astronomům na Harvardu k prověření této hypotézy, setkal se s naprostým nezájmem. To ho pochopitelně rozladilo.

Nevzdal se však. Registroval „galaktický“ šum po celých 14 měsících, až do konce dubna 1933. Pak předal veškerý materiál svým nadřízeným. Byli překvapeni, ale neváhali a zprávu poskytli tisku. V nedělním vydání „New York Times“ 14. května vychází pod titulkem *Nové rádiové vlny přicházejí z centra Mléčné dráhy* sdělení, které mezi čtenáři vyvolalo rozruch. Nejsou to depeše cizích inteligentních bytostí? Hned příští den rádiová stanice NBC Blue Network vysílá přímým přenosem Janského šum z radioteleskopu.

Jansky chtěl pochopitelně pokračovat ve svých výzkumech, stavět nové a citlivější antény. Setkal se však s nepochopením nejen u jeho vlastní firmy, což snad lze pochopit, ale také u astronomů a fyziků. Ti nebyli vůbec připraveni na to, že by se mohlo otevřít nové okno do vesmíru, že by mohla vzniknout radioastronomie. Janského objev rádiového záření z kosmu přišel opravdu příliš brzy.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (příběh „Objev, který přišel příliš brzy“ z připravované knihy *Zlaté století astronomie*, Aventinum Praha).

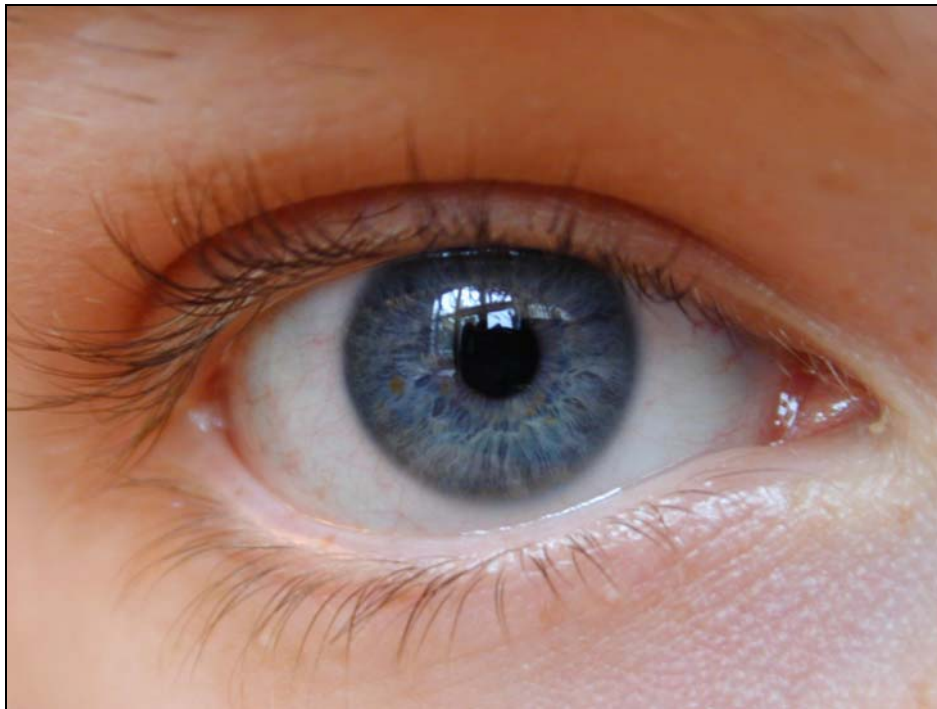


3.3. Astronomův nejcennější přístroj

Myslíte, že je to počítač? Mám za to, že jím je – lidské oko. Ano, oko zůstává tím nejcennějším přístrojem i v dnešním moderním věku. Pro astronoma je pohled do vesmíru „na vlastní oči“ velice užitečný. Lidské oko je ovšem složitý organismus. Aby astronomům poskytovalo věrohodné výsledky, musí každý dobře vědět, jak funguje.

Stručná anatomie oka

Oko má téměř kulový tvar. Povrchová vrstva je jen v přední části oka průhledná. Tam tvoří rohovku. Za rohovkou se nalézá *duhovka*, která má funkci clony regulující množství světla vcházejícího do oka. Uprostřed duhovky je tmavý kruhový otvor, nazývaný *zornička* nebo *panenka*¹⁾.



Za duhovkou je *oční čočka*, která má dvojbypuklý tvar. Dvě třetiny zadní plochy oka jsou vyplněny *sítnicí*. Její součástí jsou světločivé buňky – *čípky* a *tyčinky*. Čípků je nejvíce v okolí optické osy čočky. Čípky umožňují barevné vidění a aktivují se až při určité úrovni osvětlení. Tyčinky slou-

¹⁾ Velikost zorničky se mění podle osvětlení: ve dne je její průměr nejmenší (kolem 1 až 2 milimetrů), při slabém osvětlení je největší (maximální průměr je individuální a pohybuje se mezi čtyřmi až osmi milimetry). Průměr zorničky si můžete změřit pomocí celuloidového pravítka při tlumeném osvětlení před zrcadlem. Pro noční pozorování je to údaj dost podstatný – samozřejmě čím je průměr zorničky větší, tím je situace lepší.

3. Naše skleněné a rádiové oči

ží k nočnímu černobílému vidění. Jsou o několik řádů citlivější než čípky. Nejvíce tyčinek je rozmístěno asi 20 stupňů od optické osy oční čočky. Naše vidění – utváření obrazu sledovaného předmětu – je dosti komplikovaný proces, na němž se podílejí společně oči i mozek.

Zásady správného vizuálního pozorování

Při nočním pozorování se musíme *adaptovat na tmou*, což trvá nejméně půl hodiny (zpětná adaptace na normální osvětlení proběhne během několika minut). Abychom během pozorování nezrušili noční adaptaci, používáme k osvětlování pracovního stolu s pozorovacím deníkem a jinými záznamy jen slabé červené světlo, na které jsou tyčinky (aktivované při nočním vidění) málo citlivé (naše pozorovací stanoviště samozřejmě ponecháváme ve tmě).

Ve dne, kdy se při vidění uplatňují čípky, jsou naše oči nejvíce citlivé na záření o vlnové délce asi 555 nm (oči se dlouhým vývojem přizpůsobilo tomu, jak vyzařuje Slunce). V noci se maximum citlivosti očí posunuje k vlnové délce asi 510 nm (proto se nám v noci zdají zelené a modrozelené věci světlejší).

Chceme-li při pozorování vidět co nejslabší objekty, používáme bočního vidění: díváme se ve směru asi 10° odchýleném od směru k objektu a nehýbeme se.

Citlivost sítnice se zvyšuje působením vitamínu A a okysličením, naopak se zhoršuje kouřením a požíváním alkoholu. Přes den je třeba chránit oči před velkými dávkami ultrafialového záření, které způsobují šedý oční zákal a degeneraci žluté skvrny (pomohou sluneční brýle a štítky na čepicích či klobouky). Velké dávky záření během dne značně prodlužují dobu adaptace na tmou.

Je třeba pravidelně si nechat vyšetřovat zrak. Již malá krátkozrakost (kterou v běžném životě ani nepostřehneme) zřetelně snižuje možnost spatřit slabé světelné zdroje.



Tyčinky v lidském oku.



čítanka

Zdeněk Mikulášek: Proč se hvězdy malují cípaté, když jsou kulaté?

Požádáte-li kohokoli z neastronomů, aby vám nakreslil hvězdu, určitě namaluje něco hrotitého, hranatého, cípatého. To je však v naprostém rozporu s tím, co o hvězdách víme. Hvězdy jsou tělesa podobná našemu Slunci. Pohromadě jsou držena gravitací, která je nekompromisně zformuje do podoby koule. Jenomže všechny hvězdy s výjimkou Slunce jsou od nás natolik daleko, že je nemůžeme spatřit jako kotoučky. Vidíme je tedy jen jako bezrozměrné body. Opravdu? Co na to ale říká náš zrak? Podíváme-li se na hvězdy na obloze, shledáme, že jsou cípaté. Jako by z nich vystupovaly ostré paprsky. U jasných hvězd jsou to paprsky dlouhé a četné, u slabých kratičké. Vypovídá to snad něco o fyzikální podstatě hvězd? Zřejmě ne – tytéž paprsky totiž vidíme vycházet i ze vzdálených světelných zdrojů, žárovek či výbojek, které mají s hvězdami společné snad jen to, že také svítí. Příčinu celého jevu tudíž musíme hledat jinde – v optickém zařízení, jímž světlo vnímáme – tedy v lidském oku.



Světlé kříže u jasných hvězd tentokrát nemají nic společného s naším zrakem – jde o ohyb světla na nosičích pomocných zrcátek dalekohledu (ostatně – je to snímek, ne přímý pohled očima).

3. Naše skleněné a rádiové oči

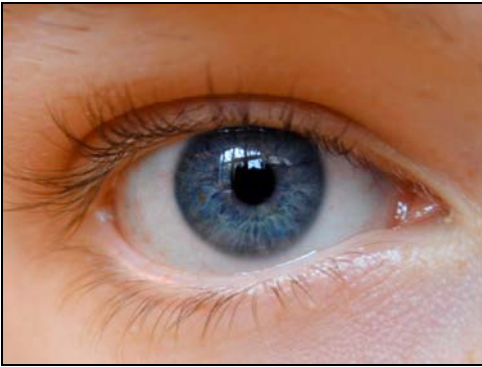
Za první a současně zcela vyčerpávající vysvětlení hvězdicovitěho vzhledu hvězd vděčíme německému učenci Hermannu von Helmholtzovi, který se mimo jiné zabýval i fyzikou našich smyslů. Ve svém pojednání *Úspěchy teorie zraku* píše: „Obrazy světelných bodů, které v oku vznikají, jsou nepravidelně hvězdicovité. Příčinou toho je uspořádání oční čočky, jejíž vlákna jsou paprskovitě rozložena do šesti směrů. Oční čočka není tvořena stejnorodou optickou hmotou, ale je složena z množství průhledných buněk, které jsou v ní uloženy jako dílky pomeranče. Na stěnách buněk, na jejich švech dochází k rozptylu a ohybu světla. Oba tyto optické jevy jsou příčinou toho, že jsou pozorované světelné body obrostlé křtící světelných výběžků.“

Chtěli byste spatřit hvězdy bez falešných paprsků, hvězdy skutečně bodové? Není nic snazšího. Návod na to nám dal už před půl tisíciletím všestranný génius Leonardo da Vinci (1452–1519). Připomeňme, že je to týž umělec, který namaloval proslulou Monu Lisu. Přiložíme-li si těsně před zřítelnicí papír s otvorem menším než jeden milimetr, uvidíme jen ty nejjasnější hvězdy. To však není podstatné. Důležité je, že všechny hvězdy spatříme jako body.

Proč? Úzký svazek světla vymezený otvorem ve stínítku teď prochází jen středem čočky. Ostatní dílky čočky se nedostanou ke slovu. Čočka v té chvíli funguje tak, jako by byla odlita z čirého, homogenního skla. Že tomu nevěříte? Přesvědčete se sami. K pokusu potřebujete jen propíchnutý papír a hvězdnatou noc.

Z knihy 220 záhadných otázek z astronomie (Rovnost, Brno 1996).

3. Naše skleněné a rádiové oči



Je užitečné myslet přesně i o věcech neužitečných.

Bernard le Bovier de Fontenelle, spisovatel (1657 – 1757)

otázky a příklady

Otázka 3.3.1. Když se podíváme za silného atmosférického zákalu na sluneční kotouč, někdy na něm spatříme i pouhýma očima sluneční skvrny. Jak velké musí být tyto skvrny, aby byly prostým okem vidět? (Uvažte, že okem běžně rozlišíme dva detaily úhlově od sebe vzdálené 2 až 3 úhlové minuty.)



Foto: Wojciech Rychlik

3. Naše skleněné a rádiové oči

Otázka 3.3.2. Foton A má dvakrát větší frekvenci než foton B. V jakém poměru jsou jejich energie?

Otázka 3.3.3. Do jaké vzdálenosti od Slunce musíme poslat kosmickou sondu, chceme-li, aby na její sluneční baterie dopadal 10krát větší tok slunečního záření, než jaký dopadá na naši Zemi?



čítanka

Zdeněk Pokorný: Měsíc a Slunce jsou u obzoru větší

Jistě můžete potvrdit z vlastní zkušenosti, že Měsíc, je-li nízko nad obzorem, se jeví mnohem větší, než když jej vidíme vysoko na obloze. Podobně to platí o Slunci. Je to úkaz velmi nápadný, a proto neudivuje, že o něm uvažovali již starověcí učenci Aristotelés ze Stageiry a Klaudios Ptolemaios.

Budeme-li hledat fyzikální vysvětlení tohoto jevu, neuspějeme. Posuďte sami: je-li Měsíc právě při obzoru, je jeho vzdálenost od pozorovatele větší než v případě, když nám svítí vysoko nad hlavou, takže by měl být u obzoru menší. Ovšem takové rozdíly jsou pod hranicí pozorovatelnosti pouhými očima. Ani lom světla v zemské atmosféře – tzv. refrakce – průměr Měsíce nebo Slunce u obzoru nezvětší. V důsledku astronomické refrakce se nám kotouč zapadajícího nebo vycházejícího Slunce či Měsíce jeví poněkud zploštělý ve svislém směru, nic víc a nic méně. Nezbývá než připustit, že „zvětšení“ Měsíce a Slunce u obzoru je jev zdánlivý, ryze subjektivní. Ostatně – dokázat pravdivost tohoto tvrzení je poměrně snadné: stačí Měsíc vyfotografovat třeba krátce po východu a pak v době, kdy bude vysoko nad obzorem. Velikost obrazu Měsíce na obou snímcích bude zaručeně stejná.



O řešení, které považujeme za správné, se zmiňuje již alexandrijský matematik a hvězdář Ptolemaios. Efekt souvisí s obecnými vlastnostmi lidského vnímání. Pozorujeme-li vzdálený předmět a prostor mezi ná-

3. Naše skleněné a rádiové oči

mi a předmětem je zaplněn dalšími předměty, zdá se nám onen daleký předmět ještě vzdálenější než v případě, kdybychom jej viděli skrze prázdný prostor. Měsíc nebo Slunce u obzoru srovnáváme se stromy, budovami, kopci, jež spatříme v jejich těsné blízkosti. Tato nebeská tělesa vidíme ve větší vzdálenosti, a proto se nám při stejném zorném úhlu zdají větší. Kdybychom se na „zvětšený“ Měsíc u obzoru podívali trubičkou, jež nám znemožní uvidět současně s Měsícem okolní předměty, bude Měsíc i u obzoru stejně malý, jako když je vysoko na obloze.



Psychologové dobře znají tento problém vztahu mezi vzdáleností a subjektivní velikostí předmětu. Vzdálenost předmětu, na který hledíme prázdným prostorem, vždy podceňujeme ve srovnání se stejnou vzdáleností předmětu, v jehož bezprostředním okolí můžeme vidět nějaké oporné body pro naši představu vzdálenosti. Takto vzniká také dojem, že obzor je od nás dále než ve skutečnosti a že nebe nad námi je výrazně zploštělé.

Z knihy *Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru* (Svoboda, Praha 1988).

3.4. Hvězdářské dalekohledy

V principu jsou to jednoduché přístroje, takže opravdu každý může porozumět tomu, jak dalekohledy fungují. Současně jsou však moderní teleskopy přehlídkou nových technologií, jež umožňují pronikavě zvýšit účinnost těchto přístrojů. V současné době jsme svědky budování mnoha obřích teleskopů – máme se tedy nač těšit.

Když oči nestačí

Mnohé záření, které k nám z vesmíru přichází, nemůžeme zachytit pouhými očima. Lidské oči jsou sice pozoruhodným přijímačem světla, ale každý uzná, že jejich výkonnost ke sledování slabých kosmických objektů často nestačí. Na scénu tedy přicházejí *dalekohledy*. Astronomům slouží již téměř čtyři století.



Refraktor o průměru objektivu 150 mm, ohnisková vzdálenost 2250 mm Hvězdárny a planetária Mikuláše Koperníka v Brně. Je umístěn na paralaktické montáži, polární osa je ve spodní části ukončena černým volantem. Foto: Jaroslav Luner.

3. Naše skleněné a rádiové oči

Fyzikální principy, na nichž je funkce dalekohledu založena, se samozřejmě ani za toto dlouhé období nemohly proměnit. Změnila se však přesnost provedení a hlavně velikost teleskopů. S každým novým a dokonalejším přístrojem záhy přišly i nové překvapivé výsledky. To je naprosto podstatné – *nové poznatky nezískáme spekulacemi, ale jen pozorováním*. Platilo to v době vynálezu dalekohledu, platí to nyní a zůstane to jistě zachováno i v budoucnosti.

K čemu dalekohled?

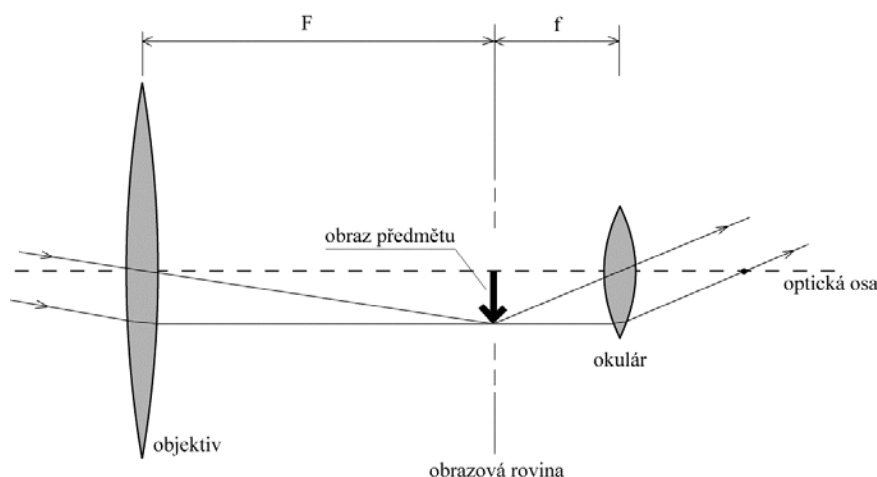
Astronomické dalekohledy používáme ze dvou důvodů. Jednak nám „přibližují“ vzdálené předměty, přesněji řečeno *zvětšují jejich úhlové rozměry*, takže pomocí dalekohledu rozlišíme na sledovaném objektu, například na Měsíci, více detailů než při pohledu pouhými očima. Druhý důvod jejich využívání můžeme shrnout do označení „sběrač fotonů“: dalekohled *shromažďuje* a přivádí do oka *mnohem více světla (fotonů)* než při pozorování pouhým zrakem. Proto přístrojem spatříme i velmi slabé hvězdy, jež pouhými očima vůbec nejsou vidět.

Sběračem světla nemusí být jen tzv. *spojná čočka*, jak jsme zvyklí vidat u malých dalekohledů používaných i mimo astronomii, ale též *duté zrcadlo*. Zrcadlové dalekohledy jsou v astronomii dokonce běžnější než teleskopy čočkové ¹⁾.

Jak dalekohled funguje?

Základní vlastnosti dalekohledu si shrňme na příkladu dalekohledu tvořeného dvěma spojnými čočkami. *Objektivem* je spojka o velké ohniskové vzdálenosti f_1 , která vytvoří obraz vzdáleného předmětu v ohniskové rovině obrazového prostoru čočky. Obraz předmětu je převrácený, zmenšený a skutečný (už tento obraz vykazuje více podrobností než vidíme očima).

Okulárem dalekohledu je opět spojná čočka s malou ohniskovou vzdáleností f_2 ($f_2 < f_1$). Okulár, který má optickou osu totožnou s optickou osou objektivu, je umístěn tak, aby obraz vytvořený objektivem se nacházel v jeho ohniskové rovině předmětového prostoru. Okulárem tedy pozorujeme obraz předmětu jako lupou.



¹⁾ Dalekohled, kde objektivem i okulárem jsou spojný čočky, nazýváme někdy též dalekohledem *Keplerovým*. Johannes Kepler roku 1611 ve spise *Dioptrica* ukázal, že dalekohled lze sestavit právě touto kombinací čoček (až do té doby dalekohledy používaly jako okulár výhradně rozptylku). Tím se Kepler stal vynálezcem tohoto typu dalekohledu, ač ho sám nesestavil a při svých pozorováních ani nepoužíval. Do praxe Keplerův dalekohled zavedli astronomové až o několik let později.

3. Naše skleněné a rádiové oči

Zorný úhel β , pod kterým sledujeme okulárem obraz předmětu, je větší než zorný úhel α , pod kterým vidíme předmět bez dalekohledu. Z obrázku, kde je vyznačen chod paprsků v dalekohledu, plyne, že

$$a/f_1 = \operatorname{tg} \alpha = \alpha; a/f_2 = \operatorname{tg} \beta = \beta$$

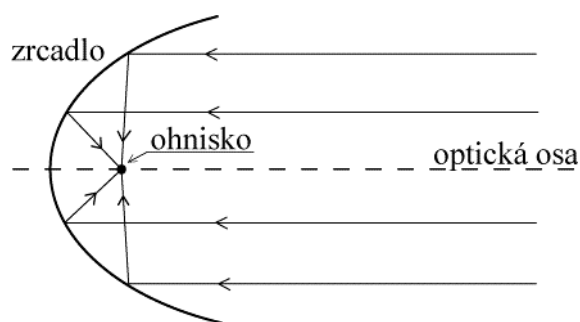
(pro malé úhly můžeme funkci tangens nahradit přímo velikostí úhlu). Úhlové zvětšení z dalekohledu je pak rovno

$$z = \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \alpha,$$

tedy

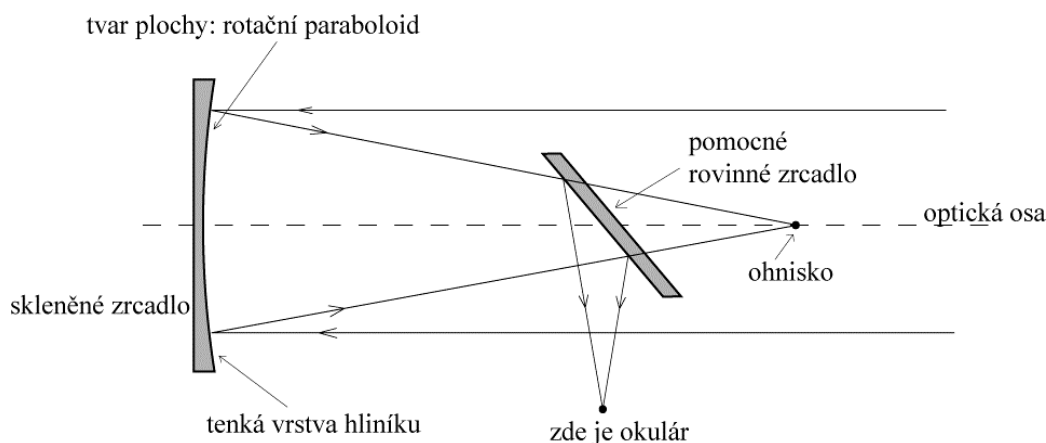
$$z = f_1/f_2.$$

Soustředění rovnoběžných paprsků do jednoho bodu – ohniska – lze provést nejen spojnou čočkou, ale i dutým zrcadlem, jehož odrazná plocha má tvar rotačního paraboloidu²⁾. Zrcadlové dalekohledy jsou v současnosti velice rozšířené, všechny velké teleskopy jsou zrcadlové. Zrcadlo bývá vyrobeno obvykle ze skla a je pokryto tenkou vrstvičkou hliníku; ta odráží nejen viditelné záření, ale i dlouhovlnnou část ultrafialového záření (s vlnovou délkou větší než 300 nm), kterou běžné sklo pohlcuje.



Pestrý svět teleskopů

Zatímco čočkové dalekohledy (*refractory*) jsou dosti uniformní (myslím tím vzájemné uspořádání objektivu a okuláru), bývají teleskopy zrcadlové (*reflektory*) již o poznání rozmanitější. Paprsky odražené od primárního zrcadla (tedy objektivu) mohou být vyvedeny mimo dalekohled pomocnými



²⁾ Historikové přesně nevědí, kdo jako první přišel s myšlenkou zrcadlového dalekohledu. Jisté však je, že prakticky uskutečnitelný návrh na zhotovení tohoto typu dalekohledu popsal ve svém díle *Optica promota* James Gregory v roce 1663.

3. Naše skleněné a rádiové oči

zrcadly mnoha způsoby. Každý z nich má své výhody a nevýhody, a řekněme hned, že neexistuje žádné ideální uspořádání zrcadlového dalekohledu; jsou jen přístroje více či méně vhodné pro určitý druh pozorování (například fotografii, studium spekter apod.).

Zajímavé jsou však kombinované dalekohledy: obsahují primární zrcadlo a *korekční čočku*, která napravuje mnohé nedostatky, jimiž reflektory chronicky trpí (například kvalitně zobrazují jen malé zorné pole). Tvůrcem prvního dalekohledu s korekční čočkou se stal roku 1930 Bernhard Schmidt (1879–1935), geniální optik, ale jinak dosti kontroverzní osobnost.

Zvětšení dalekohledu

Jedním ze základních úkolů dalekohledu je zvětšování úhlových rozměrů objektů. Oceníme to při sledování Měsíce či planet. Úhlové zvětšení z je rovno poměru ohniskových vzdáleností objektivu F a okuláru f : $z = F/f$.

Protože ohnisková vzdálenost objektivu byla dána jednou provždy při výrobě spojné čočky nebo dutého zrcadla, měníme zvětšení použitím okulárů s různými ohniskovými vzdálenostmi. Zdálo by se, že možností je nepřeberně. V praxi však musíme zvětšení volit uváženě, aby se rušivým způsobem neprojevil optické vady dalekohledu a zejména chvění zemského ovzduší. Maximální použitelné zvětšení obvykle nepřevyšuje číslo rovnající se dvojnásobku průměru objektivu v milimetrech, přičemž zvětšení nad 1000 pro pozemního pozorovatele prakticky nepřicházejí v úvahu.

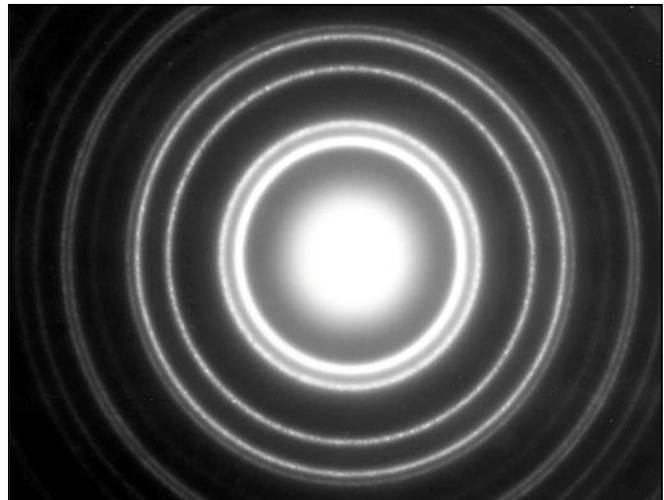
Rozlišovací schopnost dalekohledu

Budete-li kupovat astronomický dalekohled, nikdy se neptejte, kolikrát zvětšuje. Prozradili byste na sebe, že nevíte, co je nejdůležitějším optickým parametrem dalekohledu; je jím nepochybně *rozlišovací schopnost*, a ta závisí na *průměru objektivu*. Jenže s rozlišovací schopností to je přece jen trochu složitější.

I v ideálním dalekohledu a bez rušivého vlivu naší atmosféry se každý bodový objekt (např. hvězda) zobrazuje jako malý kotouček, obklopený soustavou tzv. difrakčních kroužků. Je to důsledek ohybového jevu, který vzniká při dopadu světelných vln na okrajích objektivu. Velikost centrálního ohybového kroužku určuje, jak (úhlově) blízké zdroje lze daným dalekohledem ještě rozeznat. V kursu vlnové optiky se odvozuje vztah, udávající, na čem závisí rozlišovací schopnosti dalekohledu.

Uveďme jej nejdříve slovně: rozlišovací schopnost je tím lepší, čím větší je průměr objektivu a čím je kratší vlnová délka záření.

Nyní si uvedeme matematickou podobu vztahu, který udává teoretickou rozlišovací schopnost dalekohledu (ta skutečná závisí též na kvalitě konkrétního dalekohledu, pozorovacích podmínkách



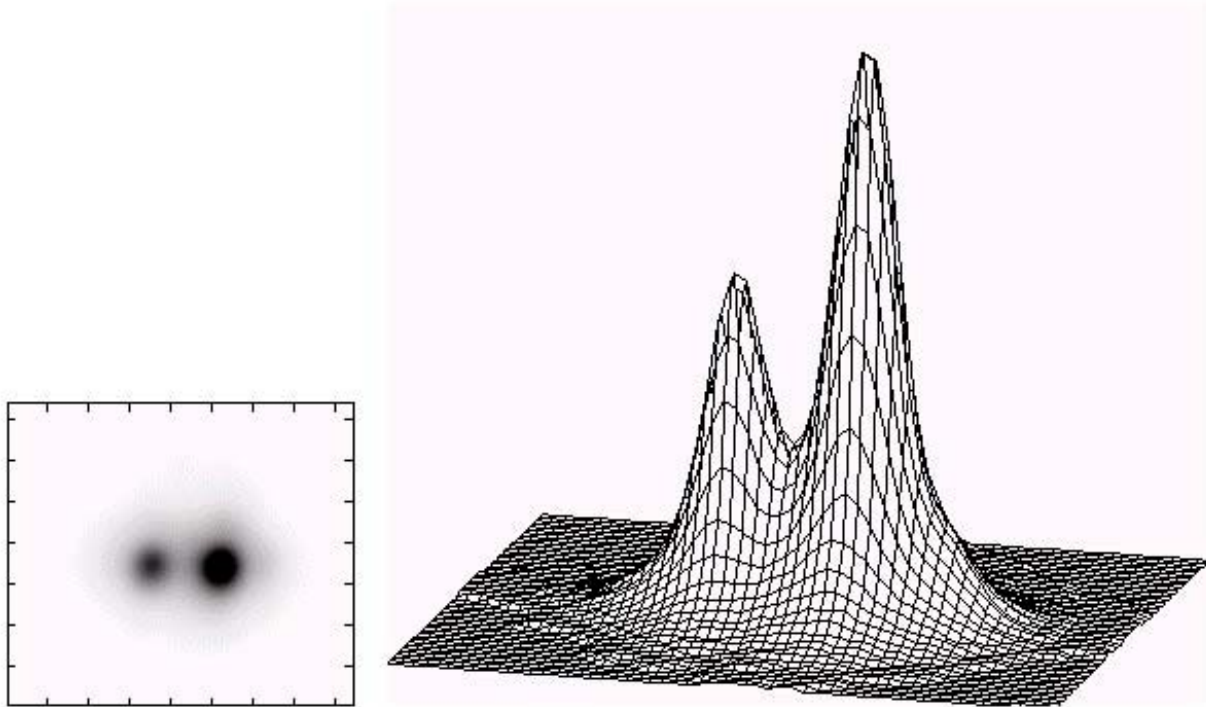
Ohybový jev při pozorování osamělé hvězdy.

3. Naše skleněné a rádiové oči

apod., a je v každém případě horší než hodnota teoretická). Z vlnové optiky plyne, že rozlišíme dva zdroje vzdálené od sebe o úhel α

$$\alpha = 1,22 \lambda/D,$$

kde α je úhel vyjádřený v radiánech, λ je vlnová délka záření a D je průměr objektivu.



Ohybový jev při pozorování dvojhvězdy.

Když průměr objektivu D vyjádříme v milimetrech a za vlnovou délku světla λ dosadíme hodnotu 555 nm (na toto záření je lidské oko nejcitlivější), dostaneme pro rozlišovací schopnost dalekohledu výraz $\alpha = 140/D$. Rozlišovací schopnost α vychází v úhlových vteřinách.

Světelnost dalekohledu

Jedná se o poměr průměru objektivu D k jeho ohniskové vzdálenosti f . O světelnostech nad asi 1:5 (tedy např. 1:4, 1:3) hovoříme jako o světelnostech velkých.

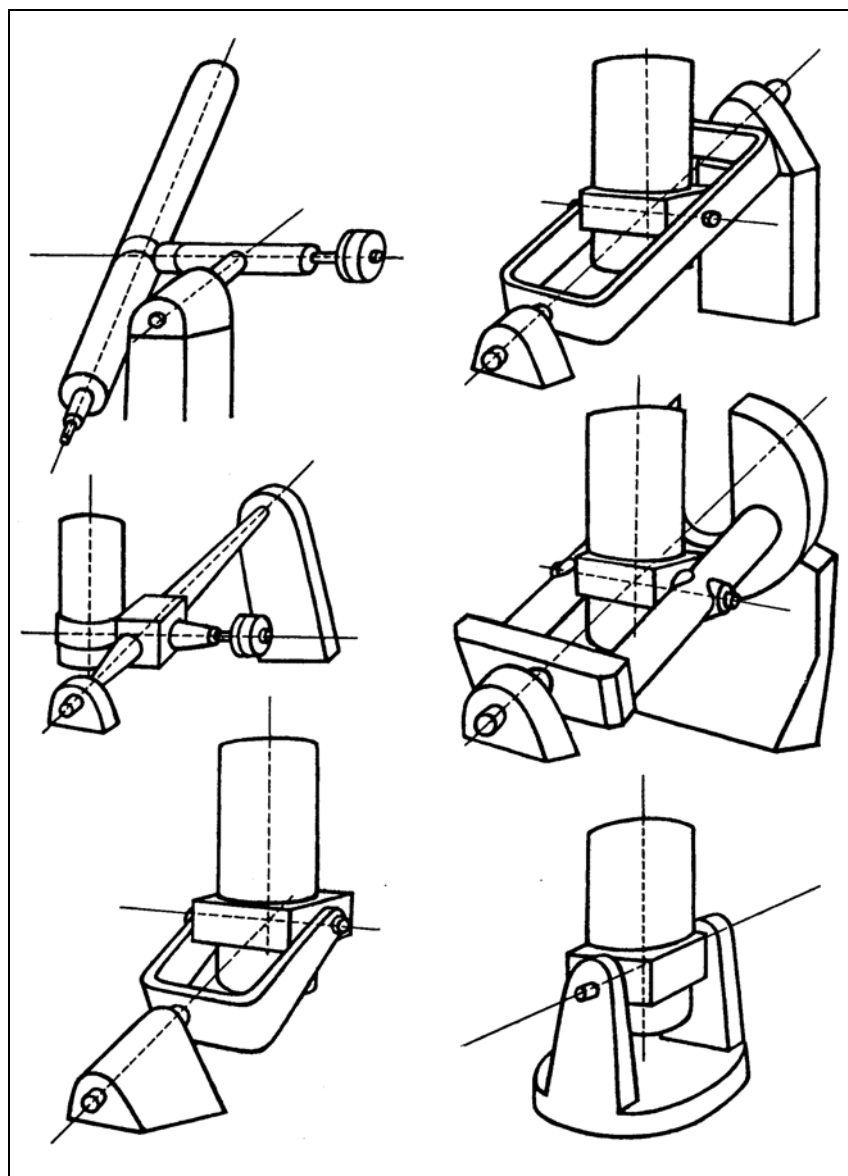
Montáže dalekohledů

Záhy po vynálezu dalekohledu vznikala doslova monstra – několik desítek metrů dlouhé teleskopy, jimiž se pozorovalo jen s největším vypětím sil. Dochovaly se zkratky o tom, jak Giovanni Cassini pochází po střeše pařížské hvězdárny s okulárem v ruce a chytá obraz planety, který vytvářel objektiv, zavěšený někde na druhé straně střechy. To je ovšem dávná historie.

Dnes je nedílnou součástí každého dalekohledu tzv. *montáž*, která umožňuje rychlé namíření dalekohledu do požadovaného směru a pak i sledování pohybu kosmického objektu po obloze. Umožňuje otáčet tubus dalekohledu kolem dvou vzájemně kolmých os. Podle orientace os rozezná-

3. Naše skleněné a rádiové oči

váme montáže *azimutální* (jedna osa je svislá, druhá vodorovná) a montáže *paralaktické* (tzv. *polární osa* je totožná se světovou osou, osa na ni kolmá se nazývá *deklinální osa*).



Různé typy montáží astronomických dalekohledů. Vždy jsou vyznačeny polární a deklinální osy (převzato z Grygar et al.: *Vesmír*, Mladá fronta, Praha 1979).

Kde a jak pozorovat s dalekohledem?

Naučit se správně a efektivně pozorovat s astronomickým dalekohledem je záležitost dostatečného cviku, podobně jako kupříkladu řízení motorových vozidel nebo hraní na kytaru. Abecedě správného pozorování se naučíte třeba tak, že si pozorně pročtete úkoly, uvedené v odstavci *pozorování* v této lekci, a všechny je pečlivě provedete.

3. Naše skleněné a rádiové oči

Zpočátku budete při pozorování používat jako detektor záření pouze svůj zrak. Je to relativně velmi citlivý detektor, který ovšem naplno využijete jen tehdy, budete-li znát jeho omezení a vyvarujete se školáckých chyb (základní rady jsou uvedeny např. v návodu na pozorování v této kapitole). Fotografická emulze v roli detektoru záření astronomických objektů, i když v posledních letech prudce vylepšuje své vlastnosti, rychle ustupuje digitálnímu způsobu detekce pomocí prvků CCD.

Největší teleskopy světa

Kde je vhodné vybudovat astronomickou observatoř s velkými přístroji? Astronom-pozorovatel potřebuje v noci především naprostou tmu, velké procento jasných nocí v roce a pokud možno i suché prostředí – to ocení především při infračervených měřeních. Proto jsou největší dalekohledy světa umístěny na odlehlých a dosti nehostinných lokalitách: na vrcholku sopky (všichni věří, že již určitě vyhaslé) Mauna Kea na Havajských ostrovech, v poušti Atacama v Chile, v horské oblasti Kanárských ostrovů, v jihovýchodní části Austrálie, ve Skalnatých horách v americké Arizoně.

A to je téměř vše, co máme na zeměkouli k dispozici. Nelze se proto divit, že na těchto vyhlášených lokalitách jsou již v provozu nebo se budují celé baterie velkých teleskopů, patřících různým institucím a státům. Ochránci přírody se dokonce v případě havajské sopky Mauna Kea domnívají, že observatoří je tu příliš mnoho!

Největším dalekohledem světa je v současné době dvojice desetimetrových teleskopů, posazená na vrcholku havajské sopky Mauna Kea. Dalekohledy jsou od sebe vzdáleny 85 metrů a tvoří unikátní systém, jehož rozlišovací schopnost v optickém oboru spektra překoná všechny dosavadní meze. Konkurentem jim však je čtveřice osmimetrových přístrojů, jež se dokončuje v jihoamerických Andách v oblasti Cerro Paranal. Tyto dalekohledy jsou hlavními přístroji Evropské jižní observatoře.



Část observatoří na havajské hoře Mauna Kea.

3. Naše skleněné a rádiové oči

Při pozorování na dně zemské atmosféry nikdy nelze zcela využít teoretické rozlišovací schopnosti dalekohledu – brání tomu neustálé proměny atmosféry. Astronomové chvění obrazu v dalekohledu nazývají *seeing*³⁾ a ke kvantitativnímu vyjádření používají údaj, jaký úhlový průměr má osamocená hvězda při pozorování dalekohledem (při klidné atmosféře činí *seeing* v našich podmínkách nanejvýš několik úhlových vteřin⁴⁾, na špičkových vysokohorských observatořích klesá pod 1").

Nepříznivý vliv chvění vzduchu lze u velkých dalekohledů potlačit pomocí tzv. *adaptivní optiky*. Jestliže pozorujeme v blízkosti sledovaného objektu nějakou jasnější hvězdu (nebo častěji: pomocí laseru si vytvoříme umělou hvězdu odrazem úzkého laserového svazku na sodíkové vrstvě ve výšce asi 90 km nad zemským povrchem), nebude její obraz bodový, ale vzhledem k neklidu v atmosféře bude rozmytý. Když se zpětně spočítá, jak by mělo být zdeformováno pomocné zrcátko v dalekohledu, aby se tím kompenzovaly zjištěné deformace obrazu zapříčiněné atmosférou, ono zrcátko se mechanicky zdeformuje. Pak po zhasnutí umělé hvězdy necháme dopadnout fotony ze sledovaného objektu (hvězdokupa, galaxie...) na detektor. To vše se opakuje s frekvencí několika hertzů – právě v takové časové škále se totiž mění optické vlastnosti našeho ovzduší.

U největších dalekohledů je třeba kompenzovat deformace zrcadel i konstrukce montáže, které vznikají např. nakláněním teleskopu do různých poloh, tepelnou roztažností materiálu apod. To umožňuje tzv. *aktivní optika*. Během pozorování se vhodnými detektory měří tvar zrcadla a zjišťují se deformace montáže (s přesností řádově 10 nm), aby se vzápětí vzniklé deformace vyrovnaly silovým působením v určitých místech na podpěru zrcadla nebo konstrukci montáže.



Část Evropské jižní observatoře (ESO) v Chile (La Silla).

³⁾ Čti: *síing* (bohužel žádný český výraz se zatím neujal).

⁴⁾ Teoretická rozlišovací schopnost dalekohledu bývá o řád lepší, jak si snadno spočítáte.

3. Naše skleněné a rádiové oči

Největší mezi velkými

Největšími astronomickými dalekohledy jsou vesměs reflektory. Zde jsou seřazeny podle průměru hlavního zrcadla.

<i>Stanoviště observatoře (komu patří dalekohled)</i>	<i>Průměr zrcadla</i>
Mauna Kea, Havajské ostrovy (USA)	2 × 10 m ¹⁾
Zelenčukskaja, severní Kavkaz (Rusko)	6,0 m
Mount Palomar, Kalifornie (USA)	5,1 m
Mount Hopkins (USA)	4,5 m ²⁾
La Palma (Španělsko)	4,2 m
Kitt Peak (USA)	4,0 m
Cerro Tololo (USA, Chile)	4,0 m
Siding Spring (Velká Británie, Austrálie)	3,9 m
Mauna Kea (Velká Británie)	3,8 m
Mauna Kea (Kanada, Francie)	3,7 m
Cerro la Silla (6 západoevropských zemí)	3,6 m
Calar Alto (Španělsko, Německo)	3,5 m
<i>největší dalekohledy světa ve stavbě:</i>	
Cerro Paranal (6 západoevropských zemí)	16,4 m ³⁾
projekt Subaru, Havajské ostrovy (Japonsko)	8,3 m
projekt Gemini, Havajské ostrovy a Cerro Pachón	2 × 8 m

¹⁾ každé desetimetrové zrcadlo je složeno z 36 segmentů tvaru šestiúhelníků;

²⁾ dalekohled je tvořen 6 zrcadly, každé o průměru 1,8 m;

³⁾ jedná se o čtyři zrcadlové dalekohledy, každé o průměru 8,2 m, jež budou moci pracovat dohromady.

3. Naše skleněné a rádiové oči



Každému člověku jest vlastní mýliti se, pouze hlupákům však v omylu setrvávati.

Tullius Marcus Cicero, politik, spisovatel a filozof
(106 – 43 př. n. l.)

otázky a příklady

Otázka 3.4.1. Je možné, aby v době částečného zatmění Slunce měly světelné skvrny ve stínu listnatých stromů, vzniklé prosvítáváním Slunce korunou stromu, tvar malých srpečků (takových, jaký tvar má právě zakryvané Slunce)?

Otázka 3.4.2. Nastal měsíční úplněk a vy se na něj díváte dalekohledem. Jak se změní tvar Měsíce, když polovinu objektivu zakryjete kusem neprůhledného papíru? a) Nestane se vůbec nic. b) Tvar Měsíce se nezmění, spatříte opět Měsíc v úplňku, ale méně jasný a s méně detaily než předtím. c) Měsíc bude mít tvar první nebo poslední čtvrti podle toho, jak upevním papír před objektivem.

Otázka 3.4.3. Mnozí pozorovatelé jsou krátkozrací nebo dalekozrací a nosí proto brýle. Musí je při pozorování dalekohledem *vždy* používat? Není to nakonec tak, že ať pozoruje s brýlemi nebo bez nich, je to zcela jedno?

Otázka 3.4.4. Měsíc v obrazové rovině dalekohledu s ohniskovou vzdáleností 1 m má velikost asi 9 mm. Tento číselný údaj si někteří z vás jistě zapamatují, aby jej nemuseli vždy znovu počítat. Hodí se totiž k řadě výpočtů, které jsou pak proveditelné téměř z paměti, jako tento: Chcete fotografovat oblohu fotoaparátlem se standardním objektivem, tj. s objektivem s ohniskovou vzdáleností $f = 50$ mm. Jak velkou část oblohy zachytíte na políčku kinofilmu 24×36 mm?

Otázka 3.4.5. Světlo většiny zdrojů (např. hvězd) nelze považovat za monochromatické, ale „bílé“, tedy za směs záření s různými vlnovými délkami. Myslíte si, že tato skutečnost (hvězdy nezáří jen na jediné vlnové délce, ale na mnoha různých) usnadní nebo naopak ztíží rozlišení dvou takových zdrojů světla (a proč)?

Otázka 3.4.6. Tato otázka je určitě poněkud záludná. Dalekohled o průměru objektivu 140 mm má – jak známo – teoretickou rozlišovací schopnost asi $1''$. Přesto lze tímto přístrojem měřit úhlové vzdálenosti hvězd s přesností vyšší než $1''$. Neporušuje se zde nějaký základní fyzikální zákon?

3. Naše skleněné a rádiové oči

Otázka 3.4.7. Na terase hvězdárny stojí vedle sebe dva přenosné dalekohledy, z nichž jeden má dvakrát větší průměr objektivu než druhý. Kolikrát více světla zachytí větší dalekohled ve srovnání s menším? Jaká je jeho rozlišovací schopnost?

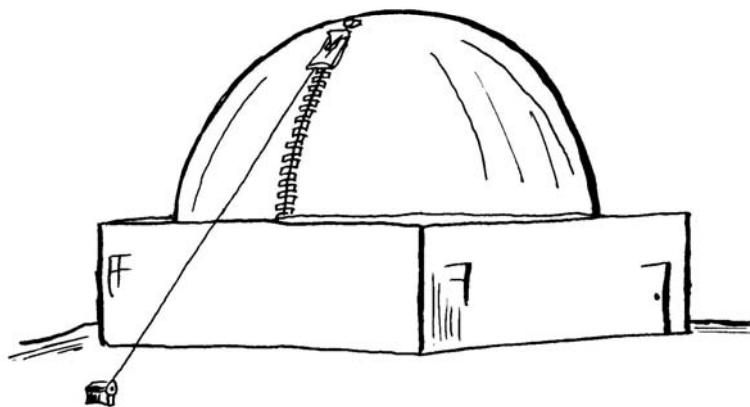
Otázka 3.4.8. Ověřte si, že po dosazení vlnové délky $\lambda = 555 \text{ nm}$ do obecného vztahu pro rozlišovací schopnost dalekohledu skutečně dostanete uvedený vztah pro α v úhlových vteřinách.

Otázka 3.4.9. Které z následujících tvrzení *není* pravdivé? a) Rozlišovací schopnost dalekohledu závisí na kmitočtu záření. b) Světelnost i zvětšení závisejí na ohniskové vzdálenosti objektivu dalekohledu. c) Zvětšení dalekohledu závisí přímo úměrně na průměru dalekohledu.

Otázka 3.4.10. Budete-li posuzovat optickou výkonnost dalekohledu (např. při koupi přístroje), zajímá vás především: a) ohnisková vzdálenost objektivu; b) maximální zvětšení dalekohledu; c) rozlišovací schopnost dalekohledu.

Otázka 3.4.11. Proč nemůžeme zrcadlovým dalekohledem, umístěným na observatoři v Brně, sledovat kosmické objekty na vlnové délce $0,01 \text{ mm}$? a) Pozorovací stanoviště je tak hluboko v atmosféře, že toto infračervené záření zemská atmosféra téměř zcela pohlcuje. b) Optická plocha reflektorů nikdy nebývá dostatečně přesně opracována pro pozorování v infračerveném oboru spektra. c) Uvedená vlnová délka spadá do rádiového oboru spektra, a rádiové záření optické plochy neodrážejí.

Otázka 3.4.12. V novinách se nezdědka objeví inzerát, ve kterém je napsáno asi toto: „Prodám astronomický dalekohled, zvětšující 400krát.“ Vy si právě chcete koupit nějaký dalekohled, jenže – uspokojí vás tato nabídka?



Podle *Sky and Telescope*, July 1982, 75.

Otázka 3.4.13. Lze nějak snadno zjistit, zda bychom pomocí obřího (např. pětimetrového) reflektoru mohli pozorovat plamen svíčky, vzdálený od nás 10 km ?

Otázka 3.4.14. Která skupina pojmů spolu navzájem bezprostředně souvisí? a) zvětšení, refraktor, azimutální montáž; b) rozlišovací schopnost, průměr dalekohledu, kmitočty záření; c) kmitočty záření, průměr dalekohledu, zvětšení.

Otázka 3.4.15. Okulár u dalekohledu s ohniskovou vzdáleností 2 m dává zvětšení 60 . Jakého zvětšení dosáhne s tímž okulárem u dalekohledu, jehož ohnisková vzdálenost činí 3000 mm ? a) stejného zvětšení; b) zvětšení 40 ; c) zvětšení 90 .

3. Naše skleněné a rádiové oči

Otázka 3.4.16. Proč se mohou některé hvězdy jevit v modrém světle jako dvojité, zatímco v červeném světle je stejným dalekohledem jako dvojhvězdy nerozlišíme?

Otázka 3.4.17. Barevnou vadu refraktoru lze potlačit: a) použitím barevného filtru; b) zacloněním objektivu; c) použitím velkého zvětšení.

Otázka 3.4.18. Reflektor ve srovnání s refraktorem: a) nemá barevnou vadu; b) má vždy větší světelnost; c) má podstatně menší kulovou vadu, zvláště mimo optickou osu.

Otázka 3.4.19. Planeta Venuše, když je ve tvaru úzkého srpku, má úhlový průměr asi $1'$. Jaké musíme použít zvětšení u dalekohledu, chceme-li dosáhnout toho, aby úhlová velikost Venuše byla stejná jako u Měsíce, když se na něj díváme pouhým zrakem?

Otázka 3.4.20. Proč se pro umístění velkých teleskopů, které budou pozorovat také v blízké infračervené oblasti spektra, hledá suché prostředí, např. pouště ve vysokých horách?

Otázka 3.4.21. Po rovné silnici se pohybuje automobil s rozsvícenými světly (pro jednoduchost předpokládejme, že to jsou „bodové“ zdroje). Vzdálenost mezi světly činí 1,2 m. V jaké vzdálenosti od nás uvidíme světla ne jako jediný, ale *dva* zdroje? (Oční pupilu považujme za „dalekohled“, jehož „objektiv“ má průměr 5 mm, efektivní vlnová délka světla je asi 550 nm).



čítanka

Jacob Bronowski: Hvězdný posel

V roce 1564 se zrodili dva velikáni: v Anglii William Shakespeare, v Itálii Galileo Galilei. Ve svých líčebných soudobých mocenských bojů volí Shakespeare dvakrát jako dějiště dramatu benátskou republiku: v Kupci benátském a v Othellovi. Jistě to bylo tím, že v roce 1600 středem světového dění byla středomořská oblast a jádrem této oblasti byly Benátky. Do Benátek proudili ctižádostiví muži, aby tam svobodně pracovali, přicházeli obchodníci, dobrodruzi, vzdělanci, nespočetní umělci a řemeslníci. Tísnilo se v ulicích, jako se tísnilo i dnes.

Benátčané byli praktičtí, věcní lidé. Galileo se věnoval intenzivně základním vědám v Pise. Avšak Benátčané, aspoň podle mého názoru, si ho najali jako profesora matematiky v Padově hlavně pro jeho nadání k praktickým vynálezům. Některé z jeho přístrojů se dochovaly v historické sbírce *Accademia Cimento*¹⁾ ve Florencii. Jsou to nádherné předměty, jak koncepčně, tak provedením. Je tam kupříkladu vypouklý přístroj z litého skla na měření rozpínavosti tekutin, připomínající teploměr. Jsou tam citlivé hydrostatické váhy, kterými se zjišťovala hustota vzácných předmětů na principu Archimédova zákona. Pak je tam ještě přístroj, který Galileo Galilei sám nazval Vojenským kompasem (měl i obchodní talent), ačkoli to ve skutečnosti je počítadlo, připomínající dnešní logaritmická pravítka. Galileo přístroje ve své vlastní dílně vyráběl i prodával.

Rozumnou, praktickou vědu Benátčané uznávali a obdivovali. Není proto divu, že když koncem roku 1608 výrobci brýlí z Flander vynalezli jakýsi primitivní dalekohled, vydali se do Benátek, aby vynález zpěněžili. Jenže benátská republika měla ve svých službách vědce nad vědce a matematika nad matematiky v osobě Galilea Galileiho, kterému se nikdo v severní Evropě nevyrovnal a který se také uměl prosazovat. Když sám také vyrobil dalekohled, vytáhl benátský senát na vrchol Campanilu, aby jim ho předvedl.

Galileo byl malý, sporý, čilý rusovlasý muž a měl větší počet dětí než se na starého mládence sluší. Bylo mu čtyřicet pět let, když se doslechl o vlámském vynálezu. Okamžitě zahájil horečnou činnost. Promyslel sám princip dalekohledu za jedinou noc a vyrobil potom přístroj, který se zcela vyrovnal vlámskému. Přístroj

¹⁾ Čti: *akademia cimento*.

