# astronomické Vádemécum

doc. RNDr. Zdeněk Pokorný, CSc.

prof. RNDr. Zdeněk Mikulášek, CSc.

RNDr. Jiří Grygar, CSc.

Slovo „Vádemécum“ vzniklo spojením dvou latinských slov „vade“ a „mecum“, což znamená – pojď se mnou“. V roce 2004 vydalo Sdružení hvězdáren a planetárií publikaci s názvem „Vádemécum demonstrátora hvězdárny“. Nicméně této metodické pomůcce, která je dodnes velmi cennou pro všechny, kteří chtějí seznamovat ostatní s krásami a taji vesmíru, předcházela ještě jedna, mnohem rozsáhlejší internetová verze. Toto astronomické „Vádemécum“ je jedinečný průvodce astronomií, z pera vynikajících učitelů a popularizátorů astronomie - zejména doc. RNDr. Zdeňka Pokorného, CSc. a dále prof. RNDr. Zdeňka Mikuláška, CSc. a RNDr. Jiřího Grygara, CSc. Původní verzi „Vádeméca“ pomáhal z rukopisů přepisovat také RNDr. Jiří Prudký. Všem zájemcům o astronomii dává toto „Vádemécum“ nejen dobrý přehled o astronomii jako takové, ale nabízí také spoustu zajímavostí, příběhů, příkladů a otázek k zamyšlení, vedoucích k hlubšímu pochopení principů ve vesmíru. Podle lidí, kteří Zdeňka Pokorného dobře znali, by si zveřejnění „Vádeméca“ a jeho volné šíření mezi mladé astronomy určitě hodně přál. Věříme, že toto výjimečné a dílo, do kterého bylo vloženo ohromné množství umu a práce, bude jistě velmi užitečným průvodcem pro všechny a milovníky hvězd a vesmíru.

Zdeněk Pokorný u patnácticentimetrového refraktoru na hvězdárně v Brně.

# 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 Gralak).

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 „tuctovou“ 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.

**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).

### 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

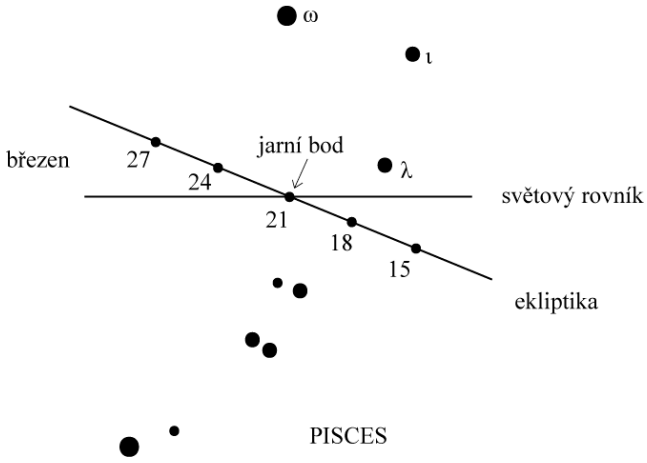
Jaký bude pohyb Slunce po obloze, když jej budeme sledovat odněkud z jižní polokoule, například z Nového Zélandu? Zjistíme, že Slunce se pohybuje od východního obzoru k západnímu. To ještě nic zvláštního není. Jenže – Slunce se pohybuje opačným směrem, než na jaký jsme zvyklí! Zde na jižní polokouli 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

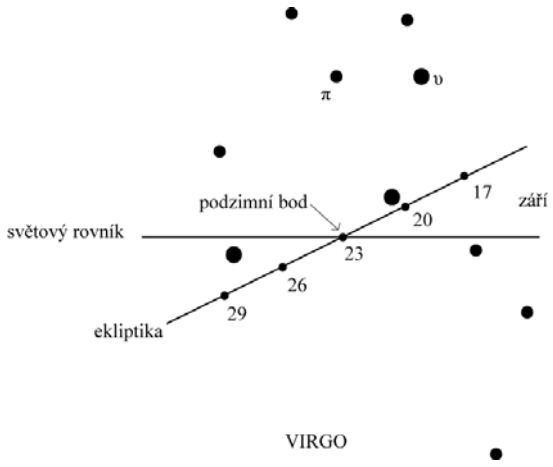
Slunce mění svou polohu nejen na obloze, ale také na *hvězdné obloze* [1]). Vůči vzdáleným hvězdám se Slunce pomalu posouvá, za kalendářní rok se ocitne ve stejné poloze vzhledem ke hvězdám jako před rokem. Množina všech směrů, ve kterých se Slunce v průběhu celého roku postupně nachází, je právě *ekliptika*. 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 poměřujeme polohy relativně blízkých objektů ze sluneční soustavy.




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!