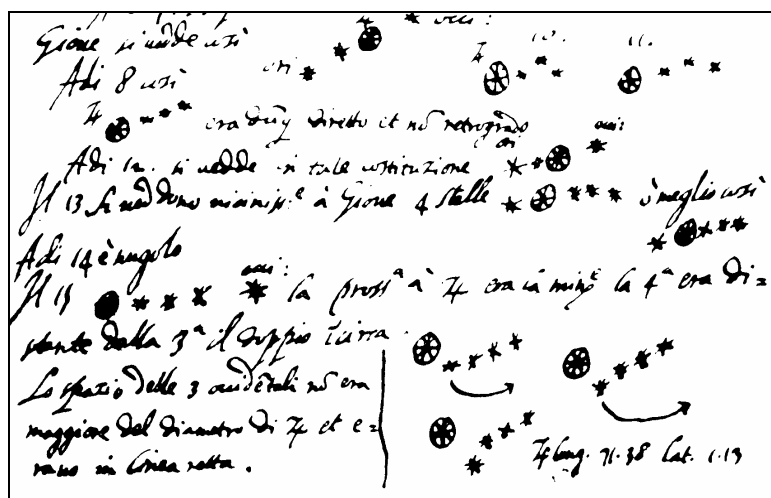
3. Naše skleněné a rádiové oči

zvětšoval asi trojnásobně, tedy přibližně tak, jako dnes lepší operní kukátko. Než se však vydal na benátský Campanile, zvýšil zvětšení na osmi až desetinásobek. To už byl skutečný dalekohled. Z vrcholu Campanilu, odkud je rozhled na třicet kilometrů, jím bylo vidět nejen lodi plující na obzoru, ale dokonce i lodi vzdálené od přístavu ještě dvě i více hodin plavby. Možnost takového pozorování měla značný praktický význam pro obchodníky.

Galileo popsal celou událost svému florentskému švagrovi v dopise z 29. srpna 1609:

Musíš vědět, že tomu budou dva měsíce, co se zde roznesla zpráva, že ve Flandřích předložili hraběti Mořici tak sestrojené kukátko, že se v něm předměty vzdálené zdají blízké a člověka je možno zřetelně rozeznat až na dvě míle. Usmyslil jsem si soustředit se na zhotovení přístroje. To se mi podařilo, a sice tak dokonale, že můj přístroj zdaleka předčil slávou přístroj flanderský. Je tomu šest dní, co se zpráva, že jsem kukátko zhotovil, donesla do Benátek a já byl povolán na signorii, abych přístroj předvedl jim i celému senátu, a to k velikému úžasu všech. Mnoho pánů i senátorů, byť již letitých, nelenilo vyjít i vícekrát po schodech nejvyšších věží benátských, aby pozorovali vzdálené plachetnice a jiná plavidla po moři, jak se blíží k přístavu.

Galileo je původcem moderního vědeckého přístupu. Uskutečnil první moderně pojatou vědeckou práci během šesti měsíců po svém triumfu na Campanilu, přestože takový triumf by jinému stačil pro celý život. Galilea napadlo, že by flanderská hračka mohla sloužit i k jiným účelům než k navigaci. Přístroj by mohl sloužit vědě, zkoumání, a to byla myšlenka v jeho době zcela nová. Zvýšil zvětšení na třicetinásobek a zadíval se dalekohledem ke hvězdám. Tak skutečně první vykonal to, co dnes považujeme za vědeckou výzkumnou práci: sestrojil přístroj, provedl pokus a zveřejnil výsledky. Učinil tak v období mezi zářím 1609 a březnem 1610, kdy v Benátkách vydal nádhernou knížku *Sidereus nuncius*, Hvězdný posel. V díle předložil ilustrovaný popis svých astronomických pozorování. Co píše?

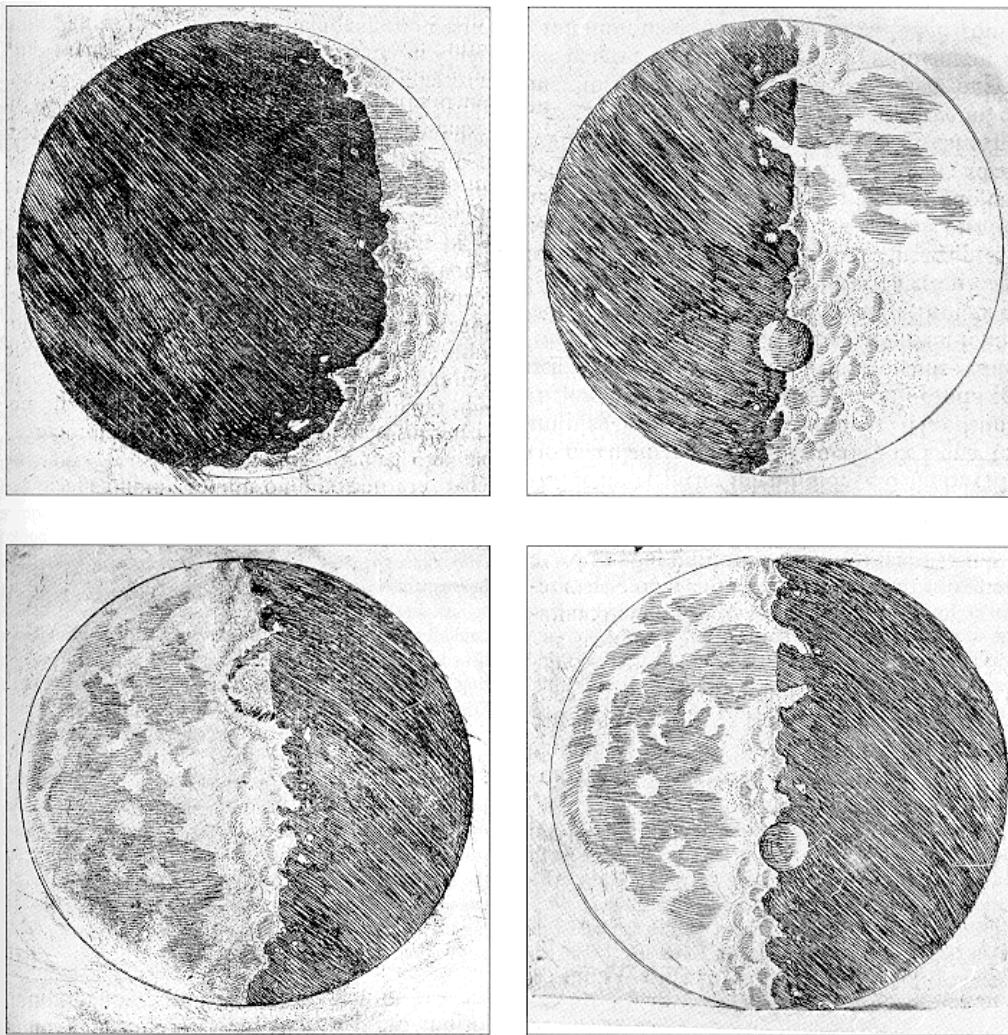


3. Naše skleněné a rádiové oči

Uviděl jsem myriády hvězd, dříve nikdy nespátřených, v počtu převyšujícím desetinásobně počet hvězd dříve známých. To, co vzbudí vpravdě největší úžas a co tak silnou mocí vskutku na mne zapůsobilo, že jsem na pozorování upozornil všechny astronomy a filozofy, byla skutečnost, že jsem objevil čtyři planety, které přede mnou žádný z astronomů neznal ani nespátřil.

Byly to Jupiterovy družice. Galileo v Hvězdném poslu také popisuje, jak dalekohledem pozoroval dokonce i Měsíc. Galileo jako první zveřejnil mapy Měsíce. Dochovaly se také jeho původní akvarely.

Jest to obdivuhodně nádherný a povznášející pohled, patří v tvář plného Měsíce... Jest jisté, že jeho povrch není rovný a hladký, avšak naopak hrubý, nerovný, jako povrch Země samotné, s mnohými rozlehlými vyvýšeninami, rozeklanými hlubokými stržemi a údolními.



Galileovy astronomické objevy vzbudily rozruch a získaly mu větší ohlas než jeho triumf u kupců. Všude však nebyly tak vítané, protože to, co Galilei uviděl na nebi a ukázal každému, kdo byl ochoten se dívat, znamenalo, že Ptolemaiov systém přestal být upotřebitelný. Koperníková pronikavá hypotéza byla potvrzena a stála nyní v plném světle zcela jasná. To, jako mnoho jiných novějších vědeckých objevů, příliš nepotěšilo tehdejší oficiální veřejnost ovládanou předsudky oné době vlastními.

Část stejnojmenné kapitoly z knihy *Vzestup člověka* (Odeon, Praha 1985; překlad Jaroslava Davidová-Moserová).



čítanka

Josef Klepešta: Neklidný a nešťastný optik od břehů Baltského moře

V roce 1935 zemřel jeden z největších astronomů-amatérů, optik hamburské hvězdárny Bernhard Schmidt. V té době jen málo lidí tušilo, jaký přínos astronomii se zrodil v hlavě tohoto výstředního muže, který nemiloval pravidelnost pracovního dne, který nedbal o svůj zevnějšek právě tak jako o svoje zdraví. Jeho duševní rozháranost souvisela s geniálností, kterou překvapoval blízké okolí.

Bernhard se narodil v roce 1879 z matky Švédky a otce Němce, a to v domku stojícím na břehu Baltského moře v Estonsku. Bernhardova mladá léta byla vzrušující. Okolí nechápalo zvláštní chlapcovu zálibu pro broušení skla v čočky, které vsazoval do bedýnek od otcových doutníků. Věčný neklid vnukl Bernhardovi sestrojení malé, ale explozivní pumy. Vybuchla a vzala sebou pravou ruku jejího stvořitele. Strašné neštěstí připoutalo Bernharda ještě úžeji k optice, jejíž zvládnutí znamenalo pro mladého muže existenci. Zmračení vyřadilo Bernharda ze zástupu pravidelných pracovníků, a právě v té skutečnosti musíme hledat jeho nespokojenost i celé duševní rozpoložení.

Schmidt počal brousit optické plochy, které sloužily astronomii. Bylo zapotřebí neskonale trpělivosti, aby levá ruka zvládla finesy optického umění. Ale jakoby cit ztracené paže dvojnásobil schopnost levé ruky, tak stále dokonaleji a dokonaleji se Schmidtovi jeho díla dařila. Byla a jsou dokonalá, takže pověst o jeho umění stále rostla. Jednoduchá parabolická plocha zrcadel Schmidta neuspokojovala. Znal její chyby, neboť sám nebe pozoroval a fotografoval.

Bylo dílem náhody, že v té době ředitel hvězdárny v Bergedorfu u Hamburku rozeznal Schmidtovy schopnosti a vyzval jej energicky, aby vstoupil do služeb ústavu. Schmidt se dlouho rozhodoval, ale krize poválečných let a opuštěnost ho nutila práci přijmout, tím spíše, že jej ředitel ujistil, že na ústavě může pracovat jen na problémech, které ho samotného zajímají. Schmidt svolil. Nelze říci, že vždy a všem byla povaha tohoto bouřliváka po chuti. Ale Schmidt konal dobré služby hvězdárně. Poslouchal stesky, které si vyměňovali fotografové nebe. Viděl před sebou jasně problém astronomické fotografie: na jedné straně dobře astigmaticky korigované fotografické objektivy dávaly nedosti ostré obrazy hvězd, na straně druhé jediná re-

3. Naše skleněné a rádiové oči

flexní plocha zrcadla kreslila neskonale ostřeji, ale dovedla zobrazit jen malou část oblohy, přibližně tolik, co zakryjí dva úplňky Měsíce.



Hvězdárna v Hamburku – Bergedorfu v roce 1911, krátce před příchodem Bernharda Schmidta.

Úkol, který měli před sebou fotografové, bylo mapování hvězdné oblohy. Použití reflektoru k tomuto účelu bylo nemyslitelné již proto, že mapování by trvalo několik tisíc let. Schmidt o úkolu dlouho přemítal, ale stále nenacházel řešení. Až jednoho večera, kdy odpočíval na palubě lodi vezoucí jej a kolegy za slunečním zatměním na Filipíny v roce 1929 – tu se před jeho duševním zrakem objevilo řešení celého problému. Ano, bylo to správné řešení, a Schmidt brzy po návratu realizoval nápad na malém modelu.

Jednoho dne pozval k sobě ředitele ústavu. Přístroj ve tvaru malé bedny ležel na okně a skleněné oko ostře čitelné, i když Schmidt komorou pohyboval. Způsob korekce jednoduché kulové plochy byl úžasně prostý. Všechny její hlavní nedostatky odstranil Schmidt korekční deskou, kterou světlo hvězd muselo projít dříve, než se dostalo k odrazné ploše zrcadla. Výsledkem byl nezkreslený a barevně bezvadný obraz uvnitř komory na zakřivené kulové ploše.

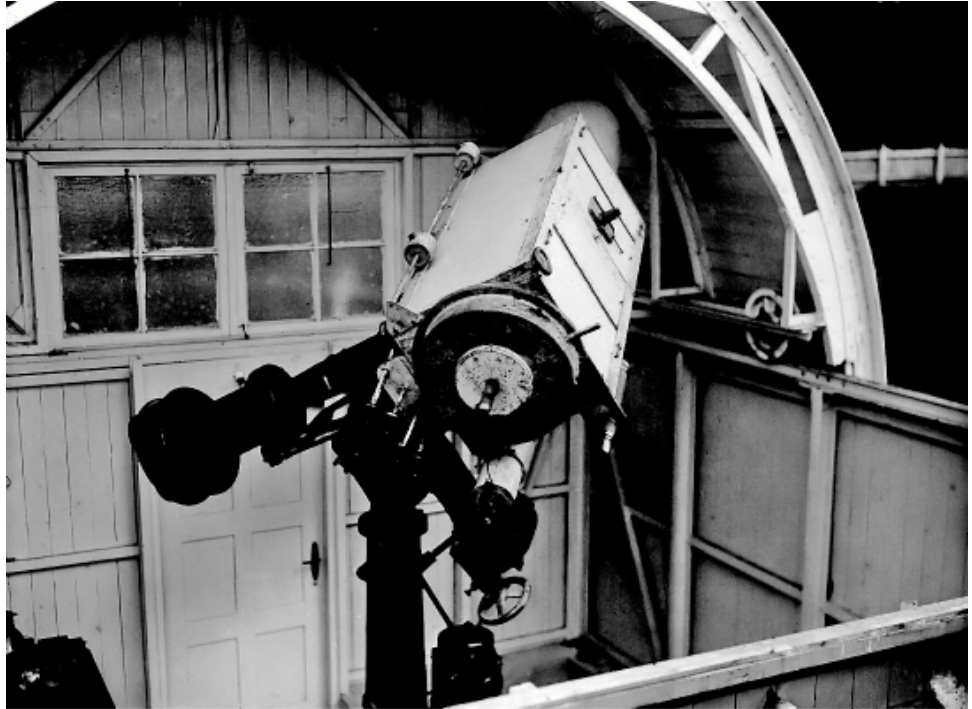
Tato zakřivená kazeta se zdála být pro mnohé problémem. Ale pro Schmidta nebyla. Nasekal několik koleček z plochého filmu a přesvědčoval hvězdáře, že s podob-



3. Naše skleněné a rádiové oči

ným materiálem je obtíž prakticky překonána. Objev byl učiněn, publikován, ale ještě dlouho trvalo, než svět začal oceňovat Schmidtův geniální nápad. Bylo však pozdě. V roce 1935, kdy konečně myšlenka Schmidtova vykročila do světa, její tvůrce umírá.

Výňatek z článku *Výročí Bernharda Schmidta*. Říše hvězd, 1950, 239–241.



Schmidtova komora na hvězdárně v Hamburku – Bergedorfu.

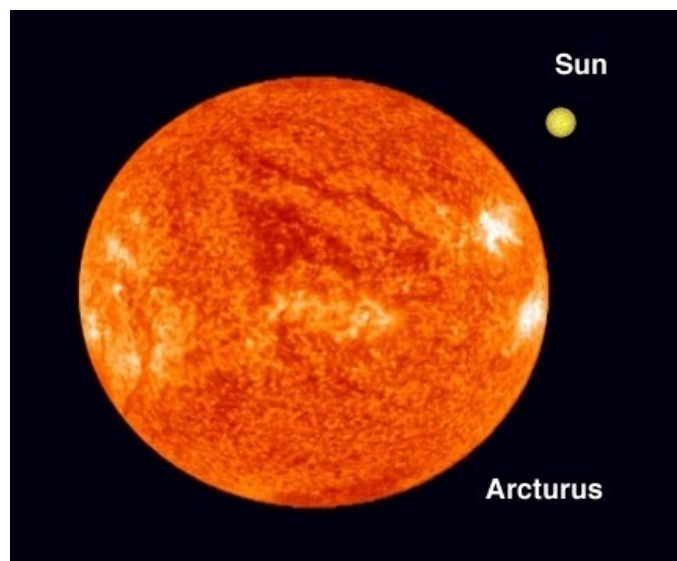
3. Naše skleněné a rádiové oči



úloha k zamyšlení

Zorné pole dalekohledu

Hvězda α Bootis, známá jako Arcturus, prošla zorným polem nehybného dalekohledu podél průměru (tedy středem zorného pole) za dobu $t = 120$ s. Jaký je úhlový průměr d zorného pole tohoto dalekohledu? (Máte již pohromadě všechny potřebné informace k výpočtu?) Považujete tuto metodu zjišťování velikosti zorného pole dalekohledu za dostatečně přesnou? (Když ano, zdůvodněte proč, když nepovažujete, pokuste se navrhnout jinou.)



3. Naše skleněné a rádiové oči

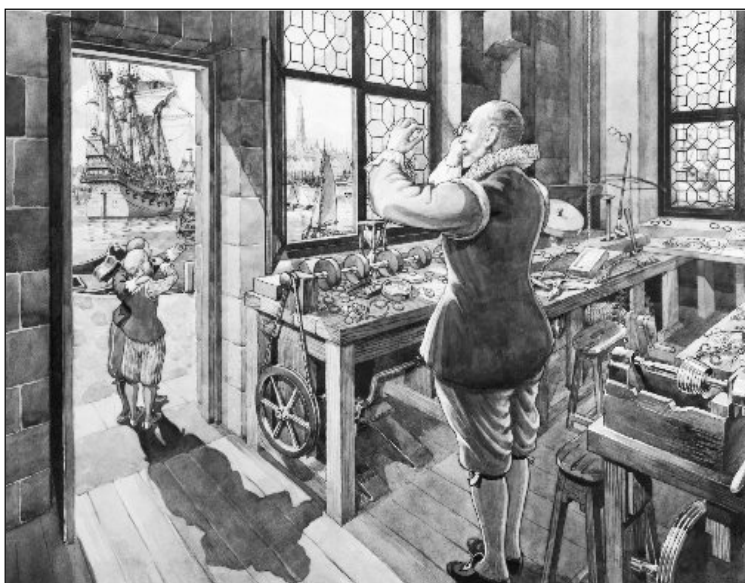


medailon

Jan Lippershey ¹⁾ a Galileo Galilei

Tycho Brahe, jeden z nejlepších pozorovatelů všech dob, byl odkázán jen na své oči. Jeho důmyslné přístroje – kvadranty, sextanty či armilární sféry – žádnou optiku či dalekohled neměly. Ani nemohly mít, protože dalekohled dosud nikdo nevynalezl. Jenže – ironií osudu už pár let po jeho smrti doba nazrála a přišel okamžik vynálezu dalekohledu. 2. října 1608 požádal nizozemský optik a výrobce brýlí Jan Lippershey generální nizozemské stavy o udělení patentu na přístroj, který pomocí skleněných čoček přibližuje vzdálené předměty. Jak se zdá, tento vynález podobně jako mnohé jiné byl více dílem náhody než geniálního nápadu. Dalekohled prý objevily Lippersheyovy děti, když si doma hrály s nepotřebnými čočkami. Ať tak či onak, patent Lippershey sice nedostal, ale slušné odměny za první tři přístroje se přece jen dočkal. Nicméně ke hvězdnému nebi dalekohled poprvé zamířil někdo jiný – Galileo Galilei.

Když byl Galilei profesorem matematiky v Padově, povolal jej benátský dóže na svůj dvůr. Galilei už v té době platil nejen za učenice, ale i úspěšného vynálezce. Benátčané dovedli tuto jeho vlastnost ocenit. Galilei vyrobil hydrostatické váhy, měřidlo času – kyvadlo, teploměr, počítadlo připomínající logaritmické pravítko, mikroskop. Když se v květnu 1609 dověděl o vynálezu nizozemského výrobce brýlí, neváhal a přesto že nevěděl, jak nový přístroj vypadá a jak je sestaven, vymyslel a zhotovil přístroj podobný. Jeho dalekohled, který se zcela vyrovnal holandskému, zvětšoval asi troj-



¹⁾ Čti: *liprshej*.

3. Naše skleněné a rádiové oči

násobně, tedy přibližně jak obyčejné divadelní kukátko. To se ale Galileimu zdálo málo a proto zvýšil zvětšení na desetinásobné, a pak ještě na třicetinásobné.



Když se pomocí svých přístrojů zadíval ke hvězdám, objevil vsutku nevidané věci: měsíční povrch není ani rovný ani hladký, ale naopak hrubý, nerovný, jako povrch Země samotné, s mnoha vyvýšeninami, rozeklanými hlubokými stržemi a údolím. Galilei jako první zveřejnil mapy Měsíce. Středem jeho pozornosti bylo i Slunce. Uviděl na něm tmavé skvrny a jejich soustavným pozorováním usoudil, že Slunce rotuje. Tak padl mýtus o Slunci bez poskvrny, Slunci věčně čistém a neměnném.

První Galileiho dalekohledy byly sice ještě nedokonalé, obrazy neostře, ale přesto byl jejich tvůrce fascinován záplavou hvězd, které dosud nikdo nespátřil. Mléčná dráha se rozpadala do podoby tisíců slabých hvězdiček. Při prohlížení Jupiteru objevil Galilei v lednu 1610 čtyři družice, vytvářející spolu s planetou miniaturní sluneční soustavu. U Venuše Galilei rozpoznal fáze. Byla to doba velkých objevů.

Zprávy o Galileiho pozorováních vzbudily u jeho současníků rozruch, ale ne vždy i pochopení. Jeho pozorování nebyla pro každého vítaná, neboť to, co Galilei na obloze uviděl a ukázal každému, kdo byl ochoten se dívat, znamenalo konec dlouholetých představ o nehybné Zemi, jež měla být středem celého vesmíru.

Medailon napsal Zdeněk Pokorný.

3. Naše skleněné a rádiové oči



citát

V divočině kolem vysokohorské observatoře na Kitt Peaku v Arizoně je živá příroda zastoupena především skunky. Jedné noci se jistému skunkovi podařilo nějak proklouznout do kuchyně. Kuchař ho stačil zahnat do komory na smetáky a zavřel dveře. Další hodinu se pak několik světových astronomických kapacit radilo, jak skunka bezpečně vyhnat. Někdo navrhl, že by se mohla udělat cestička ze salátových listů od dveří komory na zápraží. Když byla cestička vysypána, astronomové na dané znamení prudce otevřeli oboje dveře. Načež po vyznačené cestičce vběhl do komory další skunk.

G. S. Mumford (*Kitt Peak National Observatory Contributions* č. 551, 1970). Překlad: Jiří Grygar.



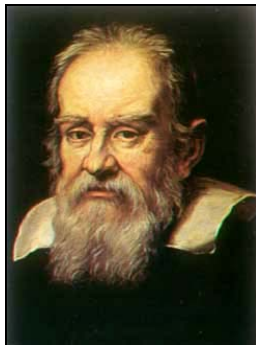
3. Naše skleněné a rádiové oči



speciální otázka

Vrstevníci

Renesanční doba dala astronomii velikány jako Mikuláše Koperníka, Galilea Galileiho, Johannese Keplera či Tychona Brahe. Tito učenci, ač vytvářeli svá díla přibližně ve stejné době, přece jen nebyli všichni vrstevníky. S kým se tedy kdo (z těchto čtyř osobností) nemohl přímo setkat nebo psát si dopisy, protože už (nebo ještě) nežil?



3.5. Kosmické teleskopy

Nejúspěšnějším dalekohledem světa je bezesporu Hubbleův kosmický dalekohled. Poznatky získané tímto přístrojem už nyní zásadně proměňují mnohé obory astronomie, a to jeho mise ve vesmíru ani zdaleka nekončí. Obrazně řečeno, díky tomuto teleskopu budou astronomové brzy donuceni přepisovat učebnice astronomie.

Před startem

O astronomických dalekohledech, obíhajících na drahách kolem Země, se zmiňoval už v roce 1923 německý raketový průkopník Hermann Oberth. S nápadem kosmického dalekohledu přišel znovu v roce 1946 americký astrofyzik Lyman Spitzer ¹⁾ (1914–1997), ale teprve začátkem 60. let, po prudkém počátečním rozvoji kosmonautiky, brali odborníci jeho myšlenku dostatečně vážně.

Návrh na vypuštění Hubbleova kosmického dalekohledu byl předložen v roce 1977, s termínem realizace v roce 1983. Vyskytly se však obrovské problémy technického rázu, takže termín vypuštění se posunul o tři roky. Na začátku startovního roku 1986 ovšem došlo k havárii raketoplánu *Challenger* ²⁾. Následný zákaz letů raketoplánu způsobil, že se start prvního velkého kosmického dalekohledu odsunul až na rok 1990.



¹⁾ Čti: *lajmen spicer*.

²⁾ Čti: *čelindže(r)*.

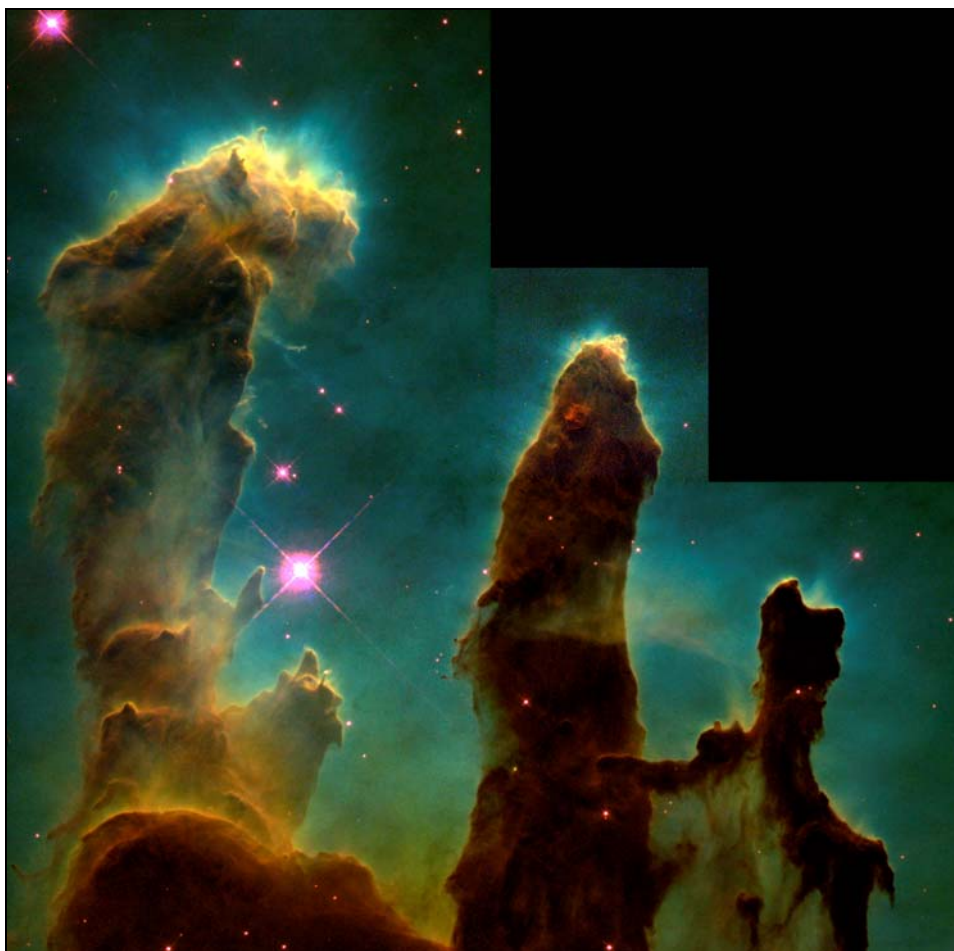
3. Naše skleněné a rádiové oči

Rozčarování po startu

Kosmický dalekohled je umělou družicí tvaru válce. Je dlouhý 13 metrů, v nejširší části má průměr 4,3 metru, jeho hmotnost je téměř 12 tun. Záhy po vypuštění v dubnu 1990 bylo jasné, že tento jednu a půl miliardy dolarů drahý přístroj není tak dokonalý, jak astronomové předpokládali.

Optické testy odhalily příčinu potíží: hlavní zrcadlo o průměru 2,4 metru má poněkud chybný tvar! Je na okrajích příliš mělké (od správného tvaru se zde odchyluje o dva mikrometry), což ve výsledku znamená, že světlo odrážené okrajem zrcadla se soustřeďuje o 38 milimetrů dále než světlo ze středových částí. V učebnicích optiky se taková vada označuje jako sférická.

Důsledkem této vady je ztráta světla a potřeba delších expozičních dob. Tento stav bylo zajisté nutné napravit. Z několika řešení nakonec zvítězil návrh, aby se nejméně užívaný rychlý fotometr nahradil novým modulem, v němž by byla instalována korekční optika, jež se přizpůsobí skutečnému, tedy poněkud chybnému tvaru hlavního zrcadla. Zařízení bylo hotovo za 28 měsíců a v prosinci 1993 se vydala posádka raketoplánu *Endeavour*³⁾ k opravě Hubbleova dalekohledu. Již první snímky opraveným dalekohledem ukázaly, že se akce plně zdařila. Dnes už nikdo nepochybuje o tom, že tento unikátní přístroj s pohnutou historií je nejlepší, i když nejdražší observatoř světa.



Nejznámější snímek, pořízený až dosud Hubbleovým kosmickým dalekohledem: „Sloupy zrození“, jinak malá část Orlí mlhoviny M 16 v souhvězdí Hada.

³⁾ Čti: *indeve(r)*.

Úkoly kosmického dalekohledu

Kosmický teleskop sice svými rozměry nepatří mezi největší dalekohledy světa, ale skutečnost, že pozoruje mimo zemskou atmosféru, z něj vytváří v současnosti vůbec nejvýkonnější astronomický přístroj.

V případě planet ovšem nemůže pořídit tak detailní záběry jejich povrchů jako kosmické sondy, dokáže však často a dlouhodobě sledovat například změny v atmosférách planet. Rozlišovací schopnost dalekohledu, která je na mezi dané fyzikálními zákony, umožní zobrazit disky největších hvězd, prohlédnout si stavbu hvězdokup, sledovat zrod hvězd v oblacích mezihvězdné látky. Nenahraditelný je při studiu vzdálených galaxií. Jedním z jeho hlavních úkolů je stanovení dostatečně přesné hodnoty Hubblovy konstanty, jež nám říká, jak rychle se vesmír rozpíná.

Perspektivy Hubblova kosmického dalekohledu

Zatím je Hubbleův kosmický dalekohled mírně za poločasem své činnosti. I kdyby již teď z nějakého důvodu přestal pracovat, jeho přední místo v dějinách astronomie určitě nikdo nezpochybní. A jak běžel čas od první servisní mise v roce 1993? Druhá se uskutečnila v únoru 1997 (vyměnilo se celkem 11 hlavních dílů přístroje), třetí přišla v prosinci 1999: v té době byl kosmický teleskop kvůli poruše posledního gyroskopu uspán a údržba spočívala především ve výměně všech gyroskopů, instalaci nového řídicího počítače a několika dalších pomocných přístrojů.

Když byl kosmický teleskop počátkem roku 2000 znovu uveden do provozu, ukázalo se, že je ve skvělé kondici, určitě lepší než na počátku své činnosti. Čtvrtá servisní mise, která byla vlastně dokončením té předchozí (a proto se často označuje jako mise 3B a ne 4), proběhla v březnu 2002: došlo k výměně již nefunkčního spektrografu, ale zejména byla provedena generální oprava elektrické sítě dalekohledu včetně výměny slunečních baterií. Nyní se teleskop nachází ve zvláštním stavu: v lednu 2004 NASA zveřejnila záměr ukončit veškeré servisní mise k tomuto přístroji, což by znamenalo, že je odsouzen k pomalému zániku, protože kritické součásti mají omezenou trvanlivost. Toto rozhodnutí vyvolalo bouřlivou reakci nejen mezi astronomy, a je proto předčasné předpovídat, jaký bude osud kosmického dalekohledu v nejbližších letech.

Další kosmické dalekohledy

V rámci projektu NASA *Origins* byly do kosmického prostoru dopraveny i další velké dalekohledy, které slouží astronomům: Comptonova⁴⁾ observatoř pro sledování objektů v oboru záření gama, rentgenová observatoř Chandra⁵⁾ a zejména Spitzerův kosmický dalekohled. Tento reflektor o průměru zrcadla 0,85 m je v provozu od poloviny roku 2003 a slouží k pozorování v infračerveném oboru spektra (na vlnových délkách od 3 do 180 μm).

Už nyní se připravují projekty kosmických dalekohledů další generace. V návrzích najdeme reflektory, jejichž primární zrcadla o průměru 6 až 8 metrů budou zhotovena buď z jednoho kusu, nebo z několika menších segmentů. Teleskopy by měly být vyneseny na dráhu vysoko nad Zemí, nebo na dráhu kolem Slunce. Půjde-li vše podle našich současných představ, bude kosmický dalekohled nové generace fungovat v roce 2007.

⁴⁾ Čti: *komptonova*, podle amerického fyzika Athura Comptonova. Observatoř pracovala v letech 1991 – 2000, již neexistuje.

⁵⁾ Čti: *čandra*, podle indického fyzika Subrahmanyana Chandrasekhara (viz medailon v kap. 6.1).

3. Naše skleněné a rádiové oči



citát

Při slavnostním zahájení provozu pětimetrového dalekohledu na Mount Palomaru, tehdy největšího na světě, zeptali se novináři proslulého amerického astronoma Edwina Hubbla: „Co očekáváte, že naleznete pomocí pětimetrového dalekohledu?“ A Hubble pohotově odpověděl: „Doufám, že nalezneme něco, co jsme vůbec neočekávali.“

Uveřejněno v Kosmických rozhledech 1971, 74.





medailon

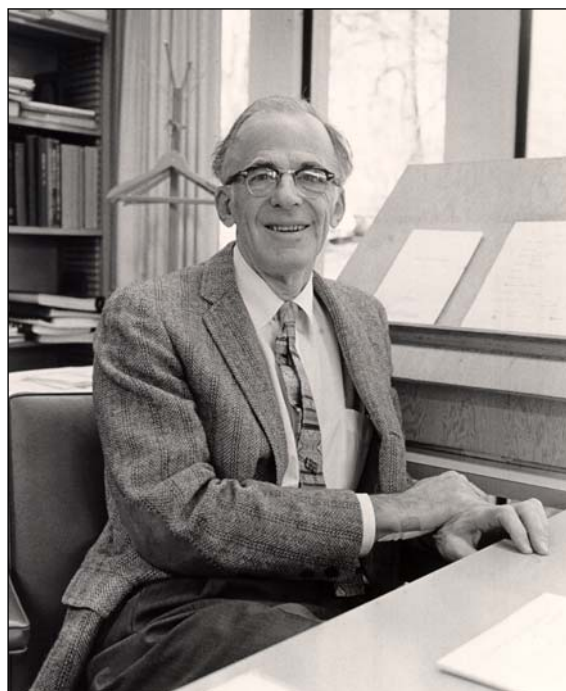
Lyman Spitzer ¹⁾

(26. 6. 1914 – 31. 3. 1997)

V pondělí 31. března 1997 začal pro Lymana Spitzera další normální pracovní týden. Tento 83letý muž, formálně již dávno penzionovaný, pokračoval v úpravách rukopisu své další práce o mezihvězdné látce. Analyzoval v ní, jak nová data z Hubblova kosmického dalekohledu ovlivní teorii, kterou před lety spolu s dalšími vytvářel. Během dopoledne při šálku kávy, v pohodě a uvolněně diskutoval o astronomických novinkách se svými kolegy z astronomického ústavu univerzity v Princetonu, který po více než třicet let až do roku 1979 vedl. Neúnavně pracoval po celý den. Večer, po návratu domů, však náhle zkolaboval a zakrátko zemřel.

Završil se bohatý a plodný život významného amerického astrofyzika. Všichni, kteří jej poznali blíže, o něm hovoří jako o laskavém člověku, uhlazeném gentlemanovi, kterého obdivovali a měli doopravdy rádi. Pro astronomy zůstává Lyman Spitzer příkladem osobnosti s neobyčejně širokým rozsahem zájmů. Zaměřil se na výzkum mezihvězdné látky, laboratorního plazmatu a hvězdokup, a ve všech třech oborech dosáhl významných úspěchů. Monografie, vzešlé z tohoto výzkumu, patří dodnes mezi základní učebnice. Široká veřejnost zná však tohoto vědce z jiného úhlu pohledu: pro ni se stal duchovním otcem velkého kosmického dalekohledu.

S nápadem vybudovat kosmický dalekohled přišel Lyman Spitzer poprvé v roce 1946; tenkrát návrh zaujal sotva několik lidí. Spitzer se však své myšlenky nevzdal. Když doba nazrála, skupina vědců (Spitzer v ní ovšem nechyběl) z Národní akademie věd vypracovala v roce 1962 pro NASA studii o budoucnosti kosmického výzkumu; doporučuje se v ní vývoj velkého kosmického telesko-



¹⁾ Čti: *lajmen spicer*.

3. Naše skleněné a rádiové oči

pu jako logické pokračování amerického programu výzkumu vesmíru. Obdobná zpráva následovala o tři roky později. Brzy poté Národní akademie věd vytvořila komisi v čele se Spitzerem, která měla navrhnout vědecký program pro kosmický dalekohled se zrcadlem o průměru přibližně tři metry.

Zpráva komise byla hotova v roce 1969. Bylo to v době objevu kvasarů, kosmického reliktního záření, neutronových hvězd – zkrátka právě tehdy přicházela další „zlatá éra“ pozemní astronomie. Navzdory mnoha výhodám, jež by přinesl kosmický dalekohled, většina astronomů se pragmaticky věnovala právě těmto novým objevům, které byly výsledkem práce pozemních přístrojů. Jen někteří byli ochotni obětovat svou vědeckou kariéru a po mnoho let usilovně vyjednávat a připravovat tak složité a nákladné zařízení, jako je velký kosmický dalekohled. Lyman Spitzer mezi ně patřil.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (bude zveřejněn v knize *Zlaté století astronomie*, Aventinum Praha).

3. Naše skleněné a rádiové oči



citát

Přijdeme-li na trh, očekáváme, že exotické zboží ze vzdálených míst bude pěkně drahé. Z téhož důvodu jsou astronomové ochotni platit tučné prémie za fotony, které a) mají vlnové délky, neumožňující jim proniknout zemskou atmosférou, nebo b) přicházejí z málo jasných vzdálených objektů.

Donedávna bylo nezbytné budovat stále větší pozemní dalekohledy, jestliže jsme chtěli posunout astronomické obzory směrem k okraji pozorovatelného vesmíru. S příchodem kosmického dalekohledu, jenž dovoluje sledovat slabší objekty než jsou viditelné na Zemi, se situace dramaticky změnila. Tento vývoj uvolňuje cestu pozemské astronomii k tomu, aby využila své schopnosti sbírat fotony poměrně lacino. Kromě toho soudím, že nedávný vývoj výroby dalekohledů s tenkými zrcadly posunul výhody sběru fotonů ve velkém ještě rozhodněji směrem k pozemním observatořím. Podle mého názoru musí pozemní astronomie na tento nový vývoj správně reagovat důrazným využitím své úspornosti.

To znamená, že bychom neměli směřovat ke stavbě nesmírně nákladných pozemních dalekohledů bohatýrských rozměrů. I když stále ještě nejsou k dispozici podrobné inženýrské studie, přece jen mám silné podezření, že azimutálně montované dalekohledy s tenkými zrcadly o průměru kolem tří metrů standardního provedení a vyráběné ve větších sériích by byly nejúspornějšími sběrači fotonů.

Pokud je historie spolehlivým vodítkem, pak je zřejmé, že tyto pozemní „třímetrové dalekohledy za lidovou cenu“ budou velmi zaměstnány studiem záplavy fascinujících objektů, objevených observatořemi na oběžné dráze kolem Země.

Sydney van den Bergh: *IAU Colloquium* č. 54 (1979). Překlad: Jiří Grygar.

Poznámka s odstupem času: už jen s těmi informacemi, které o astronomických dalekohledem máte, jste jistě poznali, že některé názory uvedené v citátu čas překonal, jiné ovšem platí stále. Pokuste se je shrnout do několika bodů!

3.6. Radioteleskopy

V době televize, satelitních přijímačů pro různá použití a mobilních telefonů není nijak těžké vysvětlovat, co to jsou radioteleskopy. Do technických detailů ovšem nepůjdeme, jen se zmíníme o principu jejich činnosti a srovnáme optické a rádiové přístroje, používané v astronomii. Další ponecháme ke studium těm, jimž je elektronika koníčkem.

Stručný popis radioteleskopu

Pro soudobou astrofyziku je typické, že se prudce rozvíjí *neoptická* astronomie. Její historicky nejstarší a nejvýznamnější částí je *radioastronomie*.

Základní přístroj, který radioastronomie používá – radioteleskop – se ovšem svému optickému protějšku podobá jen velmi málo. V radioteleskopu se nikde nevytváří obraz pozorovaného objektu obdobným způsobem jako v optickém dalekohledu; tvorba „rádiového obrazu“ je výsledkem často komplikovaného procesu zpracování.



Největší radioteleskop světa s plně pohyblivou anténou o průměru 100 m, vybudovaný v Effelsbergu v německém Porýní.

3. Naše skleněné a rádiové oči

Hlavními složkami každého radioteleskopu jsou *anténa* a *přijímač*. Anténa zprostředkovává přechod energie elektromagnetické vlny z prostoru do přijímače. Obvykle je sestrojena tak, že maximální reakce přijímače odpovídá směru, do něhož je rádiový dalekohled nastaven, a minimální je v jiných směrech. Antény mají rozmanité tvary: jsou dipólové nebo tvaru rotačního paraboloidu, válce či trychtýře¹⁾.

Problémy s rozlišovací schopností

Velikost sběrných anténních ploch většinou dostačuje k zachycení slabých signálů z kosmických zdrojů. Signál lze zesílit a vhodnými matematickými postupy oddělit od šumu, který vzniká v anténě a přijímači.

Omezujícím faktorem však bývá *rozlišovací schopnost*. Pro dosažení dostatečné rozlišovací schopnosti by měly být antény radioteleskopů co největší²⁾. Jenže jejich rozměry jsou pochopitelně z konstrukčních důvodů omezeny. Proto se rozlišovací schopnost zvyšuje současným sledováním objektu větším počtem radioteleskopů; signály zachycené jednotlivými přístroji musíme ale vhodným způsobem složit. Takto lze v rádiovém oboru dosáhnout dokonce lepší rozlišovací schopnosti než u optických dalekohledů.



Radioteleskopy na kolejnicích ve tvaru třícípé hvězdy, takže lze nastavit vhodnou vzájemnou vzdálenost (Very Large Array, Socorro, USA).

¹⁾ Radioteleskopy nebývají konstruovány pro příjem pouze jediného kmitočtu (vlnové délky), ale celého kmitočtového pásma. Nejkratší vlnová délka, na které může radioteleskop pracovat, je dána přesností, s jakou je zhotovena plocha antény. Obvykle se požaduje, aby odchylky od ideálního tvaru anténní plochy nepřesáhly hodnotu desetiny vlnové délky přijímaného záření.

²⁾ Poznamenejme, že u parabolických antén platí pro rozlišovací schopnost tentýž vztah jako v optickém oboru: rozlišovací schopnost je tím lepší, čím je větší průměr antény a čím je kratší vlnová délka, na níž pozorujeme.

3. Naše skleněné a rádiové oči



Praktika

*„Nač budu potřebovat,“ ptalo se pachole,
„třírohy, čtverouhle, kola, parabole?“ –
„Že potřebné,“ dí mudřec, „musíš nyní věřit,
nač jsou potřebné, poznáš, až svět začneš měřit.“*

Adam Bernard Mickiewicz, spisovatel (1798 – 1855),
překlad Karel Havlíček Borovský

otázky a příklady

Otázka 3.6.1. Srovnáme rozlišovací schopnost klasického rádiového a optického dalekohledu: je-li vlnová délka rádiového záření, přijímaného 100metrovou parabolickou anténou, 10 000krát větší než vlnová délka záření viditelného, bude rozlišovací schopnost tohoto radioteleskopu zhruba stejná jako rozlišovací schopnost optického dalekohledu o průměru objektivu: a) 1 cm; b) 1 m; c) 100 m. (Dříve, než vyznačíte svou odpověď, proveďte krátký výpočet. Teprve když neuspějete, vylučujte evidentně chybné odpovědi.)

Otázka 3.6.2. Proč mohou radioastronomové pozorovat i ve dne, zatímco „optičtí“ astronomové jsou většinou odkázáni jen na pozorování v noci?

Otázka 3.6.3. Kolikrát slabší objekty můžeme (teoreticky) sledovat radioteleskopem, jehož parabolická anténa má průměr 300 m, než podobným přístrojem s anténou o průměru pouhých 50 m?

3. Naše skleněné a rádiové oči



medailon

Grote Reber

(22. 12. 1911 – 20. 12. 2002)

Janského první radioastronomická pozorování v odborné veřejnosti zapadly, ze světa ale úplně nezmizely. Po pročtení jeho článků se mladý a nadšený radioamatér (nyní již elektroinženýr ve firmě Stewart-Warner Comp., která navrhovala radiopřijímače) Grote Reber rozhodl, že bude pokračovat v Janského pozorováních. Bylo mu jasné, že potřebuje speciální zařízení: parabolický reflektor, který by v ohnisku soustřeďoval rádiové záření a pracoval podobně jako optický zrcadlový dalekohled.

Takový projekt už není amatérskou záležitostí. Po nakreslení plánů proto Reber kontaktoval American Bridge Company. Ti požadovali 7000 dolarů, což byla pro mladého člověka uprostřed velké hospodářské krize neúměrně vysoká cena. Nezbyvalo než si poradit sám.



3. Naše skleněné a rádiové oči

Tak se dvěma pomocníky začal Reber na svém pozemku ve Wheatonu (ve státě Illinois) zvedat k nebi divně vyhlížející konstrukci. Zrcadlo mělo průměr téměř deset metrů a ohniskovou vzdálenost šest metrů. Skládalo se ze 45 plátů kovu, které byly přišroubovány na 72 dřevěných trámů, jež vybíhaly od středu k okraji antény a svým tvarem modelovaly parabolickou plochu. Celý přístroj se mohl pohybovat jen v severojižním směru, tak jako kdysi tzv. pasáží přístroje, používané astronomy k přesnému zjišťování poloh hvězd.

Je až neuvěřitelné, jaké reakce tato stavba vyvolala. Námítky měli zejména sousedé. Když přišlo, reflektor pochopitelně zachycoval velké množství vody, jež se pak řinula dolů centrálním otvorem v anténě. Tak vznikla fáma, že přístroj má něco společného s počasím a že ho nepříznivě ovlivňuje. A když jeden letoun začal mít potíže s motorem právě při přeletu antény, bylo těžké lidem vymluvit, že to není vojenský projekt, jenž má ničit letadla. Silně to připomíná potíže, které měl český vynálezce bleskosvodu Prokop Diviš v Příměticích, kde ho místní vesničané obvinili, že jeho zaří-

zení způsobilo dlouhotrvající sucho – jenže událost s Divišovým bleskosvodem se stala o dvě stě let dříve.

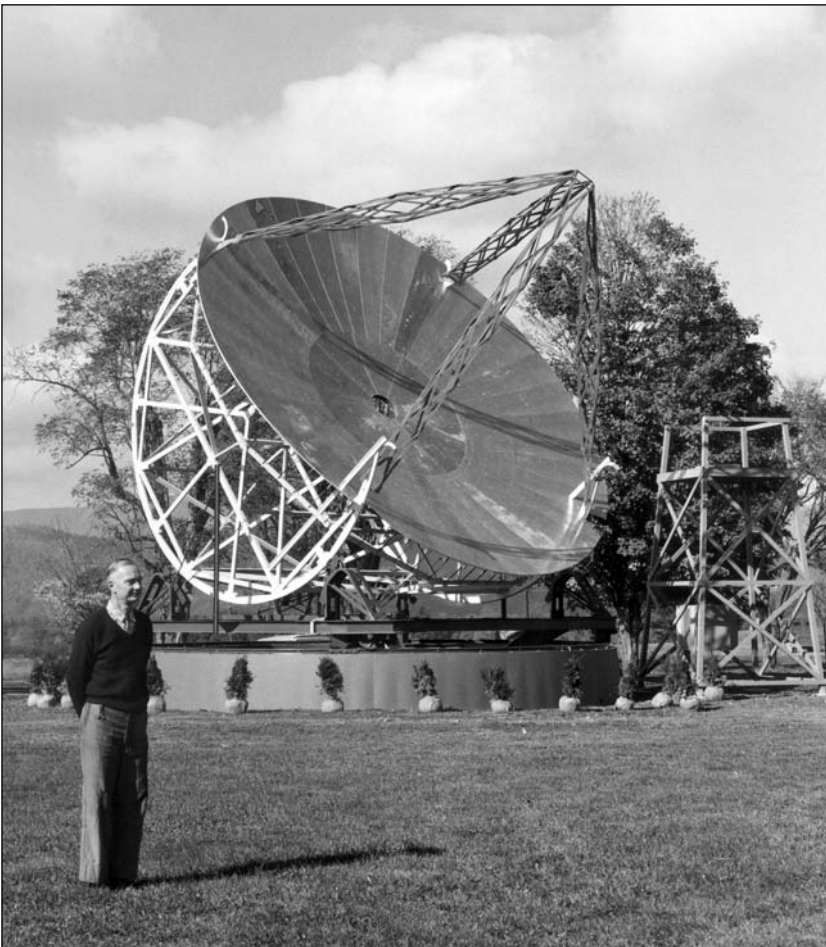
V září 1937, po čtyřech měsících tvrdé práce, byl Reber se svými pomocníky hotov. Radioteleskop přišel na 1300 dolarů, což bylo víc než tehdejší cena auta. Á propos automobil: zapalování aut natolik rušila rádiová pozorování, že je Reber mohl provádět jen od půlnoci do rána. Přes den pracoval ve svém zaměstnání, pak šel brzy spát, aby se od půlnoci mohl věnovat radioastronomickému výzkumu. Ryzí amatér.

Zpočátku neměl úspěch. Zvolil si vlnovou délku 9 centimetrů, ale nic nezachytil. V létě 1938 přešel na 33 centimetrů – zase nic. Úspěch se dostavil, až když si na jaře 1939 zvolil vlnovou délku 1,87 metru. Postupně vznikala první rádiová mapa Mléčné dráhy s několika výraznými zdroji záření, ne nepodobná té, jež v 18. století sestavil William Herschel. Kromě zdroje ze souhvězdí Střelce, který pozoroval již Jansky, objevil Reber další v souhvězdích Labutě, Kasiopeji, Velkého psa a Lodní zádi.

Když v roce 1940 Grote Reber své výsledky zveřejnil, astronomové je opět (až na výjimky) pominuli. Tentokrát také proto, že začala světová válka a mnozí se přeorientovali na vojenský výzkum. Téměř po deset let byl tedy Reberův teleskop jediným přístrojem svého druhu na světě a on sám byl jediným radioastronomem na této planetě.

V roce 1943 zaměřil svůj přístroj na Slunce. Tomuto možnému zdroji rádiového záření se zatím nevěnoval, protože přes den pracoval u firmy. Zachytil sluneční rádiové záření, i když ne jako první. Po válce se dověděl, že britští vědci je registrovali již o rok dříve. Osádky vojenských radarů bránících Británii před nálety Němců se totiž původně domnívaly, že je to záměrné rušení jejich přístrojů protivníkem. S ohledem na vojenský význam objevu však nemohla být tato zpráva během války zveřejněna.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (příběh „Jediný radioastronom na světě“ z připravované knihy *Zlaté století astronomie*, Aventinum Praha).



3. Naše skleněné a rádiové oči



citát

Nikdy, nikdy nebýt průkopníkem velké vědy!

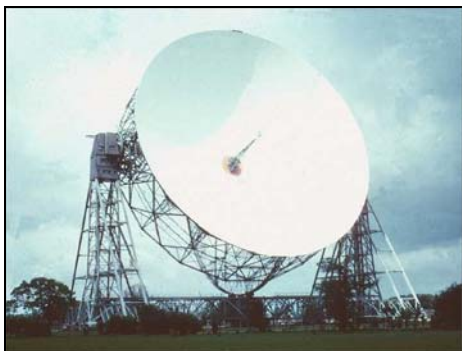
Na podzim roku 1945 přijel Bernard Lovell se dvěma trajlery naplněnými bednami s radarem a pojezdným dieselagregátem do Jodrell Banku ¹⁾, 35 kilometrů jižně od Manchesteru. Se svým kolegou J. A. Cleggem tak vlastně založili meteorickou radarovou astronomii. Koncem roku 1947 již zde měli nepohyblivou parabolickou anténu o průměru 66 metrů, kterou si sami postavili. Na jaře 1952 pojal Lovell záměr na stavbu plně pohyblivého 76metrového paraboloidu, a našel i šéfkonstruktéra H. C. Husbanda, jenž byl ochoten přístroj zhotovit. Náklady na stavbu ve výši 932 400 dolarů schválila státní organizace DSIR..



¹⁾ Čti: džodrel benku.

3. Naše skleněné a rádiové oči

V září 1952 se začalo s výstavbou, ve kterou všichni skládali velké naděje. Avšak v únoru 1958, když byl rádiový dalekohled již v provozu, předseda univerzitní rady Lovella decentně upozornil, že vláda mu může předsat k úhradě 900 000 dolarů, a že v případě nedobytnosti mu hrozí vězení. Smutnou skutečností byly totiž celkové výdaje na radioteleskop ve výši 1,8 milionu dolarů, takže projekt se utápěl v dlužích kolem 730 000 dolarů!



Mark 1 – radioteleskop v Jodrell Banku v roce 1965 a nyní.



Lovell a radioteleskop však byli zachráněni šťastným příčiněním první umělé družice z října 1957. Radioteleskop byl urychleně adaptován na radiolokátor. Ukázalo se, že je to jediné zařízení v Británii, jež je schopno zaznamenat nosnou raketu družice. Britský tisk rychle zapomněl na svou předchozí nevráživost vůči Lovellovi a ministerský předseda Macmillan se zmínil v Dolní sněmovně „ o našem radioteleskopu“. Jak hořce se asi Lovell usmíval, když slyšel tuto poznámku!

G. C. McVittie, *Science* 162 (1968), str. 886 (překlad: Jiří Grygar, mírně zkráceno a upraveno).

3.7. Radiolokace v astronomii

Rádiové záření z objektů dalekého vesmíru sledujeme pomocí radioteleskopů většinou jen pasivně. Tělesa sluneční soustavy však můžeme zkoumat i *radiolokačním* způsobem, tedy aktivně. Tento způsob pozorování se rozvíjí od 60. let dvacátého století, i když první úspěšná radiolokace Měsíce je z roku 1946. Teprve o dvacet let později se podařil radiolokační kontakt s Merkurem a Venuší a zjistila se přesná doba rotace těchto planet. Uveďme si, na jakém principu takový radar pracuje a co nového astronomické radary poskytly. Není toho málo.

Dopplerův jev

Světlo, které vysílá nějaký zdroj, si můžeme představit jako řadu kulových vlnoploch, rozbíhajících se do okolí. Je-li zdroj světla vůči pozorovateli v klidu, je doba mezi příchody jednotlivých vrcholů vln k pozorovateli stejná jako doba mezi jejich odchody ze zdroje.

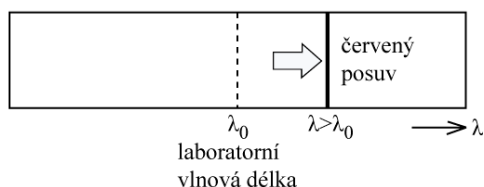


Všechny velké radioteleskopy jsou schopny nejen pasivně přijímat rádiové záření z vesmíru, ale pracují též aktivně – jako radiolokátory.

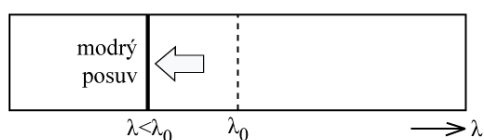
3. Naše skleněné a rádiové oči

Když se však zdroj od pozorovatele *vzdaluje*, doba mezi příchody dvou po sobě následujících vrcholů vlny je *delší* než doba mezi jejich odchody ze zdroje, protože druhý vrchol vlny musí urazit poněkud delší dráhu než vrchol předcházející. Z hlediska pozorovatele má vlna vysílaná zdrojem *delší vlnovou délku*, než kdyby byl zdroj v klidu. Při přibližování zdroje se vlnová délka naopak zkracuje. Jde o *Dopplerův jev*, známý a hojně využívaný v řadě vědních i technických oborů.

vzdalování objektu:



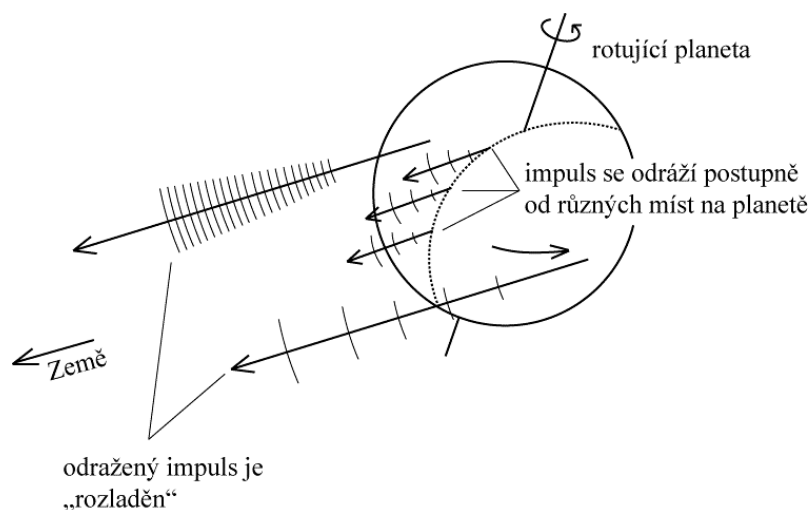
přibližování objektu:



Posun spektrálních čar při vzdalování a přibližování objektu.

Rádiové odrazy od planet

Radiolokátor si představme jako radioteleskop, vybavený nejen přijímačem, ale i vysílačem série krátkých impulsů na určitém kmitočtu. Svazek záření, vysílaný radiolokátorem do vesmíru, bývá sice poměrně úzký, nicméně v „zorném poli“ radiolokátoru je celý disk planety. K planetě dorazí prakticky rovinná vlna o jediném kmitočtu.



Dopplerovský posuv a časové zpoždění impulsu odraženého od rotující planety.

Když planeta vůči Zemi *nerotuje* (nebo když její osa rotace leží poblíž spojnice Země-planeta), nebude mít odražený a navracený signál tvar krátkého impulsu, ale bude poněkud prodloužen v ča-

3. Naše skleněné a rádiové oči

se: odráží se totiž postupně od jednotlivých částí kulové planety a tím dochází k jistému zpoždění části signálu.

Pokud planeta *rotuje*, je signál po odrazu od planety a návratu na Zemi také poněkud „rozladěn“: pozorujeme nejen původní kmitočet, ale i kmitočty trochu odlišné. Je to důsledek Dopplerova jevu, neboť část fotonů se odráží od té poloviny planety, jež se vlivem rotace od nás vzdaluje, další část pak od druhé poloviny, která se k nám přibližuje. Výsledek: původní signál, který měl podobu krátkého impulsu na jediném kmitočtu, se navrací prodloužen v čase i kmitočtu.

3. Naše skleněné a rádiové oči



Než začneš řešit problém, promysli si, co uděláš s výsledkem.

Richard Wesley Hamming, matematik a počítačový expert (1915 – 1998)

otázky a příklady

Otázka 3.7.1. Bude se projevovat Dopplerův jev v případě, že se zdroj světla pohybuje kolmo na spojnici zdroje a pozorovatele?

Otázka 3.7.2. Kosmická sonda odlétá ze sluneční soustavy, stále však vysílá telemetrické údaje a výsledky některých měření. Jaký je kmitočet rádiového záření, které od sondy přijímáme, ve srovnání s kmitočtem, na kterém pracuje palubní vysílač sondy? a) je menší (nižší); b) je stále stejný; c) nelze posoudit, protože to záleží na režimu, v jakém vysílač pracuje.

Otázka 3.7.3. Je možné využitím Dopplerova jevu dokázat, že Země, když její pohyb poměříme vzhledem ke vzdáleným hvězdám, obíhá kolem Slunce?

Otázka 3.7.4. Jistě „vše souvisí se vším“; neberte však toto přísloví doslova a pokuste se najít, které pojmy, jež uvádíme, spolu *bezprostředně* souvisejí. a) foton, ionosféra, Dopplerův jev; b) Dopplerův jev, radiolokace, radiální rychlost; c) radiální rychlost, ultrafialové záření, energie; d) foton, radiální rychlost, teplota.

3. Naše skleněné a rádiové oči



doplňěk



Dopplerův jev

Poprvé byl formulován Christianem Dopplerem v roce 1842, když byl profesorem matematiky na pražské technické univerzitě. Odvodme jeho matematické vyjádření.

Vrcholy kulových vlnoploch vycházejí ze zdroje v pravidelných časových intervalech s periodou T . Jestliže se zdroj vzdaluje od pozorovatele radiální rychlostí v_r ($v_r > 0$), pak během doby mezi vysláním dvou po sobě jdoucích vrcholů se zdroj posune o vzdálenost $v_r T$. Tím ovšem vzroste čas potřebný k tomu, aby se vrchol dostal ze zdroje k pozorovateli, o hodnotu $v_r T/c$, kde c je rychlost šíření světla. Čas T' , který uplyne mezi příchody po sobě jdoucích vrcholů vlny k pozorovateli, je tedy roven

$$T' = T + v_r/c.$$

Vlnová délka λ vyslaného světla je

$$\lambda = c T,$$

vlnová délka λ' světla přicházejícího k pozorovateli

$$\lambda' = c T'.$$

Pro poměr vlnových délek λ' a λ tedy dostáváme

$$\lambda'/\lambda = T'/T = 1 + v_r/c.$$

Tytéž úvahy platí i v případě přibližování zdroje k pozorovateli, jen $v_r < 0$.

3. Naše skleněné a rádiové oči



úloha k zamyšlení

Kuriózní dopravní přešupek

Vypráví se tento vtip: řidič vjel ve městě do křižovatky na červenou. Zastaví ho dopravní policista a uděluje mu pokutu na nerespektování světelných signálů. Řidič se však hájí tím, že červené světlo vůbec neviděl, neboť se mu vlivem Dopplerova jevu změnilo na zelené. Strážce pořádku, znalý fyziky(!), mu proto tento přešupek prominul, ale vzápětí mu udělil pokutu za nedodržení maximální rychlosti v uzavřené obci. Takže – jaké rychlosti by řidič musel dosáhnout, aby situace, kterou uvádí, skutečně nastala?



3. Naše skleněné a rádiové oči

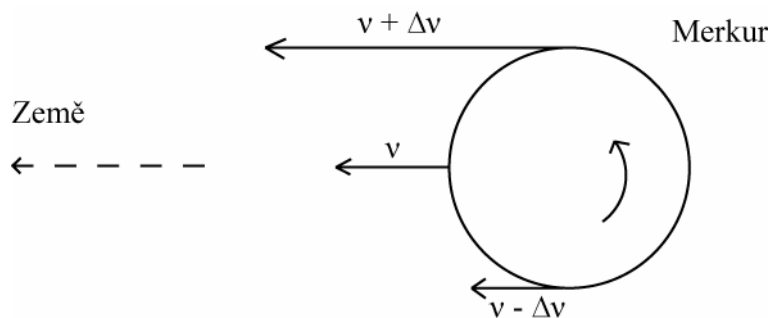


praktikum

Rotace Merkuru

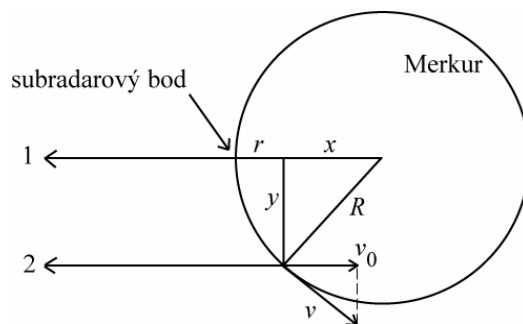
Rychlost rotace planety je důležitý fyzikální parametr, podobně jako hmotnost tělesa, existence atmosféry, magnetického pole apod. U Merkuru se na základě vizuálních pozorování Schiaparelliho (1889) a Lowella (přelom 19/20. století) dosti dlouho soudilo, že rotace planety je *vázaná*, tj. jedna otočka je rovna periodě oběhu kolem Slunce (88 dnům). Spektroskopicky se zjistilo, že rotace Merkuru je pomalá, avšak přesnou hodnotu doby rotace nebylo možno takto určit. Teprve *radarová pozorování* z 60. let dvacátého století přispěla k vyřešení problému: doba rotace Merkuru je jen $2/3$ oběžné periody, tj. necelých 59 dní. Ověříme si na základě radarových záznamů tuto hodnotu.

Jak radarová metoda pracuje? V radarovém svazku, vyslaném ze Země, je celý kotouč planety. Odražený signál, který byl původně ostrým impulsem na jedné frekvenci, se vrací rozložený v *čase* i *frekvenci*. Na obr. 1 vidíme, jak vzniká rozklad ve frekvenci. Je dán dopplerovským posuvem po odrazu od rotující planety. Rozklad v čase je způsoben tím, že se nejdříve odrazí signál v tzv. *subradarovém bodě* a později v kruhových prstenech soustředných kolem subradarového bodu (obr. 2).



Obr. 1. Rozklad signálu ve frekvenci.

3. Naše skleněné a rádiové oči



Obr. 2. Rozklad signálu v čase.

Pro časové zpoždění Δt signálu 2 vůči 1 platí

$$(1) \quad \Delta t = 2 r/c \text{ (neboť } r = c \Delta t/2),$$

kde c je velikost rychlosti světla. Z obr. 2 plyne

$$(2) \quad x = R - r, \quad y = \sqrt{(R^2 - x^2)},$$

kde $R = 2420$ km je poloměr Merkuru. Složku rychlosti v_0 , kterou se od nás vzdaluje (nebo k nám přibližuje) právě ta část povrchu, od níž se signál odrazil, určíme z frekvenčního posunu Δv na základě Dopplerova jevu:

$$(3) \quad 2 v_0/c = \Delta v/v.$$

Řeckým písmenem v je označena frekvence vyslaného impulsu. Z podobnosti trojúhelníků (obr. 2) plyne

$$(4) \quad v/v_0 = R/y,$$

kde v je hledaná rychlost rotace. Perioda rotace P je pak rovna

$$(5) \quad P = 2 \pi R/v.$$

Poznámka: dokážete vysvětlit, proč je ve vztahu (3) uveden koeficient 2?

Pracovní postup:

1. Změřte frekvenční posun Δv na obr. 3: tužkou si na záznamu pro $\Delta t = 120 \mu\text{s}$ (a potom i na dalších třech) vyznačte body, kde úroveň signálu začíná klesat k základní úrovni. Určete (bez ohledu na znaménko) velikost frekvenčního posunu pro každý z těchto bodů, vypočítejte průměrnou hodnotu tohoto posunu a zapíšte ji do tabulky 1.

2. Pomocí vztahů (1) až (5) vypočítejte postupně veličiny r , x , y , v_0 , v a P v jednotkách, uvedených v tabulce 1. Výsledky zapisujte postupně do tabulky 1¹⁾. Poznámka: frekvence $v = 430$ MHz, 1 den = 86 400 s.

3. Hodnoty P získané pro čtyři různá časová zpoždění zprůměrujte a srovnajte s přesnou hodnotou periody rotace, získanou sondou Mariner 10: $58,646 \pm 0,005$ dne ($2/3$ oběžné periody $87,9693$ dne = $58,6462$ dne).

4. Ze známé velikosti rychlosti světla $c = 299\,790$ km s^{-1} a ze vzdálenosti Merkuru od Země (vypočítáme ji ze 3. Keplerova zákona) lze velmi přesně určit velikost astronomické jednotky v kilometrech. Vypočítejte ji, když víte, že v den pozorování 17. 8. 1965 nastala tato konfigurace Slunce, Země a Merkuru: Merkur

¹⁾ Případně si napište krátký program pro výpočet; při jeho ladění se ovšem bez postupného výpočtu uvedených veličin neobejdete.

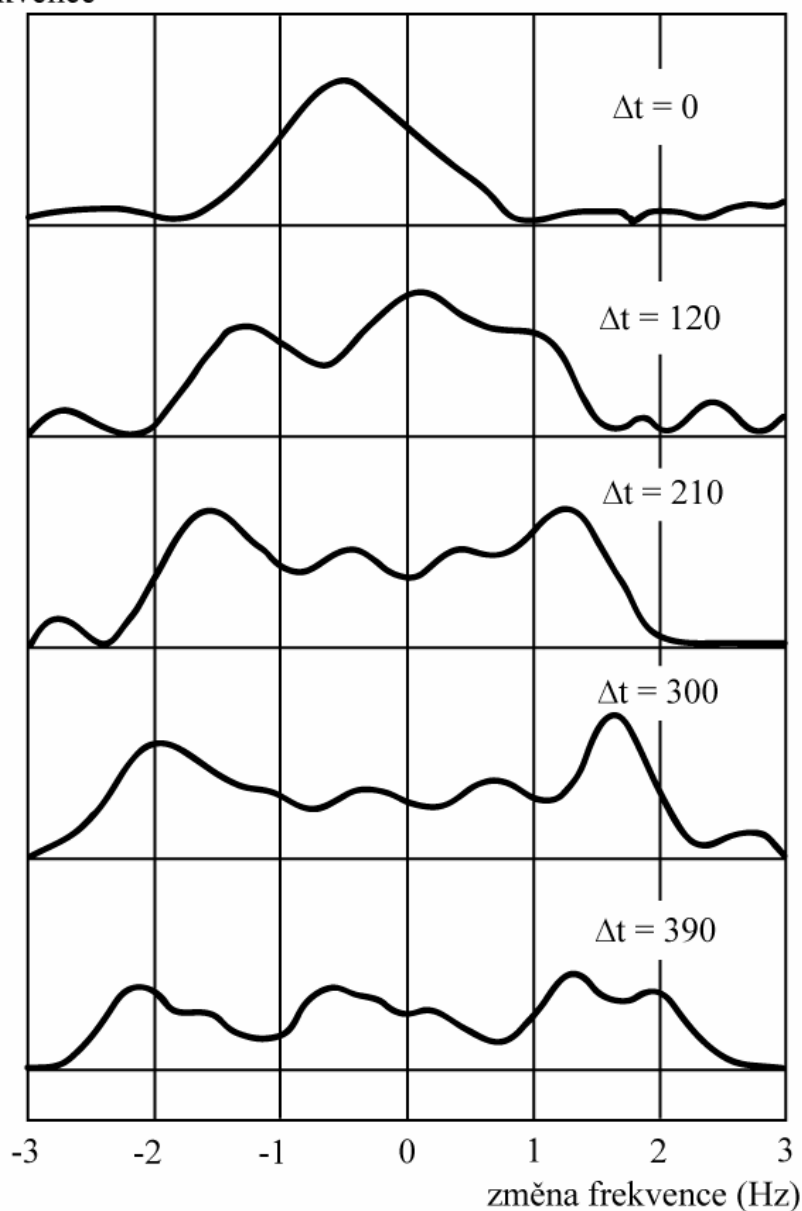
3. Naše skleněné a rádiové oči

byl 0,3977 AU od Slunce, Země 1,0116 AU od Slunce a úhel Slunce-Země-Merkur byl roven 4° . Vyslaný impuls z radaru se po odrazu od Merkuru vrátil zpět na Zemi za 616,125 s.

Praktikum bylo připraveno s použitím článku D. B. Hoffa a G. Schmidta: *Laboratory Exercises in Astronomy – the Rotation of Mercury* (Sky and Telescope 58, 1979, č. 3, 219-221).

Vstupní data, výsledky:

přijatý tok záření
dané frekvence



Obr. 3. Záznamy radarových signálů odražených od Merkuru (Δt uvedené u každého záznamu je mikrosekundách). Pozorování je ze 17. 8. 1965, radioteleskop Arecibo, Portoriko (jeho snímek používáme jako „logo“ této kapitoly). Frekvence vyslaného impulsu byla 430 MHz.

3. Naše skleněné a rádiové oči

Tabulka 1

Δt (μs)	Δv (Hz)	r (km)	x (km)	y (km)	v_0 (km s^{-1})	v (km s^{-1})	P (dny)
120							
210							
300							
390							
aritmetický průměr:							

Podle bodu 4: délka 1 AU = _____ km.

3. Naše skleněné a rádiové oči



úloha k zamyšlení

Vzdálenost Měsíce

Při laserovém určování vzdálenosti Měsíce od Země se měří doba t , která uplyne mezi vysláním krátkého záblesku laserovým vysílačem, a příjmem tohoto paprsku po odrazu od měsíčního retroreflektoru. Vzdálenost pak činí $d = 0,5 ct$, kde c je velikost rychlosti šíření světla ve vakuu. K experimentu použijeme rubínový laser, který vysílá monochromatické záření vlnové délky $\lambda = 694,33 \text{ nm}$ s energií $E = 3 \text{ J}$ v jednom záblesku. Zjistěte: a) jak „dlouhý“ je jeden záblesk (v metrech), jestliže jeho vyslání trvá 3 ns ? b) na kolik centimetrů přesně lze změřit vzdálenost, jestliže aparatura dokáže měřit čas mezi vysláním a návratem paprsku s přesností 10^{-10} s ? c) kolik fotonů n je vysláno v jednom záblesku?



3. Naše skleněné a rádiové oči



medailon

Christian Andreas Doppler

(29. 11. 1803 – 17. 3. 1853)

Christian Doppler se narodil v Salcburku v rodině uměleckého kameníka, maturoval v rakouském Linci a na doporučení profesora matematiky ze salzburského lycea, jenž objevil jeho matematické nadání, šel studovat na polytechniku do Vídně (1822–1825). Dostalo se mu inženýrského vzdělání, ale i zběhlosti v matematice a fyzice. Doppler, který byl vynikajícím studentem, se navíc zajímal také o astronomii. Po absolutoriu na polytechnice se vrátil do Salcburku jako profesor tamějšího lycea, ale současně „dálkově“ studoval filozofickou fakultu vídeňské univerzity, kde se věnoval klasickým i moderním jazykům, vyšší matematice, mechanice a astronomii. Svá studia na univerzitě ukončil

v roce 1829 a stal se pak asistentem matematiky na vídeňské polytechnice.

Zde publikoval své první vědecké práce z matematiky, v nichž však kromě geniálních postřehů bylo i nemálo nepřesností a zjevných omylů. Brzy se však začal věnovat také fyzice a úvahám na pomezí fyziky a filozofie. Ač zaměřením spíše teoretik začal vymýšlet nové měřicí přístroje a pomůcky, od cyklografu na kreslení oblouků kružnic libovolného poloměru až po přístroj, měřící tlak páry v kotli lokomotivy podle výšky tónu vydávaného parní píšťalou. První práce, týkající se astronomie, publikoval Doppler v roce 1837.

Po ukončení časově omezené asistentury na vídeňské polytechnice v roce 1833 hledal Doppler trvalejší místo velmi obtížně, takže spíše z nouze přijal roku 1835 místo profesora na stavovské reálce v Praze. Škola připravovala studenty pro pražskou polytechniku a Doppler usiloval přejít na tuto prestižní školu, což se mu podařilo až v roce 1841. Naneštěstí však v té době se nepříliš pevně zdraví profesora Dopplera počalo dále zhoršovat, také pro naprosto nepřiměřené pedagogické povinnosti – například v roce 1847 měl ústně a písemně vyzkoušet 440 studentů!

Jistou protiváhou k této nelidské a málo tvůrčí dřině se stala Dopplerova účast v práci Královské české společnosti nauk, jež zásluhou historika Františka Palackého a matematika Bernarda Bolzana právě tehdy obnovila svou odbornou činnost. Doppler



3. Naše skleněné a rádiové oči

se roku 1840 stal mimořádným členem Společnosti, leč až napodruhé a jen těsnou většinou hlasů (7 proti 5); přesto se však vrhl do díla s neobyčejným nadšením, o čemž lze v tištěných Pojednáních Společnosti nalézt přesvědčivé doklady.

Tak se též stalo, že dne 25. května 1842 přednesl Doppler v dnešním Vlasteneckém sále Karolina v Praze přednášku „O barevném světle dvojhvězd a některých jiných hvězd na nebi“, již se účastnilo pouhých šest členů přírodovědecké sekce Společnosti. Převratná práce, v níž Doppler formuloval princip, dnes nazývaný jeho jménem, vyšla ještě téhož roku v Pojednáních tiskem a stala se základem pro pozdější Dopplerovo světové uznání.

Paradoxně však i tato epochální práce obsahovala zásadní omyl, neboť Doppler chtěl spektrálním posuvem vlnových délek záření hvězd vlivem pohybu hvězdy vůči pozorovateli objasnit rozdílné barvy dvojhvězd, obíhajících kolem společného těžiště. To by však vyžadovalo nerealisticky vysoké rychlosti oběžného pohybu složek dvojhvězdy, téměř srovnatelné s rychlostí světla.

Dopplerův jev byl ve skutečnosti nejprve ověřen v akustice roku 1845 holandským meteorologem Christopherem Buyssem-Balлотem, jenž jako pohybujiící se zdroje zvuku použil skupiny trubačů, kteří stáli na otevřeném železničním voze, taženém parní lokomotivou rychlostí pouhých 30 km/h. Dnes podobný úkaz snadno odhalí i necvičené ucho, když kolem nás projíždí dostatečně rychlý automobil. Správný výklad Dopplerova principu podal roku 1848 francouzský fyzik Armand Fizeau ¹⁾, takže někdy hovoříme o principu Dopplerově-Fizeauově. Princip se postupně uplatnil nejen v astronomii, kde umožňuje určit pohyby planet, hvězd, galaxií i kvasarů ve směru zorného paprsku přímo v kilometrech za sekundu bez ohledu na případně neznámou vzdálenost zdroje záření od nás, ale také v mnoha dalších oblastech fyziky, techniky, medicíny, telekomunikací i dopravy.

Doppler sám dostal mezitím výhodnější místo na lesnické akademii v Banské Štiavnici na Slovensku, takže roku 1847 z Prahy definitivně odchází. Předtím ještě byl v roce 1843 zvolen řádným členem Královské české společnosti nauk a o pět let později se stal členem Císařské akademie věd ve Vídni a čestným doktorem pražské Karlo-Ferdinandovy univerzity. V Banské Štiavnici se věnoval důlní geodézii a geomagnetismu, ale jeho nový elán zmařily boje v revolučním roce 1848, jež postihly naneštěstí právě Banskou Štiavnici. Doppler proto již počátkem roku 1849 přechází do Vídně, kde se v roce 1850 stává prvním ředitelem Fyzikálního ústavu na vídeňské univerzitě. Zápal, s nímž se Doppler pustil do vybudování nového moderního pracoviště, však narušilo vážné nedorozumění s profesorem matematiky téže univerzity, slovenským rodákem Jozefem Petzvaľem (1807–1891). Petzval zaútočil proti Dopplerem objevenému principu matematickými argumenty a tvrdil, že frekvence akustického či optického vlnění nemůže záviset na pohybu zdroje vůči pozorovateli, neboť prý platí fyzikální zákon zachování frekvence! Nemocný Doppler se příliš nedokázal bránit; koncem roku 1852 odjíždí na zotavenou do Benátek, ale zde v předjaří následujícího roku umírá. Na jeho náhrobku v Benátkách čteme nápis díky tomu, kdo „pomocí studia a vědy pronikl hluboko do tajemství přírody“.

Autorem medailonu je Jiří Grygar.

¹⁾ Čti: *fizó*.



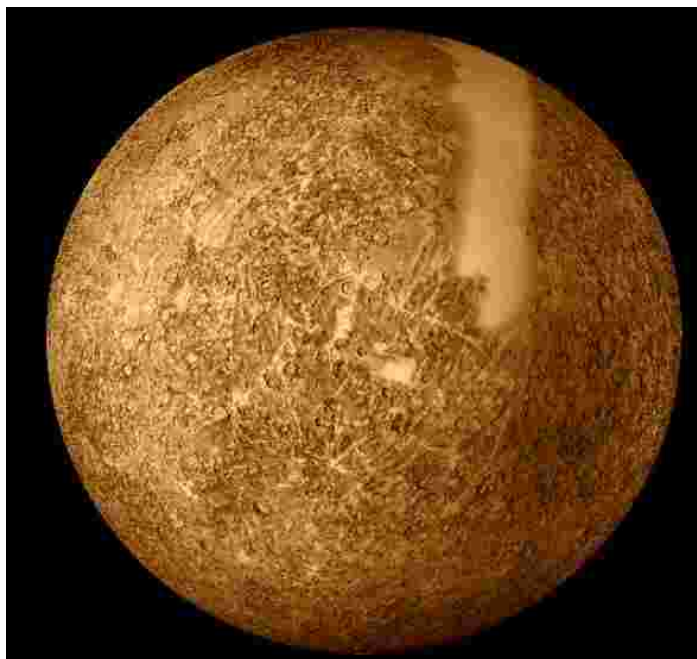
úloha k zamyšlení

Jak je to s rotací Merkuru?

Radiolokace těles sluneční soustavy se rozvíjí od počátku 60. let dvacátého století. První úspěšná radiolokace Měsíce je sice z roku 1946, ale teprve o dvacet let později se podařil radiolokační kontakt s Merkurem a Venuší, což vedlo ke zjištění doby rotace těchto planet. V případě Merkuru to byl obzvláště zajímavý výsledek: celé generace astronomů žily v přesvědčení, že Merkur má *vázanou rotaci* vůči Slunci, tj. jedna otočka je rovna periodě oběhu kolem Slunce (přibližně 88 dnům). Nyní ale víme, že doba rotace Merkuru činí jen $2/3$ oběžné periody, tj. necelých 59 dní. Znamená to, že zatímco planeta dvakrát oběhne kolem Slunce, vůči Slunci se otočí třikrát.

Do doby radarových pozorování bylo pořízeno asi 20 map Merkuru, a to i velmi zkušenými pozorovateli. Právě na jejich základě astronomové tvrdili, že siderická doba oběhu Merkuru $T = 87,97$ dne je rovna siderické době rotace P . Jak je to možné? Pokuste se tento paradox vysvětlit, když víte, že ve skutečnosti siderická doba rotace doba $P = 87,97 \cdot 2/3 = 58,65$ dne.

Drobná nápověda: Merkur ze Země můžeme sledovat jen v určitých obdobích okolo maximálních východních či západních elongací. Ty se opakují s periodou S , což je synodická oběžná doba Merkuru. Vypočítejte ji, a také zjistěte délku slunečního dne R na Merkur (ověřte si, zda skutečně $R = 2T = 3P$). Co když problém souvisí se skutečností, že periody S , R a P jsou shodou okolností v poměru malých celých čísel?



4.1. Jak je to jasné?

Informace o tom, jak jsou hvězdy jasné, patří mezi nejstarší vědecká data na světě. Astronomové z historických důvodů používají zcela jiné názvosloví než fyzikové, kteří také studují, jak různé objekty vyzařují. Aby nedocházelo ke zmatkům, snažte se přesně pochopit základy astronomické fotometrie. V astronomické literatuře se, bohužel, stále uvádějí i jiné, nesprávné a navzájem si odporující definice a tvrzení, takže se vám určitě vyplatí nyní zvýšit pozornost.

„Velikosti“ hvězd

Astronomie se může pochlubit mnoha prvenstvími, a toto je jedno z nich: v díle Claudia Ptolemaia *Almagest* z 1. století n.l. je uveřejněn nejstarší soubor fotometrických dat. Celkem 1022 hvězd je zde roztríděno do šesti skupin: nejjasnější jsou hvězdy „první velikosti“, nejslabší ještě okem viditelné „šesté velikosti“.



Tímto na první pohled prazvláštním rozdělením se nevědomky dosáhlo toho, že při pozorování hvězd dvou sousedních „velikostí“ (například první a druhé, čtvrté a páté) máme pocit, že ony slabší hvězdy jsou „stejným dílem slabší“ než příslušné jasnější hvězdy. Tak byla už ve starověku vytvořena stupnice, která respektuje způsob vnímání světla našima očima a zpracování informace moz- kem.

4. Všechna kosmická tělesa září

Jasnost a hvězdná velikost

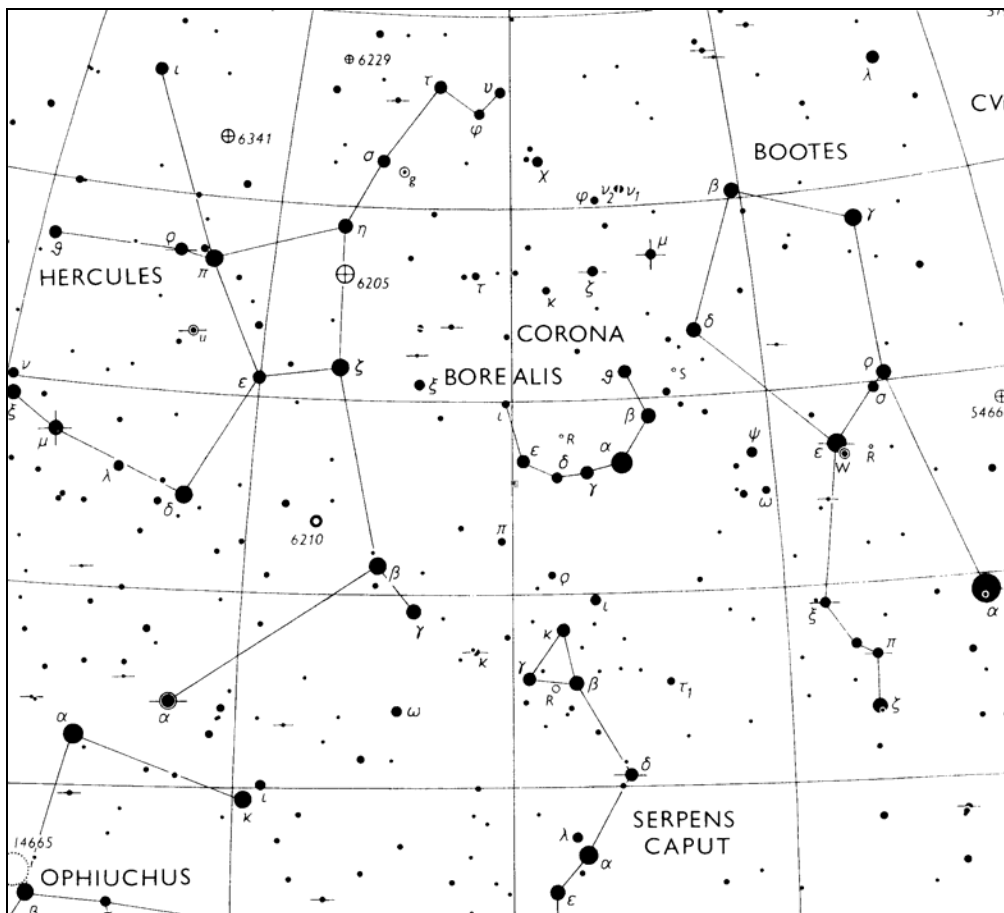
Moderní fyzikální definice fotometrických pojmů používaná astronomy vychází sice ze staré terminologie, dává jí však přesný obsah. Jedním ze základních pojmů je *jasnost*. Co označuje?

Jasnost hvězdy ¹⁾ je osvětlení, které tato hvězda vyvolává v místě, kde je pozorovatel, přičemž se ještě předpokládá, že mezi ní a pozorovatelem není zemská atmosféra (to je zajisté umělý předpoklad, ale nutný; při přesných měřeních se rušivý vliv našeho ovzduší výpočtem odstraňuje). Fyzikální jednotkou jasnosti je lumen na čtverečný metr.

V astronomii se zpravidla místo jasnosti používá veličina z ní odvozená – *hvězdná velikost*. Je definována takto:

$$m = -2,5 \log (j/j_0).$$

Písmenem m je označena hvězdná velikost objektu (hvězdy), j je jasnost objektu a j_0 je jasnost objektu, který má nulovou hvězdnou velikost (takový objekt způsobí osvětlení $2,54 \cdot 10^{-6}$ luxů). Jednotkou hvězdné velikosti je *magnituda* (zkráceně mag).



Na každé mapě hvězdné oblohy průměr kotoučku hvězdy vyjadřuje, v jakém intervalu hvězdných velikostí se daný objekt nachází (ukázka z *Malého atlasu hvězdné oblohy*, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

¹⁾ Pozor na záměnu pojmu jasnosti s jinými fotometrickými veličinami, jako jsou například *jas* nebo *svítivost*. Poznamenejme, že fyzikové veličinu *jasnost* nepoužívají, protože ji nepotřebují, je to tedy (v oblasti vědeckých termínů) záležitost ryze astronomická.

4. Všechna kosmická tělesa září

Všimněte si, že hvězdná velikost je definována tak, že *zmenšuje-li se* hvězdná velikost, jasnost objektu (například hvězdy) *roste*. Tímto způsobem astronomové navázali na starobylé vyjadřování, pocházející už od Ptolemaia.

Veličina a její jednotka

Hvězdná velikost je *fyzikální veličina*, magnituda je *název její jednotky*. Tato slova nemůžeme libovolně zaměňovat, i když se tak v astronomické literatuře bohužel často děje. Řekneme-li například „hvězda 8. magnitudy“, je to stejně nesmyslné jako vyjádřit výšku budovy slovy „dům jedenáctého metru“. Můžeme však použít vyjádření, že jde o „hvězdu osmé velikosti“. Tím se ovšem blížíme starověkému vyjadřování toho, jak jsou hvězdy jasné, a myslíme tím, že hvězdná velikost oné hvězdy je v rozmezí 7,5 až 8,5 magnitudy²⁾.

Hvězdné velikosti některých objektů

Uveďme si pro srovnání hvězdné velikosti některých kosmických objektů. Čísla se pochopitelně neučte z paměti, ale o to víc srovnávejte.

<i>Kosmický objekt</i>	<i>Hvězdná velikost</i>
Slunce	-26,7 mag
Měsíc v úplňku	-12,7 mag
Venuše při největší jasnosti	-4,7 mag
Sirius	-1,5 mag
Vega	0,0 mag
nejslabší hvězdy viditelné pouhými očima	6 mag
nejslabší hvězdy pozorovatelné triedrem	asi 10 mag
nejslabší objekty pozorovatelné dalekohledem na Zemi	asi 28 mag
nejslabší objekty pozorovatelné kosmickým dalekohledem	asi 30 mag

Absolutní jasnost

Jasnosti hvězd, o nichž jsme dosud pojednávali, jsou vztaženy k pozorovateli nacházejícím se na Zemi. Hvězdy jsou však od nás různě daleko, takže pouhým porovnáním jasností, aniž bychom vzali v úvahu *vzdálenosti* hvězd, nemůžeme určit, jak mnoho hvězdy září (tedy jaké jsou jejich *zářivé výkony*). K takovému porovnání zářivých výkonů musíme „přemístit“ pozorovatele do jisté dohodnuté vzdálenosti. Ve hvězdné astronomii se používá vzdálenost 10 parseků. Jasnost, kterou by hvězda měla, kdybychom ji sledovali z této vzdálenosti, se nazývá *absolutní jasnost* hvězdy. Obdobně zavádíme pojem *absolutní hvězdná velikost*.

²⁾ Stupnice hvězdných velikostí je nekonečná číselná řada, tedy existují i *záporné* hvězdné velikosti. Z definice hvězdné velikosti přímo plyne, že je-li jasnost nějakého objektu *100krát* menší než jasnost jiného objektu, činí rozdíl hvězdných velikostí *přesně 5 magnitud* (rozdíl jasností dvou objektů lišících se jednu magnitudu je pátá odmocnina ze sta, čili 2,512...).

4. Všechna kosmická tělesa září

Mezi pozorovanou hvězdnou velikostí m a absolutní hvězdnou velikostí M platí převodní vztah

$$M = m + 5 + 5 \log \pi = m + 5 - 5 \log r,$$

kde π je paralaxa hvězdy (v úhlových vteřinách), r je vzdálenost (v parsecích). Přesvědčte se, že po dosazení $r = 10$ pc je $M = m$. Rozdíl pozorované a absolutní hvězdné velikosti ($m - M$) označujeme jako *modul vzdálenosti*.

$$m - M = 5 \log r - 5$$

modul vzdálenosti

$(m - M)$	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	[mag]
vzdálenost r	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	[pc]
			1 kpc			1 Mpc				1 Gpc	

Modul vzdálenosti.

Když astronomové hovoří o barvách

Dosud jsme mlčky předpokládali, že hvězdné velikosti jsou odvozeny z osvětlení ve vizuální části spektra. Může tomu však být také jinak: filtrem nebo receptorem záření vymežíme pouze *část spektra* (dokonce nemusí jít o část vizuální oblasti spektra, ale třeba o infračervenou). Pak hovoříme o měření hvězdných velikostí v tzv. *barvách*.

Je-li těchto „barev“ více, jedná se o *barevný systém*. Když u hvězdy změříme hvězdnou velikost v několika barvách, můžeme vypočítat i její *barevný index*: ten je roven *rozdílu* hvězdných velikostí v barvě s kratší vlnovou délkou a delší vlnovou délkou³⁾.

Dnes se v astronomii běžně používá několik desítek různých barevných systémů. Jeden z nejrozšířenějších (a také jeden z nejdéle používaných) je *barevný systém UBVI*. Zkratka napovídá, kterou část spektra tento systém pokrývá: U (ultraviolet) – ultrafialovou, B (blue) – modrou, V (visual) – žlutozelenou (podobá se, i když přesně neodpovídá, spektrální citlivosti oka). Na systém UBVI navazují v dlouhovlnné oblasti spektra barvy R (red) – červená, I (infrared) – infračervená atd. (systém UBVI).

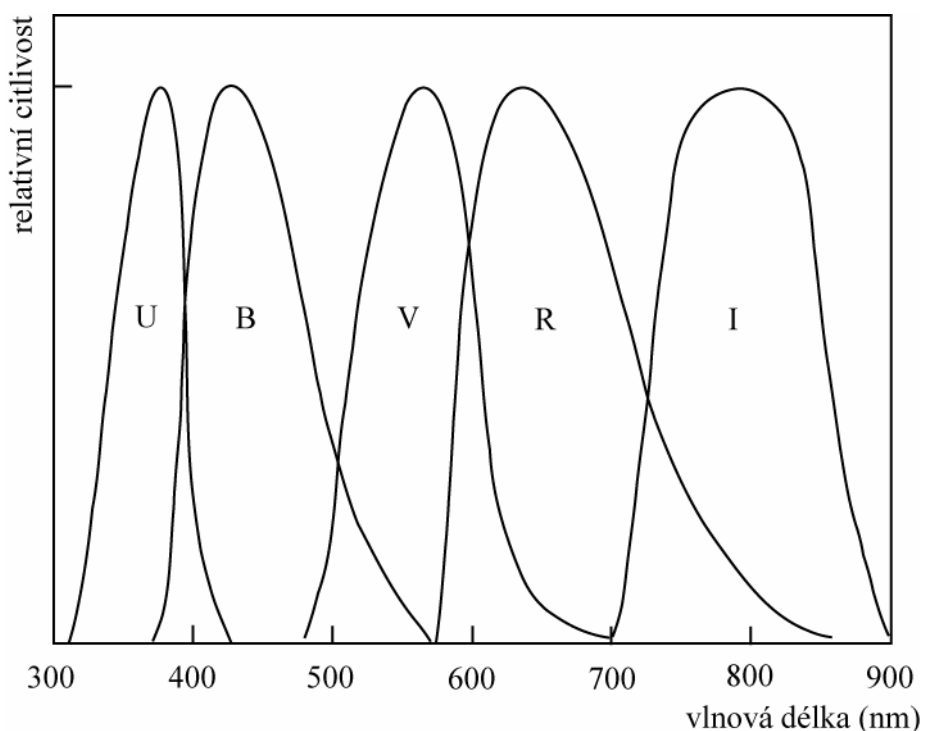
Zopakujme a upřesněme pojem barevný index: víme, že

$$\text{barevný index} = m_{\text{krátkovlnná oblast}} - m_{\text{dlouhovlnná oblast}}$$

Tak např. barevný index $(B-V) = m_B - m_V$, kde m_B je hvězdná velikost objektu v barvě B a m_V je hvězdná velikost v barvě V.

³⁾ K čemu je měření barevných indexů dobré? Když nemáme k dispozici spektrum hvězdy (a to se u slabých objektů získává krajně obtížně), mohou nám barevné indexy, jež lze získat přece jen snáze než spektra, prozradit alespoň to, jak mnoho hvězda vyzařuje v jednotlivých částech spektra. Fotometrie v několika oborech spektra je tedy náhradou spektroskopie.

4. Všechna kosmická tělesa září



Barevný systém UBV(RI).

Bolometrické veličiny

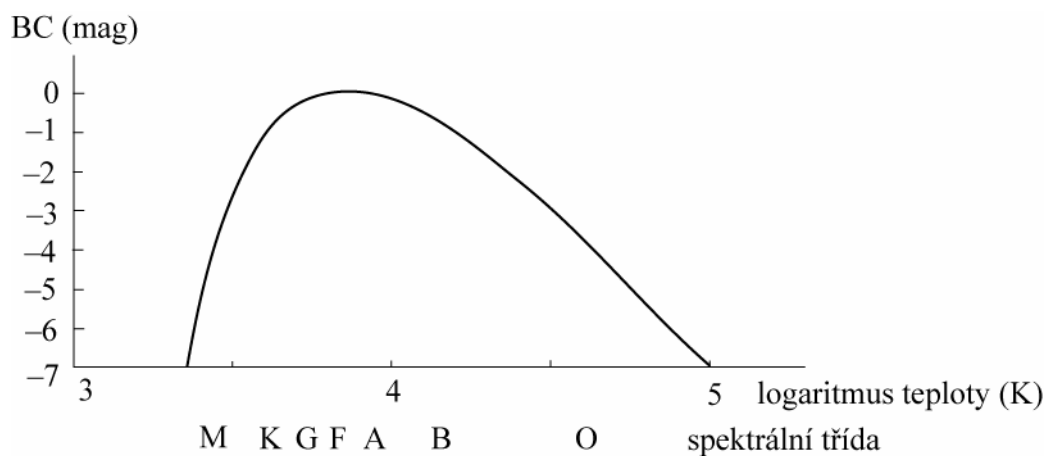
Když budeme chtít znát jasnost (resp. hvězdnou velikost) nějakého objektu nejen v určité části spektra, ale v *celém* spektrálním oboru, musíme změřenou fyzikální veličinu (jasnost, hvězdnou velikost) přepočítat na tzv. *bolometrickou*. Žádný přístroj, který by měřil např. osvětlení v celém oboru elektromagnetického záření neexistuje, vždy je to záležitost přepočtu za jistých předpokladů.

Rozdíl bolometrické a vizuální hvězdné velikosti (ať již pozorované nebo absolutní) označujeme jako bolometrickou korekci BC :

$$BC = m_{\text{bol}} - m_{\text{viz}} = M_{\text{bol}} - M_{\text{viz}}.$$

Bolometrická korekce BC není zanedbatelně malou korekcí, u některých hvězd činí až několik magnitud! Je zřejmé, že teprve absolutní *bolometrická* hvězdná velikost M_{bol} je mírou zářivého výkonu hvězdy.

4. Všechna kosmická tělesa září



Bolometrická korekce BC v závislosti na povrchové teplotě hvězd (pojem *spektrální třída* bude zaveden v kapitole 4.4. *Hvězdy ve spektroskopu*).

4. Všechna kosmická tělesa září



doplňěk

Slovníček pojmů z fotometrie

Pojmy z fotometrie nepatří mezi běžné, se kterými se setkáváme v každé učebnici fyziky. Pro nás jsou však nyní důležité, a proto uvádíme alespoň ty, které nejvíce potřebujeme. (Zpracováno podle *Slovníku školské fyziky*, Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1988, a podle V. Šindeláře a L. Smrže: *Nová soustava jednotek*, SPN, Praha 1989).

hustota světelného toku – podíl světelného toku plochou a průmětu této plochy do směru kolmého na směr šíření světla. Jednotkou je lumen na čtvereční metr.

hustota zářivého toku – podíl zářivého toku plochou a průmětu této plochy do směru kolmého na směr šíření záření. Jednotkou je watt na čtvereční metr.

intenzita osvětlení – viz *osvětlení*

jas – podíl svítivosti plošky povrchu zdroje ve směru pozorování a kolmého průmětu této plošky do tohoto směru. Jednotkou je kandela na čtvereční metr.

kandela – název jednotky svítivosti, jedna ze sedmi základních jednotek soustavy SI. Kandela je definována jako svítivost v daném směru zdroje, který vysílá monochromatické záření frekvence $540 \cdot 10^{12}$ Hz a jehož zářivost v tomto směru činí $(1/683)$ wattů na steradián.

lumen – název jednotky světelného toku; bodový světelný zdroj vysílá do prostorového úhlu 1 steradiánu světelný tok 1 lumenu, je-li svítivost tohoto zdroje (ve všech směrech) rovna 1 kandele.

lux – název jednotky osvětlení; 1 lux je osvětlení plochy, na jejíž každý čtvereční metr dopadá rovnoměrně rozložený světelný tok 1 lumenu.

osvětlení – podíl světelného toku dopadajícího na sledovanou plošku povrchu a velikosti této plošky. Jednotkou osvětlení je lux.

steradián – jednotka prostorového úhlu; steradián je prostorový úhel, který s vrcholem ve středu koule vytíná na povrchu této koule plochu s obsahem rovným druhé mocnině poloměru koule.

světelný tok – fotometrická veličina charakterizující intenzitu zřakového vjemu normálního lidského oka, který je vyvolán zářivým tokem. Jednotkou je lumen.

svítivost (bodového zdroje světla v daném směru) – podíl té části světelného toku, která vychází ze zdroje v daném směru do malého prostorového úhlu, a velikosti tohoto prostorového úhlu. Jednotkou je kandela.

zářivost (bodového zdroje světla v daném směru) – podíl té části zářivého toku, která vychází ze zdroje v daném směru do malého prostorového úhlu, a velikosti tohoto prostorového úhlu. Jednotkou je watt na steradián.

zářivý tok – výkon přenášený zářením, které prochází v určitém místě prostoru danou plochou. Jednotkou je watt.

4. Všechna kosmická tělesa září



doplňěk

Pogsonova rovnice

Pozorovatelé, kteří dříve (ještě před přesnou definicí jasnosti) zařazovali hvězdy do jednotlivých tříd jasností, se snažili, aby *rozdíly pocitů* při pozorováních hvězd lišících se o jednu třídu (hvězdnou velikost) byly vždy stejné (tedy abychom neměli dojem, že se jasnosti hvězd například 1. a 2. velikosti od sebe liší mnohem víc než hvězdy 5. a 6. velikosti). Zapsáno matematicky:

$$j_1/j_2 = j_2/j_3 = \dots = j_5/j_6 = \rho,$$

kde j_i jsou jasnosti (tedy osvětlení) hvězd i -té velikosti a ρ kvocient geometrické řady.

Jednotliví pozorovatelé v 18. a 19. století, když sestavovali katalogy hvězd, měli kvocienty $\rho = 2,3$ až $2,8$. V roce 1856 navrhl britský astronom Norman Pogson, aby byla přijata hodnota $\log \rho = 0,4$ (přesně), tedy $\rho = 2,512\dots$. Pogsonův návrh byl akceptován a používá se dodnes. Zobecněním předchozího vztahu dostaneme

$$j_m = j_n \rho^{(n-m)},$$

resp.

$$n - m = 2,5 \log (j_m/j_n),$$

kde m, n jsou hvězdné velikosti. Tuto rovnici nazýváme **Pogsonovou**.

Poznámka: pro $n = 0$ dostaneme definiční vztah bezrozměrné *hvězdné velikosti*

$$m = -2,5 \log (j/j_0),$$

který je uveden v úvodním textu této kapitoly.

4. Všechna kosmická tělesa září



Na situaci, která nás donutí změnit plánovaný postup, se musíme dívat jako na novou příležitost a ne jako na neúspěch.

Richard Wesley Hamming, matematik a počítačový expert (1915 – 1998)

otázky a příklady

Otázka 4.1.1. Jestliže pro jasnosti j_1 a j_2 dvou hvězd platí, že $j_1 > j_2$, jaká nerovnost platí pro odpovídající hvězdné velikosti m_1 a m_2 ?

Otázka 4.1.2. Rozumíte-li dobře textu, pak snadno zodpovíte na tuto otázku: Které z následujících tvrzení je fyzikálně chybné? a) Do 21. hvězdné velikosti bylo zaznamenáno na 20 000 kup galaxií. b) Ptolemaios, který převzal hvězdný katalog od Hipparcha, rozdělil hvězdy viditelné pouhými očima do šesti tříd: nejjasnější označil jako hvězdy 1. velikosti, nejslabší 6. velikosti. c) Hvězda stokrát méně jasná než jiná hvězda má hvězdnou velikost o 5 magnitud větší (číselně) než hvězda jasnější.

Otázka 4.1.3. Galaxie se na obloze jeví jako objekt s hvězdnou velikostí 8 mag. Její absolutní hvězdnou velikost můžeme odhadnout na -17 mag. Jak asi daleko je tato galaxie?

Otázka 4.1.4. Jasnost hvězdy Rigel odpovídá 0,1 mag, přičemž paralaxa této hvězdy je na mezi měřitelnosti běžnými pozemními dalekohledy (tedy předpokládejte, že není větší než 0,01"). Jaká musí být přinejmenším absolutní hvězdná velikost Rigelu?

Otázka 4.1.5. Největší dalekohledy světa mají průměry zrcadel zhruba tisíckrát větší než bývá průměr duhovky lidského oka. Odhadněte, jak slabé hvězdy lze těmito dalekohledy vizuálně ještě sledovat.

Otázka 4.1.6. Zářivý výkon hvězdy, kterou pozorovatel na Zemi vidí jako objekt hvězdné velikosti 3,0 mag, je oproti zářivému výkonu hvězdy s hvězdnou velikostí 4,0 mag: a) 2,512...krát větší; b) přesně 2,5krát větší; c) nelze navzájem porovnat, pokud neznáme vzdálenosti hvězd od pozorovatele.

Otázka 4.1.7. Které z uvedených tvrzení je chybné? a) Čím je hvězda jasnější, tím je její hvězdná velikost (číselně) menší. b) Jasnost Siria odpovídá hvězdné velikosti $m = -1,5$ mag. c) Magnituda hvězdy je veličina, která nám říká, jak je hvězda jasná.

4. Všechna kosmická tělesa září

Otázka 4.1.8. William Herschel počítal při svých výzkumech s tím, že absolutní jasnosti všech hvězd jsou stejné, tedy sama pozorovaná hvězdná velikost indikuje vzdálenost hvězdy. Pripusťme, že absolutní hvězdná velikost všech hvězd je +2 mag. Jaký je vztah pro výpočet vzdálenosti r hvězdy z její pozorované hvězdné velikosti m ? Jak daleko by byly za našeho předpokladu hvězdy právě ještě viditelné pouhýma očima?

Otázka 4.1.9. Známá galaxie M 31 v Andromedě je za bezměsíčné oblohy poměrně snadno pozorovatelná i pouhýma očima (hvězdná velikost $m = 4$ mag). Mohli bychom pouhým zrakem uvidět galaxii, která by byla přibližně stejná jako M 31, ale dvakrát dál než galaxie v Andromedě?

Otázka 4.1.10. Každá ze složek dvojhvězdy má hvězdnou velikost +2,0 mag. Jakou hvězdnou velikost bude mít dvojhvězda, když ji nerozlišíme na dvě složky, ale budeme ji vidět jen jako jednu hvězdu? a) opět jen +2,0 mag; b) $2 + 2 = 4$ mag; c) bude poněkud jasnější než +2,0 mag, ale přesnou hodnotu je třeba vypočítat z Pogsonovy rovnice; d) k výpočtu je třeba ještě zadat vzdálenost dvojhvězdy.

Otázka 4.1.11. Rozdíl dvou hvězdných velikostí m_1, m_2 závisí na osvětleních E_1, E_2 podle vztahu

$$m_1 - m_2 = 2,5 \log (E_2/E_1)$$

(Pogsonova rovnice). Je koeficient u logaritmické funkce uveden přesně? a) Ano, takto je definován. b) Ne, přesná hodnota je 2,512... c) Ano, ale chybí mu znaménko mínus.

Otázka 4.1.12. Předpokládejme, že dvě galaxie jsou téměř stejné co do rozměrů i stavby. Pozorovaná jasnost jedné z nich je však 200krát menší než jasnost druhé. Odpovědět na otázku, která z nich je od nás dál a kolikrát, je jistě snadné. Doplňte však svou odpověď také o údaj, jaký je rozdíl hvězdných velikostí těchto dvou galaxií.

Otázka 4.1.13. Hvězda **A** má tutéž jasnost v modré a červené barvě. Hvězda **B** se jeví jasnější v červené než v modré barvě. Hvězda **C** je naopak jasnější v modré barvě než v červené. Seřadte tyto hvězdy podle teploty od nejteplejší po nejchladnější.

Otázka 4.1.14. V následující tabulce máte uvedeny pozorované a absolutní hvězdné velikosti čtyř jasných hvězd. Aniž byste cokoli počítali, můžete už pouhým pohledem na uvedená čísla říci něco o vzdálenostech těchto hvězd. Nebo je to vyloučené?

Hvězda	Pozorovaná hvězdná velikost	Absolutní hvězdná velikost
Aldebaran	0,9 mag	-0,7 mag
Arcturus	-0,1 mag	-0,2 mag
Sírius	-1,5 mag	1,4 mag
Procyon	0,4 mag	2,7 mag

Otázka 4.1.15. Pozorujeme dvě hvězdy, které jsou úhlově nedaleko od sebe. První hvězda má pozorovanou hvězdnou velikost $m_1 = 2$ mag, druhá $m_2 = 4$ mag. Víc o těchto hvězdách zatím nevíme, ani to, zda náhodou netvoří dvojhvězdu. To nám však jistě nezabrání v úvaze o tom, jak mohou být (relativně vůči sobě) tyto hvězdy zářivé, jak jsou daleko... Napište takovou úvahu.

Otázka 4.1.16. Jaké znaménko má bolometrická korekce?

Otázka 4.1.17. Kdyby se vzdálenost hvězdy, jejíž hvězdná velikost činí 4 mag, zmenšila na polovinu, jaká by pak byla její pozorovaná hvězdná velikost?

4. Všechna kosmická tělesa září



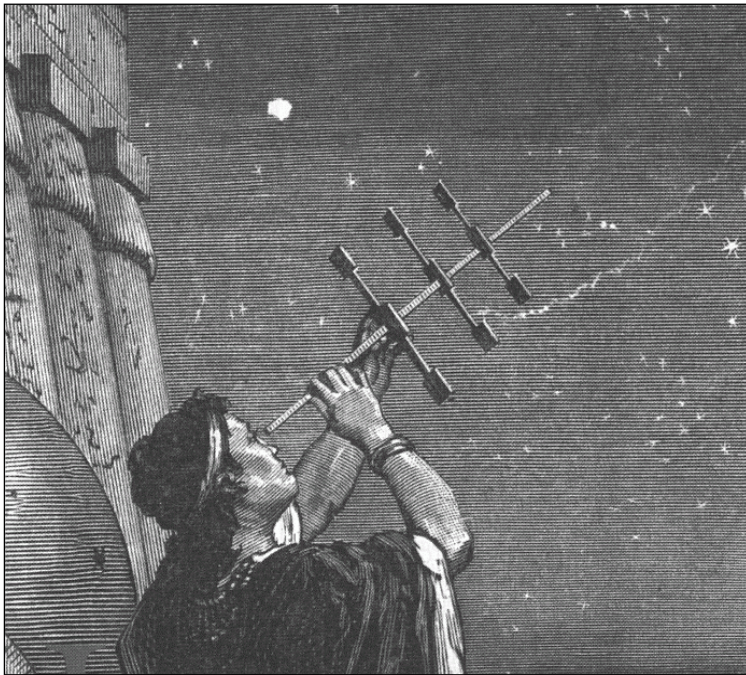
medailon

Hipparchos

(asi 190 až 125 př. n. l.)

Byl to nejvýznamnější antický astronom-pozorovatel a také matematik. Určil délku tropického roku (trvání oběhu Země kolem Slunce) a ročních období, změřil vzdálenost i velikost Měsíce. Zavedl pojem zeměpisné délky a šířky, souřadnic vhodných pro určení polohy na povrchu koule. Byl první, kdo si všiml, že zemská osa se vůči hvězdám pozvolna kolébá – tomuto úkazu říkáme precese.

K jeho nejvýznamnějším odkazům však patří katalog poloh a jasností 850 hvězd převážně ze severní polokoule. Hipparchos byl k sestavení katalogu inspirován pozorováním nové hvězdy roku 134 př. n. l. Chtěl, aby se případná budoucí nová hvězda dala snadno odlišit od hvězd již existujících.



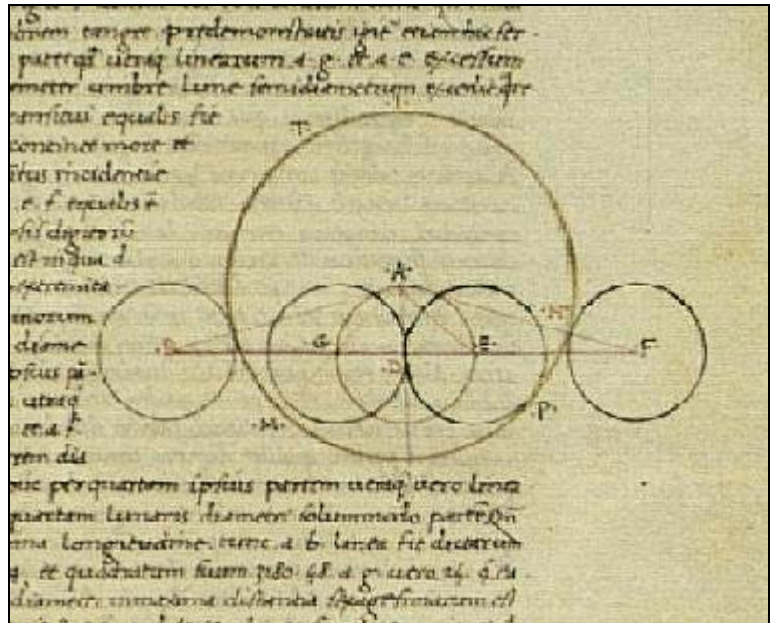
Z jeho (nedochovaného) katalogu pak čerpal počátkem druhého století našeho letopočtu jiný slavný starověký hvězdář Klaudios Ptolemaios, jenž tak vlastně Hipparchova data zachoval natrvalo ve spise se souhrnným názvem *Almagest*. Jelikož od doby sestavení Hipparchova katalogu uplynulo více než dva tisíce let, mohou i přibližná měření poloh a jasností hvězd neobyčejně přispět k řešení důležitých otázek hvězdných pohybů a vývoje – jde tedy o nejstarší vědeckou práci, která se dosud cituje.

Na počest Hipparcha dostala kódové označení HIPPARCOS astrometrická umělá družice, která pracovala na protáhlé oběžné dráze kolem Země v letech 1989–1993. Jejím cílem bylo pořídít nejobsáhlejší a nejpřesnější katalog hvězd v celých astronomických dějinách. Katalog obsahuje polohy, pohyby, vzdálenosti a jasnosti zhruba jednoho milio-

4. Všechna kosmická tělesa září

nu hvězd s přesností, která o řád předčí nejlepší katalogy, pořízené moderními pozemními dalekohledy. Katalog, vydaný v roce 1996, nemá vůbec vzhled tlustých vázaných svazků, zabírajících celou knihovnu (kdyby se takto doopravdy vytiskl, hmotnost jednoho výtisku by dosáhla dvou a půl tun!). Místo toho se využilo pokroku techniky a katalog byl vydán v podobě kompaktních disků. Tak mají astronomové celého světa stejný a především velmi snadný přístup k těmto jedinečným údajům, jež budou astronomům sloužit tím lépe, čím více času od vydání katalogu uplyne – z téhož důvodu, pro jaký využívají původních Hipparchových měření.

Autorem medailonu je Jiří Grygar.



Úryvek z Almagestu, vydaného Klaudiosem Ptolemaiem.

4. Všechna kosmická tělesa září



úloha k zamyšlení

Čtení za měsíčního úplňku

V učebnicích se uvádí, že ke čtení drobně tištěného textu, například novin, postačí osvětlení 0,1 lx. Připusťme, že je to pravda. Kolik hvězd nulté hvězdné velikosti by muselo zářit na nočním nebi, aby se dalo za jejich svitu číst? Stačí ke čtení osvětlení poskytované Měsícem v době úplňku? Srovnajte svůj výsledek se skutečností – k ověření přece stačí pouze malý experiment!



Pohled na Drážďany za úplňku (Johan Dahl, 1788 – 1857), olejomalba z roku 1839, Drážďanská obrazová galerie).

4. Všechna kosmická tělesa září



Cílem výpočtů nejsou čísla, ale pochopení podstaty věci.

Richard Wesley Hamming, matematik a počítačový expert (1915 – 1998).

doplňěk

Vztah mezi pozorovanou a absolutní hvězdnou velikostí

Odvoďme si vztah mezi pozorovanou hvězdnou velikostí m , absolutní hvězdnou velikostí M a vzdáleností r objektu. *Absolutní* hvězdná velikost M odpovídá podle definice případu, kdy je hvězda ve vzdálenosti $r_0 = 10$ pc. V obecném případě je hvězda s *pozorovanou* hvězdnou velikostí m ve vzdálenosti r . Pro poměr jasností j/j_0 objektů, jež jsou ve vzdálenostech r a r_0 , platí Pogsonova rovnice

$$j/j_0 = 10^{0,4(M-m)}.$$

Protože $j \sim 1/r^2$, platí také

$$r_0^2/r^2 = 10^{0,4(M-m)},$$

přičemž $r_0 = 10$ pc. Logaritmováním této rovnice dostáváme

$$2 - 2 \log r = 0,4 (M - m),$$

odkud jednoduchou úpravou získáme běžně uváděný vztah

$$M = m + 5 - 5 \log r.$$

4. Všechna kosmická tělesa září



úloha k zamyšlení

Kosmická loď na cestě k Proximě Centauri

Kosmická loď letí ze Země ke hvězdě Proxima Centauri rychlostí v , jež je mnohem menší než rychlost šíření světla ve vakuu c . Jaký díl dráhy loď již urazila, když astronaut vidí Slunce i Proximu Centauri stejně jasnou? Proxima Centauri je jak známo po Slunci nejbližší hvězdou. Patří mezi tzv. červené trpaslíky, její vzdálenost od Slunce $d = 1,29$ pc a její vizuální hvězdná velikost $m_p = 11,1$ mag. Pro výpočet budete potřebovat ještě jeden číselný údaj: jak je jasné Slunce při pohledu ze Země. Uveďme tedy, že na pozemské obloze Slunce dosahuje hvězdné velikosti $m_s = -26,7$ mag.

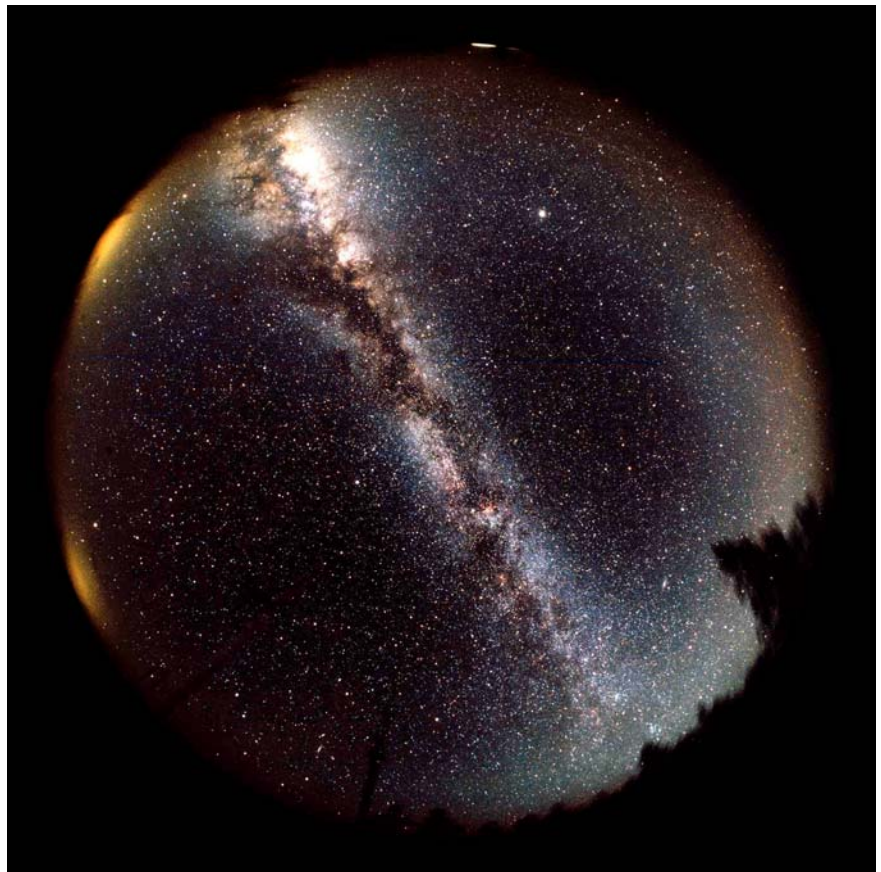




úloha k zamyšlení

Atmosféra zeslabuje světlo

V zemské atmosféře dochází k pohlcování a rozptylu světla kosmických objektů. Proto také *pozorovaná* hvězdná velikost hvězdy závisí na její zenitové vzdálenosti, neboť při větší úhlové vzdálenosti hvězdy od zenitu je i dráha světelného paprsku v atmosféře delší. Hvězda, která je jen 5° nad vodorovnou rovinou, se jeví o 1,8 magnitudy slabší než jinak stejná hvězda v zenitu. Jaký musí být poměr průměrů objektivů dvou dalekohledů, chceme-li v obou přístrojích vidět hvězdy stejné mezní velikosti, budeme-li s jedním dalekohledem pozorovat v zenitu a s druhým 5° nad vodorovnou rovinou?



Snímek celooblohovou komorou, pořízený v roce 1985 Dougem Officerem a Paulem Welchem (Steward Observatory, The University of Arizona).

4.2. Proč a jak tělesa září?

Nyní si připomeneme několik základních fyzikálních pojmů, které se týkají záření těles. Řeč bude o kvantech záření, o jejich vyzařování a pohlcování, o tělesu, které se označuje jako absolutně černé... I pro astronoma jsou to pojmy velice důležité; nebude-li je znát, nemá šanci porozumět ani těm nejjednodušším jevům, které ve vesmíru pozoruje (v podstatě taková situace byla v astronomii a fyzice až do konce 19. století).

Jak vzniká záření?

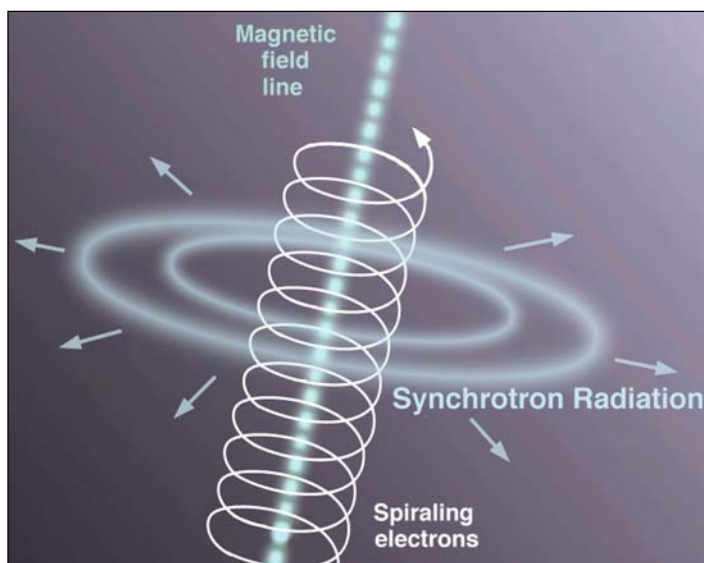
Každý atom, molekula či elementární částice, například elektron, má určitou energii. Ke změně této energie může dojít zejména *vyzářením* (*emisi*) nebo *pohlcením* (*absorpcí*) kvanta elektromagnetického záření.

Velikost energie, kterou nějaká částice může vydat nebo přijmout, ovšem závisí na způsobu vzájemného působení částice a okolí. Jsou-li částice *vázané* třeba v atomu nebo molekule, nemůže jejich systém nabýt libovolného energetického stavu, ale jen určitých energií. Je to dáno zákony platnými v mikrosvětě. Naopak *volné* částice, které nejsou vázané na nějaké „pevně dané“ stavy energie, mohou přecházet mezi dvěma libovolnými energetickými stavy (případně jeden stav je „volný“ a druhý vázaný).

Záření volných částic

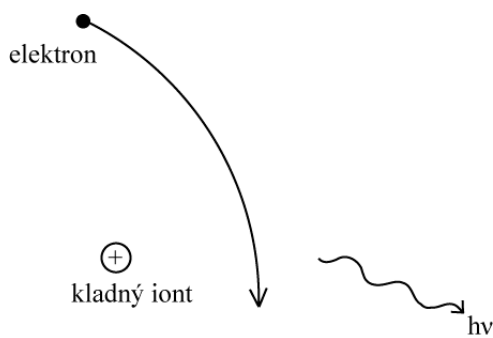
Uvažujme, jak probíhá elektromagnetické vyzařování u volných částic. Vyzařovat mohou jen elektricky nabitě částice, které se pohybují *zrychleně* (musí na ně působit nějaká síla). Nejčastěji jsou to volné elektrony, protože čím je částice lehčí, tím snadněji se mění její rychlost a tím dříve částice vyzařuje.

Názorným příkladem je tzv. brzdné záření (viz obrázek na další straně): proletí-li elektron kolem kladného iontu, jeho dráha se zakříví a rychlost se změní. Změna hybnosti je vyrovnána vyzařením fotonu s energií $h\nu$. Kinetická energie elektronu se přitom sníží, elektron je přibrzděn (odtud název tohoto záření).



← Vznik synchrotronového záření – způsobují je elektrony letící v magnetickém poli (viz text).

4. Všechna kosmická tělesa září

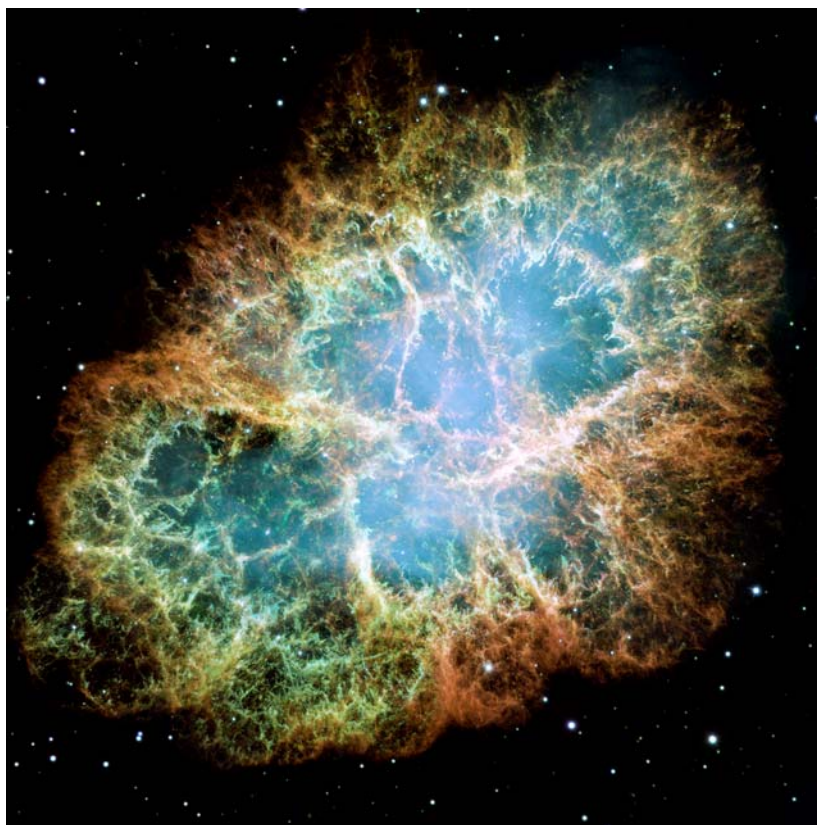


Vznik brzdného záření.

Také elektron letící v magnetickém poli vyzařuje. Působením Lorentzovy síly se trajektorie elektronu zakřivuje a elektron vyzařuje, přičemž charakter záření závisí na rychlosti, jakou se pohybuje (tedy na energii elektronu). Záření elektronů, jejichž rychlost v je podstatně menší než rychlost šíření světla ve vakuu c , známe z urychlovačů částic – cyklotronů, a proto se nazývá *cyklotronové*. Je to všesměrové záření na kmitočtu odpovídajícím frekvenci oběhu elektronu v urychlovači.

Při rychlostech v srovnatelných s rychlostí c se začínají projevovat jevy popisované teorií relativity. Ve spektru záření se kromě základní frekvence objeví i její

násobky, které při vysokých energiích vytvoří prakticky spojité spektrum. Podle analogie se zářením elektronů ve výkonnějších urychlovačích – synchrotronech – se toto záření označuje jako *synchrotronové*.



Krabí mlhovina v souhvězdí Býka je příkladem silného zdroje synchrotronového záření, které registrujeme v rádiovém oboru spektra.

Synchrotronové záření je ve vesmíru poměrně časté. Vzniká všude tam, kde jsou přítomny proudy energetických elektronů a magnetické pole. Je to záření silně polarizované (stejně jako cy-

4. Všechna kosmická tělesa září

klotronové), což umožňuje určit směr magnetických siločar ve zdroji (kmitová rovina elektrického vektoru elektromagnetické vlny je kolmá na směr siločar).

Můžeme zobecnit – z vlastností elektromagnetického záření, které ve vesmíru sledujeme, lze odvodit způsob a podmínky, za nichž toto záření vzniklo.

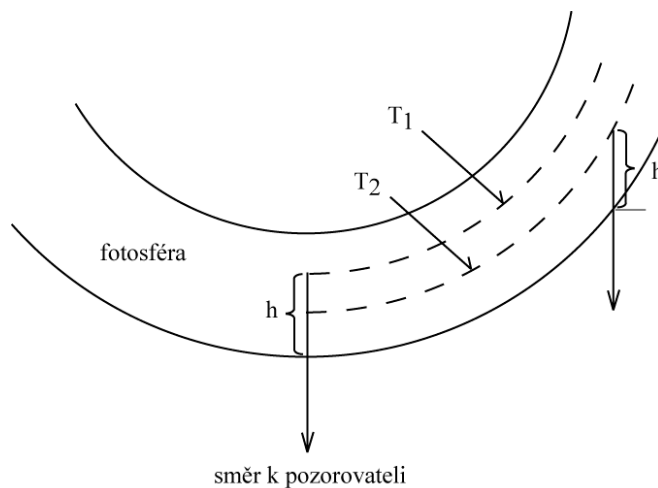
Tepelné záření

Představme si prázdnou nádobu s malým otvorem a dutinou tvaru koule, kužele nebo válce. Záření se uvnitř dutiny po nesčetných odrazech na stěnách pohltí. Protože takové těleso připomíná látku nabarvenou na černo, dostalo název *absolutně černé těleso* (více o něm v následujícím doplňku). Na záření uvnitř dutiny můžeme pohlížet jako na plyn, který je v tepelné rovnováze se stěnami nádoby (v kterémkoli časovém okamžiku je množství pohlcené energie rovno množství energie vyzářené). Tomuto fotonovému „plynu“ tedy můžeme přisoudit *teplotu*. Říkáme, že jde o *rovnovážné tepelné záření*.

V mnoha případech můžeme zdroj záření, například hvězdu, pokládat v prvním přiblížení za absolutně černé těleso. Je to výhodné proto, že vlastnosti tepelného záření dokážeme poměrně snadno matematicky popsat.

Proč je Slunce na okrajích temnější?

Je to důsledek jednoho ze zákonů, popisujících vyzařování absolutně černého tělesa (Stefanova-Boltzmannova zákona). Ve fotosféře (tedy vrstvě, odkud k nám přichází pozorované záření) platí, že teplota látky s výškou *klesá*. Při pohledu doprostřed slunečního kotouče dohlédneme do jisté hloubky. Tato dohlednost – vlastně tloušťka plynu, přes kterou se ještě proderou fotony (jež pak letí až k nám volným meziplanetárním prostorem), je zhruba stejná uprostřed kotoučku jako na jeho okraji.

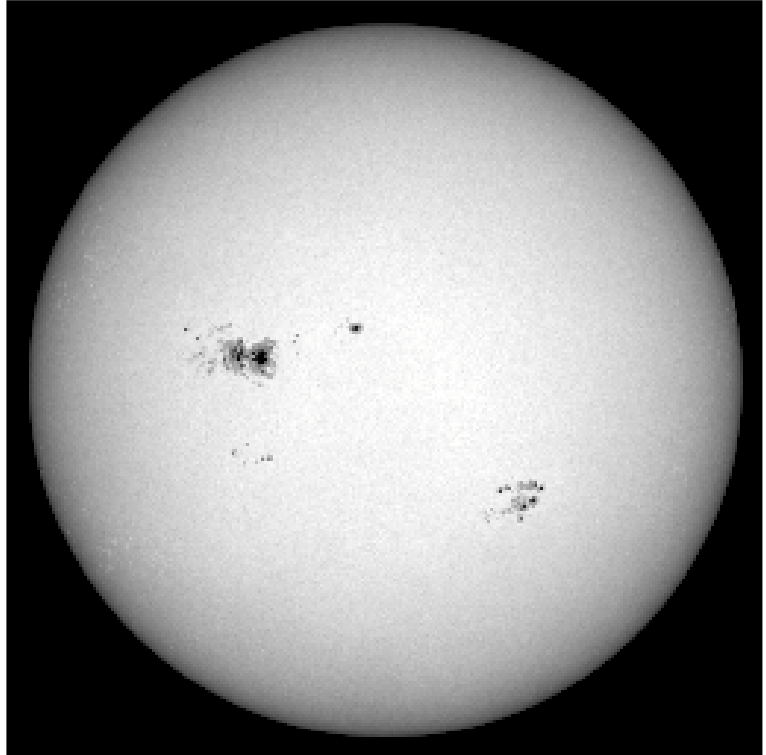


h – hloubka ve fotosféře
 T_1, T_2 – teploty ($T_1 > T_2$)

Vznik okrajového ztemnění u hvězd.

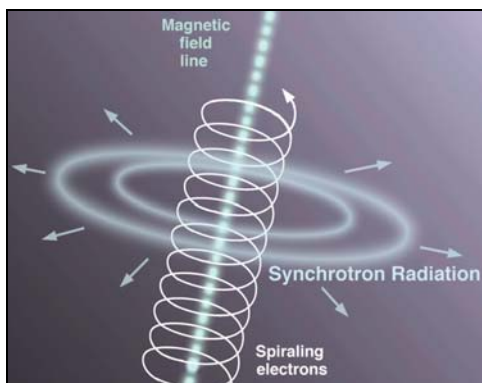
4. Všechna kosmická tělesa září

Na kraji však jde o šikmý pohled, není to pohled přímo na střed. Při téže dohlednosti ve fotosféře pronikneme uprostřed kotoučku do hlubších vrstev fotosféry než na okraji, tedy do teplejších oblastí, které zákonitě vyzařují více než vyšší a chladnější vrstvy. Zcela u okraje slunečního disku k tomu přistupuje ještě omezená hloubka sloupce fotosféry, což okrajové ztemnění ještě o něco zvýší.



Okrajové ztemnění slunečního kotouče snadno zaznamenáme při každém pozorování i docela malými přístroji.

4. Všechna kosmická tělesa září



doplňěk

Absolutně černé těleso

Tento pojem zavedl Gustav-Robert Kirchhoff roku 1860. Je to – po pravdě řečeno – termín dosti nevhodný, protože tělesa jsou „černá“, když nezáří, zatímco absolutně černé těleso září (a jeho barva závisí na teplotě). S černou barvou to však jistou souvislost má: když hledíme zvenku do malého otevřeného okna, pak i za velmi jasného dne nám místnost za oknem připadá tmavá, téměř černá (i když je třeba vymalována do bíla). Je tomu tak proto, že se téměř všechno záření přicházející zvenčí po mnoha odrazech na stěnách místnosti pohltí a zpátky ven se nedostane prakticky vůbec nic.

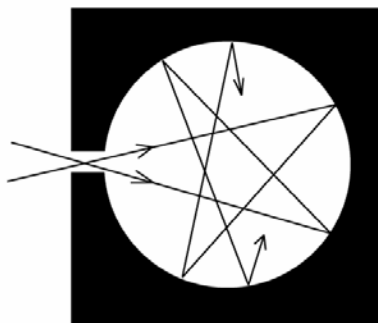
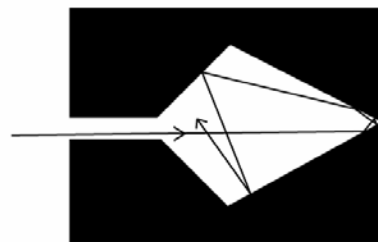
Podobným způsobem fungují i laboratorní provedení absolutně černého tělesa, jak navrhl Kirchhoff. Jsou to prázdné nádoby s malým otvorem a dutinou tvaru koule, kužele nebo válce. Záření se uvnitř dutiny po nesčetných odrazech na stěnách pohltí (a proto takové „těleso“ připomíná látku nabarvenou na černo).

Na záření uvnitř dutiny můžeme pohlížet jako na plyn, který je v tepelné rovnováze se stěnami nádoby (v kterémkoli časovém okamžiku je množství pohlcené energie rovno množství energie vyzářené). Tomuto „plynu“ můžeme tedy přisoudit *teplotu T*.

Každé těleso zahřáté na jakoukoli teplotu září, proto *září i absolutně černé těleso*. Otvorem v dutině můžeme zkoumat vlastnosti tohoto záření, např. jeho intenzitu vyzařování (což je energie, kterou vyzáří jednotková plocha zdroje za jednu sekundu). Ta závisí *jen na teplotě* (a nikoli například na materiálu či tvaru stěn), jak zjistil už Kirchhoff. Z experimentů i teorie plyne, že čím *vyšší* teplotu *T* má absolutně černé těleso,

- tím *více* vyzařuje (celkově i v jednotlivých vlnových délkách);
- tím více se posouvá ke *kratším* vlnovým délkám maximum vyzařování; proto stále teplejší předmět mění své zabarvení z červeného na žluté a bílé, a mění je pak i na modré, jenže naše oči velmi jasný předmět vnímají už jen jako bílý.

Dodejme ještě, jak se nazývají matematická vyjádření těchto závislostí. Spektrum tepelného záření absolutně černého tělesa (tedy závislost monochromatického jasu na kmitočtu či vlnové délce záření, přičemž parametrem je teplota) popisuje *Planckův zákon*. Byl odvozen v roce 1900 Maxem Planckem za předpokladu (a v rozporu s tehdejší



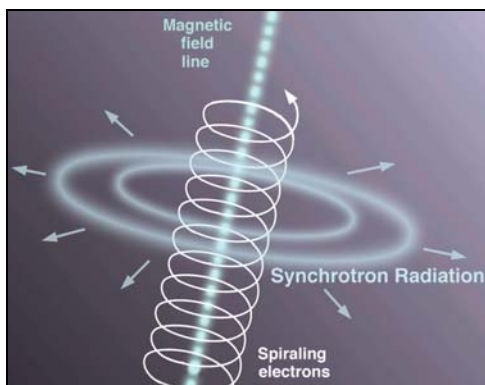
4. Všechna kosmická tělesa září

fyzikou), že elektromagnetické pole uzavřené v dutině si vyměňuje energii s jejími stěnami nespojitě – po kvantech o velikosti rovné $h\nu$.

Celkový jas (tedy celkové množství energie, sečtené přes všechny kmitočty či vlnové délky) udává *Stefanův-Boltzmannův zákon*. Celkové množství energie je úměrné T^4 ; poznamenejme, že teplota T určená z tohoto zákona se nazývá *efektivní teplotou*.

Vlnová délka λ_m , na níž se vyzařuje nejvíce energie, se řídí *Wienovým zákonem posuvu*: $\lambda_m = b/T$, kde konstanta $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$.

4. Všechna kosmická tělesa září



čítanka

Zdeněk Mikulášek: Jakou barvu má vesmír?

Budete-li se nepředpojatě probírat nepřibarvovanými snímky hvězdné oblohy, dříve nebo později musíte dojít k závěru, že vesmír vlastně není příliš barevný. Je spíš černobílý. Když už tu něco svítí, pak je to v podstatě bílé, nejvýše s nádechem do modra nebo do oranžova. Vždy ale jde o lomené tóny, žádné syté barvy, na jaké jsme zvyklí ze Země. Když naopak něco nesvítí anebo tam vůbec nic není, pak je tam tma, tma hluboká, černočerná. Takže jsme právě vytipovali dvě základní vesmírné barvy: nejoblíbenější je sytá čern kombinovaná s bělobou.

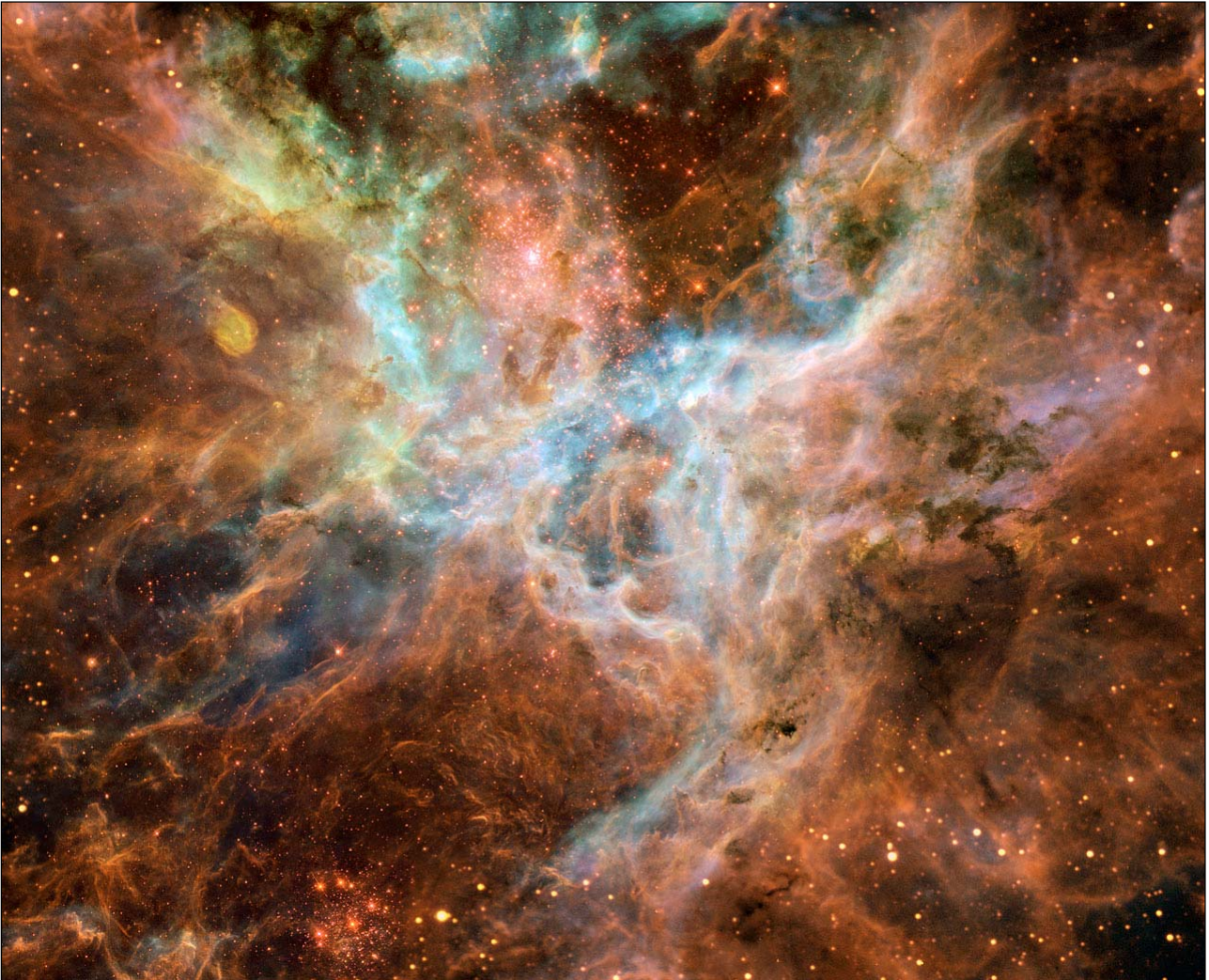
Náš seznam musíme doplnit ještě o blankytnou modř a šarlatovou červeň. Těmito barvami však nezáří hvězdy. Ty, poslušny zákonů záření těles zahřátých na několik tisíc stupňů Celsia, svítí ve všech spektrálních barvách zároveň, takže výsledkem tu je ono víceméně bílé světlo. Modře a červeně září mlhoviny. Tyto nesmírně rozlehlé komplexy řídkého plynu a prachu jsou pasivními světelnými zdroji. Svítí jedině díky tomu, že se v jejich bezprostřední blízkosti nalézají hvězdy, aktivní zdroje víceméně bílého světla.

Část světla takové hvězdy blízkou mlhovinou projde, aniž by přitom narazila na nějakou překážku, část světla je však v mlhovině dílem pohlcena, přeměněna a poté znovu vyzářena, dílem rozptýlena do jiného směru. Mlhovinami s vysokým zastoupením prašné složky se nejhůře prodírají fotony modrého světla. Ty jsou prašnými částicemi o rozměrech desetitisíciny milimetru zastaveny a odchýleny. Tak se může stát, že foton pocházející z hvězdy, který předtím směřoval úplně jinam, dospěje k nám a my ho zaznamenáme jako záření mlhoviny. Vzhledem k tomu, že takovéto dezorientaci zvláště ochotně podléhají částice krátkovlnného záření, jeví se prašné mlhoviny jako blankytně modré plošky. Světlo hvězd, které jsou ponořeny do prašných oblaků, je však o tyto modré fotony ochuzeno a jeví se proto jako narudlé.

Se původem červené barvy mlhovin je to poněkud složitější. Hlavní roli zde hraje tentokrát mezihvězdný plyn, konkrétně sám vodík. Třebaže v mezihvězdné látce zcela bezkonkurenčně převažuje, projevuje se jen málokdy. Je netečný k procházejícímu záření, nepředstavuje pro ně žádnou překážku. K tomu, abychom ho vybudili k nějaké aktivitě, je třeba ho zahřát na teplotu několika tisíc stupňů Celsia. Pak si teprve začne všimnout záření, začne je pohlcovat, začne i sám zářit.

Rozsáhlé oblasti horkého vodíku nacházíme v okolí zvláště žhavých hvězd. Vodík je tu na své vysoké teplotě udržován zejména neviditelným ultrafialovým zářením horkých hvězd, které v tomto oboru vyzářují valnou část svého výkonu. Řídký horký vodík nezáří v celém rozsahu spektra, ale jen v několika spektrálních čarách, v několika barvách. V oboru viditelného světla svítí vodík nejintenzivněji ve spektrální čáře vodíku

4. Všechna kosmická tělesa září



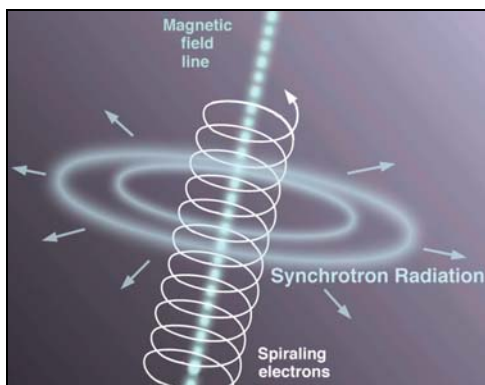
Mlhovina Tarantule, známá astronomům spíše jako 30 Doradus ve Velkém Magellanově oblaku (snímek: Hubblův kosmický dalekohled).

H alfa s vlnovou délkou 656 nanometrů. Záření vodíku v této spektrální čáře je pak pravou příčinou šarlatově červeného zbarvení mračen mezihvězdné látky, která obklopují žhavé, často teprve nedávno zrozené hvězdy.

Národní barvy vesmíru jsou tedy černá, bílá, červená a modrá. Na svůj černý smoking si vesmír připíná červenomodrobílou trikolóru.

Z knihy *100+1 záludných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).

4. Všechna kosmická tělesa září



Zmýlit se při práci je docela dobře možné. Je to věc pravdy, ne cti.

Petr Leonidovič Kapica, fyzik (1894 – 1984)

otázky a příklady

Otázka 4.2.1. Předpokládejme, že energie fotonu je natolik malá, že nedostačuje k odtržení elektronu od jádra atomu, tedy k ionizaci atomu. Aby k ionizaci došlo, musí být vlnová délka fotonu: a) větší; b) menší; c) může být stejná, ale fotonů musí být více než jeden.

Otázka 4.2.2. Ionizační energie vodíku (tedy energie potřebná k odtržení elektronu od jádra vodíku) se rovná 13,6 eV. Vypočítejte maximální vlnovou délku, kterou musí mít foton, aby mohl ionizovat atom vodíku. Do které oblasti spektra toto záření spadá?

Otázka 4.2.3. V jedné z následujících trojic pojmů je uveden takový, který nemá se zářením nic společného. Najdete tuto trojici a v ní onen pojem? a) emisní čára, foton, vlnová délka; b) ionizace, spektrum, infračervené záření; c) světelný rok, parsek, foton; d) absorpce, spektrum, frekvence.

Otázka 4.2.4. Nabízíme vám čtyři tvrzení. Která z nich platí? a) K popisu záření absolutně černého tělesa stačí znát jediný parametr – teplotu. b) Absolutně černé těleso vyzařuje nejvíce v ultrafialové a viditelné části spektra. c) Všechna tělesa ve vesmíru září jako absolutně černá tělesa. d) Čím vyšší teplotu má absolutně černé těleso, tím méně vyzařuje.

Otázka 4.2.5. Hvězda A má dvakrát vyšší povrchovou teplotu než hvězda B, ale současně má poloviční průměr než hvězda B. Bude její zářivý výkon vyšší nebo nižší než zářivý výkon hvězdy B? Když ano, kolikrát?

Otázka 4.2.6. Když víme, že nějaké kosmické těleso vysílá záření podobně jako absolutně černé těleso, pak existuje jednoznačný vztah mezi: a) hmotností tělesa a jeho teplotou; b) teplotou tělesa a velikostí povrchu tělesa; c) teplotou tělesa a vlnovou délkou, na níž nejvíce vyzařuje.

Otázka 4.2.7. Planckův vyzařovací zákon udává: a) celkovou vyzařovanou energii (pro všechny vlnové délky); b) rozdělení vyzařované energie v závislosti na vlnové délce; c) vlnovou délku, kde těleso vyzařuje nejvíce energie.

4. Všechna kosmická tělesa září

Otázka 4.2.8. V dutině s absolutně černými stěnami, vyhřátými na teplotu T , se nachází rovnovážné záření, které má stejnou teplotu. Co by se stalo, kdybychom stěny dutiny náraz nahradili dokonalými zrcadly, jejichž povrch by odrážel beze ztrát záření libovolné vlnové délky?

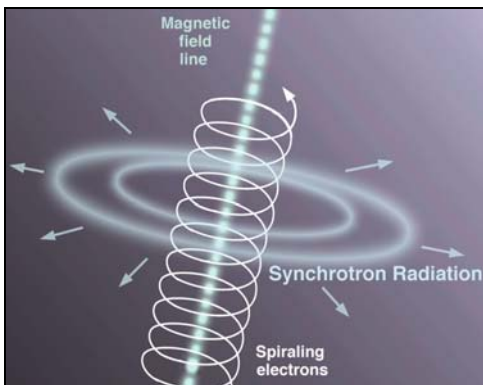
Otázka 4.2.9. Antares a Barnardova hvězda mají přibližně stejné povrchové teploty, tím však jejich podobnost prakticky končí. Povrch hvězdy Antares je stamilionkrát větší než povrch trpasličí Barnardovy hvězdy. V jakém poměru jsou zářivé výkony těchto hvězd?

Otázka 4.2.10. Jaké teploty mají absolutně černá tělesa, která vyzařují nejvíce ve viditelné části spektra?

Otázka 4.2.11. Slunce, podobně jako většina hvězd, má povrchovou teplotu z intervalu hodnot, vypočítaných v otázce 4.2.10. Tedy i Slunce vyzařuje nejvíce ve viditelné části spektra. Lze tento poznatek dát do souvislosti s nějakou vlastností lidského zraku?

Otázka 4.2.12. Zárodečný oblak hvězdy vyzařuje nejvíce záření na vlnové délce $2,5 \mu\text{m}$ (tedy v blízké infračervené části spektra). Jaká je asi teplota těch částí oblaku, jejichž záření registrujeme? (Návod: aby byl výpočet co nejjednodušší a mohli jste ho provést zpaměti, využijte informací o záření Slunce a jeho povrchové teplotě).

4. Všechna kosmická tělesa září

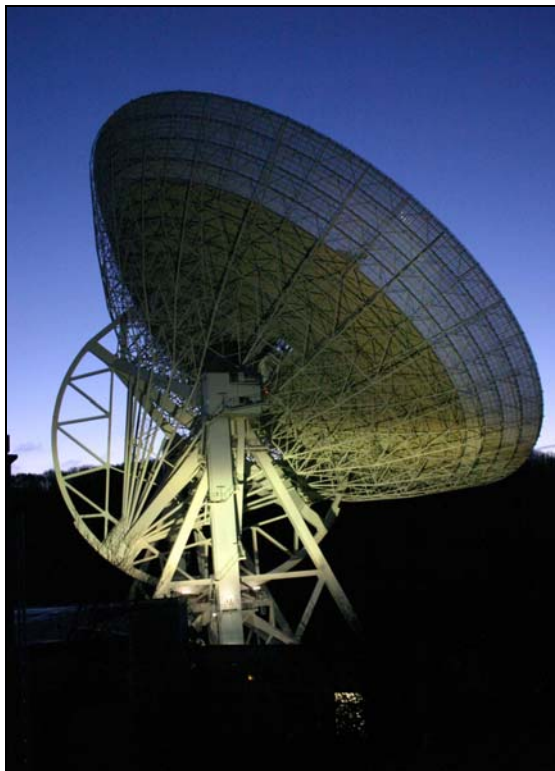


citát

Číst jen to pravé

Stalo se, že americký radioastronom dostal do rukou sovětskou práci o tom, že atomy mezihvězdného vodíku mohou mít elektrony mnohem dále od jádra než v jiných astrofyzikálních podmínkách a mohou tedy vyzařovat tak, že v jejich spektru budou tzv. rekombinační čáry vysokých sérií. Ve druhé části této teoretické práce autor dokazoval, proč se takové záření nikdy nezdaří pozorovat. Naštěstí si onen radioastronom druhý díl práce nepřčetl, odešel k radioteleskopu a tam zmíněné záření objevil.

T. R. McDonough (Sky and Telescope 58, 1979, str. 518). Překlad: Jiří Grygar.



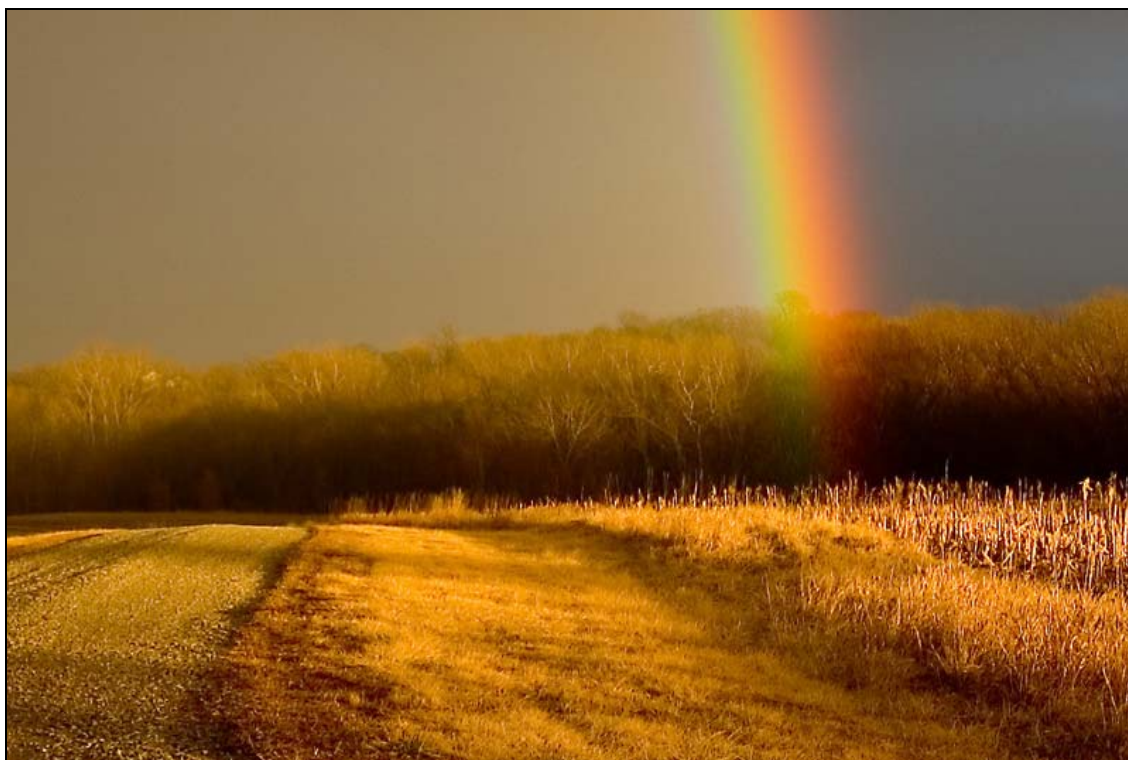
4.3. Trocha spektroskopie

Počátky moderní spektroskopie se budovaly před téměř dvěma sty lety. I nyní stojí za to ponořit se trochu do dějin spektroskopie. Na důkladnější popis teorie a rozbor spektroskopických metod nyní sice nedojde, ale jen proto, že i tento průvodce vesmírem má přece jen omezený rozsah.

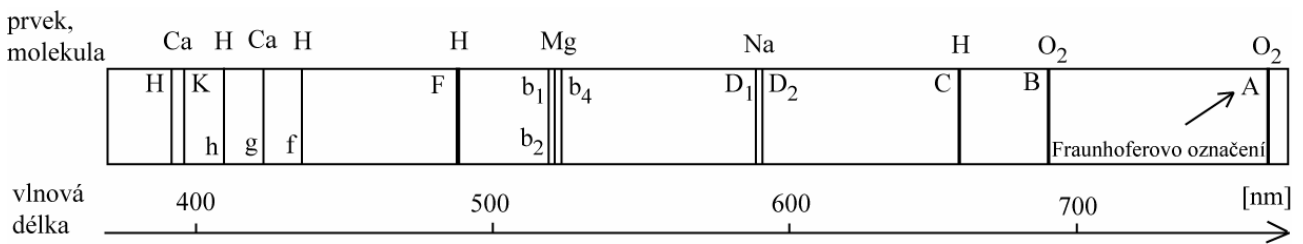
Dějiny spektroskopie v kostce

První pokus s rozkladem světla do barevného proužku spektra pomocí skleněného hranolu uskutečnil roku 1665 Isaac Newton. Jako zdroj světla použil Slunce, bylo to vlastně první pozorování hvězdného spektra. O století a půl později zopakoval Newtonovy pokusy anglický fyzik William Wollaston. V roce 1802 rozeznal ve spektru sedm tmavých čar, o kterých se domníval, že jsou hranicemi mezi jednotlivými spektrálními barvami (pravda, čáry ne vždy ležely tam, kde bychom je hledali).

Jenže už roku 1814 vzala tato představa za své: vynikající německý optik Joseph Fraunhofer (1787–1826) zhotovil spektroskop natolik kvalitní, že v něm nenalezl sedm, ale tisíce tmavých čar. Dodnes se nazývají čarami Fraunhoferovými.



4. Všechna kosmická tělesa září



Fraunhoferovy čáry ve slunečním spektru.

Kirchhoff a Bunsen

Na Fraunhoferovy spektrální výzkumy navázali v polovině 19. století Gustav-Robert Kirchhoff (1824–1887) a Robert Bunsen (1844–1899), kteří zkoumali čárová spektra rozžhavených pevných látek a plynů. Objevem dvou zákonů položili roku 1859 základy spektrální analýzy. Zde je jejich znění:

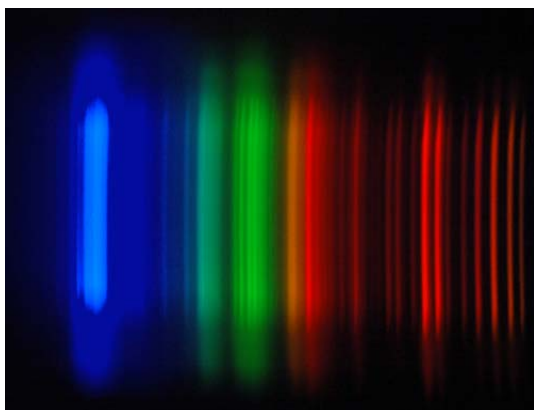
1. Jednotlivé prvky v plynném stavu mají spektrum složené z čar, jejichž počet a vlnové délky jsou za všech fyzikálních podmínek (teplota, hustota, tlak) vždy stejné, mění se jen výraznost čar.

2. Spektrální čáry plynu umístěného mezi zdrojem spojitého záření a pozorovatelem se jeví jako absorpční, jestliže je plyn chladnější než zdroj, nebo jako emisní, je-li plyn teplejší než zdroj.

To jsou strohé formulace velice důležitých fyzikálních zákonů, které předznamenalou bouřlivý rozvoj spektroskopie.

Roztříd' me si spektra

Spektrum hvězdy či jiného objektu, které získáme rozkladem světla pomocí optického hranolu nebo mřížky, vyjadřuje, jak je energie vyzařovaná hvězdou rozdělena v závislosti na vlnové délce či kmitočtu. Základním úkolem astrofyziky je právě poznání a vysvětlení této funkce, vyjadřující rozdělení zářivého toku v závislosti na vlnové délce (kmitočtu). Je v ní obsažena informace o zdroji záření i o prostředí, kterým se záření šířilo od zdroje k pozorovateli.



Emisní spektrum argonu.

Spektrum může být spojitě nebo čárové. V prvním případě má podobu světlého pásku od jednoho okraje spektra k druhému, bez výrazných přerušení. Čárové spektrum je pak množina čar či pruhů, rozložených v místech s určitou vlnovou délkou. Jednotlivé atomy, případně z nich složené molekuly, mají své charakteristické skupiny spektrálních čar. Nejjednodušší spektrum má atom vodíku, spektra atomů s více elektrony jsou složitější. Velmi komplikovaná jsou spektra i těch nejjednodušších molekul.

V případě kosmických objektů se ovšem nejčastěji setkáme se spektry, ve kterých se přes spojitý podklad překládají tmavší *absorpční* spektrální čáry, někdy i světlejší *emisní* čáry.



čítanka

Owen Gingerich: Počátky spektrální analýzy

V roce 1844, dva roky poté, co známý francouzský filozof Auguste Comte¹⁾ dokončil své proslulé šesti-svazkové dílo „Kurs pozitivní filozofie“, uveřejnil filozofické pojednání o astronomii. Na samém počátku vyhláší své názory na omezení, jež v sobě skrývá tato věda: „Hvězdy můžeme sledovat jen zdálky. Toto omezení, jemuž se nelze vyhnout, nám nejen znemožňuje uvažovat o životě na těchto velkých tělesech, ale dokonce zabraňuje i nanejvýš umělé spekulace, týkající se jejich chemické či fyzikální povahy.“ Takto se navrací ke svému dřívějšímu tvrzení, že „člověk se nikdy ve svých představách nedoví plnou pravdu o hvězdách“. Comte stěží očekával, že už v příští generaci se jeho autoritativní výrok ukáže jako chybný.

Přenesme se do starého německého univerzitního města Heidelbergu, do doby na konci roku 1859. Nahlédněme do dopisu chemika Roberta Bunsena, adresovaného 15. listopadu tohoto roku anglickému kolegovi Henry E. Roscoeovi²⁾. Vzrušení pisatele je zřejmé již z prvních vět:

„V současnosti se Kirchhoff a já zabýváme výzkumem, který nám nedává spát. Kirchhoff učinil překrásný, zcela neočekávaný objev: našel, proč jsou čáry ve slunečním spektru tmavé, a dokáže je v tomto spektru uměle zesílit nebo vytvořit takové spojité spektrum, kde tmavé čáry budou na zcela stejných pozicích jako čáry Fraunhoferovy! Nalezl tak způsob, kterým lze zjistit složení Slunce a stálic se stejnou přesností, s jakou určujeme například chlorid stroncia pomocí našich chemických reagens. Tato metoda umožňuje určit složení látky na Slunci stejně snadno jako na Zemi, takže kupříkladu mohu prokázat přítomnost lithia ve dvaceti gramech mořské vody!“

Bunsen se s Gustavem Kirchhoffem setkal ve Vratislavi v roce 1851, kde mladý fyzik začínal jako asistent. V následujícím roce Bunsen odešel do Heidelbergu; zde se stal ředitelem chemického ústavu, a po dvou letech zřídil tu pro Kirchhoffa místo profesora fyziky. Říkává se, že největším Bunsenovým objevem byl právě Kirchhoff, podobně jako se často poznamenává, že jednou z největších zásluh Humphry Davyho o fyziku bylo přijetí Faradaye do svých služeb.

V 50. letech 19. století Bunsen vyvinul svůj světoznámý hořák. Díky bezbarvému plameni se brzy stal standardním kusem v zařízeních pro identifikaci prvků podle barvy. Bunsen zprvu používal k rozlišování

¹⁾ Čti: *óžist kómt*.

²⁾ Čti: *roskeovi*.

4. Všechna kosmická tělesa září

charakteristických zabarvení filtry, ale Kirchhoff usoudil, že hranol, který vytvoří spektrum, je lepší řešení. A tak společně sestavili spektroskop, který byl tvořen kolimátorem, hranolem a okulárem, a tento přístroj spolu s Bunsenovým hořákem zahájil éru optické chemické analýzy. Heidelberští vědci zjistili, že každý prvek dává své charakteristické soubory jasných spektrálních čar, jež jsou stejně unikátní jako třeba otisky prstů u člověka.

Na podzim roku 1859 zahájil Kirchhoff skvělou sérii experimentů, při nichž už nešlo jen o laboratorní měření, ale i pozorování vesmíru. Kirchhoff ani Bunsen nikdy nepublikovali své osobní vzpomínky z doby svých objevných výzkumů, a tak se zachovalo jen málo historek o těchto velkých vědcích. Jedna z mála byla uveřejněna v roce 1902 v časopise Nature:

Město Heidelberg se choulí v údolí řeky Neckar na okraji pohoří Schwarzwald. Z okolních kopečků lze podél Rýnu vidět Mannheim, říční přístavní město ležící asi 15 kilometrů západně. Jednou zvečera, když Kirchhoff a Bunsen vyhlédli ven oknem své laboratoře, uviděli požár někde v Mannheimu, a pomocí spektroskopu v plamenech identifikovali baryum a stroncium.

O něco později, když byli na jedné ze svých četných procházek na „Cestě filozofů“ v zalesněných kopcích severně od řeky Neckar, Bunsen zahloubaně uvažoval: „Jestliže můžeme analyzovat požár v Mannheimu, proč bychom nemohli udělat totéž i v případě Slunce? Ale,“ dodal, „lidé si budou myslet, že jsme se zbláznili, když uvažujeme o takových věcech.“

Dost možná, že právě tato příhoda byla na počátku Kirchhoffových výzkumů povahy tmavých Fraunhoferových čar ve slunečním spektru. Již dříve Fraunhofer zjistil nápadnou shodu v poloze výrazné tmavé čáry ve žluté oblasti slunečního spektra (tuto čáru označil písmenem D) a jasné žluté čáry, která se téměř vždy objevovala ve spektru plamene. Vysvětlit původ žlutého plamene bylo velmi obtížné; tenkrát se ještě nevědělo, že žluté zabarvení způsobuje sodík, přítomný v obyčejné soli. Sůl bývá různě znečištěna. Avšak Bunsen byl i výborným chemikem a dokázal si připravit velmi čisté látky. A tak spolu s Kirchhoffem zjistil, že žlutá čára je charakteristickou čarou právě sodíku.

Kirchhoff se rozhodl, že přímo otestuje, zda světlá sodíková čára získaná v laboratoři se skutečně shoduje s tmavou sluneční čarou, a proto vložil zbarvený plamen do svazku slunečního světla nevelké intenzity. Čáry souhlasily. Avšak při zvýšení intenzity slunečního světla Kirchhoff k velkému překvapení uviděl čáru D tmavší než byla předtím! „Buď je to nesmysl a nebo něco moc velkého,“ poznamenává pro sebe.

Příští den Kirchhoff usoudil, že skutečně může jít o něco důležitého, a tak nahradil svazek slunečního světla lampou, která dávala spojité spektrum. Vzrušení narůstalo. Bunsen vzkřiknul: „Jestliže se tmavé čáry opravdu objeví, myslím, že se opravdu zblázním!“ Dost pravděpodobně se tmavé čáry hned napoprvé neobjevily, neboť teplota plamene Bunsenova hořáku byla příliš vysoká ve srovnání se světlem Drummondovy plynové lampy, která vydávala spojité spektrum. Kirchhoff však vytrval a brzy našel, že s chladnějším plynovým kahanem lze také vytvořit tmavou sodíkovou čáru.

Kirchhoff bez váhání připravil článek o 600 slovech, ve kterém popsal experiment. Prezentoval jej v berlínské Akademii věd 27. října 1859. Ve zprávě uvádí, že plamen by měl být chladnější než zdroj spojitěho spektra. V následující práci uvádí svůj věhlasný zákon záření: poměr emisního a absorpčního koeficien-



Gustav Kirchhoff (stojící) a Robert Bunsen.

4. Všechna kosmická tělesa září

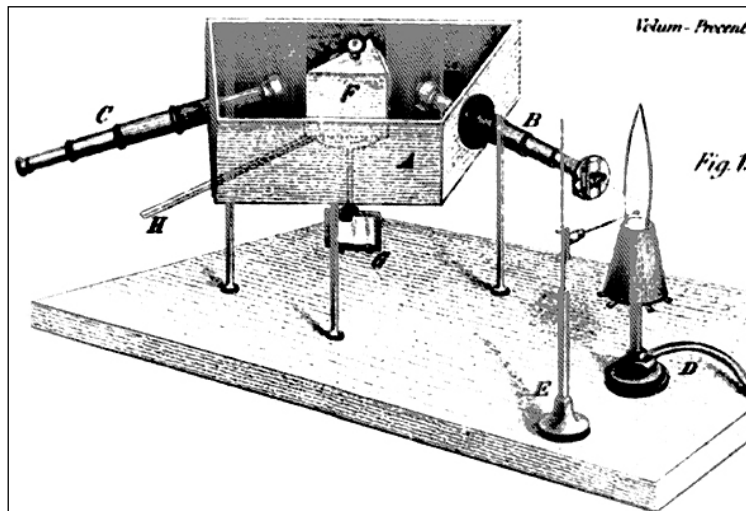
tu je funkcí vlnové délky a teploty a je to táž funkce pro všechna tělesa. V třetím článku z ledna 1860 rozpracoval svou teorii ještě důkladněji, ale mezitím velmi pečlivě mapoval sluneční spektrum a srovnával je s laboratorními spektry mnoha prvků. V následujícím roce identifikoval na Slunci sodík, vápník, hořčík, železo, nikl, chrom, baryum, měď a zinek.

Kirchhoffovo vysvětlení původu Fraunhoferových čar slavilo svůj velký úspěch zejména tehdy, když Kirchhoff spolu s Bunsenem objevili nový pozemský prvek, který podle výrazných modrých spektrálních čar nazvali césium. V následujícím roce 1862 ohlásili objev dalšího prvku – rubidia, který vykazoval červené čáry.

Je pozoruhodné, že tentýž experiment, který uskutečnil Kirchhoff v Heidelbergu na podzim roku 1859, byl realizován v Paříži již o desetiletí dříve fyzikem Léonem Foucaultem³⁾. Podobně jako Kirchhoff chtěl i Foucault dokázat, že sluneční čára D souhlasí s jasnou žlutou čarou, jež se objevila ve spektru uhlíkové obloukové lampy. K překvapení zjistil, že „když vložíme obloukovou lampu do svazku slunečního světla, čára D se podstatně zesílí“. Nicméně Foucault tento neobvyklý jev nedokázal vysvětlit. Zřejmě netušil, že jasná čára D v oblouku uhlíkové lampy vzniká sodíkovým znečištěním. Foucault též nezjistil, že laboratorní absorpční čáry a absorpční čáry sluneční přísluší týmž chemickým prvkům.

Proto plným právem čteme dnes na pamětní desce, umístěné na jedné impozantní budově na hlavní třídě v Heidelbergu: „V této budově Gustav Kirchhoff společně s Robertem Bunsenem položili základy spektrální analýzy, použili ji ke studiu Slunce a hvězd a odkryli nám tak chemii vesmíru.“

Podle článku *Unlocking the Chemical Secrets of the Cosmos*, publikovaného v časopise *Sky and Telescope* 57, 1981, 12–14. Přeložil Zdeněk Pokorný.



³⁾ Čti: *fukóltem*.

4. Všechna kosmická tělesa září

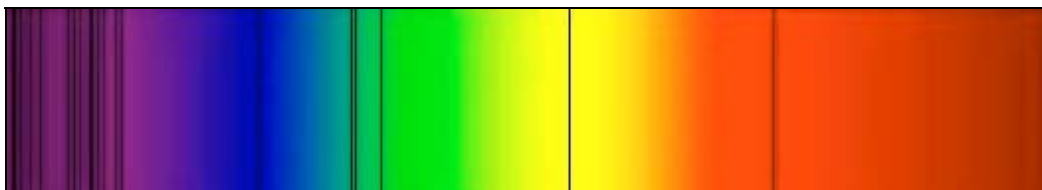


Správný postup při bádání lze shrnout takto: „Přemýšlet, počítat, plánovat, experimentovat, přemýšlet – a napřed i potom a pořád myslet.“ Často se ale uplatňuje tato metoda: „Údiv, odhad, tápající lopotění, znovu odhad, teoretizování, a hlavně vyhýbání se jakémukoli výpočtu.“

Arthur Gordon Webster, fyzik (1863 – 1923)

otázky a příklady

Otázka 4.3.1. Budou vlnové délky emisních spektrálních čar určitého prvku přesně stejné jako vlnové délky absorpčních čar, nebo budou jiné (a proč?)



Otázka 4.3.2. Jakou frekvenci má elektromagnetické záření, jehož vlnová délka činí 0,2 m? Do jaké části spektra toto záření náleží?

Otázka 4.3.3. Který (či které) z následujících pojmů *nemá* (či *nemají*) bezprostřední souvislost se spektroskopii? a) Dopplerův jev; b) foton; c) frekvence záření; d) modul vzdálenosti; e) barevný index.

4. Všechna kosmická tělesa září

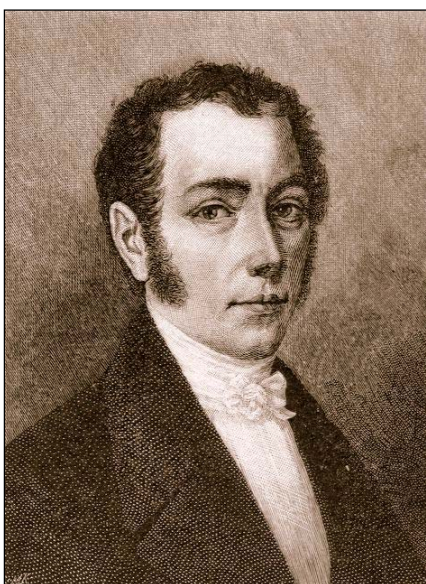


medailon

Joseph Fraunhofer

(6. 3. 1787 – 7. 6. 1826)

„**C**htěl jsem nalézt, zda v barevném obrazu slunečního světla je vidět podobný světlý proužek jako v barevných ob-
razech osvětlovacích lamp, ale místo toho jsem v dalekohledu našel takřka nepočítaně silných a slabých vertikál-
ních linií, které ale jsou tmavší než zbývající část barevného obrazu; některé se zdají býti dokonale černé.“ Těmito slo-
vy popsal v roce 1816 v jednom pojednání o lomu světla objev: tmavé spektrální čáry, kterých od červeného k fialové-
mu konci slunečního spektra napočítal přes 570, se staly o několik desítek let později klíčem k poznání zákonitostí
spektrální analýzy. Fraunhofer se ovšem tímto výzkumem dále nezabýval. Stačilo mu, když pomocí poloh těchto čar ve
spekttru mohl s nebyvalou přesností zjišťovat index lomu skel, z nichž zhotovoval objektivy, jež vykazovaly jen nevel-
kou barevnou vadu. Tehdy už byl 29letý Fraunhofer uznávaným optikem, přístroje jím navrhované a konstruované pat-
řily k nejlepším na světě.



Cesta k tomuto postavení ovšem snadná nebyla. Joseph Fraunhofer je čítankovým příkladem člověka, který ze zcela nuzných a beznadějných poměrů svou vůlí, pracovitostí i za přispění náhody vyrostl v geniálního vynálezce.

Nejmladšímu z jedenácti dětí chudého sklářského mistra v bavorském městečku Straubing se nedostalo prakticky žádného školního vzdělání. Věčně nemocný Joseph většinu času pomáhal v dílně svého otce. Ani když se proti své vůli dostal do učení k brusiči skla Weichselbergerovi, nemohl se prakticky ničemu novému naučit. V 11 letech zcela osiřel a jeho výcho-
vu formálně převzal Weichselberger. Do děje ale zasáhla náhoda: přístavba dílny jeho mistra se 21. července 1801 zřítila a pod troskami zůstali mistro-
vá a Joseph. Mistrovou vyprostili mrtvou, Joseph jako zázrakem přežil. Zá-
chranné práce sledoval i kurfiřt Max IV. Joseph. Když se dověděl o osudu mladého Fraunhofera, daroval mu 18 dukátů, řadu knih o matematice, fyzice i astronomii a také prosadil, aby se dál vzdělával v učňovské škole.

Také další Fraunhoferovy životní osudy jsou pestré a vydají na dlouhý román. Po vyučení našel Joseph uplatnění ve sklárnách v Benediktbeuer-
nu, kde zakrátko vedl výrobu technické optiky. Podařilo se mu výrazně

4. Všechna kosmická tělesa září



Fraunhofer při práci.

omezit barevnou vadu u čočkových objektivů. Pečlivě hledal ideální složení sklářské taveniny, z níž je možné vyrobit optické sklo bez bublin a nepravidelností, s předem zadaným indexem lomu skla. Postupně se objektivy z Fraunhoferovy dílny stávají světoznámé. Mistrovským dílem je 240milimetrový refraktor pro estonskou hvězdárnu v Dorpatu, s nímž astronom Friedrich Struve měřil přesné polohy několika tisíc dvojhvězd. Fraunhofer dokázal rýt na svou dobu precizní optické mřížky, kterými ve spektrometrech nahrazoval skleněné hranoly. Analýzy spekter byly rázem mnohem přesnější a snazší.

Fraunhofera povýšili do šlechtického stavu, stal se honorovaným profesorem mnichovské univerzity. Zdálo by se, že teď už ho nemůže potkat nic zlého. Jenže on usilovně pracuje. Dlouho do noci, sedm dní v týdnu. Jeho chatrné zdraví mu ale šanci nedalo: devětatřicetiletý Joseph Fraunhofer umírá na tuberkulózu. Současníky často přehlížený Fraunhofer, člověk bez formálního akademického vzdělání, se stal proslulým až po smrti. I to je jeden z rysů jeho příběhu, který určitě stojí za připomínání.

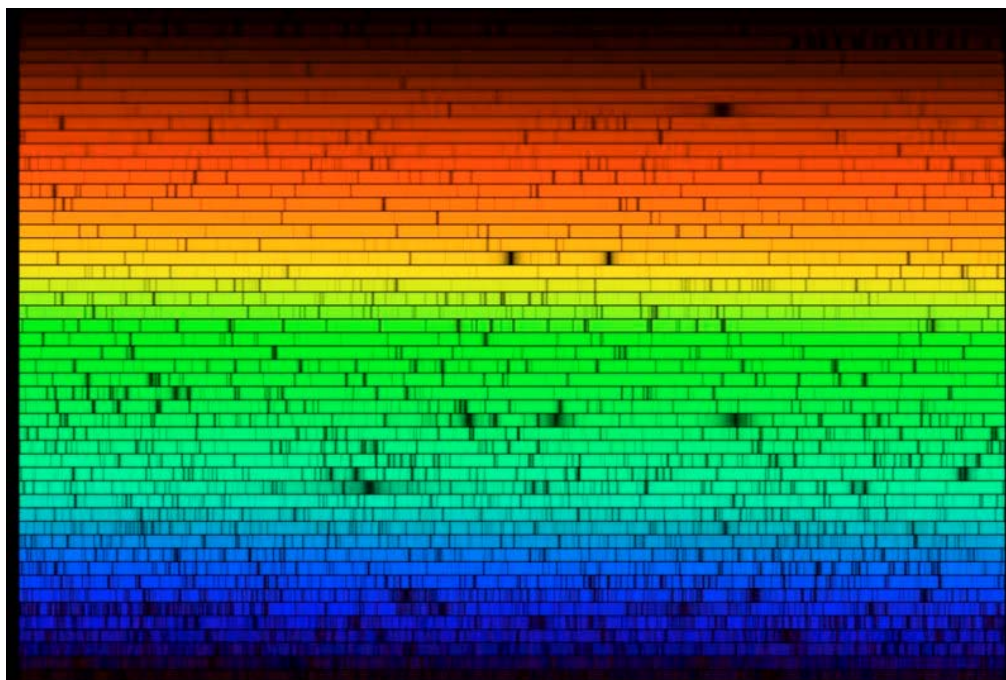
Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný.

4.4. Hvězdy ve spektroskopu

Spektrum každé hvězdy je zajisté poněkud jiné, podobně jako se každý živý tvor v něčem odlišuje od všech ostatních tvorů. Existují však velké skupiny hvězd, jejichž spektra jsou si podobná. Nyní si hvězdy roztřídíme podle jejich spektra, a také si vysvětlíme, proč vůbec tak rozmanitá spektra vznikají. Připomenou, že v každém spektru je obsaženo nebývalé množství informací, pouze je musíme správně rozluštit. A netýkají se pouze chemického složení – to je, dokonce bych řekl, druhořadá záležitost. Na závěr této kapitoly se tedy zmíníme o tom, co vše lze vyčíst ze spektra kosmického objektu.

Počátky spektroskopie hvězd

Když pomineme skutečnost, že hvězda Slunce byla vítaným zdrojem světla pro spektroskopické výzkumy od samých počátků, začíná éra soustavného průzkumu hvězdných spekter až roku 1862. Tehdy Angelo Secchi ¹⁾ (1818–1878) roztřídil na 4000 hvězdných spekter do čtyř kategorií a stal se tak zakladatelem spektrální klasifikace hvězd. V témže roce započal William Huggins ²⁾ (1824–1910) s detailním studiem vybraných hvězdných spekter. Všechny tyto práce byly založeny na vizuálních pozorováních.



Sluneční spektrum s vysokým rozlišením.

¹⁾ Čti: *andželo seki*.

4. Všechna kosmická tělesa září

Velký skok vpřed umožnilo použití fotografie. Obrovskou práci v oblasti klasifikace spekter vykonal na přelomu 19. a 20. století pracovní tým Harvardovy observatoře v USA, vedený Edwardem Pickeringem (1846–1919). Nejpilnější při klasifikaci byly dvě ženy: Anthonia Mauryová ³⁾ (1866–1952) a Annie Cannonová ⁴⁾ (1863–1941): prohlédly a klasifikovaly na půl milionu hvězdných spekter. Výsledkem jejich neúnavné činnosti byl mnohasvazkový katalog, financovaný zpočátku z odkazu amerického astronoma-amatéra Henry Drapera ⁵⁾.

Harvardská spektrální klasifikace

Původní klasifikace spekter používala písmena od A v abecedním pořádku. V průběhu prací se však ukázalo, že některé takto označené skupiny spekter vlastně neexistují, jinde bylo třeba zaměnit pořadí, takže původně abecední pořadí se narušilo. Výsledná posloupnost tzv. *spektrálních tříd* vypadá nyní takto:

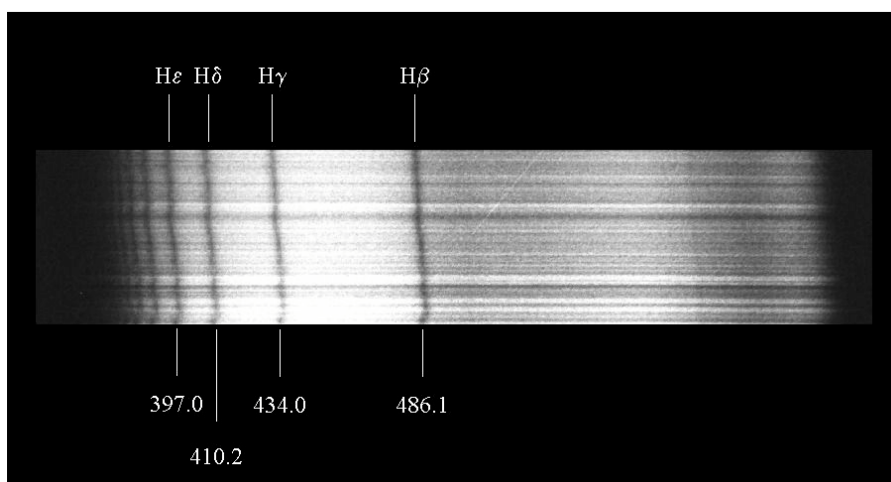
$$(Q - P - W -) O - B - A - F - G - K - M - L (- R - N - S)$$

(v závorkách jsou zapsány málo četné spektrální třídy).

Posloupnost spektrálních tříd není zapsaná takto náhodně, naopak: pořadí zápisu respektuje skutečnost, že povrchové teploty hvězd spektrálních tříd uvedených nalevo jsou vyšší než těch, jež jsou zapsané napravo. Jde tedy o *posloupnost teplotní*.

Rozmanitá spektra hvězd

Popišme si trochu podrobněji vzhled spekter hvězd jednotlivých spektrálních tříd. U hvězd spektrálních tříd O a B převládají čáry helia, uhlíku a kyslíku, u třídy A pak čáry vodíku. Pro hvězdy spektrálních tříd F a G jsou charakteristické čáry kovů, zejména železa. U ještě chladnějších hvězd spektrálních tříd K a M se objevují také čáry či pásy, náležející víceatomovým molekulám.



Spektrum hvězdy Sirius. Výrazné jsou tmavé absorpční čáry vodíku (čísla udávají vlnovou délku v nm).

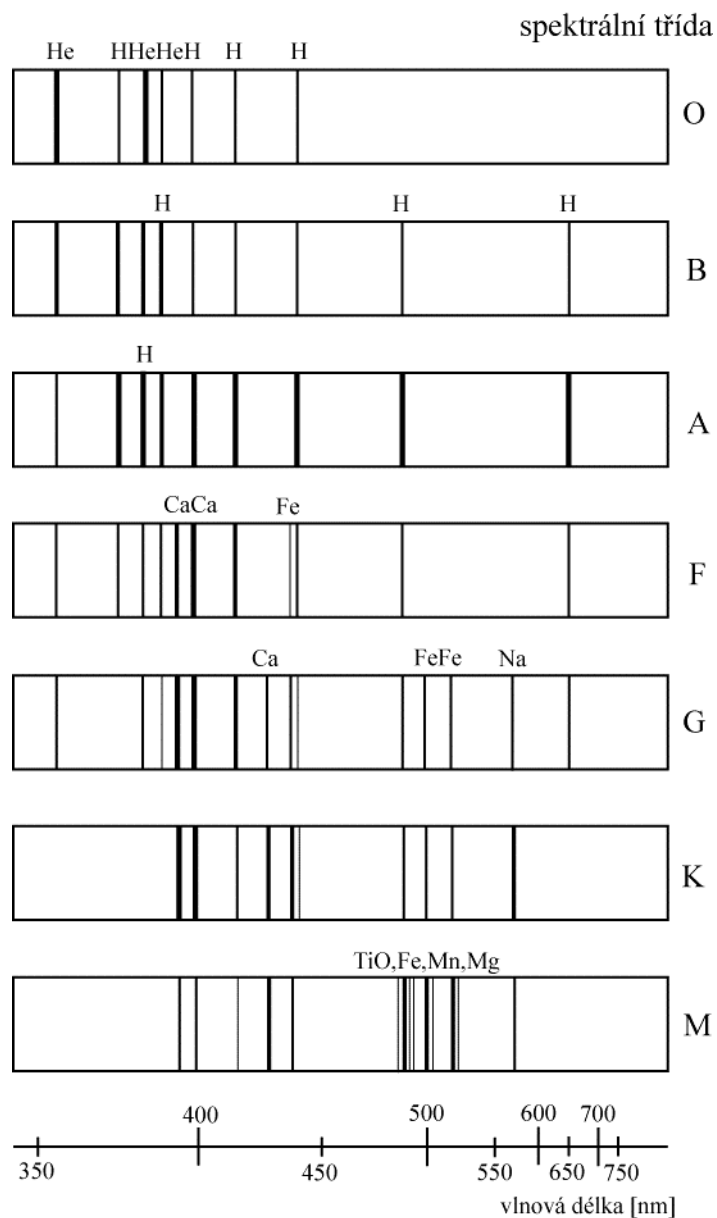
²⁾ Čti: *hagins*.

³⁾ Čti: *moryová*.

⁴⁾ Čti: *k(h)enonová*.

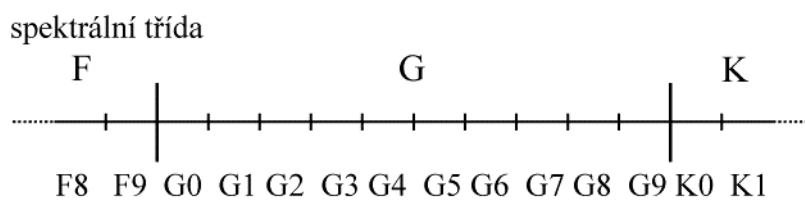
⁵⁾ Čti: *drejpra*.

4. Všechna kosmická tělesa září



Schematický vzhled hvězdných spekter různých spektrálních tříd.

Každou spektrální třídu dělíme ještě na deset podskupin, abychom tímto jemnějším dělením postihli i malé odlišnosti ve spektrech. K písmenu označujícímu spektrální třídu připojujeme ještě některou z číslic 0, 1, ..., 9 (např. F8, M2). Někdy jsou k údaji o spektru připojeny i poznámky v podobě malého písmene, např. *e* – emisní čáry ve spektru (B4*e*), *p* – pekuliární (tj. osobitý, zvláštní) vzhled spektra (A3*p*).



Jemnější dělení spektrálních tříd.

4. Všechna kosmická tělesa září

Nakonec si uveďme ještě jedno označení, které pochází z období počátků spektrální klasifikace hvězd. Tehdy se všeobecně soudilo, že teplotní posloupnost je i posloupností vývojovou (hvězda vzniká jako žhavé a zářivé těleso, postupně chladne, zahušťuje se a vyhasíná). Proto se spektrální třídy O, B a A označily jako *rané*, třídy K a M (někdy i F a G) jako *pozdní*. Dnes víme, že tak jednoduchým způsobem se hvězdy nevyvíjejí, nicméně rozřídění hvězd na *rané* a *pozdní* již zůstalo.

Spektrální třídy a povrchové teploty hvězd:

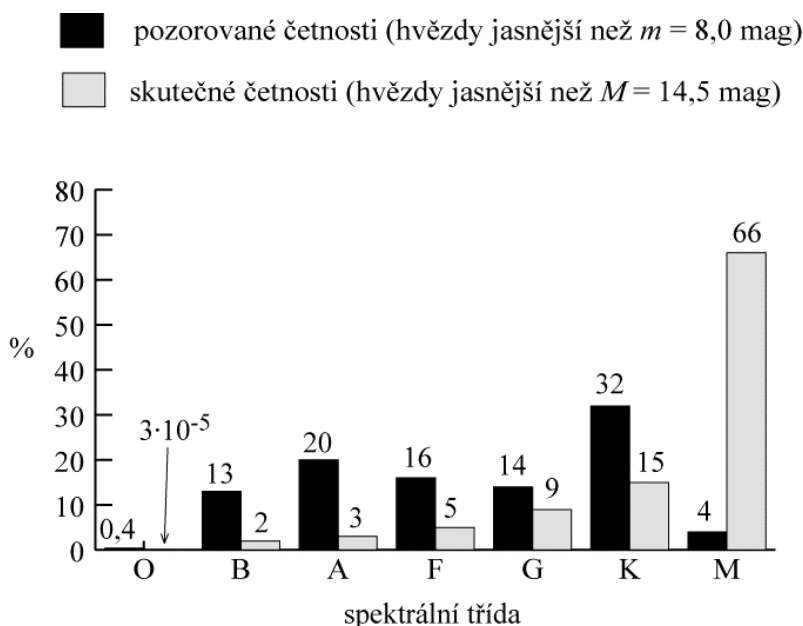
Spektrální třída	Povrchová teplota hvězdy (přibližně)	Typičtí představitelé
O	28 000 – 40 000 K	ζ Pup, λ Ori, ξ Per, λ Cep
B	10 000 – 28 000 K	ε Ori, α Vir, γ Per, γ Ori
A	7000 – 10 000 K	α CMa, α Lyr, γ Gem
F	6000 – 7000 K	δ Gem, α CMi, α Per, α Pup
G	5000 – 6000 K	Slunce, α Aur, β Hyi
K	3500 – 5000 K	α Boo, β Gem, α Tau
M	2500 – 3500 K	α Ori, α Sco, o Cet

Zlomyslné výběrové efekty

Každý astronom (a pochopitelně nejen on) musí čas od času řešit zapeklitý problém: odpovídají údaje, které byly získány pozorováním nebo experimentem, doopravdy realitě, nebo jsou nějak zkresleny? Ano, řeč je o *výběrových efektech*, které nás mohou snadno svést od pravdy.

Například: které spektrální třídy jsou nejčetnější? Při zjišťování z katalogu několika desítek tisíc nejjasnějších hvězd budou převažovat spektrální třídy A až K. Nevezmeme-li ale v úvahu jen hvězdy nejjasnější, nýbrž prostě *všechny* z okolí Slunce, převažují zcela jednoznačně hvězdy spektrální třídy M. Těch je ve vesmíru určitě nejvíce!

Pozorované a skutečné četnosti výskytu hvězd různých spektrálních tříd jsou již na první pohled odlišné. Když se při výběru neomezíme jen na nejjasnější hvězdy, jsou nejčetněji zastoupeny relativně chladné hvězdy spektrální třídy M ⁶⁾.



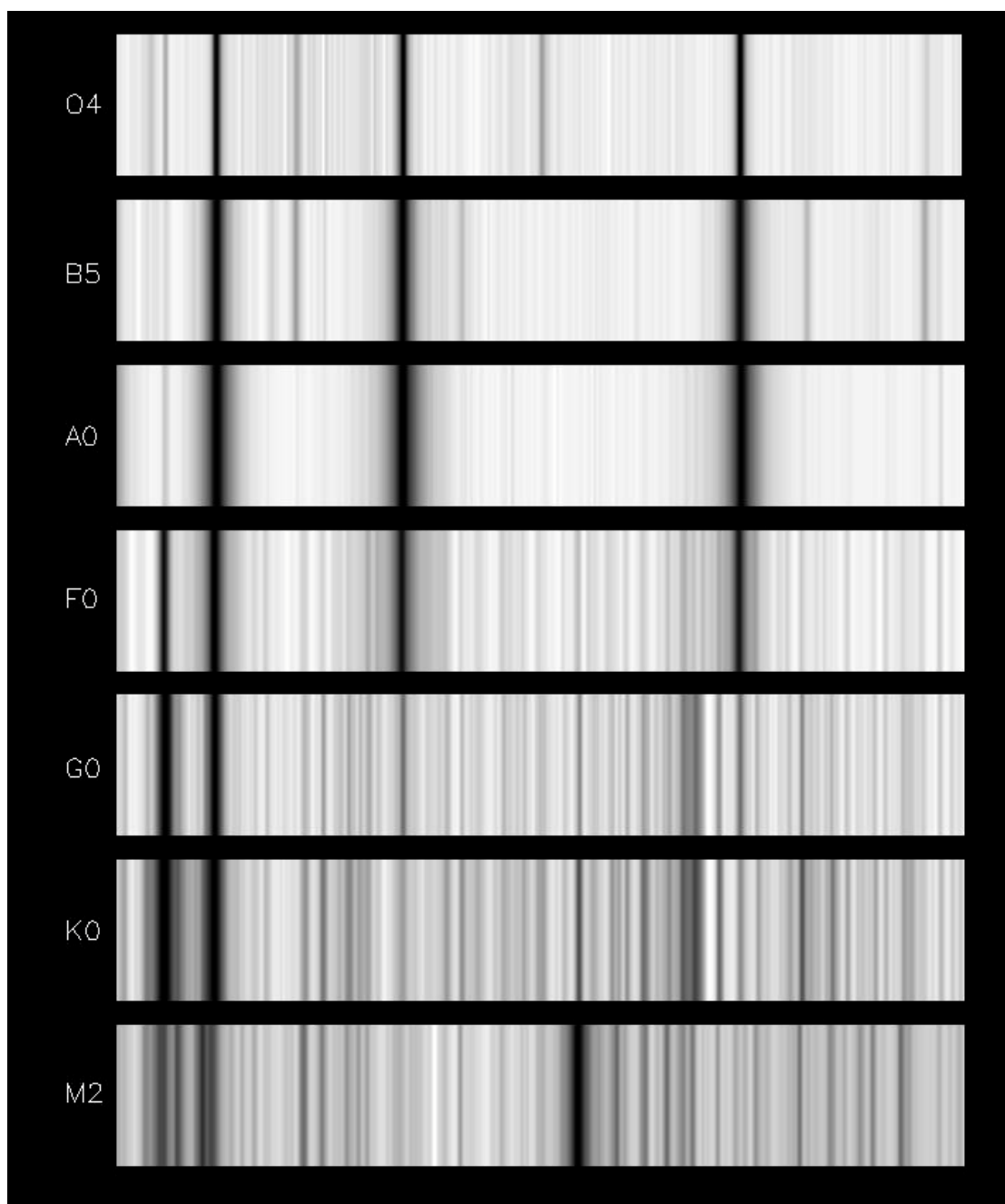
⁶⁾ Tato informace určitě odpovídá tomu, jaké fyzikální parametry má „typická“ hvězda – viz kapitola 1.1.

4. Všechna kosmická tělesa září

Hvězdy heliové, vodíkové a železné

Představa, že výskyt určitých čar ve spektru hvězdy věrně odráží její skutečné chemické složení, je lákavá. Například Rigel by měl být „heliovou“ hvězdou (právě tyto spektrální čáry jsou v jeho spektru nejmarkantnější), Vega „vodíkovou“, naše Slunce by mělo být určitě hvězdou „železnou“.

Takové představy o chemickém složení hvězd vznikaly koncem 19. století, kdy ještě neexistovaly fyzikální disciplíny, schopné vysvětlit vznik hvězdných spekter. Dnes už víme, že vzhled hvězdných spekter je dán především *fyzikálními podmínkami* v místech vzniku čar (v první řadě jde o teplotu, potom o tlak), zatímco skutečné chemické složení – u většiny hvězd víceméně stejné – lze ze vzhledu spektra odvodit až složitým postupem.



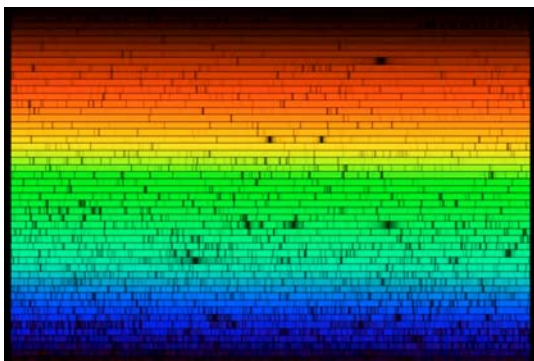
4. Všechna kosmická tělesa září

Kdy září vodík?

Říkali jsme, že spektrum hvězdy je především obrazem *fyzikálních* podmínek, za nichž záření vzniká. Zde je příklad: výskyt vodíkových čar ve spektru hvězd. U horkých hvězd (povrchové teploty nad 20 000 kelvinů) je vodík zcela ionizován, neutrální vodík téměř neexistuje a proto nemohou vznikat ani absorpční vodíkové čáry. Naopak u chladných hvězd (pod 5000 K) je téměř všechen vodík neutrální, jenže v nejnižším možném energetickém stavu. Protože není vybuzen do vyšších stavů, ani v tomto případě nepozorujeme výrazné spektrální čáry vodíku.

Optimální situace je u hvězd s teplotou kolem 10 000 K: vodík je sice při této teplotě již částečně ionizován, ale současně je dost neutrálních atomů, které jsou buzeny do vyšších energetických stavů a proto září.

4. Všechna kosmická tělesa září



Některé věci jsou tak vážné, že o nich můžete mluvit jenom žertem.

Niels Henrik David Bohr, fyzik (1885 – 1962)

otázky a příklady

Otázka 4.4.1. Spektrální třída hvězdy je určena: a) jejím chemickým složením; b) její povrchovou teplotou; c) její rychlostí rotace.

Otázka 4.4.2. Proč nacházíme absorpční pásy, které přísluší molekulám, pouze ve spektrech hvězd spektrálních tříd M a K?

Otázka 4.4.3. Která z následujících posloupností spektrálních tříd *není* rostoucí nebo klesající posloupností povrchových teplot hvězd? a) O, F, M; b) A, O, K, G; c) K, F, A, W; d) M, K, A, B.

Otázka 4.4.4. Jak jsme již uvedli, hvězdy různých spektrálních typů jsou v Galaxii zastoupeny velmi nerovnoměrně, přičemž pozorované zastoupení neodpovídá skutečnému. Hvězdy spektrálního typu O mají absolutní hvězdnou velikost přibližně -6 mag, hvězdy typu A $+1$ mag, typu G $+5$ mag, typu M $+9$ mag. Jak s použitím těchto faktů vysvětlíte velké rozdíly mezi pozorovaným a skutečným počtem hvězd jednotlivých spektrálních typů?

Otázka 4.4.5. Proč ve spektru hvězdy spektrálního typu B0 neočekáváme přítomnost čar neutrálního železa? a) Tyto hvězdy železo vůbec neobsahují. b) Za teplot charakteristických pro tyto hvězdy je už všechno železo ionizováno. c) Ve spektru hvězd spektrální třídy B0 nejsou vůbec žádné spektrální čáry, hvězdy mají jen spojité spektrum.

Otázka 4.4.6. Pozorujeme tři hvězdy s různými barevnými odstíny. Jen jedna z níže uvedených posloupností zabarvení představuje zároveň seřazení hvězd od nejchladnější po nejteplejší. Označte tuto posloupnost. a) načervenalá, namodralá, nažloutlá; b) načervenalá, nažloutlá, namodralá; c) taková posloupnost neexistuje, zabarvení na teplotě nezávisí (jde o fyziologický klam v lidském oku).

Otázka 4.4.7. Je-li posloupnost spektrálních tříd současně posloupností teplotní, hvězdy kterých spektrálních tříd budou mít zabarvení modrobílé a kterých načervenalé?

Otázka 4.4.8. Pro hvězdy spektrální třídy A jsou ve spektru typické: a) vodíkové čáry; b) molekulární čáry; c) čáry kovů (železa, niklu, wismutu...).

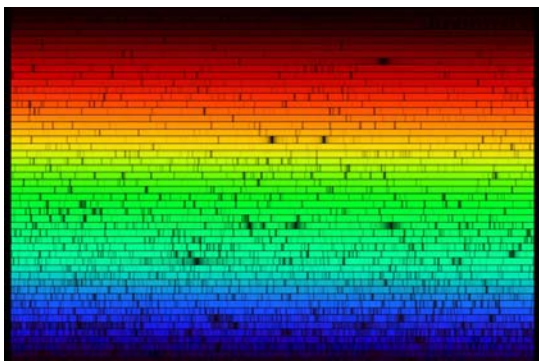
4. Všechna kosmická tělesa září

Otázka 4.4.9. Z absolutní bolometrické hvězdné velikosti lze usoudit (bez dalších doplňujících údajů) na: a) energii, kterou hvězda vyzařuje ve všech oborech spektra; b) energii, kterou hvězda vyzařuje ve vizuálním oboru spektra; c) spektrální typ hvězdy.

Otázka 4.4.10. Bezprostředně po sobě byly exponovány dva snímky části souhvězdí Lva. První snímek byl pořízen na film, který je citlivý převážně na červené světlo, druhý pak na film citlivý jen na světlo modré. Při prohlídce negativu bylo zřejmé, že hvězda Regulus byla na „červeném“ snímku výrazně slabší než na „modrém“. Lze z tohoto faktu něco usoudit o povrchové teplotě nebo spektrální třídě hvězdy Regulus?



Tam jsou uloženy moje dřívější práce.



medailon

Annie Jump Cannonová

(11. 12. 1863 – 13. 4. 1941)

Když v dubnu 1925 přebírala Annie Cannonová čestný doktorát Oxfordské univerzity, stálo ve zdůvodnění: „Za unikátní příspěvek v astrofyzice při klasifikaci spekter více než čtvrt milionu hvězd.“ Cannonová již byla čestným doktorem univerzit v Delaware a Groningenu, ocenění z Oxfordu však představovalo obzvlášť prestižní událost. Nejen proto, že na proslulé anglické univerzitě byla první ženou, jež se této cti dostalo. Výsledky práce Annie Cannonové dodnes zná každý student astronomie. Katalog hvězdných spekter, známý pod označením „The Henry Draper Catalogue“, patří totiž stále k základním astronomickým publikacím. V devíti svazcích jsou informace o 225 300 hvězdách. Najdete zde údaje o polohách hvězd, jejich jasnostech – ale především o spektrech hvězd.

Klasifikovat hvězdná spektra začala slečna Cannonová v roce 1896, když nastoupila na Harvardovu univerzitní observatoř. Spektra většího počtu hvězd lze pořídit naráz pomocí tzv. objektivového spektrografu: před objektiv dalekohledu vložíme velký skleněný hranol, takže hvězdy, jež jsou bodovými zdroji světla, se na fotografické desce zobrazí ve tvaru krátkých spekter. Když byly k dispozici snímky spekter, pořízené kvalitními objektivovými spektrografy, Cannonová zpřesnila spektrální klasifikaci a začala systematicky prohlížet všechna dostupná hvězdná spektra. To se psal rok 1911.

Do roku 1915 klasifikovala na čtvrt milionu hvězd, měsíční dávka činila 5000 hvězd. Aby dosáhla tohoto výkonu, pečlivě si práci zorganizovala. U malého stolku, zespuďu prosvětleného, lupou prohlížela skleněné fotografické desky se spoustou spekter. Asistentu pak jen hlásila výsledky. Když se dostala do oblastí na desce, kde bylo hvězd poskrovnu, dokázala klasifikovat tři i více hvězd za minutu. Jestliže se hvězdné pole zahustilo, byly to každou minutu „jen“ dvě hvězdy.

V jejích denících je vše pečlivě zaznamenáno, také začátek a konec každé klasifikační seance. Ze zápisů vy-



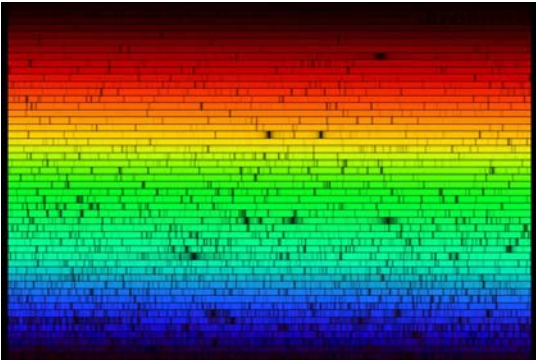
4. Všechna kosmická tělesa září

plývá, že se efektivnost její práce neustále zvyšovala. Annie Cannonová pracovala jako dokonalý stroj. I po letech, když ji někdo žádal o prověření klasifikace nějaké konkrétní hvězdy, byla schopna zopakovat svá předchozí určení s přesností desetiny spektrální třídy. Fenomenální vizuální paměť spolu s obrovskou trpělivostí slavila úspěch.

Annie Cannonová ale také jasně ukázala, že publikovat lze jen ověřená data. Ačkoli klasifikaci čtvrt milionu spekter Cannonová dokončila již v roce 1915, první svazek Draperova katalogu vyšel až v roce 1918, a poslední devátý o šest let později. Hvězdy bylo nutné spolehlivě identifikovat, údaje o polohách a jasnostech srovnat s jinými katalogy... To je práce přílišně zdlouhavá, únavná, ale naprosto nezbytná. Annie Cannonová ji podstoupila.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (zpracováno podle článku Barbary Weltherové, *Mercury*, 1984, 28–29).

4. Všechna kosmická tělesa září



speciální otázky

Číslo a zase číslo

Abyste dobře porozuměli astronomii, nemusíte znát nazpaměť velké množství čísel o hvězdách, planetách a dalších kosmických objektech. Na druhé straně byste měli mít „cit pro čísla“ – měli byste poznat evidentně chybný číselný údaj a nahradit jej vhodnějším (byť ne zcela přesným). Vyzkoušejte si to: v každém z následujících tvrzení je alespoň jedno číslo. Některá z nich jsou záměrně uvedena chybně. Najděte je, a budete-li znát správnou (či „přesnější“) hodnotu, uveďte ji místo chybné.

1. Parsek je *větší* délkovou jednotkou než světelný rok. Platí, že 1 parsek = 3,26 světelného roku.
2. Na celé hvězdné obloze spatříme pomocí běžného triedru za obvyklých pozorovacích podmínek (mimo městské osvětlení) *řádově* tisíce hvězd.
3. Pro pozorovatele na Měsíci trvá měsíční den (např. doba od púnoci do púnoci) asi 29 a půl dnů pozemských, tedy skoro celý pozemský kalendářní měsíc.
4. Kdyby povrchová teplota Slunce byla dvakrát vyšší než je současná (tedy asi 10 000 K), zářilo by Slunce nikoli nažloutlým, ale bílým světlem.
5. Jupiter, který obíhá kolem Slunce ve vzdálenosti zhruba 5 AU, dokončí jeden svůj oběh přibližně za 112 let.

5.1. Měříme a odhadujeme vzdálenosti

Informace o vzdálenosti kosmického objektu je snad nejdůležitějším údajem, který potřebujeme vědět. Navíc – tento údaj se vzhledem k obrovským vzdálenostem zjišťuje velmi obtížně. Proto si nyní navzájem porovnáme jednotlivé způsoby určování vzdáleností, abychom správně posoudili, jak jsou výsledky spolehlivé.

Radiolokace

Zjišťování *vzdáleností* radiolokací je elegantní metoda: měříme *čas* mezi vysláním impulsu a jeho návratem po odrazu od tělesa. Protože známe rychlost šíření elektromagnetického záření ve vakuu (a ve vesmíru *je* bezvadné vakuum), určíme po elementárním výpočtu vzdálenost přímo ve fyzikálních jednotkách (např. kilometrech). Bohužel – takto jsme schopni měřit vzdálenosti jen u objektů sluneční soustavy, protože výkony našich současných radiolokátorů na víc nestačí ¹⁾.



Radioteleskop síť VLA v Socorro (Nové Mexiko, USA).

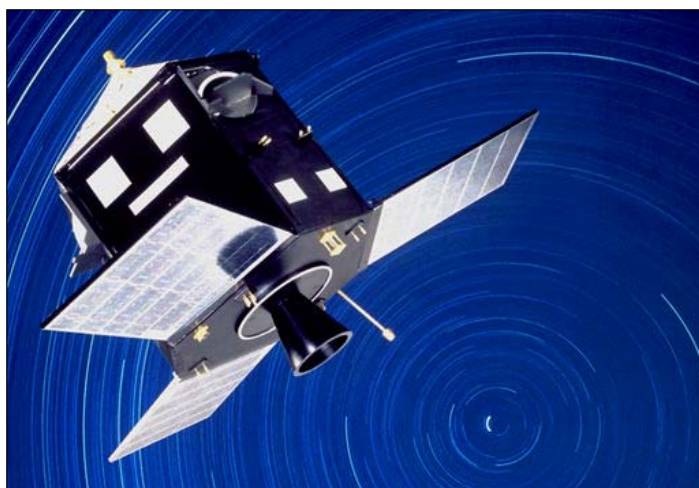
¹⁾ Obdobou radiolokace v optickém oboru spektra jsou odrazy laserových paprsků od Měsíce. Na Měsíci byly instalovány, zejména při expedicích Apollo, na několika místech tzv. koutové odražeče (speciální zrcadla), sloužící k odrazu fotonů vyslaných ze Země laserovými zdroji světla. Přesnost měření vzdálenosti touto metodou je neobyčejně vysoká – řádově centimetry! Metoda byla použita zatím jen u Měsíce.

5. Jak astronomové měří a váží

Jak přesně měříme souřadnice hvězd?

S přesností měření souřadnic hvězd úzce souvisí přesnost zjišťování paralax hvězd. Zde je uvedena střední přesnost jednoho měření souřadnice. Všimněte si dvojího velkého zvýšení přesnosti: poprvé po vynálezu dalekohledu (Hevelius a další), podruhé po vyhodnocení měření z družice Hipparcos, určené speciálně k měření poloh hvězd.

<i>střední přesnost jednoho měření</i>	
Ptolemaios (asi 100 n.l.)	$\pm 500''$
Tycho Brahe (1600)	$\pm 100''$
Hevelius (1680)	$\pm 18''$
Bradley (1750)	$\pm 2''$
Bessel (1825)	$\pm 0,7''$
moderní pozorování (1950)	$\pm 0,1''$
družice Hipparcos (1995)	$\pm 0,002''$



Družice Hipparcos (European Space Agency).

Měříme paralaxy hvězd

Měření paralaxy je klasickou přímou metodou určování vzdáleností kosmických objektů. Nejdlejší možnou základnou pro pozemského pozorovatele je průměr zemské dráhy. Tím je dán – při docilované přesnosti série měření řádově $0,01''$ – dosah metody: můžeme měřit paralaxy hvězd, které jsou nanejvýš 50 až 100 parseků daleko.

To ovšem platí pro pozorování pozemní. Velké zvýšení přesnosti nastane při měřeních na umělých družicích Země, protože odpadne rušivý vliv atmosféry. Výsledky z první družice tohoto druhu – satelitu Hipparcos – to potvrzují zcela přesvědčivě.

U pohybových hvězdokup lze jejich vzdálenosti určit na základě měření radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd, které tvoří hvězdokupu. Tento způsob je popsán v doplňku a praktiku *Vzdálenost hvězdokupy Hyády*, kde se s ním seznámíte podrobněji. Relativní chyba určení vzdálenosti touto metodou obvykle nepřevyšuje několik procent.

Všichni jsme stejní



Opravdu? Kdyby tomu tak skutečně bylo, měli bychom situaci při určování vzdáleností velmi usnadněnu. Astronomové tohoto principu při odhadech vzdáleností často využívají. Předpokládají například, že většina kosmických objektů *téhož typu* má téměř stejné absolutní hvězdné velikosti (tedy: téměř stejně září). Tak třeba předpokládají, že u nejjasnějších galaxií dosahuje absolutní hvězdná velikost -22 magnitud. Z pozorované hvězdné velikosti lze pak snadno vypočítat vzdálenost. Nebo třeba můžeme předpokládat, že některé objekty mají téměř stejnou velikost (například největší mlhoviny v galaxiích). Z pozorované úhlové velikosti pak zjistíme vzdálenost. Ale pozor, jde stále jen o odhady! Co když výchozí předpoklad neplatí?

Vypočítat vzdálenost hvězdy či galaxie, známe-li její absolutní hvězdnou velikost M a pozorovanou hvězdnou velikost m , je opravdu snadné. Známe totiž modul vzdálenosti ($m - M$) a z něho po úpravě dostaneme i vzdálenost r :

$$m - M = 5 \log r - 5,$$

$$r = 10^a \text{ (pc)},$$

kde

$$a = 1 + (m - M)/5.$$

5. Jak astronomové měří a váží



doplňěk

Vzdálenosti pohybových hvězdokup

U *pohybových* hvězdokup lze vzdálenosti určit na základě měření radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd, které tvoří hvězdokupu. (Poznamenejme, že *vlastním pohybem* rozumíme změnu polohy hvězdy na hvězdné obloze, měřenou vůči vzdáleným slabým hvězdám.) Hvězdy pohybových hvězdokup jsou natolik blízko, že dokážeme zjistit směr jejich společného pohybu v prostoru. Zakreslíme-li vlastní pohyby hvězd z hvězdokupy do hvězdné mapy, zjistíme, že směřují prakticky k jedinému bodu (úběžníku). Z polohy tohoto úběžníku lze vypočítat dosti přesně vzdálenost hvězdokupy.

Odvoďme si potřebné vztahy. Na připojeném obrázku písmeno S označuje Slunce, H pak Hyády. Směr pohybu Hyád je odchýlen od přímky Slunce-Hyády (SH) o úhel ϑ . Z pozorování známe radiální rychlost hvězdy v_r (změříme ji na základě Dopplerova jevu) a vlastní pohyb hvězdy za rok μ (zjistíme jej z přesných měření poloh hvězdy). Velikost tečné složky rychlosti v_t (kolmá na složku v_r) je rovna (viz obr. vpravo)

$$v_t = v_r \operatorname{tg} \vartheta.$$

Vlastní pohyb hvězdy za rok je roven μ . Je to zorný úhel ϑ , pod kterým se nám jeví úsečka o délce dané součinem rychlosti v_t a doby jednoho roku ve vzdálenosti Hyád.

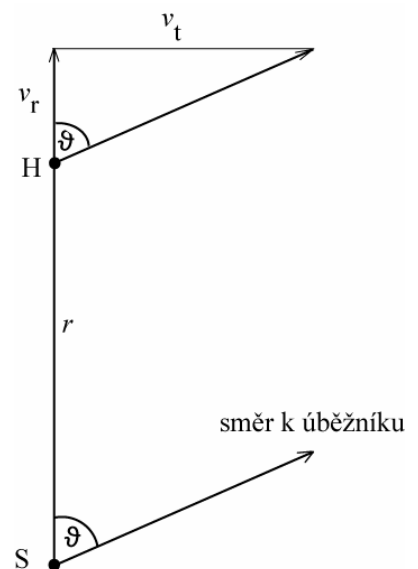
Paralaxu π vypočítáme z úměry

$$\pi / \mu = a / [\text{rychlost } v_t \times \text{čas (1 rok)}],$$

kde a je délka astronomické jednotky ($a = 1,496 \cdot 10^8$ km).

Dosadíme-li za a a čas příslušné číselné hodnoty (složky rychlosti v_r , v_t jsou obvykle uvedeny v jednotkách $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, proto a dosazujeme v kilometrech a čas v sekundách) a po úpravě předchozího vztahu dostaneme pro paralaxu π

$$\pi = 4,74 \mu / v_t = 4,74 \mu / (v_r \operatorname{tg} \vartheta).$$



5. Jak astronomové měří a váží



Otevřená hvězdokupa Hyády v souhvězdí Býka. Nejjasnější výrazně načervenalá hvězda poněkud nalevo od středu snímku je Aldebaran (do hvězdokupy ovšem nepatří).



čítanka

Zdeněk Pokorný: První hvězdná paralaxa

Úsilí o určení vzdáleností hvězd kulminovalo v letech 1837 až 1839. Jestliže v roce 1841 předal sir John Herschel, prezident Královské astronomické společnosti v Londýně, zlatou medaili pouze Friedrichu Besselovi, bylo to sice po zásluze, ale s úspěšným určením vzdáleností hvězd jsou spojena i jména dalších dvou astronomů – Wilhelma Struveho a Thomase Hendersona. Ale začněme popořádku.

Již Mikuláši Koperníkovi bylo jasné, že vzdálenosti hvězd může změřit trigonometricky. Vybral si hvězdy v okolí ekliptiky, tedy poblíž roviny dráhy Země kolem Slunce (za předpokladu heliocentrického uspořádání sluneční soustavy, v což Koperník pochopitelně věřil). Zvolíme-li takové hvězdy, jež jsou v jistém okamžiku vůči nám přesně v opačných směrech (řečeno astronomickou terminologií: rozdíl ekliptikálních délek je přesně 180 stupňů), o půl roku později zjistíme změnu. Rozdíl bude poněkud větší než 180 stupňů.

Metoda je správná a její princip je průzračný jako voda ve studánce; budeme-li zjišťovat polohu hvězdy ze dvou různých stanovišť, musí se nám blízká hvězda vůči vzdálenému pozadí poněkud posunout. Úhel, o nějž se posune (nazýváme jej paralaxa), bude tím větší, čím bude hvězda blíže. Jenže Koperník žádný posun nezjistil! Bystře usoudil, že hvězdy jsou alespoň tisíckrát dál než Slunce.

Jiný velikán renesanční astronomie a snad nejlepší pozorovatel nebe z doby před vynálezem dalekohledu Tycho Brahe touto metodou také nic nenaměřil, ale jeho závěr byl odlišný od Koperníkova: Země se vůči hvězdám nehýbe! Získal tak objektivní argument ve prospěch svého vlastního geocentrického modelu vesmíru. Galileo Galilei i Christiaan Huygens dospěli k názoru, že měření Koperníkova a Tychonova, jež byla tzv. absolutní, nemají při docilované přesnosti měření mnoho nadějí na úspěch. Při absolutních měřeních se musíme opřít o nějaký pevný výchozí směr, k němuž všechna další měření vztahujeme (jinak by to ani nešlo, chceme-li zjišťovat úhly blízké 180 stupňům). Právě v takovém případě systematické chyby velmi rychle narůstají. Galilei i Huygens měřili relativně – polohu měřené hvězdy vztahovali ke hvězdám sousedním – ale ani oni neměli úspěch.

Byl by to dlouhý příběh, kdybychom uváděli všechny, kteří se snažili změřit paralaxu nějaké hvězdy. O důležitosti takového měření není třeba se dlouze rozepisovat, vždyť je tím dáno měřítko našeho vesmíru či přinejmenším okolí našeho Slunce. Ještě v 18. století nebylo o ničem rozhodnuto. V tu dobu už sice nebylo pochyb o správnosti heliocentrismu, nicméně dosud nebyla změřena paralaxa žádné hvězdy. V tomto dlouho

5. Jak astronomové měří a váží

neúspěšném úsilí se zrodil objev tzv. roční aberace hvězd (Samuel Molyneux a James Bradley) i objevení skutečných (tzv. fyzických) dvojhvězd (William Herschel). Na počátku 19. století snad téměř každý pozorovatel usiloval o změření paralaxy hvězd. Kdo tedy byl tím prvním úspěšným?

Aktéři finále byli tři. První – Wilhelm Struve: narozen v Německu, studoval na ruské univerzitě v Dorpatu (dnešním Tartu). Od roku 1815 byl ředitelem tamní hvězdárny; ve 30. letech mu připadl úkol řídit stavbu nové observatoře v Pulkovu u Petrohradu. Druhým aktérem byl Friedrich Bessel, jehož záliba cestovat po moři ho přivedla až k astronomii. Na přimluvu astronoma Olberse dostal místo asistenta na hvězdárně v Lilienthalu. Také on budoval hvězdárnu – byla to pruská státní observatoř v Královci (dnešním Kaliningradu), kde se po jejím dokončení roku 1813 stal ředitelem. Konečně Thomas Henderson, původně písař v advokátní kanceláři. Zájem roku 1831 byl i on jmenován ředitelem tamní hvězdárny. Jedním z úkolů, které si předsevzal, bylo přesně změřit polohu hvězdy Toliman (alfa Centauri).

Jak se celá situace odvíjela? V roce 1837 vydává Struve v Petrohradě latinsky psaný spis *Stellarum duplicium et multiplicium mensurae micrometricae*, ve kterém uvádí, že paralaxa hvězdy Vegy je $0,125''$ s pravděpodobnou chybou $0,055''$. Chyba se zdála

Struvemu příliš velká (jde ostatně jen o 17 pozorování z doby od prosince 1835 do listopadu 1836), takže tomuto měření nepřikládal velkou důležitost. Také jiní astronomové získanému výsledku příliš nevěřili. Struveho pozorování ale narušovaly povinnosti spojené se stavbou pulkovské hvězdárny, a tak až 8. května 1840 uveřejňuje Struve výsledek nové série měření: $0,348''$ (s chybou $0,014''$). Kuriózní je, že první měření, která i Struve zpochybňoval, dala téměř přesný výsledek (dnes známá hodnota paralaxy Vegy je $0,129''$), zatímco série měření z pozdější doby byla vlastně chybná.

Struve věděl, že Friedrich Bessel měří paralaxu hvězdy 61 Cygni, dokonce ho dopisy vybízel, aby v měřeních pokračoval. Bessel v prosinci 1838 uveřejnil výsledek: $0,314''$ (s pravděpodobnou chybou $0,020''$ – dnes uváděná hodnota paralaxy je $0,286''$). Thomas Henderson publikoval měření paralaxy Tolimanu v roce 1839: $1,16''$ s chybou $0,11''$. Tomuto výsledku zprvu také nikdo nevěřil – tak velká paralaxa! Ale Henderson měl štěstí ve výběru hvězdy; alfa Centauri je, jak známo, po Slunci a svým trpasličím průvodci Proximě nejbližší hvězdou.

Kdo tedy jako první změřil paralaxu nějaké hvězdy? Problém je vlastně ve své podstatě neřešitelný. Úsilí zjistit paralaxu hvězd bylo tehdy obrovské. A úkol přetěžký – vždyť například paralaxa Tolimanu ($0,741''$) je tak malá, že odpovídá pozorování dnešní jednokorunové mince (o průměru 20 milimetrů) ze vzdálenosti více než pěti kilometrů! Tři astronomové dospěli do cíle prakticky současně – takový je dnešní pohled na věc. Koneckonců ani Bessel, Struve či Henderson nepovažovali otázku, kdo z nich byl opravdu *první*, za podstatnou.

Uveřejněno v knize *220 záludných otázek z astronomie* (Rovnost, Brno 1996).



Wilhelm Struve.



čítanka

Zdeněk Pokorný: Umíte si představit vzdálenosti ve vesmíru?

Každý záhy pochopí, že kosmické objekty jsou od nás tuze daleko. Ve škole se dovíme, že Slunce je dál než Měsíc, některé planety jsou blíže a jiné dále od Země než Slunce, zato však všechny ostatní hvězdy a galaxie jsou mnohem, mnohem dál než vše, co tvoří naši sluneční soustavu. Vesmír je tak rozlehlý, že my i s naší Zemí – která je pro nás bezesporu světem obrovským – se v něm doslova ztrácíme.

Tato představa je v podstatě správná. Jenže, neplyne z ní též, že tyto obrovské vzdálenosti nejsme s to vlastně zjistit? Lze mít důvěru k oněm číslům s mnoha nulami, jež údajně vyjadřují vzdálenosti kosmických objektů? A můžeme si vzdálenosti ve vesmíru vůbec nějak představit?

Tak předně: jak určujeme vzdálenosti v prostoru bezprostředně kolem sebe? Jak poznáme, že kniha ležící na stole je blíže než obraz na stěně místnosti? Vzdálenosti předmětů zjišťujeme tak, že se na ně díváme ze dvou směrů. Levým a pravým okem vidíme předměty poněkud posunuté vůči vzdálenému pozadí, tím více posunuté, čím jsou blíže. Protože oči máme od sebe vzdáleny jen 7 až 8 centimetrů, stačí to k prostorovému vidění do vzdálenosti asi sta metrů.

Přesto však, jak dobře víme, jsme schopni říci, co je blíže a co dále, i když vzdálenost přesahuje sto metrů. Tady pomáhá zkušenost. Vzdálenější předměty jsou úhlově menší, méně výrazné, zamlžené. My pak už ze zkušenosti víme, že jsou asi tři, pět či deset kilometrů daleko.

Astronomové jsou při určování vzdáleností v podobné situaci. Měří polohy hvězd ze dvou stanovišť; vzájemné polohy velmi vzdálených hvězd se měnit nebudou, zato však blízké hvězdy se vzhledem k těm vzdáleným pohnou. Praktický problém spočívá jen v tom, že tyto posuvy jsou velmi malé. I když zvolíme za základnu průměr zemské dráhy kolem Slunce, tedy největší základnu, jež je zatím k dispozici, činí tyto posuvy (paralaxy) u nejbližších hvězd jen několik desetin úhlové vteřiny!

Takovým způsobem dokážeme změřit vzdálenosti nejbližších řekněme několika desítek tisíc hvězd (a to jsme optimisté). U vzdálenějších si počínáme obdobně jako člověk, který se opírá o svou zkušenost, který vzdálenosti neměří, ale *odhaduje*. Předpokládejme kupříkladu, že existují skupiny hvězd s téměř stejnými vlastnostmi. Hvězdy, které stejně září, stačí pak navzájem porovnat, a ty, jež vidíme na obloze jasnější, jsou tudíž blíže než ty málo jasné. Kvalifikovaný odhad vzdálenosti je pro astronoma nutností. Je spojen s rizikem značných chyb, mnohdy systematických a tudíž velmi zálučných, ale *lepší je vrabec v hrsti než holub na*

5. Jak astronomové měří a váží

střeše. Poznáme-li četná úskalí při určování vzdáleností ve vesmíru, můžeme mít důvěru i k oněm milionům, miliardám či bilionům kilometrů. Nesmí to však být důvěra slepá.

Dobrá – vzdálenosti ve vesmíru jsou propastné. Dokáže si je vůbec někdo představit? Pro mne má velmi konkrétní představu vzdálenost třeba deseti kilometrů. To kráčíím dlouhými kroky dvě hodiny a nikde se nezastavuji. Sto kilometrů – to je horší: nejsem z těch, kteří by tuto vzdálenost ušli na jeden záťah, nu a v autě jde o hodinu a něco jízdy. Tisíc kilometrů: to je ještě horší. Sednu-li do letadla, jakákoli přímá představa o vzdálenosti se mi ztrácí. Jednoduše řečeno – když nás zradí naše smysly i každodenní zkušenost, je po představách. To však neznamená, že ta vpravdě astronomicky velká čísla značící vzdálenosti hvězd a galaxií jsou jen iluzí.



Galaxie v Andromedě je nejvzdálenější objekt ve vesmíru, který ještě můžeme pozorovat pouhýma očima.

Jedna představa se ale přece jen nabízí. Nebudeme vzdálenosti vyjadřovat v metrech, mílích, astronomických jednotkách či v něčem podobném, ale v jednotkách, které se opírají o měření času. Víme, že fotony (chcete-li: jakékoli záření) se ve vakuu šíří rychlostí 300 000 kilometrů za sekundu. Tak velkou vzdálenost si samozřejmě už nepředstavíme (snad jen uvedme, že jsou to 4/5 střední vzdálenosti Měsíce od Země). Nicméně není nic nepředstavitelného na tvrzení, že signál vyslaný z Měsíce potřebuje na překonání vzdálenosti k Zemi o trochu více než sekundu. Ze Slunce letí k Zemi 8,3 minuty, třebas od Neptunu 4 hodiny, od hvězdy Proxima Centauri 4,3 roku, od velké galaxie v souhvězdí Andromedy přes dva miliony let. Snad až na ten poslední časový údaj si lze vše představit.

Vzdálenosti takto vyjádřené si můžeme snadno zapamatovat i srovnávat. Délkové jednotky, které nazýváme světelná hodina, světelný den či světelný rok, jsou velmi praktické, právě proto, že dávají alespoň trochu té představy o nepředstavitelně velkých astronomických vzdálenostech.

Z knihy *100+1 záhadných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).

5. Jak astronomové měří a váží



Pouze šarlatáni jsou si něčím jisti. Pochybnost není právě příjemným stavem, ale jistota je směšná.

Voltaire (Francois Marie Arouet), spisovatel a filozof
(1694 – 1778)

otázky a příklady

Otázka 5.1.1. Měříme-li paralaxu nějaké hvězdy, vždy zjišťujeme úhlovou vzdálenost mezi měřenou hvězdou a řadou slabších hvězd v jejím okolí. Proč nepoužíváme jako oporné body vzdálené galaxie? Vždyť galaxie jsou natolik daleko, že vytvářejí jakousi „nehybnou kulisu“. Pak by se nemohlo stát, že měřená hvězda je dál než některá z oporných hvězd, což jistě znemožňuje zjištění paralaxy.

Otázka 5.1.2. V jedné bezejmenné galaxii byla zpozorována supernova, která se jevila jako hvězda 10 magnitudy, byla tedy dobře vidět i ve větším triedru. Předpokládejme, že supernova dosáhla absolutní hvězdné velikosti -20 mag. Po krátkém výpočtu nebo chvilce uvažování jistě správně určíte, jak je galaxie od nás daleko – platí jedna ze tří nabízených možností: a) 1000 pc; b) 10 000 000 pc; c) 1000 Mpc.

Otázka 5.1.3. Toto je již velmi snadná otázka: tvrdíme-li, že jasné galaxie jsou blíže než galaxie méně jasné, pak mlčky předpokládáme, že: a) rychlost šíření světla je konečná; b) všechny galaxie mají stejné moduly vzdáleností; c) všechny galaxie mají přibližně stejný zářivý výkon.

Otázka 5.1.4. U pohybových hvězdokup lze zakreslit vlastní pohyby jednotlivých hvězd do hvězdné mapy. Směřují prakticky do jednoho úběžníku. Za jakého předpokladu se prodloužené směry vlastních pohybů protnou v jediném bodě?

Otázka 5.1.5. Když určujeme vzdálenosti blízkých pohybových hvězdokup na základě vlastních pohybů jednotlivých hvězd hvězdokupy, dosahuje relativní chyba měření asi: a) maximálně 1 až 2 promile; b) několik procent; c) sto procent i více.

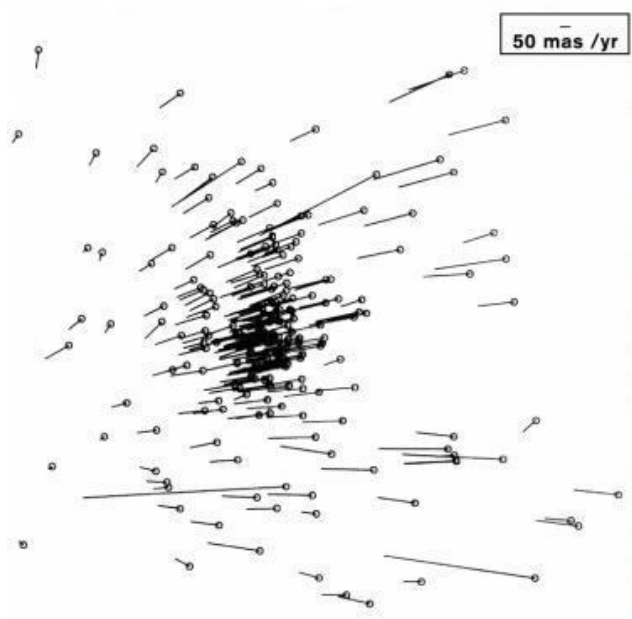


praktikum

Vzdálenost hvězdokupy Hyády

Hyády v souhvězdí Býka jsou nejbližší otevřenou hvězdokupou a též hvězdokupou pohybovou. Co nejpřesnějšimu určení vzdálenosti této hvězdokupy věnují astronomové již tradičně nemalé úsilí, neboť tato vzdálenost slouží jako „základní metr“ pro většinu dalších metod určování vzdáleností kosmických objektů.

Hvězdy patřící ke hvězdokupě se vůči vzdáleným hvězdám pohybují zhruba stejným směrem a rychlostí. U Hyád je to více než 200 hvězd, převážně trpasličích, o hvězdné velikosti 5 až 6 magnitud. Zakreslíme-li vlastní pohyby hvězd z Hyád do hvězdné mapy, uvidíme, že směřují k jednomu bodu (úběžníku). Z polohy úběžníku a z měření radiálních rychlostí hvězd můžeme vypočítat vzdálenost celé hvězdokupy. Je třeba si však uvědomit, že tato metoda určování vzdáleností, i když je poměrně přesná, je použitelná jen u několika blízkých pohybových hvězdokup.



Vlastní pohyby hvězd z Hyád, měřené družicí Hipparcos. Malá úsečka vpravo nahoře udává velikost vlastního pohybu 50 tisícín úhlové vteřiny za rok.

5. Jak astronomové měří a váží

Připomeňme si vztah, odvozený v doplňku této kapitoly, který použijeme pro výpočet paralaxy π (a tudíž vzdálenosti r) pohybové hvězdokupy Hyády:

$$(1) \quad \pi = 4,74 \mu / (v_r \operatorname{tg} \vartheta),$$

kde μ je vlastní pohyb hvězdy (z hvězdokupy) za rok, v_r je její radiální rychlost a ϑ je úhel mezi směrem ke hvězdě a směrem k úběžníku hvězdokupy.

Pracovní postup

1. Ověřte si výpočtem správnost konstanty 4,74, uvedené ve vztahu (1)!

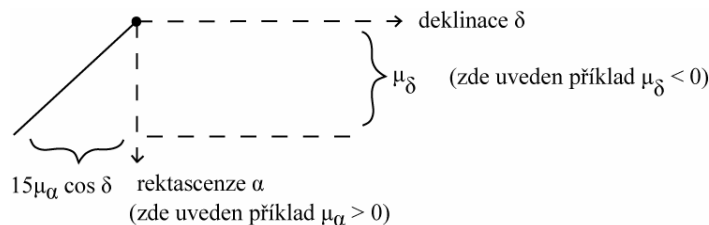
2. V tabulce 1 jsou pro 8 hvězd pohybové hvězdokupy Hyády uvedeny polohy (rektascenze α a deklinace δ) a složky vlastních pohybů za rok v rektascenzi ($15 \mu_\alpha \cos \delta$) a deklinaci (μ_δ). Doplňte v tabulce hodnotu celkového vlastního pohybu μ za rok, kterou vypočítáte ze vztahu

$$(2) \quad \mu = \sqrt{[(15 \mu_\alpha \cos \delta)^2 + \mu_\delta^2]}.$$

Použití vztahu (2) je oprávněné, neboť složky vlastního pohybu v rektascenzi a deklinaci jsou natolik malé, že pravouhlý *sférický* trojúhelník přejde v *rovinný*, kde μ tvoří přeponu (můžeme proto použít Pythagorovu větu).

3. Do připravené sítě (obr. 1) zakreslete polohy všech osmi hvězd a úsečkami znázorněte jejich vlastní pohyby. Aby obrázek byl správný, dbejte těchto pokynů:

- uvažte, ve kterém směru narůstá rektascenze a deklinace;
- stupnici pro rektascenzi zvolte od $3^{\text{h}}50^{\text{m}}$ do $7^{\text{h}}0^{\text{m}}$, pro deklinaci od 0° do 30° . Měřítka v obou osách musí být stejná ($1^{\text{h}} = 15^\circ$, $4^{\text{m}} = 1^\circ$);
- úsečky znázorňující vlastní pohyb musí mít jiné měřítko než to, které používáme pro vynášení poloh hvězd (jinak bychom úsečky nemohli zakreslit). Zvolte např.: $0,1'' = 20 \text{ mm}$.



Příklad zákresu hvězdy a jejího vlastního pohybu.

4. Prodlužte na obr. 1 úsečky znázorňující vlastní pohyby hvězd a snažte se nalézt polohu úběžníku. Z obrázku můžete též odečíst přibližnou hodnotu úhlu ϑ . Chcete-li pracovat přesněji, musíte vzít v úvahu, že nejde o případ v rovině, ale sférický. Úhel ϑ lze vypočítat ze základních vztahů sférické trigonometrie pro úhlovou vzdálenost dvou bodů daných svými sférickými souřadnicemi. Protože výpočet není zcela jednoduchý, použijte hodnot ϑ uvedených v tabulce 1.

5. Poněvadž již znáte hodnoty veličin μ , v_r a ϑ , vypočítejte pomocí vztahu (1) paralaxy π pro všech 8 hvězd a výsledky zprůměrujte. Vzdálenost $r = 1/\pi$ (v parsecích), kterou takto vypočítáte, srovnajte s hodnotou uváděnou v literatuře (vyhledejte se ji).

Praktikum bylo připraveno s použitím kapitoly B25 knihy M. G. J. Minnaerta: *Practical Work in Elementary Astronomy* (D. Reidel, Dordrecht 1969).

5. Jak astronomové měří a váží

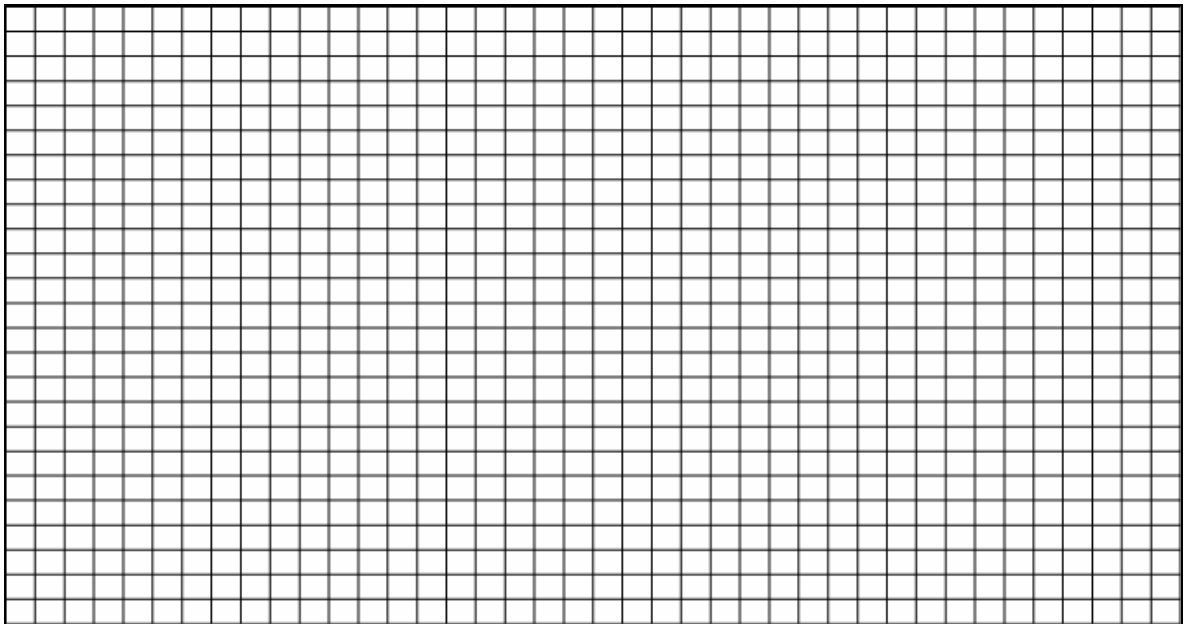
Vstupní data, výsledky:

Tabulka 1

Číslo hvězdy	α (2000)	δ (2000)	$15\mu_\alpha \cos \delta$	μ_δ	μ	ϑ	v_r (km s ⁻¹)
6	3 ^h 53,2 ^m	17° 20'	0,149"	-0,028"		37,5°	31,6
14	4 ^h 11,3 ^m	5° 31'	0,152"	0,010"		32,5°	35,8
33	4 ^h 20,6 ^m	15° 06'	0,112"	-0,023"		30,5°	36,1
74	4 ^h 28,8 ^m	17° 07'	0,106"	-0,046"		29,0°	40,5
104	4 ^h 38,1 ^m	12° 31'	0,103"	-0,011"		26,0°	44,4
112	4 ^h 46,0 ^m	11° 42'	0,074"	-0,004"		24,0°	38,2
129	5 ^h 03,1 ^m	21° 35'	0,068"	-0,042"		23,5°	42,5
131	5 ^h 09,8 ^m	28° 02'	0,062"	-0,070"		26,5°	41,3

Střední hodnota paralaxy π : _____

Vzdálenost r (v parsecích): _____



Obr. 1. Polohy a vlastní pohyby osmi hvězd z Hyád.

5. Jak astronomové měří a váží

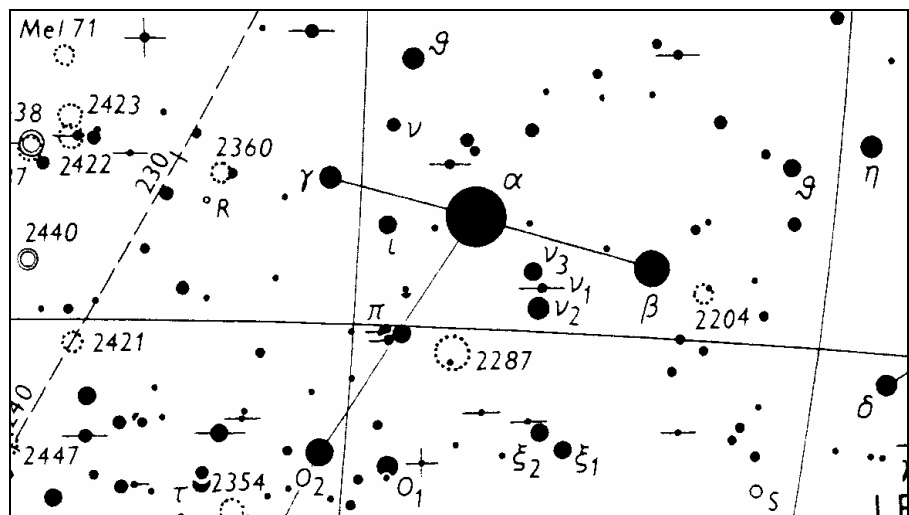


úloha k zamyšlení

Jak daleko je Sirius?

Koncem 17. století odhadl Christian Huygens vzdálenost hvězdy po Slunci nejjasnější – Siria (α Canis Majoris). Porovnal jasnost Siria a Slunce a vypočítal, že pokud obě tělesa září stejně (mají stejný zářivý výkon, řečeno dnešní terminologií), pak je Sirius 27 000krát dále než Slunce. Podle současných měření je poměr pozorovaných jasností Siria a Slunce roven $8,3 \cdot 10^{-11}$. Na základě těchto moderních dat určete vzdálenost hvězdy Sirius

- Huygensovou metodou, tedy za předpokladu, že Sirius a Slunce *opravdu* mají stejný zářivý výkon;
- s využitím moderního poznatku, že ve skutečnosti Sirius má 23krát větší zářivý výkon než Slunce.



5.2. Jak se váží hvězdy?

Vážit hvězdy, které jsou od nás tak nesmírně daleko, můžeme považovat za svého druhu zázrak. Určování hmotností určitě není snadné, u osamělých hvězd to jde skutečně jen ztuha... Prakticky jen u dvojhvězd se lze dobrat spolehlivých výsledků. Ještě že máme Keplerovy zákony!

Na řadě jsou dvojhvězdy

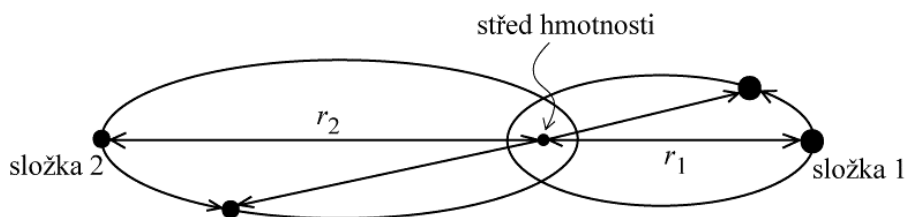
Hmotnost je nejpodstatnější charakteristikou hvězdy, protože na její velikosti závisí stavba a vývoj hvězdy. Bohužel právě hmotnost je veličinou, která se u hvězd zjišťuje s největšími obtížemi. Prakticky jediná přímá metoda je použitelná pouze u dvojhvězd. Známe-li vzdálenosti složek dvojhvězdy od středu hmotnosti soustavy a oběžnou dobu dvojhvězdy, můžeme z třetího Keplerova zákona zjistit hmotnosti obou složek.

Tato metoda má ale jeden háček: abychom určili vzájemnou vzdálenost složek dvojhvězdy (v *délkových* jednotkách, nikoli jen *úhlových*), musíme znát vzdálenost dvojhvězdy od nás, a jak již víme, s jejím určováním také bývají potíže.

Zde je matematický zápis třetího Keplerova zákona v tzv. přesném tvaru:

$$(r_1 + r_2)^3 / P^2 = (M_1 + M_2) G / (4\pi^2) .$$

Zde r_1 , r_2 jsou vzdálenosti obou hvězd od středu hmotnosti soustavy, P je oběžná doba, M_1 , M_2 hmotnosti hvězd, G je gravitační konstanta a π je v tomto vztahu Ludolfovo číslo (3,14159...). Všechny veličiny a konstanta jsou v jednotkách soustavy SI (metry, kilogramy...). Když ale budeme vzdálenosti r_1 , r_2 měřit v astronomických jednotkách, čas P v rocích a hmotnosti M_1 , M_2 ve slunečních hmotnostech, koeficient $G/(4\pi^2)$ nabude hodnoty jedna.



U dvojhvězdy obě složky obíhají kolem společného středu hmotnosti soustavy.

Z třetího Keplerova zákona určíme součet hmotností ($M_1 + M_2$), jestliže známe součet vzdáleností od středu hmotnosti ($r_1 + r_2$). Budeme-li však znát nejen součet ($r_1 + r_2$), ale i jednotlivé hodnoty r_1 , r_2 , můžeme vypočítat též hmotnosti každé složky M_1 , M_2 , protože platí $M_1/M_2 = r_2/r_1$.

5. Jak astronomové měří a váží

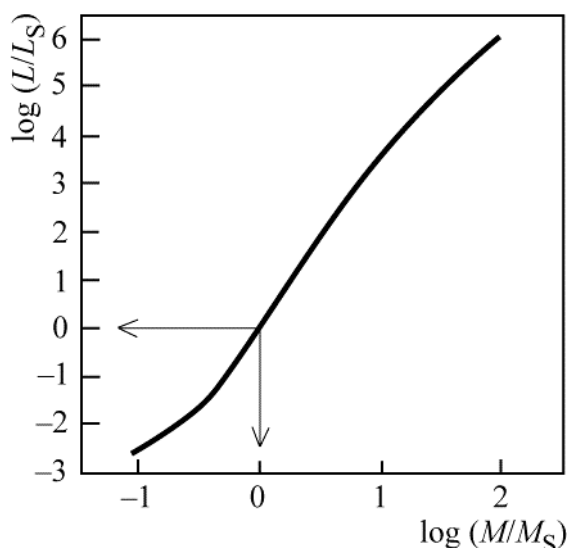
Hmotnosti osamocených hvězd

Přímým způsobem hmotnost osamocené hvězdy prakticky nezjistíme. Naštěstí však existuje statistická závislost mezi hmotnostmi hvězd a jejich zářivými výkony. Tato závislost plyne z teorie vnitřní stavby hvězd a na jejím odhalení se podílel zejména anglický astrofyzik první poloviny 20. století Arthur Eddington (1882–1944). Závislost platí spolehlivě sice jen pro hvězdy podobné stavby jako Slunce, těch je však více než 90 procent. Nejásněme ale předčasně: abychom závislost mohli použít, musíme znát zářivý výkon hvězdy, tedy její vzdálenost. A pak nezapomeňme: závislost je to pouze *statistická*, takže stěží určíme nepřesnost takového odhadu pro nějakou konkrétní hvězdu.

Uveďme matematický zápis závislosti mezi hmotností hvězdy M a jejím zářivým výkonem L :

$$L = a M^b,$$

kde a , b jsou konstanty. Konstanta b má hodnotu blízkou 3.

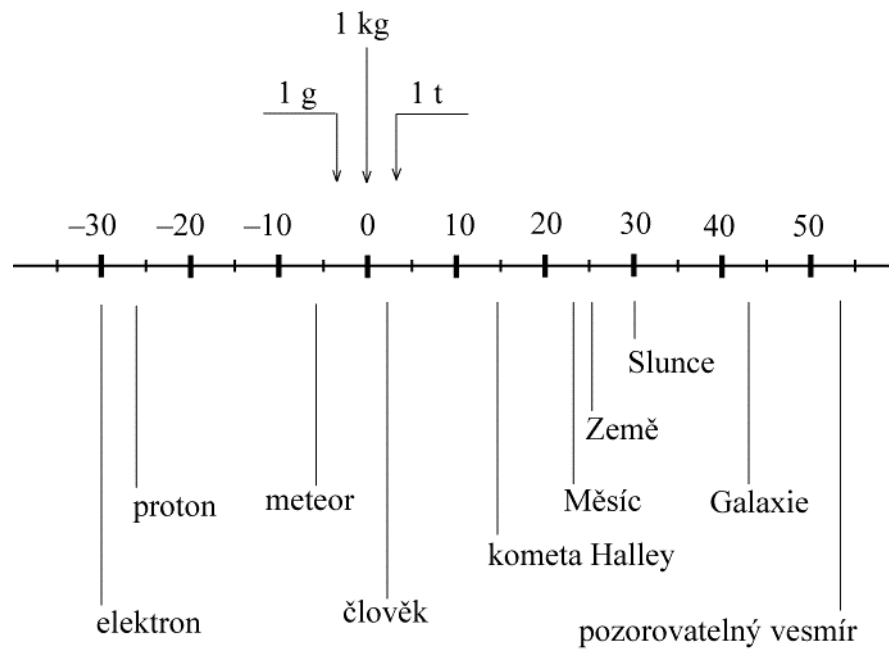


Schematický průběh závislosti hmotnost – zářivý výkon hvězdy (hmotnosti M a zářivé výkony L jsou uvedeny ve slunečních jednotkách).

O závislost hmotnosti hvězdy na jejím zářivém výkonu, kterou jsme nyní zmínili, se opíráme při určování tzv. *dynamických paralax* dvojhvězd. Výsledkem jsou nejen poměrně spolehlivé hodnoty vzdáleností těchto hvězdných soustav, ale i odhady hmotností jednotlivých složek dvojhvězdy. V praxi si celý postup můžete ověřit sami.

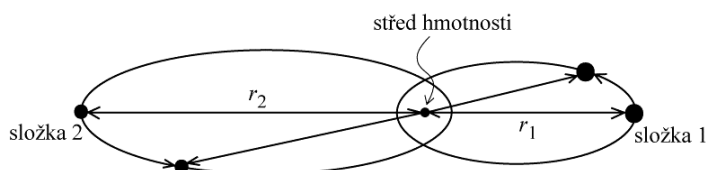
Je zřejmé, že objekty ve vesmíru mají rozmanité hmotnosti. I když je jejich určování většinou velmi svízelné (ostatně podobné je to se vzdálenostmi kosmických objektů), můžeme je alespoň v hrubých rysech navzájem porovnat. K tomu poslouží následující obrázek.

5. Jak astronomové měří a váží



Hmotnosti objektů ve vesmíru (vodorovná škála hmotností je uvedena v logaritmicke míře a v kilogramech).

5. Jak astronomové měří a váží



Dobrá pozorování nikdy neumírají, uvádají jen teorie.

Harlow Shapley, astronom (1885 – 1972)

otázky a příklady

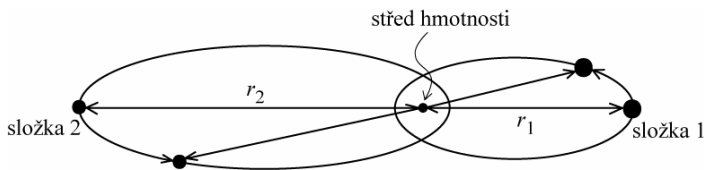
Otázka 5.2.1. Chceme určit hmotnost vizuální dvojhvězdy na základě třetího Keplerova zákona. Známe periodu oběhu složek kolem středu hmotnosti, jejich úhlovou vzdálenost a sklon trajektorie ke směru zorného paprsku. K určení hmotnosti však musíme znát ještě: a) rozměry složek; b) povrchovou teplotu složek; c) vzdálenost dvojhvězdy; d) polohu dvojhvězdy na hvězdné obloze, tj. její rektascenzi a deklinaci.

Otázka 5.2.2. Jestliže Slunce nahradíme hvězdou o hmotnosti 4krát větší než má Slunce, doba oběhu Země se: a) dvakrát prodlouží; b) dvakrát zkrátí; c) nezmění, protože vzdálenost Země-Slunce je stejná jako dříve.

Otázka 5.2.3. Hvězda Regulus ze souhvězdí Lva, jejíž zářivý výkon je 120krát větší než sluneční, patří svou vnitřní stavbou ke hvězdám podobným Slunci, takže pro ni platí Eddingtonem odvozený vztah mezi zářivým výkonem a hmotností. Odhadněte tedy její hmotnost.

Otázka 5.2.4. Čím je součet hmotností složek dvojhvězdy větší, tím je doba oběhu kolem společného středu hmotnosti (při stejné vzájemné vzdálenosti složek) [kratší × delší].

5. Jak astronomové měří a váží



praktikum

Dynamická paralaxa hvězd

Známe-li u vizuální dvojhvězdy dobu oběhu P složek kolem středu hmotnosti a je-li dostatečně přesně změřena velká poloosa a trajektorie, můžeme zjistit *dynamickou paralaxu* (tedy vzdálenost) dvojhvězdy i hmotnosti obou složek. K tomu využijeme empiricky stanovené závislosti mezi hmotností a zářivým výkonem hvězd. V současné době známe dynamické paralaxy jen asi tisíce systémů; přesto však jde o velmi cenná data, neboť vzdálenosti (i hmotnosti) hvězd se s dostatečnou přesností zjišťují velmi obtížně.

Odvoďme si potřebné vztahy. Jestliže a je délka velké poloosy trajektorie složky **B** kolem složky **A**, μ_1 , μ_2 hmotnosti složek, pak třetí Keplerův zákon bude mít tvar

$$(1) \quad a^3/P^2 = \mu_1 + \mu_2.$$

V tomto případě jsou hmotnosti složek vyjádřeny v hmotnostech Slunce, velká poloosa v astronomických jednotkách a doba oběhu v rocích. Pro lineární velikost velké poloosy a platí

$$(2) \quad a = a'' r = a''/\pi,$$

kde a'' je velká poloosa vyjádřená v úhlových vteřinách, r vzdálenost v parsecích, π je paralaxa. Po dosazení vztahu (2) do (1) dostáváme pro tzv. dynamickou paralaxu výraz

$$(3) \quad \pi^3 = a''^3/[P^2(\mu_1 + \mu_2)].$$

Pracovní postup:

1. U dvojhvězdy známe veličiny a'' a P . Za předpokladu, že hmotnosti $\mu_1 = \mu_2 = 1$ (vyjádřeno v hmotnostech Slunce), vypočítejte ze vztahu (3) předběžnou hodnotu paralaxy π .

2. Nyní pro každou složku zvlášť vypočítejte absolutní hvězdné velikosti M_1 (M_2); pozorované hvězdné velikosti m_1 (m_2) obou složek ovšemže známe. Platí:

$$(4) \quad M_k = m_k + 5 + 5 \log \pi, \quad k = 1, 2.$$

3. Závislost hmotnost – zářivý výkon $M = f(\mu)$ umožní stanovit (pro každou složku) odhady hmotností μ_1 (μ_2). Závislost, kterou uvádíme, byla převzata z knihy D. L. Harrise, K. A. Stranda a C. E. Worleye: *Basic Astronomical Data*, Chicago and London 1963, 273 a spolehlivě platí jen pro hvězdy hlavní posloupnosti (tento pojem bude upřesněn v kapitole 5.5). Závislost můžeme aproximovat lineárním vztahem (5).

Hmotnosti složek tedy můžete zjistit výpočtem: veličiny $\log \mu$ a M jsou lineárně závislé

$$(5) \quad \log \mu = p M + q,$$

kde konstanty p , q nabývají hodnot:

5. Jak astronomové měří a váží

rozsah M (mag)	p	q
$M < 0$	-0,12	0,46
$0 \leq M \leq 7,5$	-0,10	0,46
$7,5 < M \leq 11$	-0,14	0,75

Veličina M je absolutní bolometrická hvězdná velikost.

4. Přesnější hodnoty $\mu_1 + \mu_2$, získané výpočtem ze vztahu (5), dosad'te opět do vztahu (3) a celý postup opakujte. Výpočet končí, jestliže se dvě po sobě následující hodnoty dynamické paralaxy od sebe liší jen velmi málo (řekněme o méně než 0,01"). Všechny mezivýsledky zapisujte do tabulky 1.

V tabulce 2 jsou uvedeny hvězdné velikosti m , velké poloosy a a doby oběhů P pro několik vybraných vizuálních dvojhvězd. Pro srovnání je uvedena i trigonometrická paralaxa. Dynamickou paralaxu vypočítejte alespoň pro jednu z uvedených dvojhvězd.

Celý postup výpočtu dynamické paralaxy lze pochopitelně naprogramovat (což doporučujeme); tato úloha je klasickou ukázkou iteračního výpočtu, a obvykle velice dobře konverguje. Sestavíte-li si výpočetní program, připojte jej k tomuto praktiku – uveďte jeho výpis a způsob používání.

Vstupní data, výsledky:

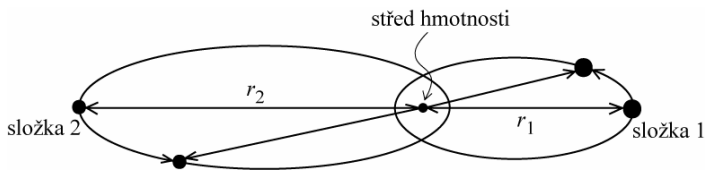
Tabulka 1. Výpočet dynamické paralaxy pro dvojhvězdu _____

<i>Cyklus výpočtu</i>	μ_1	μ_2	π	M_1	M_2	$\log \mu_1$	$\log \mu_2$
1	1,0	1,0					
2							
3							
4							
5							

Tabulka 2.

<i>Dvojhvězda</i>	m_1 (mag)	m_2 (mag)	a''	P (roky)	<i>Dynam. paralaxa</i>	<i>Trigon. paralaxa</i>
70 Oph	4,2	6,0	4,56"	87,71		0,193"
α Cen	0,0	1,2	17,58"	79,92		0,754"
γ Vir	3,5	3,5	3,70"	168,68		0,094"
ξ Boo	4,7	7,0	4,90"	151,51		0,145"

5. Jak astronomové měří a váží



výsledky

K otázce 5.2.1.: Varianta c – vzdálenost dvojhvězdy od nás umožní přepočítat *úhlovou* vzdálenost složek na *lineární* vzdálenost.

K otázce 5.2.2.: Varianta b – plyne z třetího Keplerova zákona: při zachování vzdálenosti Země-Slunce platí pro hmotnost M a dobu oběhu P vztah $M P^2 = \text{konst.}$

K otázce 5.2.3.: $L \sim M^3$ (veličiny L a M jsou v jednotkách slunečních zářivých výkonů a hmotností), takže hmotnost hvězdy Regulus M je přibližně $\sqrt[3]{120} = 5$ hmotností slunečních.

K otázce 5.2.4.: Kratší.

5.3. Rozměry hvězd

Ve velikostech hvězd jsou obrovské rozdíly. Porovnááme-li je se Sluncem, existují hvězdy miniaturní i veleobří. Není určitě nijak snadné změřit velikost hvězdy, když v dalekohledu nevidíme nic než bod. Často se používají docela rafinované metody – například se využívá toho, že některé hvězdy zakrývá Měsíc. Začněme ale popořádku.

Jak jsou hvězdy veliké?

Pomineme-li Slunce, musíme konstatovat, že hvězdy jsou od nás natolik daleko, že i ty největší vidíme prakticky jen jako světlé body. Navíc chvění atmosféry rozmývá obraz hvězd v dalekohledech, takže běžnými pozorovacími technikami nemůžeme dosáhnout lepšího rozlišení než řádově desetiny úhlové vteřiny, a to k rozeznání kotoučků hvězd nestačí.

Zlepšení tohoto stavu přinese spřažení dvou blízkých velkých dalekohledů, pracujících dohromady jako tzv. interferometr. Takto zakrátko budou fungovat dva desetimetrové reflektory na vrcholku hory Mauna Kea na Havaji a čtyři osmimetrové teleskopy na hoře Paranal v Chile. Nezapomínejme ani na kosmický dalekohled, který už je schopen zaznamenat největší hvězdy jako kotoučky.



Dva desetimetrové reflektory Keckovy observatoře na Havajských ostrovech slouží jako obří interferometr.

5. Jak astronomové měří a váží

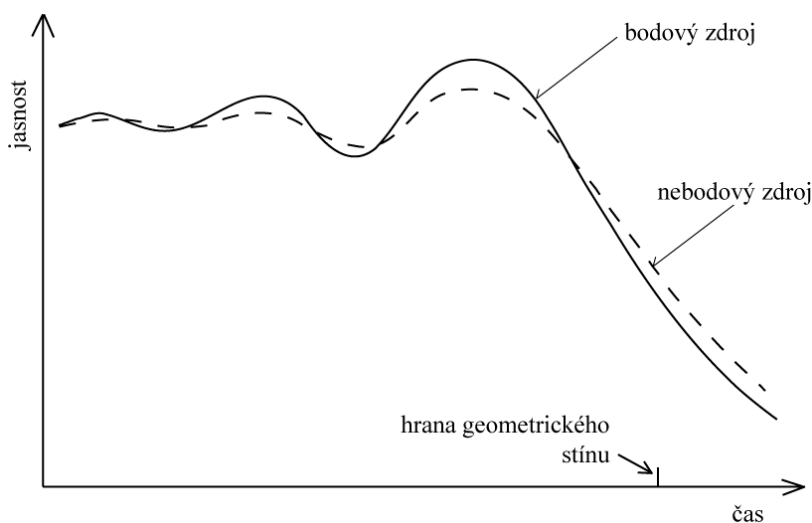
V zákrytu s Měsícem

V pásu kolem ekliptiky, kde se pohybuje Měsíc, dochází k mnoha zákrytům hvězd Měsícem. Měsíc osvětlený hvězdou vrhá stín, jehož okraj se po zemském povrchu pohybuje rychlostí asi kilometr za sekundu (právě taková je oběžná rychlost Měsíce vzhledem k Zemi, ověřte si jednoduchým výpočtem!). Pozorovatel, vybavený fotometrem schopným zaznamenat změny jasnosti hvězdy s časovým rozlišením tisícin sekundy, ovšem nezaregistruje okamžité zmizení hvězdy. Několik setin sekundy před zákrytem nastane několik zjasnění a zeslabení, přičemž průběh intenzity osvětlení závisí na úhlovém průměru zdroje.

Porovnáním takového záznamu získaného pozorováním s teoretickými průběhy změn jasnosti lze určit, jaký úhlový průměr měla hvězda, která byla Měsícem zakryta. (Poznamenejme, že z fyzikálního hlediska se jedná o ohyb světla bodového zdroje na ostré hraně, tzv. Fraunhoferův ohybový jev.)



Také Regulus je jednou z hvězd, která může být Měsícem zakryta.



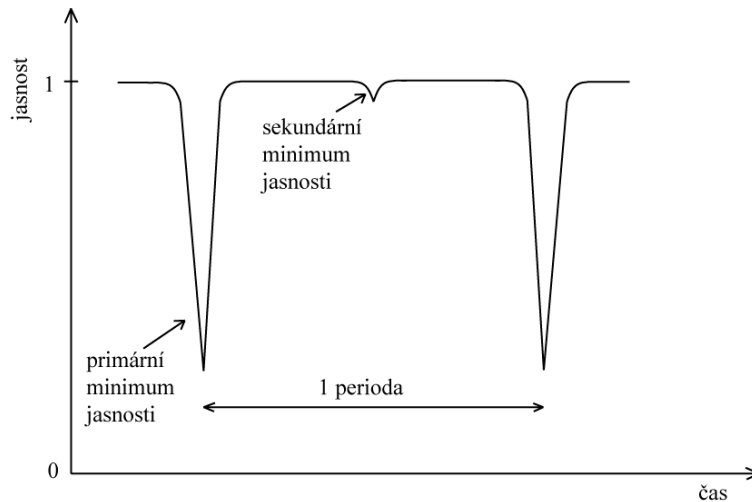
Fotometrický záznam zákrytu hvězdy Měsícem.

Zákrytové dvojhvězdy

Víte, co jsou zákrytové dvojhvězdy? Pokud ano, můžete tento odstavec přeskočit. Zákrytové dvojhvězdy jsou takové hvězdné soustavy, u nichž je oběžná rovina orientována vůči nám – pozorovatelům – docela význačným způsobem: dochází totiž ke vzájemnému zakrývání složek dvojhvězdy (oběžná rovina je tedy téměř totožná se směrem zorného paprsku).

5. Jak astronomové měří a váží

My ovšem jednotlivé složky nevidíme, jsou úhlově příliš blízko u sebe. Že jde o zakrývající se dvojhvězdu, poznáme z charakteristického tvaru *světelné křivky*, tedy z časového průběhu jasnosti, která se periodicky mění. Zákrytovou dvojhvězdou je například Algol ze souhvězdí Persea; takových soustav je ale opravdu hodně, v katalogích najdeme v současné době na 10 000 položek.



Schematizovaná světelná křivka algidy.

Zákrytové dvojhvězdy jsou opravdu zajímavé soustavy; mimo jiné umožňují určit zřejmě tím nejspolehlivějším způsobem *průměry* jednotlivých hvězd. Ze světelné křivky lze snadno odvodit okamžiky začátků a konců zákrytů a zatmění jednotlivých složek dvojhvězdy. Při známé periodě oběhu složek kolem společného těžiště (také tu lze zjistit ze světelné křivky) získáme poměry velikostí hvězd k poloměru oběžné dráhy. Ze spektroskopických měření navíc můžeme určit oběžné rychlosti složek vzhledem k těžišti, takže nakonec stanovíme průměry obou hvězd přímo v kilometrech. (Podrobnosti: viz doplněk *Velikosti složek zákrytové dvojhvězdy*.)

5. Jak astronomové měří a váží



Kdo splete první knoflík, ten se už pořádně nezapne.

Johann Wolfgang von Goethe, polyhistor (1749 – 1832)

otázky a příklady

Otázka 5.3.1. Jak velká je teoretická rozlišovací schopnost jednoho 10metrového reflektoru Keckovy observatoře na Havaji? Je skutečná rozlišovací schopnost horší nebo lepší? A proč?

Otázka 5.3.2. Hvězdy Aldebaran a Arcturus mají shodou okolností stejné úhlové průměry ($0,02''$), Arcturus je však 1,8krát blíže než Aldebaran. Průměr hvězdy Arcturus, vyjádřený v délkové míře, je proto ve srovnání s průměrem Aldebaranu a) 1,8krát menší; b) $1,8^2$ krát menší; c) $1,8^2$ krát větší.

Otázka 5.3.3. Měření úhlových průměrů hvězd pomocí sledování zákrytů hvězd Měsícem je opravdu velice slibná metoda. Má však svá omezení. Jedno docela zásadní vás jistě ihned napadne. Které to je?

Otázka 5.3.4. Zjistěte pomocí mapy hvězdné oblohy deset nejjasnějších hvězd, jež mohou být někdy zakryty Měsícem.

Otázka 5.3.5. Modul vzdálenosti hvězdy je mírou a) vzdálenosti; b) zářivého výkonu; c) velikosti; d) povrchové teploty.

Otázka 5.3.6. Výsledkem fotometrických pozorování zákrytové dvojhvězdy je její světelná křivka. Pouze na základě rozboru této světelné křivky můžeme zjistit: a) hmotnosti jednotlivých složek dvojhvězdy; b) velikosti složek dvojhvězdy, vyjádřené v poloměrech trajektorie, po níž obíhají složky dvojhvězdy; c) spektrální třídy obou složek dvojhvězdy.

Otázka 5.3.7. Rozměry hvězd lze určit nepřímou tehdy, známe-li: a) zářivý výkon hvězdy a její povrchovou teplotu; b) hmotnost a vzdálenost hvězdy; c) jasnost a vzdálenost hvězdy. Přitom předpokládáme, že hvězdy září jako _____ .

Otázka 5.3.8. Zeptejme se ještě jednou na výpočet velikosti poloměru hvězdy. K tomu, abychom jej vypočítali, musíme znát tyto fyzikální veličiny: a) pozorovanou jasnost, vzdálenost, povrchovou teplotu; b) pozorovanou jasnost, spektrální třídu, barevný index; c) absolutní jasnost, barevný index, vzdálenost. Musíme současně předpokládat, že hvězdy září jako absolutně černá tělesa? [ano × ne].

5. Jak astronomové měří a váží



doplňěk

Velikosti složek zákrytové dvojhvězdy

Můžeme je zjistit přímo ze světelné křivky takové hvězdné soustavy (tedy ze závislosti jasnosti na čase). Pro jednoduchost si představme tento idealizovaný případ: obě hvězdy mají kotoučky stejnoměrně jasné, méně hmotná (tzv. sekundární) složka obíhá kolem hmotnější (primární) složky po kruhové trajektorii, a oběžná rovina těchto hvězd leží ve směru pozorovatel-dvojhvězda.

Označme si (viz též připojený obrázek): D , d – průměry složek dvojhvězdy (primární, sekundární složka) (přitom platí $d < D$), r – poloměr kruhové trajektorie, P – oběžná doba, t_1 , t_2 , ... – tzv. časy kontaktů.

Je zřejmé, že platí:

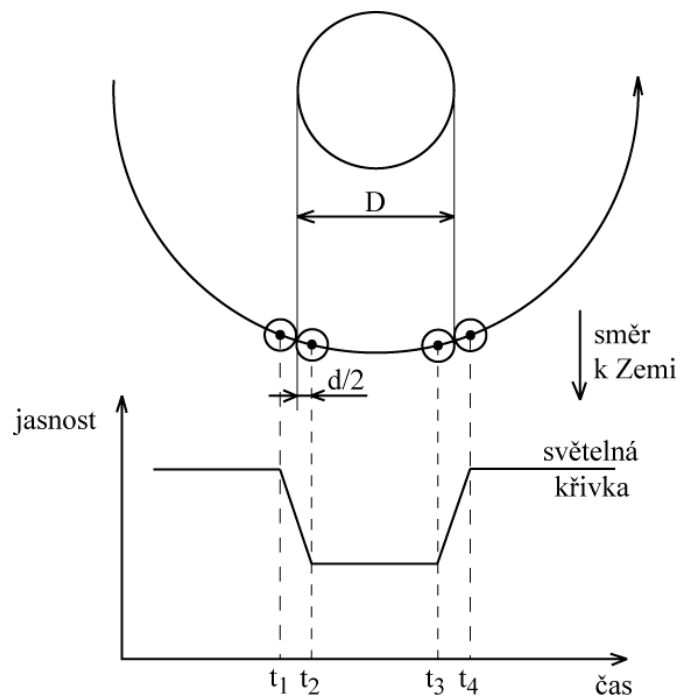
$$(t_4 - t_1)/P = (D + d)/(2\pi r) \quad \text{a}$$

$$(t_3 - t_2)/P = (D - d)/(2\pi r).$$

V těchto dvou rovnicích jsou tři neznámé veličiny, takže lze vypočítat pouze poměry D/r a d/r . Pokud však známe navíc (ze spektroskopických měření) také oběžnou rychlost v (přímo v km/s), dostaneme velikost poloměru kruhové trajektorie r (přímo v km) ze vztahu:

$$2\pi r = P \cdot v,$$

a pak lze vypočítat i velikosti D a d v kilometrech.



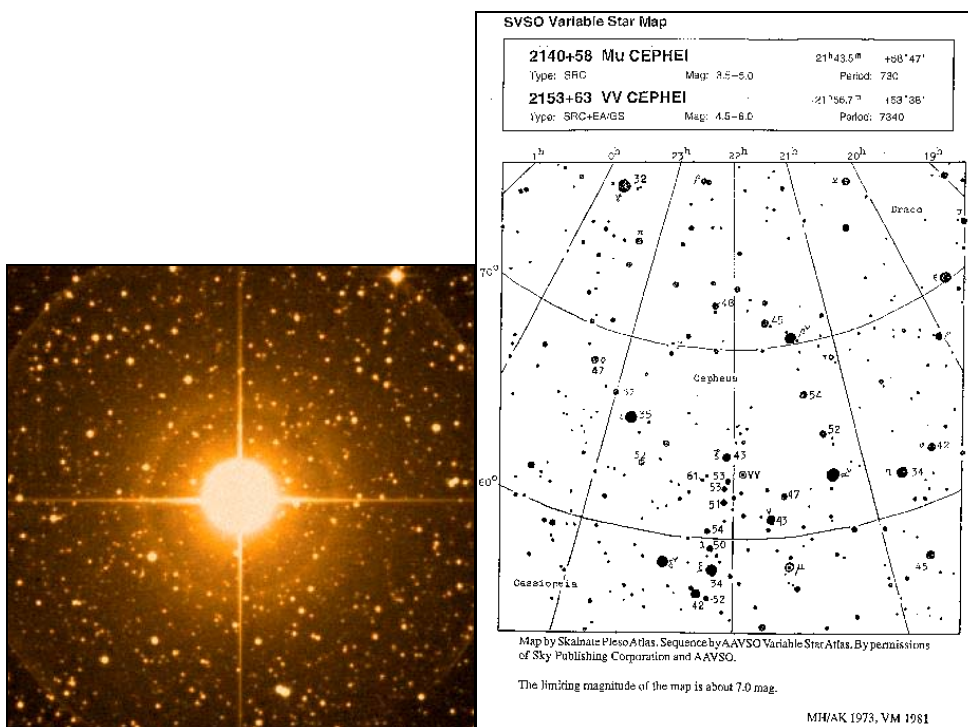
5. Jak astronomové měří a váží



úloha k zamyšlení

Zákrytová dvojhvězda VV Cephei

Zákrytová dvojhvězda VV Cephei s extrémně dlouhou periodou zákrytů 7430 dní má celkovou hvězdnou velikost $m_c = 4,8$ mag. Jestliže veleobří hvězda spektrálního typu M zakryje menší hvězdu spektrálního typu B, pozorujeme pokles jasnosti, který odpovídá 0,6 mag. Vypočítejte hvězdnou velikost této menší hvězdy. Navíc zjistěte vzdálenost dvojhvězdy – předpokládejte, že absolutní hvězdná velikost červené veleobří hvězdy $M_1 = -4,0$ mag. Kolik činí absolutní hvězdná velikost M_2 modré hvězdy?



5.4. Z čeho jsou hvězdy a planety složeny?

Chceme-li znát chemické složení kosmických těles, nejsme v současnosti odkázáni už jen na spektroskopický výzkum „na dálku“. Ovšem: u hvězd je to stále jediná použitelná metoda, ale o některých blízkých tělesech sluneční soustavy máme již přímé informace. Někdy nám dokonce příroda dopraví vzorky cizích těles až na Zemi, a zdarma.

Kousky cizích světů

Přáním každého objevitele je určitě přivést si kousek cizího světa zpět domů. Vzorky hornin Měsíce a okolních planet jsou sice skvělou trofejí, ale také (a především) neocenitelným zdrojem nových informací. Přímý chemický a mineralogický průzkum cizích těles je zatím omezen jen na Měsíc, Mars, Venuši a – meteority.

O některých meteoritech nyní již víme, že pocházejí ze zcela určitého tělesa – Měsíce, Marsu či konkrétní planetky. Výčet těles, o kterých již máme informace z rozborů vzorků hornin, v blízké budoucnosti jistě poroste; na druhé straně musíme mít stále na mysli, že v dohledné budoucnosti nelze počítat s přímým průzkumem cizích světů, nacházejících se za hranicemi sluneční soustavy.



Tento meteorit o hmotnosti 1,3 kg prorazil střechu jednoho domu v Aucklandu na Novém Zélandě, naštěstí však nikoho nezranil.

5. Jak astronomové měří a váží

Meteority

Pevná tělesa z vesmíru, která po střetu se Zemí a průletu ovzduším nalézáme na zemském povrchu v podobě meteoritů, obsahují velmi často železo, nikl a další kovy. Železné meteority jsou ve sbírkách muzeí nejčastější. Neznamená to však, že by jich bylo v okolí Země nejvíc, ba naopak.

Nejhojnější jsou kamenné meteority, tzv. chondrity ¹⁾, ty však v kolekcích meteoritů nedominují. Příčina je dvojitá: jednak železné meteority snadno odlišíme od pozemských hornin, a pak – jsou to tělesa dosti kompaktní. Průlet zemskou atmosférou je natolik mohutným sítem, že jím projdou opravdu jen ta nejodolnější, tedy nejpevnější tělesa. Nejobvyklejší materiál v okolí naší planety – poměrně křehké chondrity a zejména pak tzv. *uhlíkaté chondrity* – se tak na povrchu Země ocitá jen vzácně.



Chondrit – úlomek meteoritu Allende, který dopadl 8. 2. 1969 v mexickém spolkovém státu Chihuahua.

Upřesněme si, co to jsou *chondrity*: tyto nejhojněji zastoupené meteoritické kameny obsahují drobné útvary ve tvaru kuliček či oválů – tzv. *chondry*. Velmi vzácnou skupinou chondritů tvoří to, že uhlíkaté chondrity, jež jsou navíc tvořeny jednoduchými organickými sloučeninami a vodou. Má se za tento materiál je „primitivní“ – takto označujeme látku, která je od dob vzniku sluneční soustavy jen velmi málo tepelně a chemicky proměněná.

Které meteority jsou nejčastější?

Zastoupení meteoritů, které odvodíme z pozorovaných *pádů*, se blíží poměrnému množství, v němž tato tělesa přicházejí do okolí Země. Procento *nálezů* je ovšem jiné: železné meteority jsou nápadné

¹⁾ Řecky *chondros* znamená zrnko.

5. Jak astronomové měří a váží

ještě dlouho po svém pádu a tvoří tak většinu v muzejních sbírkách meteoritů. Poněkud jiná je situace s meteority, nalezenými v Antarktidě – ale o tom je dál více informací.

<i>Druh meteoritu:</i>	<i>pády:</i>	<i>nálezy:</i>	<i>antarktické nálezy:</i>
železné	4,8 %	27,4 %	0,7 %
železokamenné	1,3 %	2,3 %	0,3 %
kamenné	93,9 %	70,3 %	99,2 %
z toho chondrity	86,1 %	68,4 %	94,8 %

(podle Harry Y. McSweense, Jr., *The New Solar System*, 4. vydání, 1999 Sky Publ. Corp.)

Meteority z ledničky

Ovšemže je to nadsázka. Řeč je v tom případě o meteoritech, které odborníci nalézají v nebyvalém množství v Antarktidě. Mnohé z nich jsou velmi zajímavé kusy. Mnoho desítek meteoritů pochází z Měsíce. Další kousky mimozemské látky jsou původem z Marsu. U jiných meteoritů byla domovským tělesem nějaká planetka – na seznamu jsou už planetky Vesta, Božněmcová, Parthenope, Thetis, Amphitrite...

Tyto vzorky vzdálených světů uniknou do meziplanetárního prostoru při náhodných srážkách Měsíce, Marsu či planetek s cizím tělesem. Stávají se z nich jakási skaliska, pohybující se kolem Slunce. Jejich dráhy jsou gravitačně silně rušeny, takže se často mění. Při náhodném střetu se Zemí, pokud část tělesa vydrží průlet atmosférou, dopadá na zemský povrch meteorit, který pak možná i najdeme.

Sluneční vítr

Zdalo by se, že zjištění přesného chemického složení Slunce není vůbec žádný problém. Vždyť je to hvězda nejbližší a nejjasnější... Jenže my už víme, že spektroskopicky se chemické složení určuje velmi obtížně. A tak jediným způsobem, jak přímo a poměrně přesně zjistíme zastoupení prvků a izotopů ve Slunci, je přímý rozbor slunečního větru pomocí družic nebo kosmických sond. *Slunečním větrem* nazýváme stálý proud částic, unikající ze Slunce až daleko za dráhu Země. V okolí Země činí jeho hustota jen několik částic na krychlový centimetr, jeho rychlost dosahuje několika stovek kilometrů za sekundu.



Sluneční vítr je pokračováním svrchní vrstvy atmosféry (tzv. koróny), která je ještě opticky přímo pozorovatelná.

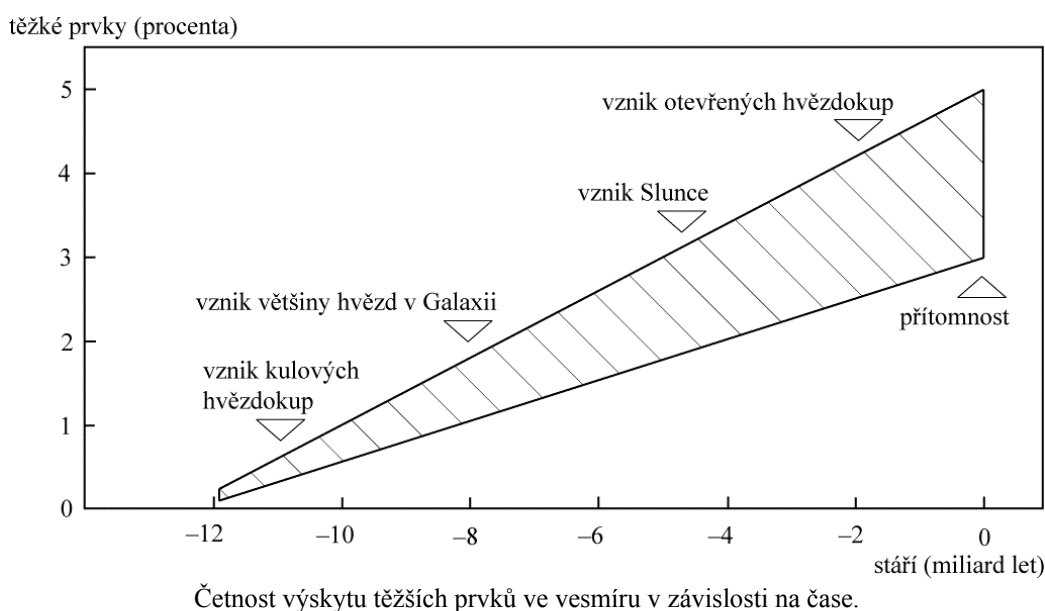
5. Jak astronomové měří a váží

Sluneční vítr podává přímou informaci o chemickém složení svrchní vrstvy Slunce, odkud vy-
létá. Pokud by vás trápilo, že takto se nedovíme nic o složení nižších vrstev, je třeba říci, že látka je
(přinejmenším ve svrchní části Slunce) dokonale promíchána. Navíc byla v celém objemu promíchána
už na počátku slunečního vývoje a s výjimkou malé oblasti kolem centra Slunce se pak již chemické
složení nemění. Můžeme tedy tvrdit, že chemické složení zjištěné rozborem slunečního větru odpoví-
dá *celkovému* chemickému složení Slunce. Rozborem slunečního větru lze poměrně přesně zjistit
chemické složení Slunce.

Prvek:	Relativní množství ve slunečním větru:
vodík	0,96
helium 3	$1,7 \cdot 10^{-5}$
helium 4	0,04
kyslík	$5 \cdot 10^{-4}$
neon	$7,5 \cdot 10^{-5}$
křemík	$7,5 \cdot 10^{-5}$
argon	$3,0 \cdot 10^{-6}$
železo	$4,7 \cdot 10^{-5}$

Chemické stárnutí vesmíru

Příliš se nezmylíme, řekneme-li, že všechny hvězdy mají stejné chemické složení, které víceméně
odpovídá četnosti prvků v celém vesmíru: převládá vodík a druhým nejhojnějším prvkem je helium,
zatímco prvky těžší než helium – například uhlík, kyslík, dusík – tvoří pouhou příměs. Trochu po-
drobnější pohled na věc odhalí, že hvězdy vzniklé *později* mají *vyšší procento těžších prvků*. Je to
důsledek hvězdného vývoje. Před 10 miliardami let vznikaly hvězdy, v nichž byly jen 0,1 až 1 pro-
cento těžších prvků (měřeno hmotnostně). U hvězd, které vznikají v současnosti, je těžších prvků už
přece jen víc – 1 až 5 procent. Vesmír nám tedy chemicky „stárne“, i když zatím jen nepatrně.





čítanka

Petr Jakeš: Ošklivé, zato důležité kamení

Když přinesli slavnému švédskému chemikovi Jakobu Berzeliovi k analýze šedý, rozpadavý a docela nepřitažlivý kámen, který 5. března 1806 spadl z nebe u francouzského města Alais, vyslovil slavný chemik pochybnost o tom, že je to meteorit. Berzelius sice věřil na mimozemský původ meteoritů, ale tomuto kusu chybělo charakteristické niklové železo a jiné tenkrát známé rysy meteoritů. Poté, co se rozpadavý meteorit navíc začal rozpouštět ve vodě a chemická analýza v něm objevila množství uhlíku a síry, pochybnosti o jeho kosmickém původu ještě vzrostly.

Složení tohoto meteoritu bylo natolik odlišné od všeho ostatního, co do té doby bylo označeno jako meteority, že bylo třeba zvýšené opatrnosti. Kdo to kdy slyšel, aby kámen z vesmíru obsahoval vodu a uhlí podobnou – pravděpodobně organickou – látku! Vždyť to mohlo znamenat, že mimo naši planetu existuje život! Ale velmi podobný, nevzhledný kámen obsahující uhlík a vodu spadl o osmnáct let později v italském Renazzu. To už byl druhý pozorovaný a okamžitě nalezený meteorit podivného složení. Nezbyvalo než věřit, že je to opravdové nové poselství nebes.

V té době se již meteority začaly třídit na kovové a kamenné. Zcela výjimečná skupina meteoritů, jež byla reprezentována pouhými dvěma kusy, dostala i zvláštní jméno „uhelné meteority“, a to pro podobnost organické látky těchto meteoritů s obyčejným pozemským uhlím. Do dnešního dne jsou známy na dvě desítky „ošklivých“ meteoritů a jsou souborně označovány jako uhlikaté chondrity.

Jsou-li meteority něco vzácného, co si zaslouží důkladné zhodnocení, pak uhlikaté chondrity představují mimořádně zajímavý materiál. Z vědeckého hlediska je to látka z nejcennějších a ve srovnání s horninami Měsíce uhlikaté chondrity jistě vedou.

Vzácnost těchto meteoritů na Zemi pravděpodobně neznamená, že jsou stejně vzácné i ve vesmíru, přesněji řečeno ve vnitřní sluneční soustavě. Právě naopak. Uhlikaté chondrity jsou ve vesmíru asi velmi hojnou látkou. Jejich neštěstím je však malá soudržnost, a tak většina z těch, které vstoupí do atmosférického obalu Země, si cestu k Zemi nevnutí, ale rozpadne se a shoří. Dopad uhlikatého meteoritu na zemský povrch je vlastně z mechanického hlediska malý zázrak, protože uhlikaté chondrity jsou tím nejkřehčím kosmickým kamením, které vydrží průlet zemskou atmosférou.

Vzácnost uhlikatých chondritů ve sbírkách muzeí a v laboratořích má ještě jiné příčiny. Takový meteorit totiž na zemském povrchu dlouho nevydrží: protože obsahuje minerály rozpustné ve vodě, stačí, aby zapršelo, a cenné kousky vesmírné hmoty se rozpadnou. To je hlavní příčina, proč dosud známe jenom ty uhlikaté chondrity, které byly sebrány okamžitě po pádu. Navíc (a to málokterý geolog nebo mineralog připustí)

5. Jak astronomové měří a váží

téměř nikdo na první pohled uhlíkatý chondrit nepozná. Možná, že mnoho uhlíkatých chondritů zůstane ležet bez povšimnutí někde na polích nebo na ulicích, než se rozpadnou. A ještě jednu zvláštnost má tento drahocenný a tolik hledaný a zlatem vyvažovaný materiál: při loužení ve vodě nepříjemně páchne.

O „obyčejných“ chondritech víme, že jsou velmi primitivní; jde o „nespecializovanou“ látku, pravděpodobně pozůstatek původní sluneční mlhoviny. Kromě chemické redukce tato látka neprodělala žádnou výraznou látkovou změnu od doby svého vzniku. Platí-li to o obyčejných kamenných chondritech, pak o jejich uhlíkatých jmenovcích to platí dvojnásob. Snad už první badatelé a po nich i desítky a stovky dalších museli být překvapeni skutečností, že k nám z vesmíru přilétá látka, kterou na Zemi spojujeme jen a jen se životem a biologickými procesy: amorfni uhlík.



Úryvek z knihy *Létavice a lunatici* (Mladá fronta, Praha 1978).

Meteorit zobrazený na této stránce je jedním z mnoha, které dopadly 28. 9. 1969 v Austrálii u městečka Murchison. Jedná se o uhlíkatý chondrit.

5. Jak astronomové měří a váží

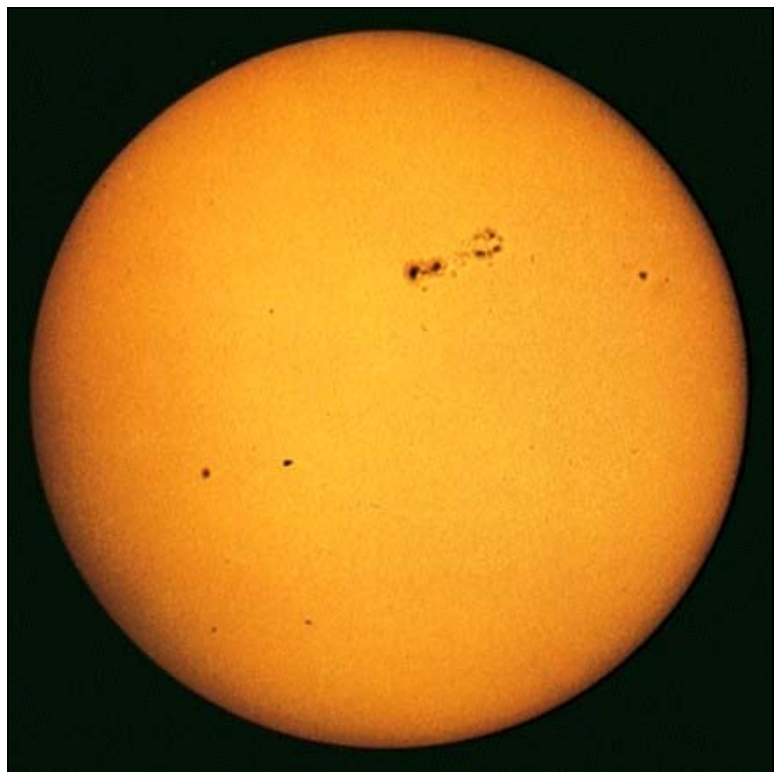


Devět desetin moudrosti je – být moudrý včas.

Tullius Marcus Cicero, řečník a filozof
(106 – 43 př. n. l.)

otázky a příklady

Otázka 5.4.1. V současné době lze pořídit sluneční spektrum i velmi vysoké kvality. Přesto však tato spektrální analýza neposkytuje *úplnou* a dostatečně přesnou informaci o chemickém složení sluneční fotosféry. Proč?



Otázka 5.4.2. Které z následujících tvrzení neplatí? a) Spektrální analýza zcela nahrazuje chemický rozbor u kosmických objektů, k nimž nelze vyslat přístrojovou sondu a provést přímou chemickou analýzu na místě. b) Všechny hvězdy mají přibližně stejné chemické složení, jen obsah tzv. těžkých prvků je rozdílný v závis-

5. Jak astronomové měří a váží

losti na tom, kdy hvězdy vznikly (zda brzy po vzniku vesmíru, ... v současnosti). c) Železných meteoritů nalézáme na zemském povrchu více než kamenných mimo jiné proto, že jsou soudržnější a snáze vydrží průlet atmosférou.

Otázka 5.4.3. Mnohé izotopy jsou nestabilní a rozpadají se, čímž se přeměňují na jiné prvky a energii. Rychlost, s jakou se nestabilní izotopy rozpadají, je popsána veličinou zvanou *poločas rozpadu*: je to čas potřebný k rozpadu poloviny jader izotopů. Tato veličina má pro daný izotop určitou hodnotu, což umožňuje zjistit stáří materiálu, který izotop obsahuje (nebo přinejmenším „stáří“ od poslední změny, při níž vznikl daný izotop). Rozumíte-li tomuto tvrzení, pak je opravdu snadné odpovědět na tuto otázku: v jaderné fyzikální laboratoři byl vytvořen nestabilní izotop, který se ihned začal rozpadat. Po 6 minutách ho zbyla pouze 1/8 původního množství. Jaký je poločas rozpadu tohoto izotopu?



Čítanka

Zdeněk Pokorný: Meteority na obřím stole

Možná ani netušíte, o čem bude řeč. Jenže řekli jsme si, že trocha nadsázky neuškodí a tak místo omšelych titulků jako *Meteority z Antarktidy...* jsme tentokrát zvolili název trochu jiný. Tento příběh je totiž až neuvěřitelný. Do roku 1964 byl na antarktickém ledu nalezen jeden jediný meteorit. Nález je z roku 1912, kdy výprava australského vědeckého expedice Mawsona objevila železný meteorit v Adélině zemi. Další nálezy přišly o půl století později, to byly v Antarktidě sebrány další tři meteority. Až do sedmdesátých let polárníci sběru meteoritů nevěnovali žádnou mimořádnou pozornost a tak šlo jen o příležitostné nálezy, nic víc. Jenže pak se vše změnilo.

Japonská, americká a pak i mezinárodní expedice, které se zaměřily na sběr meteoritů, našly v Antarktidě během několika let stovky kusů těchto mimozemských těles. Dnes počet sebraných meteoritů na tomto docela malém ledovém kontinentu již překročil desetitisícovou mez (je to mnohokrát víc než na celém zbytku světa), a toto číslo se v budoucnu zcela určitě zvýší. Ano, v současné době se nejvíce meteoritů nalézá právě v Antarktidě. Není tomu tak proto, že by jich tam dopadalo víc než na jiná místa zeměkoule, jsou zde jen zvláštní podmínky k jejich uchování a nalezení.

Místa nálezů nejsou roztroušena po Antarktidě zcela náhodně. Existují oblasti, kde je množství nalezených meteoritů obzvláště velké; především jsou to místa na úpatí hor, táhnoucích se od Viktoriiny země přes střed Antarktidy až do Coatsovy země. Je pro to nějaké vysvětlení?

Antarktida je překryta masivním ledovcem, který postupuje od jižního pólu směrem na sever. Sněhové a ledové masy se pomalu přesouvají k okrajům kontinentu a mizí jako šelfový led v mořích. Meteority, pokud na ledovce napadají, se samozřejmě pohybují spolu s ledem. Když ovšem ledovec narazí na vysoké hory, jako například ve Viktoriině zemi, jeho postup k moři se zastaví. Za současných klimatických podmínek tyto hory nepřekoná. Vítr



5. Jak astronomové měří a váží

o vysokých rychlostech a sluneční záření během letních měsíců způsobí, že led v místech, kde se hromadí, rychle ubývá. Meteority takto ovšem nezmizí, hromadí se zde a geologům nezbývá nic jiného, než je sebrat.

Je zajímavé, že antarktické meteority bývají většinou poměrně malé. Typický meteorit nebývá větší než švestka. Proto také celková hmotnost všech meteoritů z Antarktidy, ač jsou velmi četné, dosud nepřekonalala hmotnost meteoritů mimoantarktických.



Meteority z Antarktidy mají výhodu, že se nalézají ve sterilním prostředí. Zde se zachovaly kameny, které spadly dokonce před desetitisíci až statisíci lety. Mezi nimi jsou nejen vzácné uhlíkaté chondrity, ale i jiné unikátní kusy. 18. ledna 1982 byl v oblasti Allan Hills sebrán sklovitý meteorit o hmotnosti 31 gramů, označený ALHA 81005. Geologové o něm zanedlouho věděli, že pochází z Měsíce – takových měsíčních meteoritů dnes známe několik desítek. O jiných antarktických meteoritech zase víme, že jsou původem z Marsu či z některých planetek.

V Antarktidě je odhadem několik milionů meteoritů. Nevadí, že jich zatím známe opravdu jen nepatrně. Ty další zde zůstávají dobře zakonzervovány a čekají na příští generace badatelů.

Antarktida se tedy stala zemí zaslíbenou také pro sběratele meteoritů. Ale nemusel by jí být jen tento drsný šestý kontinent. Zřejmě jsou i další místa na naší planetě, kde se po staletí hromadí meteority, jen je sesbírat... O jednom takovém píše Antoine de Saint-Exupéry ve své knize *Země lidí*: na okraji Sahary, mezi mysem Juby a Cisneros, se létá nad náhorními rovinami tvaru komolých kuželů, širokých od několika set metrů až po třicet kilometrů. Zvláštní je, že tyto kužele končí na všech stranách útesem svažujícím se kolmo do propasti, takže dostat se nahoru nebo naopak sestoupit z těchto stolových hor do pouště kolem prakticky nelze. Když Saint-Exupéry jednou na náhorní rovině přistál se svým letadlem, neušlo mu, že v moři nikým a ničím nedotčeného písku se nacházejí i tvrdé černé oblázky, jako uhnětené z lávy a mající tvrdost černého diamantu. Jak sám napsal, na plachtu rozprostřenou pod jabloní mohou padat pouze jablka, *na plachtu rozprostřenou pod hvězdami může padat jenom hvězdný prach...*

Mírně upravená kapitola z knihy *220 záhadných otázek z astronomie* (Rovnost, Brno 1996).

5.5. Hvězdy v diagramu

Když o dostatečně velkém počtu hvězd víme, jak jsou daleko a jak jsou velké, hmotné a horké, můžeme mezi těmito veličinami hledat nějaké statistické závislosti. Budou-li existovat, pak zřejmě lépe porozumíme tomu, jak a z čeho jsou hvězdy sestaveny, jak se vyvíjejí. Takových závislostí může být jistě velké množství. Jedna z nich je však natolik důležitá, že o ní musíme pohovořit důkladněji. Je spjata se jmény dvou astronomů – Ejnara Hertzsprunga a Henry Russella¹⁾.

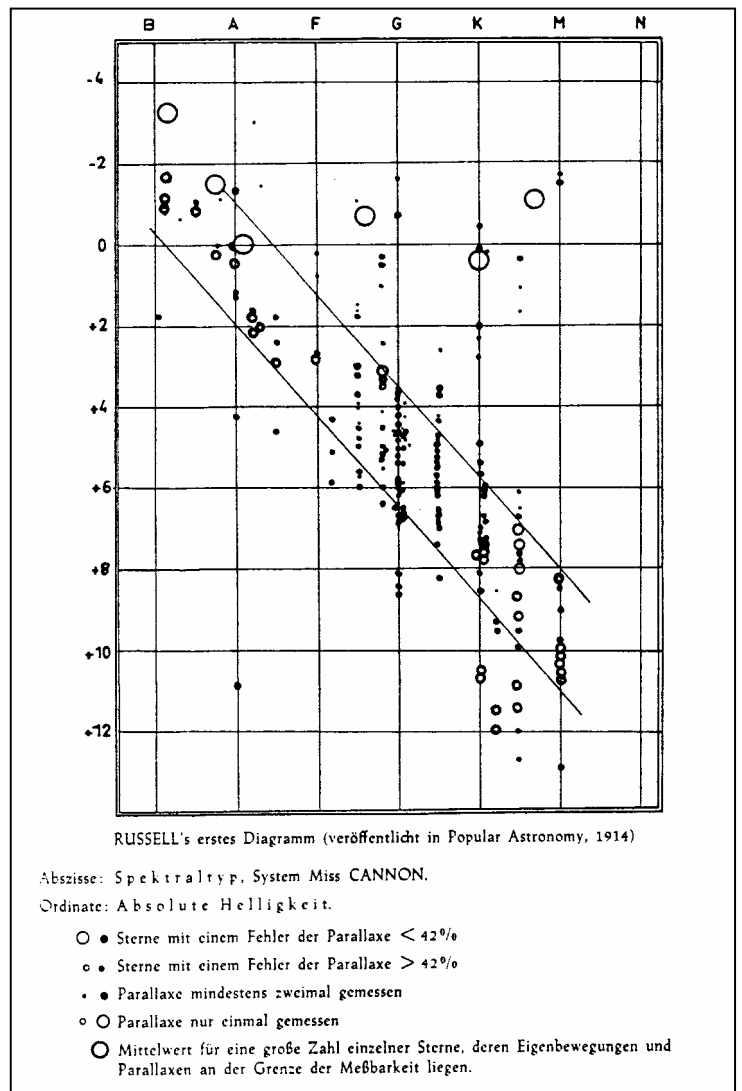
Trocha historie

V roce 1905 si dánský astronom Ejnar Hertzsprung (1873–1967) povšimnul, že vedle malých červených hvězd (malých rozměry i výkonu) existují také červené hvězdy s velkým zářivým výkonem a rozměry. Hertzsprung tehdy použil přirovnání, že jde „o velryby mezi rybami“.

Jeho závěry plně potvrdil americký astronom Henry Russell (1877–1957). V roce 1913 uveřejnil výsledky svého rozsáhlého výzkumu, v němž zjišťoval vztah mezi zářivým výkonem a teplotou hvězdy. Sestrojil diagram (viz obr. vpravo), který znázorňuje závislost mezi absolutní hvězdnou velikostí a spektrální třídou hvězd. Dnes tento diagram, bezpochyby nejdůležitější astrofyzikální diagram vůbec, nazýváme *Hertzsprungovým-Russellovým diagramem* (zkráceně HR diagramem).

Na scéně jsou obři a trpaslíci

Hvězdy nezaplňují plochu HR diagramu rovnoměrně, ale soustřeďují se v několika oblastech: nejvíce hvězd je v pásu, který probíhá od oblasti horkých a zářivých hvězd do míst, kde jsou hvězdy chladné a



¹⁾ Čti: *hercšprung a rasl.*

5. Jak astronomové měří a váží

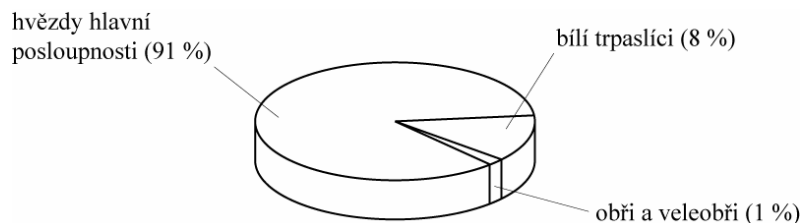
s malým výkonem. Jde o *hlavní posloupnost*; obsahuje přes 90 procent všech hvězd včetně našeho Slunce.

Další hvězdy jsou v oblasti relativně nízkých povrchových teplot, ale vysokých výkonů. Jde o *obry* (*červené obry*) a *veleobry*²⁾. V oblasti malých zářivých výkonů a dosti vysokých povrchových teplot narazíme na *bílé trpaslíky*. Hvězdy spektrálních tříd K a M s malým zářivým výkonem označujeme jako *červené trpaslíky*.

Dvě krátké, ale důležité poznámky:

1. Podíváte-li se na HR diagram, kde jsou vyznačeny i rozměry hvězd, ihned pochopíte, proč astronomové zvolili označení „obří“, „veleobří“, „trpaslíci“. Je to označení zcela přiměřené.

2. Absolutní hvězdná velikost je mírou zářivého výkonu hvězd, spektrální třída úzce souvisí s povrchovou teplotou hvězd. Z fyzikálního hlediska je tedy HR diagram *závislostí zářivého výkonu na povrchové teplotě hvězd*.



Četnosti hvězd v Galaxii.

Hvězdy zářivé a hvězdy blízké

V HR diagramu se může silně uplatňovat *výběrový efekt*. Spočívá v tom, že hvězdy s velkým zářivým výkonem jsou pozorovatelné zdaleka, zatímco slabé zaznamenáme jen v bezprostředním okolí Slunce (navíc mnoho takových hvězd nebylo dosud objeveno).

Výběrový efekt se projevuje nadměrným zastoupením obrů, veleobrů a hvězd z horního konce hlavní posloupnosti, zatímco červených a bílých trpaslíků vidíme relativně málo. Kdybychom však do HR diagramu vynášeli jen hvězdy z určitého omezeného prostoru, převládaly by zcela jednoznačně hvězdy hlavní posloupnosti (a z nich červení trpaslíci).

Nejdůležitější diagram³⁾

HR diagram jsme už v úvodu označili za nejdůležitější astrofyzikální diagram. Nyní si jen stručně naznačíme, proč tomu tak je. Ukazuje totiž, že hvězdy jsou sice velice rozmanité, ale tato rozmanitost není bezbřehá – lze v ní najít jisté zákonitosti.

Například pomocí tohoto diagramu můžeme odhadnout *vzdálenost* hvězdy: stačí znát její spektrální třídu a příslušnost hvězdy k hlavní posloupnosti, obrům či trpaslíkům (a to lze za jistých okol-

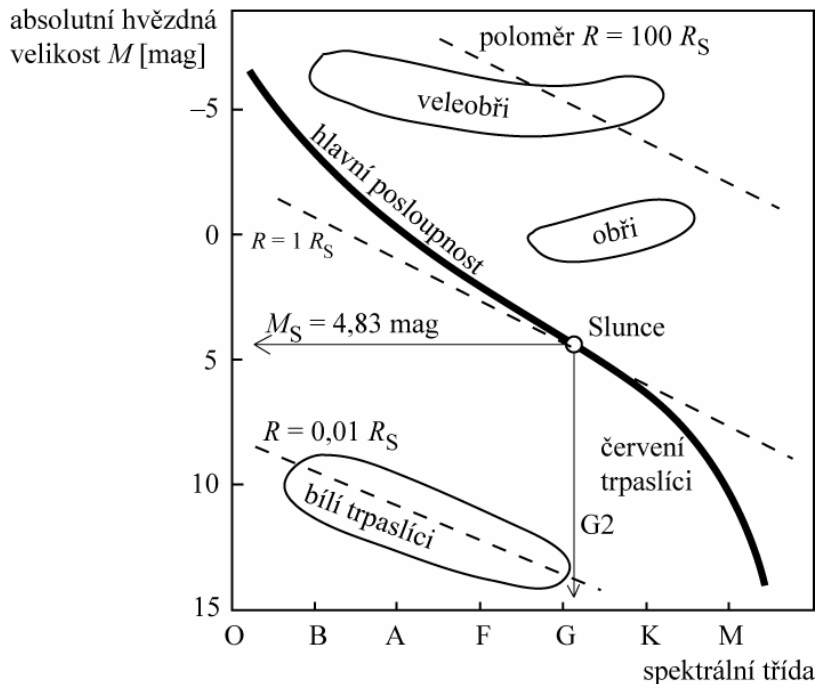
²⁾ Pozor: nezaměňujte pojmy *veleobr* a *nadobr* (s druhým z pojmů se seznámíme dále v této lekci v části o luminozitních třídách; je to jiné označení pro tzv. jasné obry, ale nikoli pro veleobry).

³⁾ Budete-li kreslit byť jen schematicky HR diagram, vždy na osách vyznačte vynášené veličiny a číselné škály; pokuste se dodržet průběh větvi diagramu podle skutečnosti. Na veličinách a škálách totiž závisí podoba tohoto diagramu – např. průběh hlavní posloupnosti. Bez dodržení tohoto pravidla nakreslíte nikoli HR diagram, ale jeho karikaturu.

5. Jak astronomové měří a váží

ností také vyčíst ze spektra). Pak z diagramu odečteme absolutní hvězdnou velikost, a při známé pozorované hvězdné velikosti jsme již schopni vypočítat vzdálenost hvězdy.

HR diagram je též neocenitelným pomocníkem při výzkumu hvězdokup. V neposlední míře je diagram výborným testem platnosti teorií stavby a vývoje hvězd. Je tedy mnoho důvodů, proč astronomové věnují HR diagramu tolik pozornosti.



Schematický vzhled Hertzsprungova-Russellova diagramu.

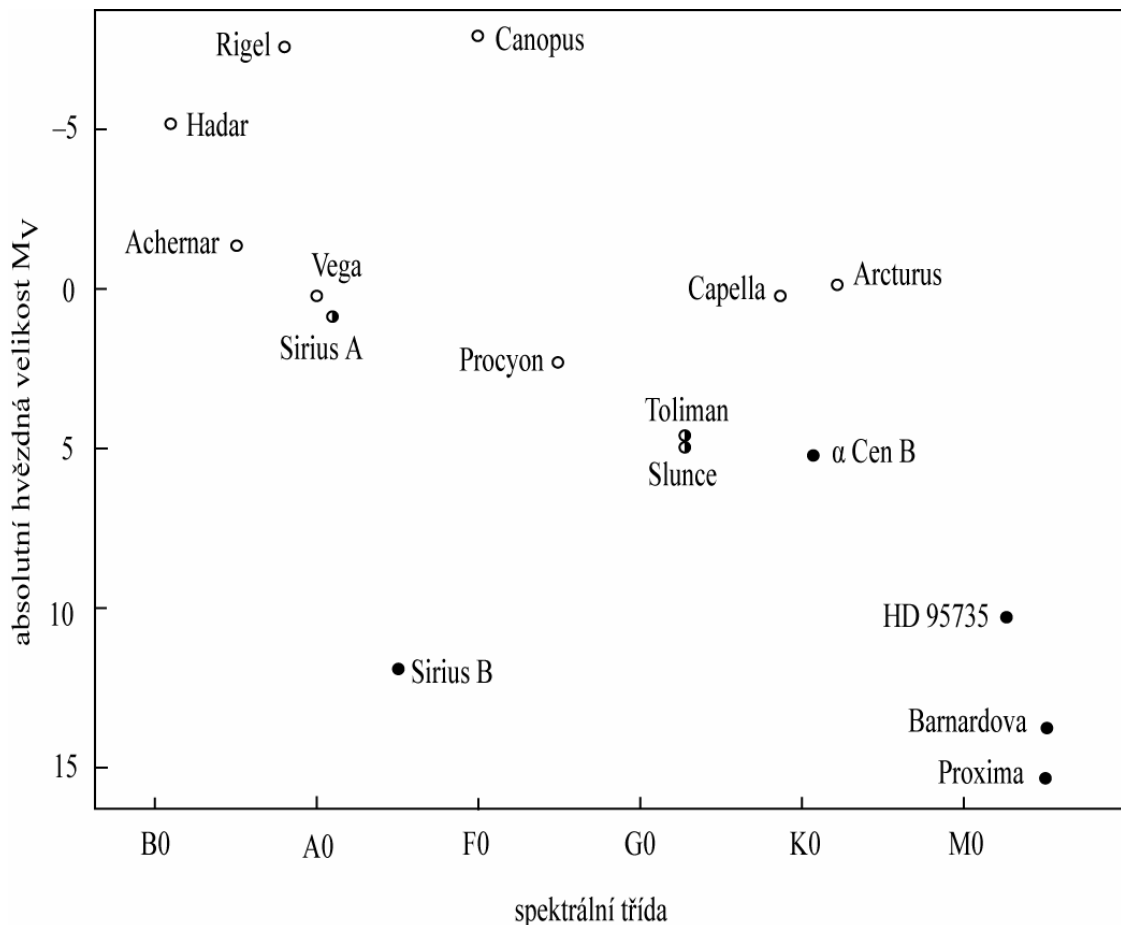
Barevný diagram

Většina hvězd je tak málo jasná, že nelze pořídit jejich spektra s dostatečně velkým rozlišením, aby byly zřetelně vidět spektrální čáry. Pak je ovšem nelze přesně spektrálně klasifikovat, určit jejich spektrální třídu. Náhradou je ale měření *barevného indexu*, který je rovněž určitým měřítkem povrchové teploty hvězd.

Pro hvězdy, které jsou od nás přibližně stejně daleko (například hvězdy ve hvězdokupě), můžeme HR diagram nahradit tzv. *barevným diagramem*. Spektrální třídy hvězd nahradí jejich barevný index, absolutní hvězdnou velikost pozorovaná hvězdná velikost.

Určíme-li u některé hvězdokupy (např. pohybové) její vzdálenost přímou metodou, známe též její modul vzdálenosti. Můžeme proto sestavit barevný diagram, v němž na svislou osu vyneseme nikoli pozorované, ale již *absolutní* hvězdné velikosti. Pro jinou hvězdokupu, jejíž vzdálenost neznáme, sestavíme ve stejném měřítku „normální“ barevný diagram s pozorovanými hvězdnými velikostmi na svislé ose. Pak oba diagramy přeložíme přes sebe a ztotožníme hlavní posloupnosti hvězdokup. Posun stupnic pozorovaných hvězdných velikostí nové hvězdokupy a absolutních hvězdných velikostí hvězdokupy pohybové (tedy posun ve svislém směru) udává modul vzdálenosti druhé hvězdokupy, a tedy i její vzdálenost.

5. Jak astronomové měří a váží



Hertzsprungův-Russellův diagram pro nejjasnější hvězdy (prázdné kotoučky) a nejbližší hvězdy (plné kotoučky).

Luminozitivní⁴⁾ třídy

Hrubé třídění hvězd na veleobry, obry, hvězdy hlavní posloupnosti a trpaslíky se zjemňuje zavedením dalšího parametru při klasifikaci spekter – tzv. *luminozitivní třídy*⁵⁾. K údaji o spektrálním typu (a podtypu) se dodá římská číslice a případně písmeno, např. K2 III (čti: *ká dva, římská tři*).

Údaj o *spektrálním typu* je informací především o povrchové *teplotě* hvězdy, zatímco údaj o *luminozitivní třídě* hovoří o *tlaku* v atmosféře hvězdy (určuje se zejména podle profilu spektrální čar ionizovaných prvků, citlivých na tlak v atmosféře). Protože hmotnosti hvězd se mění v relativně malém rozmezí, je údaj o luminozitivní třídě spolu se spektrálním typem hvězdy rámcovou informací o *velikosti* hvězdy.

⁴⁾ Latinské *luminosus* označuje světlý, jasný.

⁵⁾ Zavedli ji Herbert Morgan a Phillip Keenan, proto se označuje jako Morganova-Keenanova (MK) klasifikace.

5. Jak astronomové měří a váží

Označení luminozitních tříd:

Ia – jasní veleobři

Ib – (normální) veleobři

II – jasní obři ⁶⁾

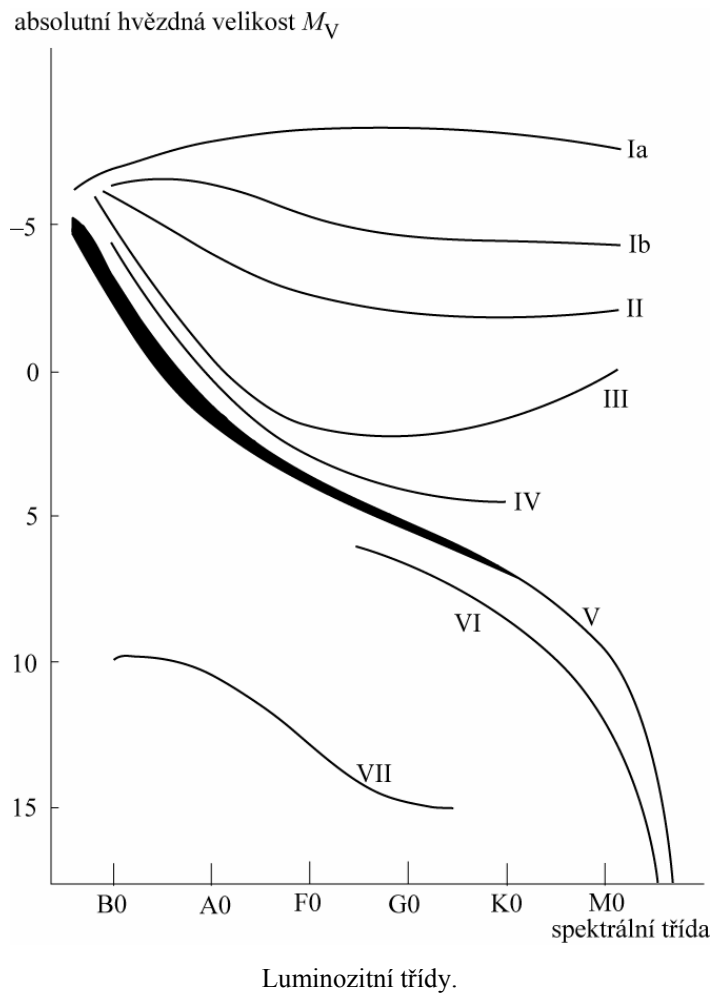
III – (normální) obři

IV – podobři

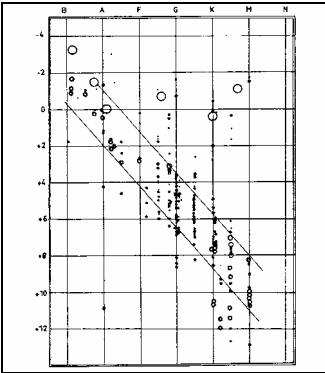
V – hvězdy hlavní posloupnosti (a červení trpaslíci)

VI – podtrpaslíci

VII – bílí trpaslíci



⁶⁾ Někdy se označují jako *nadobři*.



čítanka

Zdeněk Kopal: Hertzsprung, nebo Russell?

Dnešní mladí astronomové se s těmito jmény setkávají nejčastěji v souvislosti s Hertzsprungovým-Russellovým diagramem. Jak známo, sestrojil jej v jeho empirické formě (z níž poprvé bylo zřejmé, že se hvězdy dělí na „obry“ a „trpaslíky“) velký dánský astronom Ejnar Hertzsprung a uveřejnil jej v článku nazvaném „Zur Strahlung der Sterne“ (O záření hvězd), který vyšel v časopise *Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie* roku 1906. Protože však tento časopis četlo jen málo astronomů, zůstal pro ně obsah článku

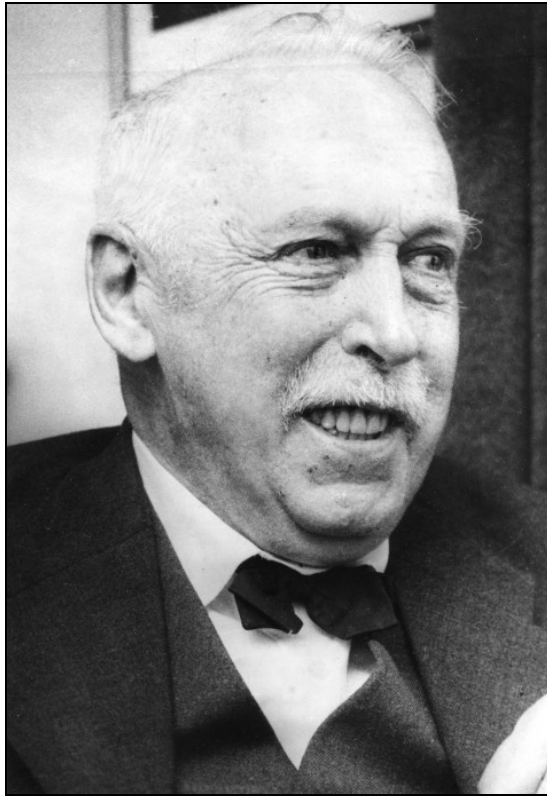
do doby, než se Russell (roku 1913) pokusil o jeho teoretickou interpretaci, z velké části neznámý. A právě tato interpretace upoutala pozornost vědecké veřejnosti natolik, že se diagram, na němž byla založena, nazýval pouze Russellovým.

Roku 1952 svolala Americká astronomická společnost k tomuto diagramu kolokvium. Jak Russell, tak Hertzsprung byli pozváni, aby se ho zúčastnili. Russell přijel a svůj krátký příspěvek přednesl hned na začátku kolokvia. Hertzsprung (o čtyři roky starší než Russell) se nedostavil a v dost sarkastickém poselství vyjádřil názor, že jediným užitečným úkolem, který by mohlo kolokvium vykonat, by bylo jeho vlastní i Russellovo jméno z názvu diagramu vůbec škrtnout. Začátkem našeho století, psal Hertzsprung, byly totiž jedinými charakteristikami hvězd, jež nám byly známy, jejich zářivé výkony a spektra a k tomu, aby člověk sestrojil diagram vyjadřující jejich vzájemnou závislost, nebylo zapotřebí žádného zvláštního důvtipu.



Henry Norris Russell.

5. Jak astronomové měří a váží

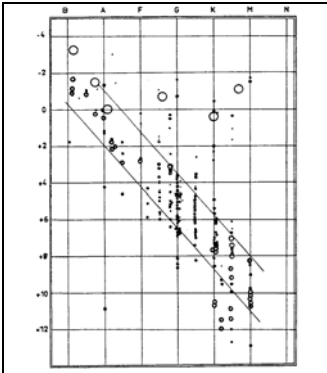


Ejnar Hertzsprung.

Mohl ještě dodat, že ta fyzikální interpretace diagramu, kterou navrhl Russell roku 1913, byla přesným opakem později zjištěného stavu věci (tehdy se Russell domníval, že se obři smršťují a přitom se postupně blíží k hlavní posloupnosti; od doby vzniku jaderné astrofyziky ve 40. letech však víme, že je tomu právě naopak). Pokud si to však sám Hertzsprung myslel, nikdy to veřejně nevyjádřil. Jako astronom zabývající se převážně pozorováním zůstal po celý svůj život na pevné půdě a neměl o teoreticích příliš vysoké mínění.

Výňatek z knihy *O hvězdách a lidech* (Mladá fronta, Praha 1991).

5. Jak astronomové měří a váží



Nic není objeveno a zároveň hned dokonalé.

Tullius Marcus Cicero, řečník a filozof (106 – 43 př. n. l.)

otázky a příklady

Otázka 5.5.1. Jak souhrnně označujeme hvězdy, které ve srovnání se Sluncem mají: a) vyšší povrchovou teplotu a menší zářivý výkon? b) menší povrchovou teplotu i menší zářivý výkon?

Otázka 5.5.2. Které z následujících pojmů spolu bezprostředně souvisejí? a) bílý trpaslík, Slunce, spektrální typ K; b) Slunce, hvězda hlavní posloupnosti; c) bílý trpaslík, nízká povrchová teplota; d) červený obr, červený trpaslík, vysoký zářivý výkon.

Otázka 5.5.3. Proč jsou tzv. červení obři načervenalí? a) Je to dáno velkým zářivým výkonem a rozměrem hvězd. b) Jde o velmi vzdálené hvězdy, projevuje se mezihvězdné zčervenání. c) Jejich povrchová teplota je v rozmezí 3000 až 5000 K.

Otázka 5.5.4. Proč se v Hertzsprungově-Russellově diagramu používá absolutní hvězdná velikost a nikoli hvězdná velikost pozorovaná?

Otázka 5.5.5. V pravém horním rohu HR diagramu se nacházejí hvězdy, jež mají relativně [největší, nejmenší] zářivý výkon a [nejvyšší, nejnižší] povrchovou teplotu.

Otázka 5.5.6. U slabých hvězd jen stěží určíme spektrální třídu, natož abychom změřili paralaxu hvězdy. Přesto však pomocí HR diagramu můžeme vzdálenost hvězdy alespoň odhadnout. U jedné takové hvězdy, jejíž pozorovaná hvězdná velikost byla $m = 15$ mag, byla určena spektrální třída jako K5. Jaká je odhadem vzdálenost hvězdy?

Otázka 5.5.7. Možná vás překvapilo, že HR diagram bývá uváděn v různých podobách. Nejlépe je to patrné na tvaru hlavní posloupnosti: někdy bývá mírně esovitě prohnutá, jindy je téměř lineární. Dokážete vysvětlit, proč tomu tak je?

Otázka 5.5.8. V barevných diagramech se index $(B-V)$ zvětšuje směrem doprava. Odpovídá to zavedenému způsobu vynášení povrchových teplot v HR diagramu, kde – jak známo – tato teplota roste směrem doleva?

5. Jak astronomové měří a váží

Otázka 5.5.9. Které z následujících tvrzení *není* pravdivé? a) Určíme-li spektrální třídu hvězdy, známe alespoň přibližně její povrchovou teplotu. b) Průměr hvězdy, absolutní hvězdná velikost a povrchová teplota hvězdy spolu navzájem souvisejí. c) I když známe jen barevný index hvězdy, můžeme pomocí HR diagramu spolehlivě určit její absolutní jasnost.

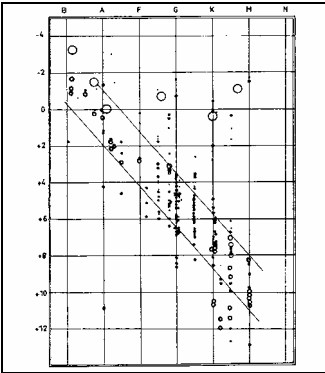
Otázka 5.5.10. Bílých trpaslíků známe v současnosti řádově tisíce. Jak se to shoduje s tvrzením, že bílí trpaslíci jsou mezi hvězdami Galaxie zastoupeni asi 7 procenty? (Hvězd v Galaxii je určitě mnohem víc než řádově desítky tisíc.)

Otázka 5.5.11. Vynášíme-li do Hertzsprungova-Russellova diagramu spektrální třídy tak, jak to provedli sami první sestavitelé (např. Henry Russell) a jak je podle nich vynášíme i my dodnes, roste či klesá povrchová teplota hvězd směrem doprava?

Otázka 5.5.12. Hvězda Sirius A je spektrálního typu A1 a patří k hlavní posloupnosti (nikoli k obrům nebo veleobrům, což plyne ze vzhledu spektra). Jak pomocí HR diagramu odhadnete vzdálenost této hvězdy od nás? (Poznamenejme, že Sirius má pozorovanou hvězdnou velikost rovnu $m = -1,5$ mag; zbývající potřebné údaje vyčtete v HR diagramu.)

Otázka 5.5.13. Hvězda Procyon je ve hvězdných katalozích klasifikována jako hvězda spektrální třídy F5 IV-V, hvězda Polárka F8 Ib. Která z těchto dvou hvězd je větší, a proč?

5. Jak astronomové měří a váží



praktikum

Hertzsprungův-Russellův diagram

Mezi různými astrofyzikálními diagramy má nejdůležitější postavení diagram *Hertzsprungův-Russellův* (HR diagram). Hvězdy se zde kupí jen v jistých vymezených oblastech. Asi 92 % všech hvězd (v určitém dostatečně velkém objemu) tvoří tzv. hlavní posloupnost, 7 % jsou bílí trpaslíci a jen asi 1 % připadá na hvězdné obry a veleobry. V HR diagramu se silně uplatňují výběrové efekty, a především ty budeme sledovat v této úloze.

Pracovní postup:

1. Do HR diagramu budete zaznamenávat na dvě desítky nejjasnějších a nejbližších hvězd. Na vodorovnou osu diagramu (obr. 1) vyneste posloupnost spektrálních typů (O-B-A-F-G-K-M). Pro každý spektrální typ S_p volte stejně velký úsek. Nejteplejší hvězdy jsou vlevo, nejméně teplé vpravo. Na svislou osu vyneste absolutní hvězdnou velikost M , a to tak, aby jasnost hvězd rostla směrem nahoru. Pohledem do tabulek 1 až 3 zjistěte potřebný rozsah stupnice pro M .

2. Do HR diagramu postupně vyneste 22 nejjasnějších hvězd, uvedených v tabulce 1¹⁾. Pro označení polohy těchto hvězd zvolte malý prázdný kroužek.

3. Postup opakujte pro 26 nejbližších hvězd (tabulka 2). Tyto hvězdy označte malým plným kroužkem. Pokud hvězda patří mezi nejjasnější i nejbližší, vyplňte jen polovinu kotoučku.

4. Do HR diagramu zakreslete také polohu Slunce: $M = 4,8$ mag, spektrální typ G 2.

5. Už letný pohled na HR diagram naznačuje, že se zde výrazně uplatňují *výběrové efekty*. Nejjasnější hvězdy „sbíráme“ z velké oblasti, proto je jich na našem diagramu podstatně více než by odpovídalo jejich skutečnému zastoupení mezi všemi hvězdami.

¹⁾ Podle jakého kritéria jsou seřazeny hvězdy v tabulce 1? (Tento způsob je běžný ve hvězdných katalozích.) Pokud si nevíte rady s odpovědí, vyhledejte si jednotlivé hvězdy na mapě hvězdné oblohy.

5. Jak astronomové měří a váží

Odhadněte, kolikrát větší objem zaujímají uvedené nejjasnější hvězdy ve srovnání s vypsány mi nejbližšími hvězdami: v tabulce 1 je pro každou hvězdu uvedena též pozorovaná hvězdná velikost m , což dovoluje vypočítat vzdálenost r (v parsecích):

$$m - M = 5 \log r - 5,$$

tedy

$$r = 10^{(m - M + 5)/5}.$$

Vypočítejte vzdálenosti postupně pro všechny nejjasnější hvězdy, запиšte do tabulky 1 a zjistěte střední hodnotu r_s . Nyní je snadné vypočítat, jaký objem zaujímají dvě desítky nejjasnějších hvězd.

V tabulce 2 jsou vypsány hvězdy s paralaxami $\pi > 0,27''$. Za typickou paralaxu považujte $\pi = 0,3''$; také tento výpočet objemu, který zaujímají nejbližší hvězdy, je jednoduchý. Kolikrát větší objem tedy zaujímají dvě desítky nejjasnějších hvězd ve srovnání s dvěma desítkami hvězd nejbližších?

6. V tabulce 3 jsou uvedeny souřadnice bodů nejdůležitějších větví HR diagramu, které byly získány z poloh velkého počtu hvězd v HR diagramu. Zakreslete tyto body do obr. 1, spojte *plynulou* čarou a označte názvem příslušnou větev diagramu.

Vstupní data, výsledky:

Tabulka 1. 22 nejjasnějších hvězd

Hvězda	m (mag)	M (mag)	Sp	r (pc)	Hvězda	m (mag)	M (mag)	Sp	r (pc)
α Eri	0,5	-2,2	B 5		α Cru	0,9	-3,5	B 2	
α Tau	0,9	-0,7	K 5		β Cru	1,3	-4,7	B 0	
α Aur	0,1	-0,6	G 8		α Vir	1,0	-3,4	B 1	
β Ori	0,1	-7,0	B 8		β Cen	0,6	-5,0	B 1	
α Ori	0,8	-6	M 2		α Boo	-0,1	-0,2	K 2	
α Car	-0,7	-4,7	F 0		α Cen	-0,1	4,3	G 2	
α CMa	-1,5	1,4	A 1		α Sco	1,0	-4,7	M 1	
ϵ CMa	1,5	-5,0	B 2		α Lyr	0,0	0,5	A 0	
α CMi	0,4	2,7	F 5		α Aql	0,8	2,3	A 7	
β Gem	1,2	1,0	K 0		α Cyg	1,3	-7,3	A 2	
α Leo	1,4	-0,6	B 7		α PsA	1,2	1,9	A 3	

5. Jak astronomové měří a váží

Tabulka 2. 26 nejbližších hvězd

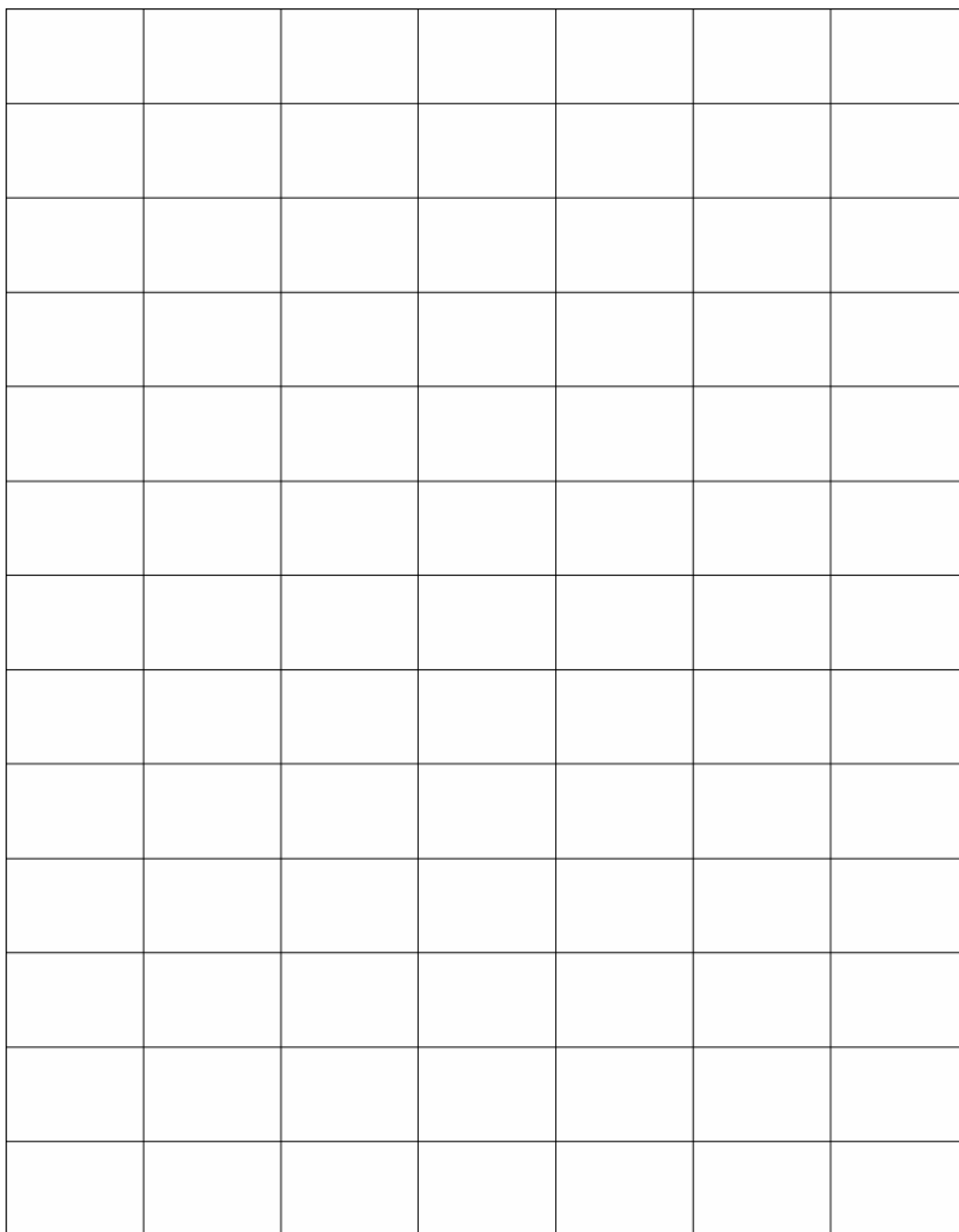
<i>Hvězda</i>	<i>M (mag)</i>	<i>Sp</i>	<i>Hvězda</i>	<i>M (mag)</i>	<i>Sp</i>
HD 1326 A	10,3	M 1	Proxima Cen C	15,5	M 5
HD 1326 B	13,3	M 6	α Cen A	4,3	G 2
L 726-8	15,3	M 5	α Cen B	5,7	K 5
UV Cet	15,8	M 6	Barnardova	13,3	M 5
τ Cet	5,7	G 8	HD 173739 A	11,2	M 4
ϵ Eri	6,1	K 2	HD 173740 B	11,9	M 5
α CMa A	1,4	A 1	Ross 154	13,3	M 4
α CMa B	11,6	A	61 Cyg A	7,6	K 5
α CMi A	2,6	F 5	61 Cyg B	8,4	K 7
α CMi B	13,0	F	ϵ Ind	7,0	K 5
Wolf 359	16,7	M 8	L 789-6	14,6	M 7
HD 95735	10,5	M 2	HD 217987	9,6	M 2
Ross 128	13,5	M 5	Ross 248	14,8	M 6

Tabulka 3. Větve HR diagramu

<i>Hlavní posloupnost</i>		<i>Obři</i>		<i>Veleobři</i>	
<i>Sp</i>	<i>M (mag)</i>	<i>Sp</i>	<i>M (mag)</i>	<i>Sp</i>	<i>M (mag)</i>
O 5	-5,8	G 0	1,1	B 0	-6,4
B 0	-4,1	G 5	0,7	A 0	-6,2
B 5	-1,1	K 0	0,5	F 0	-6
A 0	0,7	K 5	-0,2	G 0	-6
A 5	2,0	M 0	-0,4	G 5	-6
F 0	2,6	M 5	-0,8	K 0	-5
F 5	3,4			K 5	-5
G 0	4,4			M 0	-5
G 5	5,1				
K 0	5,9				
K 5	7,3				
M 0	9,0				
M 5	11,8				
M 8	16				

Střední vzdálenost 22 nejjasnějších hvězd činí $r_s =$ _____ pc (vhodně zaokrouhlete!). 26 nejbližších hvězd se nachází v prostoru tvaru koule o poloměru zhruba _____ pc. Znamená to tedy, že dvě desítky nejjasnějších hvězd ve srovnání s dvěma desítkami hvězd nejbližších zaujmají objem přibližně _____ větší.

5. Jak astronomové měří a váží



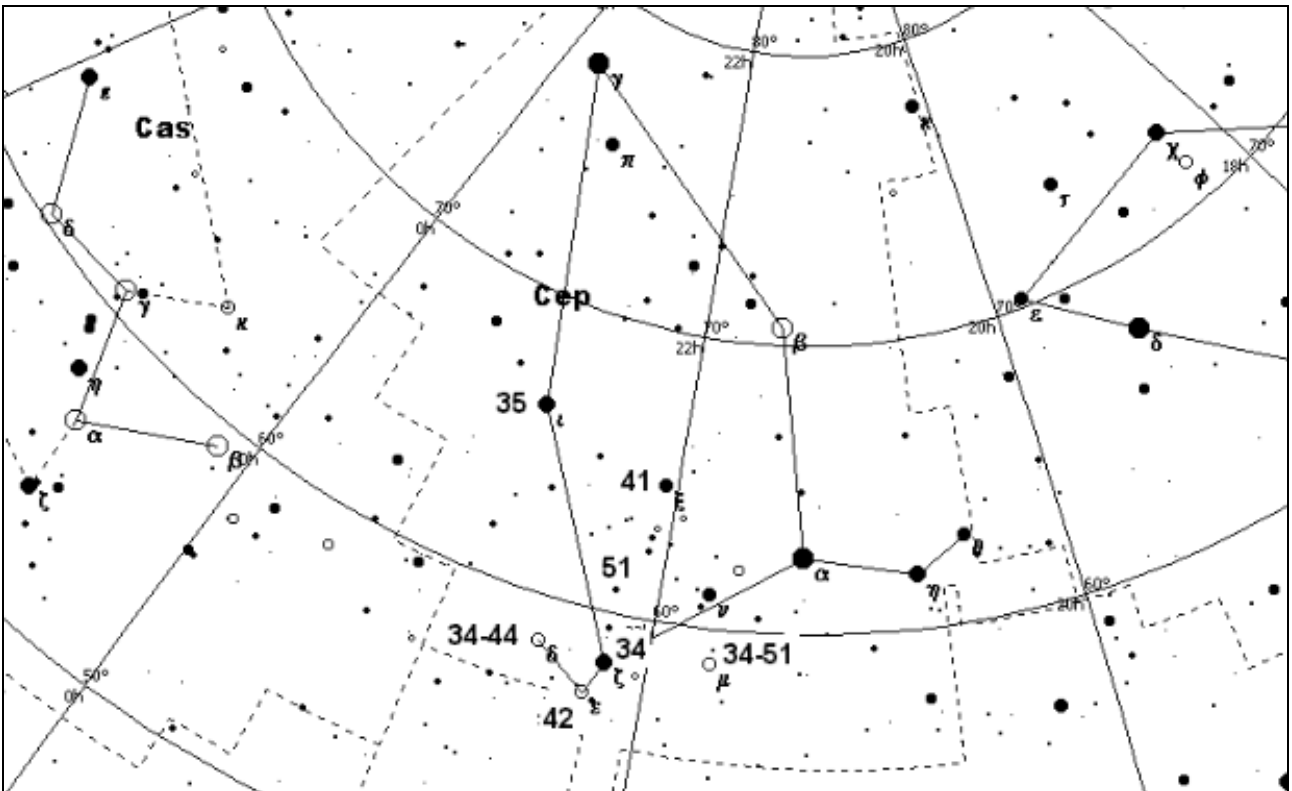
Obr. 1. Hertzsprungův-Russellův diagram

5.6. Majáky vesmíru

Zní to sice velice tajemně, ale jedná se téměř o vědecký termín. Těmi „majáky“ jsou cefeidy – jeden druh proměnných hvězd, které se pravidelně zjasňují a slábnou, některé v rychlejším rytmu, jiné pomaleji. Zvláštní na tomto jevu je skutečnost, že perioda světelných změn cefeid souvisí s tím, jak mnoho záření vydávají. Astronomové této skutečnosti využívají k určování jejich vzdáleností. Je to velice užitečná metoda.

Cefeidy se představují

V roce 1784 objevil John Goodricke ¹⁾ (1764–1786), že hvězda δ Cephei je proměnná: s periodou více než pět dní pravidelně mění svou hvězdnou velikost v rozmezí jedné magnitudy. Stala se prototypem celé skupiny proměnných hvězd, nazývaných *cefeidy*.

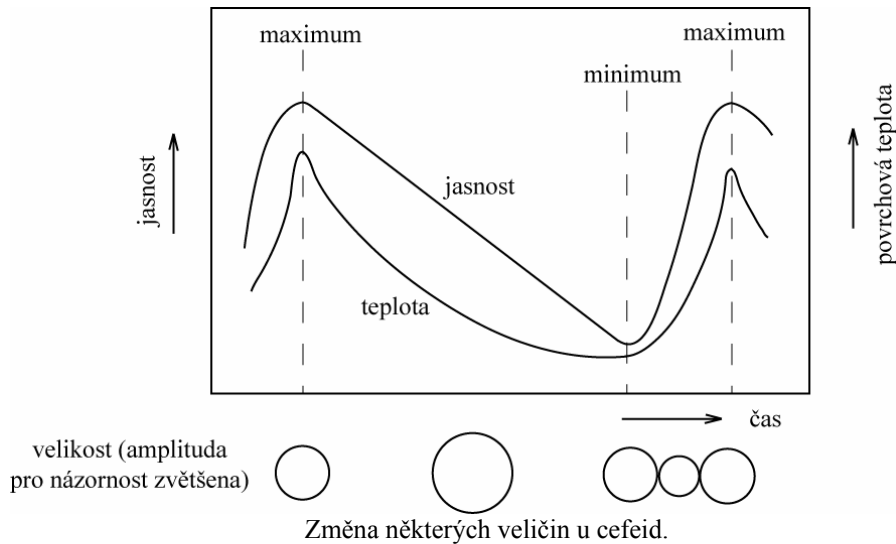


Okolí hvězdy δ Cephei. U některých hvězd v okolí jsou uvedeny hvězdné velikosti v dekamagnitudách (tyto hvězdy lze použít jako srovnávací pro sledování změn jasnosti hvězdy δ Cep).

¹⁾ Čti: *gudrik*.

5. Jak astronomové měří a váží

Cefeidy jsou veleobří spektrálních tříd F a G, jinak ale též pulsující proměnné hvězdy, u nichž dochází k periodickému rozpínání a smršťování atmosfér. Maximální jasnost odpovídá nejrychlejšímu rozpínání, minimální pak nejrychlejšímu smršťování. Relativní změny poloměru nejsou ale nijak velké, dosahují asi 10 procent. S periodou světelných změn se poněkud mění také povrchová teplota a tedy i spektrální třída.

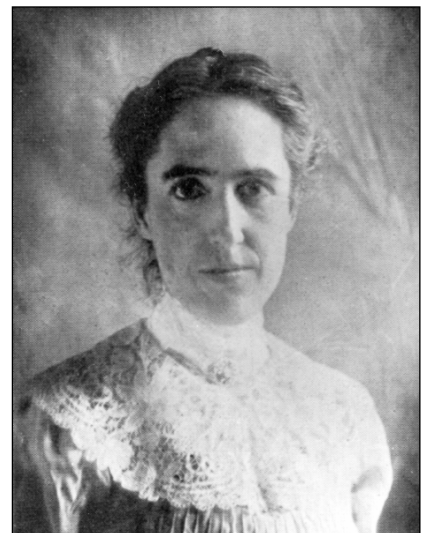


Objev Henrietty Leavittové

Henrietta Leavittová ²⁾, astronomka z Harvardovy observatoře, si v roce 1912 povšimla, že mezi střední absolutní jasností cefeid (tedy středním zářivým výkonem) a periodou jejich světelných změn existuje výrazná závislost: čím je *delší* perioda, tím *vyšší* je pozorovaná jasnost a tomu tudíž odpovídá i *vyšší* zářivý výkon.

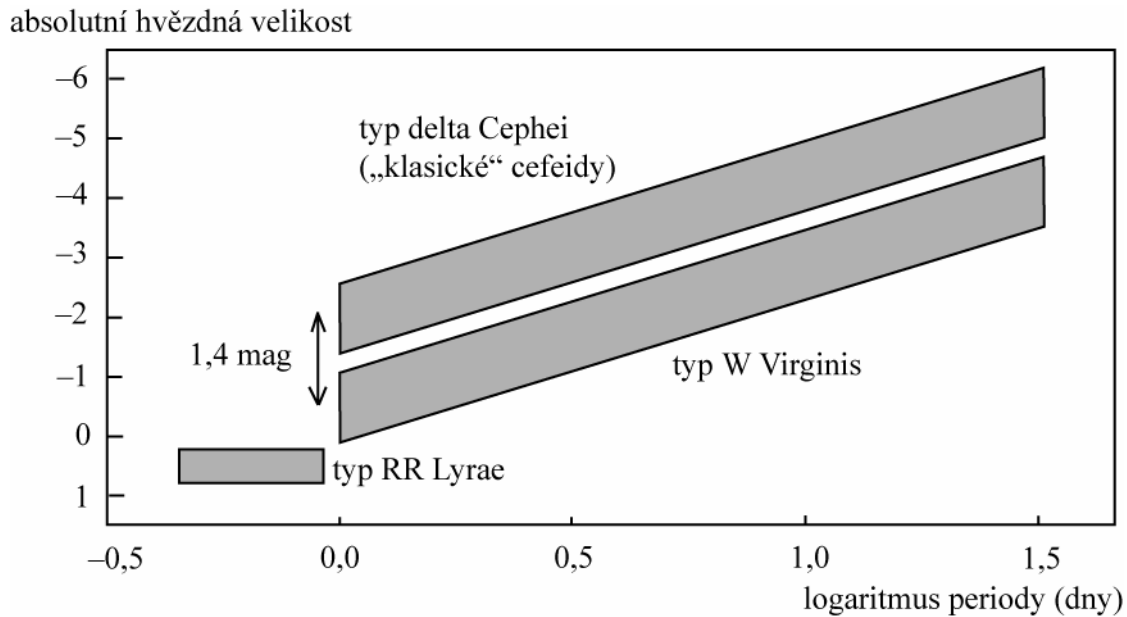
Leavittová studovala cefeidy v Malém Magellanově oblaku. Všechny jsou od nás stejně daleko, takže u nich lze absolutní jasnosti nahradit pozorovanými. Problém je jen v kalibraci nalezeného vztahu (v určení tzv. nulového bodu), protože i nejbližší cefeidy jsou od nás natolik daleko, že se až donedávna nedařilo změřit jejich paralaxy. Ejnar Hertzsprung proto odvodil nulový bod statisticky z vlastních pohybů nejbližších cefeid.

Empiricky nalezená závislost mezi zářivým výkonem a periodou světelných změn u cefeid byla později podpořena i teoreticky. Z teorie stavby hvězd totiž plyne, že perioda pulsací je nepřímo úměrná druhé odmocnině střední hustoty hvězdy. Jasnější a větší hvězdy mají nižší střední hustotu než hvězdy méně jasné a menší, proto je jejich perioda pulsací delší.



²⁾ Čti: *levitová*.

5. Jak astronomové měří a váží



Závislost zářivého výkonu na periodě světelných změn pro některé pulzující proměnné hvězdy.

Cefeid je více druhů

Pulsujících proměnných hvězd, u kterých platí závislost mezi zářivým výkonem a periodou světelných změn, je více druhů. Kromě *klasických cefeid*, jejichž představitelem je δ Cephei, pozorujeme cefeidy *typu W Virginis*³⁾ a hvězdy *typu RR Lyrae* (prvními sledovanými z nich byly právě uvedené hvězdy, proto se podle nich nazývají i celé typy).

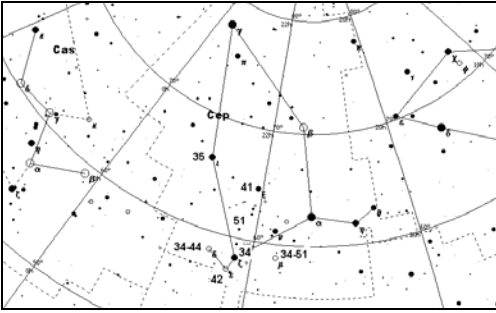
Závislost „zářivý výkon – perioda světelných změn cefeid“ má značný praktický význam pro určování vzdáleností ve vesmíru. Stačí znát periodu změn jasnosti cefeidy, abychom zjistili její absolutní hvězdnou velikost.

Z absolutní a pozorované hvězdné velikosti vypočítáme *vzdálenost* cefeidy. Pak samozřejmě víme, jak je daleko nejen ona cefeida, ale i hvězdokupa nebo celá cizí galaxie, v níž se cefeida nachází.

Ještě několik poznámek ke hvězdám typu W Virginis a RR Lyrae: ty první jsou hvězdami starší generace než klasické cefeidy. Jejich nulový bod v závislosti „výkon – perioda světelných změn“ je proti klasickým cefeidám posunut o 1,4 magnitudy. Dokud tato skutečnost nebyla známa a obě skupiny cefeid se považovaly za jedinou, vedlo to k podceňování vzdáleností ve vesmíru.

Hvězdy typu RR Lyrae jsou rychle pulzující obři spektrálních tříd B až F, jejichž absolutní jasnost *prakticky nezávisí* na periodě světelných změn. To je výhodné pro určování jejich vzdáleností – stačí znát jen pozorovanou jasnost. Nevýhodou ale je, že oproti veleobřím cefeidám nejsou tak zářivé (jsou to „jen“ obři), takže je můžeme sledovat pouze v menším okruhu vzdáleností než cefeidy.

³⁾ Čti: *virgínis* (a nikoli *viržínis*) – jedná se o latinské slovo, kde se *g* vyslovuje normálně jako *g*!



čítanka

Ze země tisíce a jedné pozorovací noci

Povězme si pohádku ze země tisíce a jedné pozorovací noci. Je to nadmíru poučný příběh z časů snad ne až tak dávných. – Byl jednou jeden profesor astronomie. Jako všechny astronomy té doby hněvalo i jeho, že vzdálenosti hvězd se určují obtížně a nepřesně. Přijal proto mladého doktoranda a uložil mu za úkol vymyslet nové a jistě i lepší způsoby zjišťování vzdáleností hvězd.

Pln zápalu pustil se aspirant do práce. Vzpomněl si na historku s určováním vzdáleností cefeid a rozhodl se jít stejnou cestou, jakou tehdy kráčela ta dobrá duše slečna Leavittová.

Náš doktorand si předsevzal vyhledat skupinu takových hvězd, jež by měly mnoho stejných vlastností. Zejména jejich absolutní jasnosti musí být přesně stejné! Z pozorované jasnosti lze pak zcela snadno určit jejich vzdálenosti, jestliže – ale ovšem – jestliže nějak jinak zjistíme vzdálenost jedné jediné hvězdy z celé skupiny. Po důkladném prostudování veškeré astronomické literatury bylo jasné, že ve vesmíru je pouze jediná hvězda, jejíž vzdálenost známe dostatečně přesně: tou je naše Slunce. A tak, chtě nechtě, musel vzít do hry i sluníčko.

Pečlivě tedy vybíral hvězdy hlavní posloupnosti a spektrálního typu G2. Starosti s cejchovní hvězdou volbou Slunce odpadly, musel jen zajistit, aby všechny vybrané hvězdy téhož spektrálního typu měly opravdu mnoho společného. Pilně a bez umdlení proto pozoroval v tisíci a jedné noci spoustu hvězd spektrálního typu G2, které náležely k hlavní posloupnosti. Měřil jejich jasnosti, zabarvení, vlastní pohyby, radiální rychlosti a ještě mnoho, mnoho jiného.



5. Jak astronomové měří a váží

Práce mu šla pěkně od ruky, profesor byl s pilným doktorandem plně spokojen. Vše se zdálo být v pořádku, až na zabarvení hvězd. Ta nesouhlasila!

„Což snad moje skupina hvězd není zcela stejnorodá?“ přemítal doktorand. „To by nebylo nic neobvyklého, vždyť i dobrák slečna Leavittová se zprvu takto zmýlila,“ dodával si odvahy.

Měřil a bádá, sestavoval roztodivné tabulky a diagramy, až najednou odhalil něco neobvyklého. Vybrané hvězdy byly v průměru tím červenější, čím se na obloze jevíly slabší.

„Pak to ovšem znamená,“ mumlal si pro sebe aspirant, „že hvězdy jsou tím červenější, čím jsou od nás dále. Ale proč? Rozpínání vesmíru? – Nesmysl, takhle to není! To asi měřím systematicky chybně zabarvení slabých hvězd.“

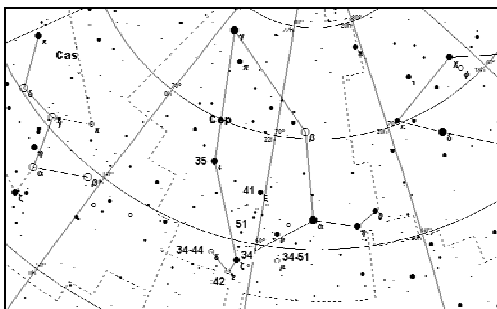
Náš doktorand byl v koncích. Sklesle se vypravil za profesorem a s obavami, že ho vyplísí, jak nedbale pozoroval, ho požádal o radu. Ten ale, když vše vyslechl, se od srdce zasmál a pravil: „Milý příteli, měřil jste opravdu dostatečně přesně. Vysvětlení toho, co jste zjistil, je docela prostinké. Vždyť přece zčervenání světla slabých hvězd...“

Věřím, že i vy už znáte řešení tohoto problému.

Podle článku Ulricha Bastiana, uveřejněného v časopise *Sterne und Weltraum*, 1983, 452, volně upravil Zdeněk Pokorný.

Ilustrační snímek ukazuje část Mléčné dráhy v souhvězdí Střelce, jak ji zaznamenala družice Chandra v rentgenovém oboru spektra.

5. Jak astronomové měří a váží



Není nám dovoleno vědět vše.

Quintus Flaccus Horatius, básník (65 – 8 př. n. l.)

otázky a příklady

Otázka 5.6.1. Proč jsou „klasické“ cefeidy vhodnější pro určování vzdáleností než hvězdy typu RR Lyrae?

a) U hvězd typu RR Lyrae není výrazná závislost periody světelných změn na absolutní hvězdné velikosti.
b) Cefeidy oproti hvězdám typu RR Lyrae mají větší zářivý výkon, takže je zahlédneme ve vzdálenějších soustavách než v případě hvězd typu RR Lyrae; c) Cefeidy pozorujeme ve všech hvězdných soustavách.

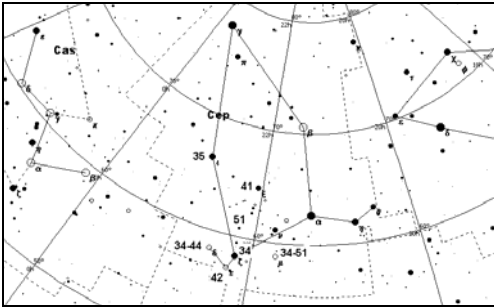
Otázka 5.6.2. Čím je absolutní jasnost cefeid [větší × menší], tím je [delší × kratší] perioda světelných změn. Totéž [platí × neplatí] pro proměnné hvězdy typu RR Lyrae.

Otázka 5.6.3. V prvním přiblížení platí, že když jsou cefeidy nejjasnější, jsou též: a) nejteplejší; b) nejmenší a nejchladnější; c) největší.

Otázka 5.6.4. Proč nelze světelné změny a další fyzikální charakteristiky cefeid vysvětlit vzájemnými zákryty dvou hvězd? Který druh pozorování (např. fotometrická, spektroskopická, poziční...) tomu odporuje?

Otázka 5.6.5. Určování vzdáleností cefeid podle jejich periody světelných změn je přece jen trochu složitější, než jak by se na první pohled zdálo. Při hodně velkých vzdálenostech už musíme brát v úvahu také existenci mezihvězdného prachu, který je sice nesmírně řídký, ale přesto pohlcuje část procházejícího světla. Když tento vliv do našich výpočtů zaneseme, zvětší se vzdálenosti určené pomocí cefeid nebo naopak zmenší? Proč?

5. Jak astronomové měří a váží



praktikum

Vzdálenost cefeid

Cefeidy – pulsující proměnné hvězdy – slouží k určování vzdáleností ve vesmíru, jsou svého druhu „majáky“ rozestými v naší i cizích galaxiích. V roce 1912 totiž Henrietta S. Leavittová zjistila, že existuje výrazná závislost mezi střední jasností a periodou světelných změn u cefeid v Malém Magellanově oblaku (*Small Magellanic Cloud* – SMC): čím jsou periody delší, tím jsou cefeidy jasnější. Vzhledem k tomu, že všechny hvězdy v SMC jsou od nás prakticky stejně daleko, vyplývá z toho, že jasnější cefeidy jsou i ve skutečnosti zářivější než cefeidy méně jasné. Dalšími výzkumy se potvrdilo, že jde o obecnou vlastnost cefeid.

Naším úkolem je určit vzdálenost SMC; využijeme přitom závislosti jasnosti na periodě světelných změn cefeid.

Pracovní postup

1. V tabulce 1 jsou uvedeny periody P a hvězdné velikosti m pro 17 cefeid z SMC. Vypočítejte logaritmus periody a doplňte do tabulky. Do grafu (obr. 2) vynesete veličiny $\log P$ a m . Lineární závislost mezi oběma proměnnými by měla být patrná již na první pohled.

2. Na obr. 1 jsou zakresleny idealizované světelné křivky dalších čtyř cefeid z SMC. Z obrázku odečtete příslušné periody a hvězdné velikosti; $m_{\text{stř}}$ je střední hodnota maximální a minimální hodnoty hvězdné velikosti: $m_{\text{stř}} = (m_{\text{max}} + m_{\text{min}})/2$. Hvězdné velikosti odečítejte s přesností na desetinu magnitudy. Výsledky zapisujte do tabulky 3 a vynesete do grafu (obr. 2); tyto čtyři body označte odlišně od ostatních (prázdným kroužkem, křížkem apod.).

3. Vynesenými body na obr. 2 proložte přímkou. Dostanete tak nekalibrovanou závislost *perioda – jasnost* pro cefeidy (vzhledem k tomu, že vzdálenost všech cefeid v SMC od nás je přibližně stejná, je jasnost zároveň mírou zářivého výkonu těchto hvězd).

4. Kalibraci závislosti *perioda – jasnost* (obr. 2) provedeme tím způsobem, že do téhož grafu vyneseme absolutní hvězdné velikosti M a logaritmy period P pro 20 cefeid, jejichž vzdálenost byla určena jinak (příslušné hodnoty M a $\log P$ jsou v tabulce 2, jde o údaje uvedené R. P. Kraftem, 1961). Poznámka: povšimněte si způsobu označování proměnných hvězd, o němž byla zmínka v kapitole 1.4.

Stupnice $\log P$ zůstane stejná. Škálu M zvolte tak, aby se nově vynášené body nepřekrývaly s předchozími, protože by to znemožňovalo dostatečně přesné proložení přímkou vynesenými body. Stupnici M vynášejte na pravou svislou osu, měřítko musí zůstat stejné! Výhodné je volit posuv o celistvý počet magnitud.

Nově vynesenými body proložte přímkou.

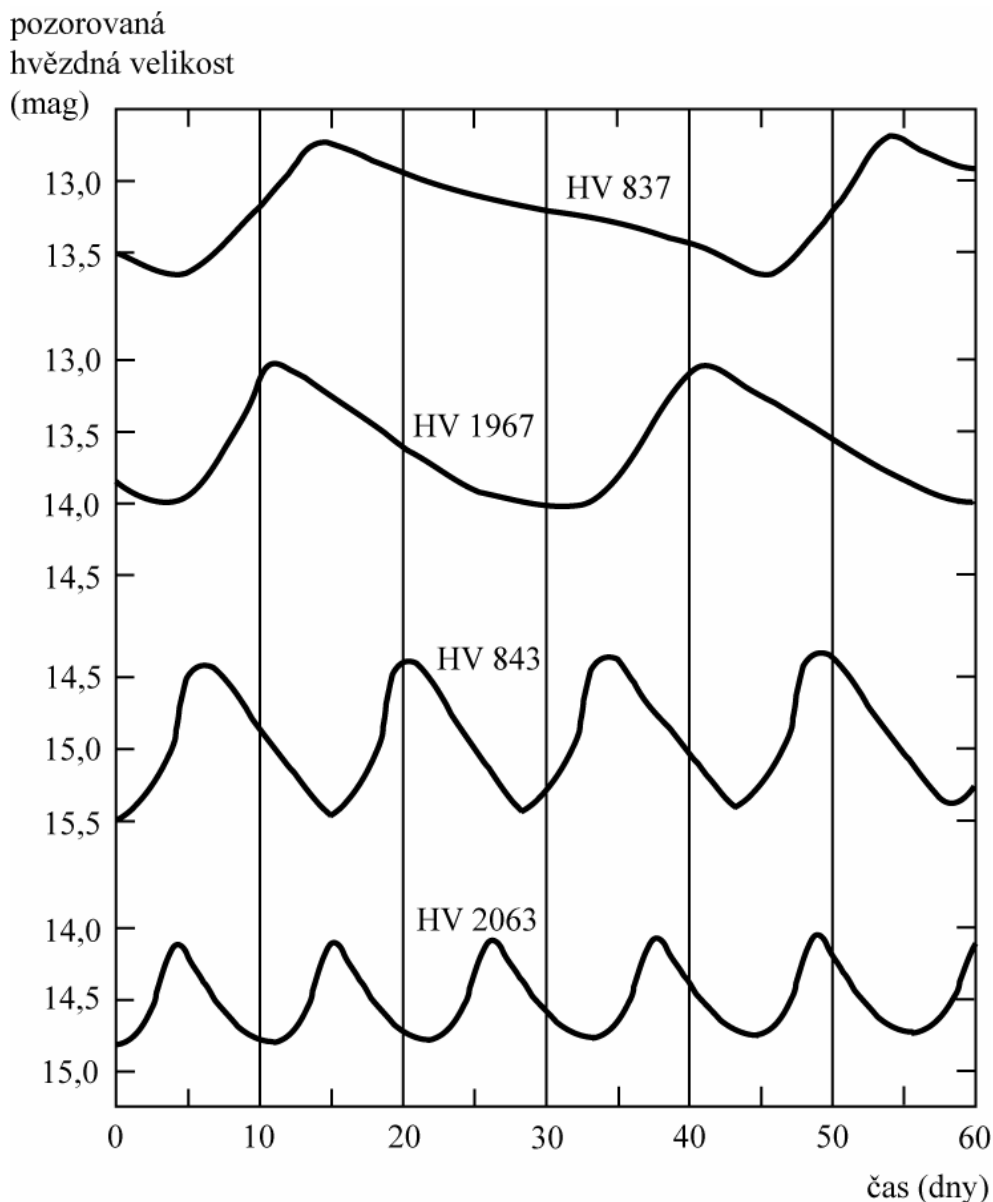
5. Jak astronomové měří a váží

5. Z obr. 2 určete vertikální rozdíl ($m - M$) mezi oběma přímkami (vzhledem k poněkud různým sklonům obou přímek odečtěte rozdíl na několika místech a zprůměrujte). Vezměte v úvahu i rozdíl škál m a M . Modul vzdálenosti ($m - M$), který takto získáte, umožní vypočítat vzdálenost r , neboť

$$m - M = 5 \log r - 5.$$

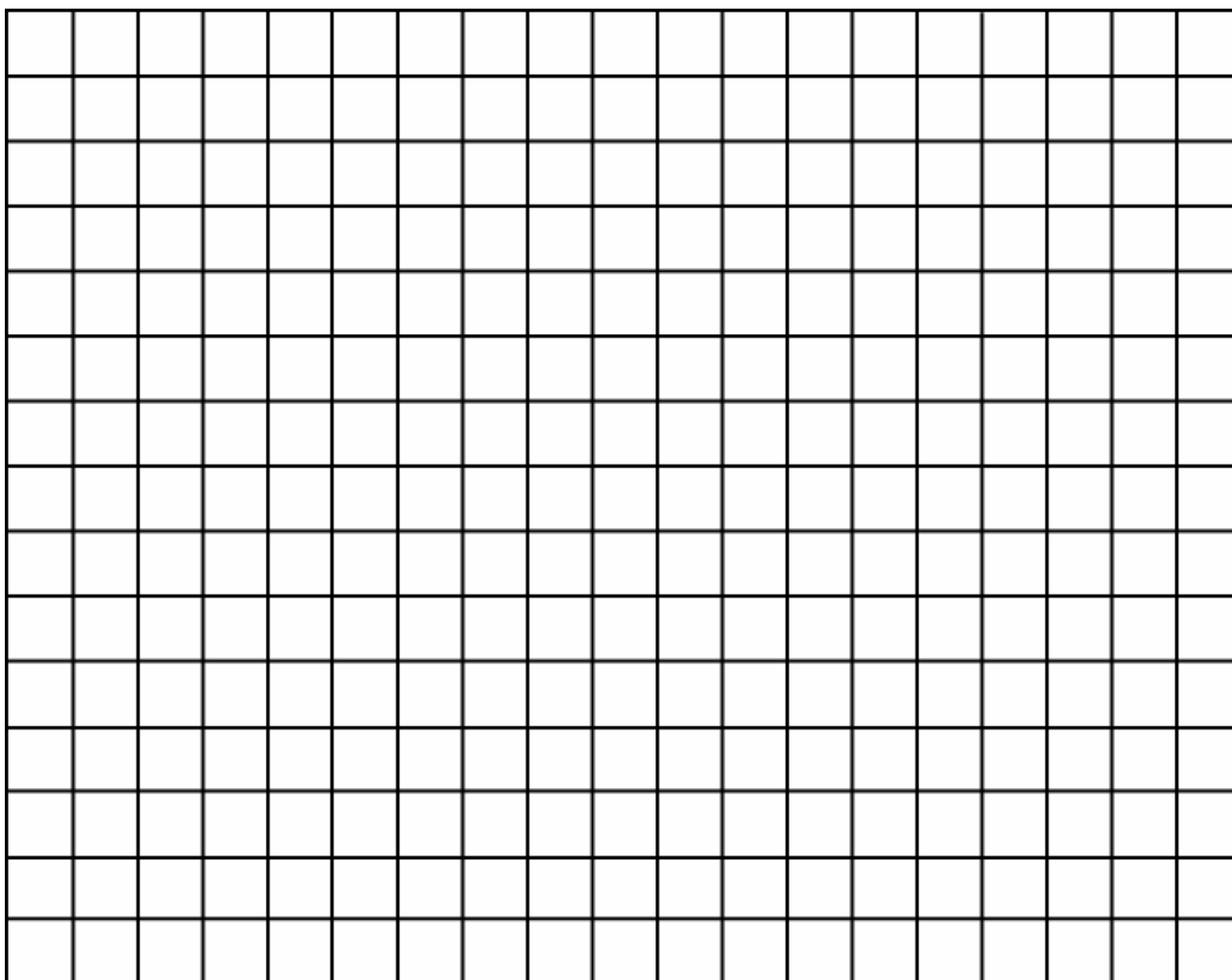
Praktikum bylo připraveno s použitím článku J. M. Pasachoffa a R. W. Goebela: *Laboratory Exercises in Astronomy – Cepheid Variables and the Cosmic Distance Scale* (Sky and Telescope 57, 1979, č. 3, 241-244).

Vstupní data, výsledky:



Obr. 1. Idealizované světelné křivky čtyř cefeid v SMC, získané H. C. Arpem. Písmena HV označují, že jde o proměnnou hvězdu objevenou na Harvardově observatoři.

5. Jak astronomové měří a váží



Obr. 2.

5. Jak astronomové měří a váží

Tabulka 1

<i>Hvězda</i>	<i>m (mag)</i>	<i>P (dny)</i>	<i>log P</i>
HV 2019	16,8	1,62	
HV 2035	16,7	2,00	
HV 844	16,3	2,24	
HV 2046	16,0	2,57	
HV 1809	16,1	2,82	
HV 1987	16,0	3,16	
HV 1825	15,6	4,27	
HV 1903	15,6	5,13	
HV 1945	15,2	6,46	
HV 2060	14,3	10,2	
HV 1873	14,7	12,9	
HV 1954	13,8	16,6	
HV 847	13,8	27,5	
HV 840	13,4	33,1	
HV 1182	13,6	39,8	
HV 1837	13,1	42,7	
HV 1877	13,1	50,1	

Tabulka 2

<i>Hvězda</i>	<i>log P</i>	<i>M (mag)</i>	<i>Hvězda</i>	<i>log P</i>	<i>M (mag)</i>
SU Cas	0,29	-1,7	U Sgr	0,83	-3,5
EV Sct	0,49	-2,4	η Aql	0,86	-3,5
SS Sct	0,56	-2,4	RX Cam	0,90	-3,7
SU Cyg	0,58	-2,8	DL Cas	0,90	-3,7
Y Lac	0,64	-2,8	S Nor	0,99	-3,7
FF Aql	0,65	-3,1	Z Lac	1,04	-4,1
CF Cas	0,69	-3,4	RW Cas	1,17	-4,5
V350 Sgr	0,71	-3,0	Y Oph	1,23	-5,3
CV Mon	0,73	-3,0	T Mon	1,34	-5,6
RR Lac	0,81	-3,4	SV Vul	1,65	-6,4

5. Jak astronomové měří a váží

Tabulka 3

<i>Hvězda</i>	m_{\max}	m_{\min}	$m_{\text{stř}}$	P (dny)	$\log P$
HV 837					
HV 1967					
HV 843					
HV 2063					

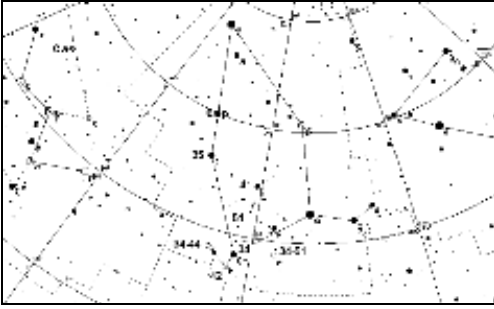
rozdíl škál m a M : _____

průměrná vzdálenost obou přímek v obr. 2: _____

modul vzdálenosti ($m - M$) = _____

vzdálenost r = _____

5. Jak astronomové měří a váží



speciální otázky

Pravda a bludy

Nyní máte před sebou pět různých tvrzení. Některá z nich jsou správná, jiná nikoli. Určitě ta chybná rozpoznáte; poznačte si, které části (slova, věty, možná i celá tvrzení) jsou chybné, a připište, v čem chyba spočívá.

1. Doba rotace Země, jak víme ze školy, je přibližně 24 hodin, ale přesně je to 23 hodin 56 minut a 4 sekundy.

2. Budu-li chtít dalekohledem rozlišit dvě hvězdy, které se nacházejí úhlově velmi blízko sebe, musím dostatečně zvýšit zvětšení obrazu. Když bude ovzduší klidné (v ideálním případě – kdybych byl(a) mimo zemskou atmosféru), při dostatečně velkém zvětšení se mi musí podařit dvojhvězdu rozlišit a obě hvězdy uvidět.

3. Radiolokací se podařilo zjistit délku astronomické jednotky ve fyzikálních jednotkách (metrech) přesněji než kteroukoli jinou metodou. Předpokladem je ovšem znalost rychlosti šíření světla ve vakuu.

4. Jedním z fyzikálních zákonů, které popisují záření absolutně černého tělesa, je Planckův zákon. Tento zákon popisuje rozdělení vyzařované energie v závislosti na kmitočtu či vlnové délce záření. Plyne z něj, že čím vyšší teplotu má absolutně černé těleso, tím více vyzařuje (celkově i v jednotlivých vlnových délkách).

5. Vlnové délky emisních spektrálních čar určitého prvku jsou přesně stejné jako vlnové délky absorpčních čar téhož prvku. Je to jeden ze základních poznatků, k nimž dospěli v polovině 19. století fyzikové Gustav-Robert Kirchhoff a Robert Bunsen.



(Podle Sky and Telescope, June 1981, 541)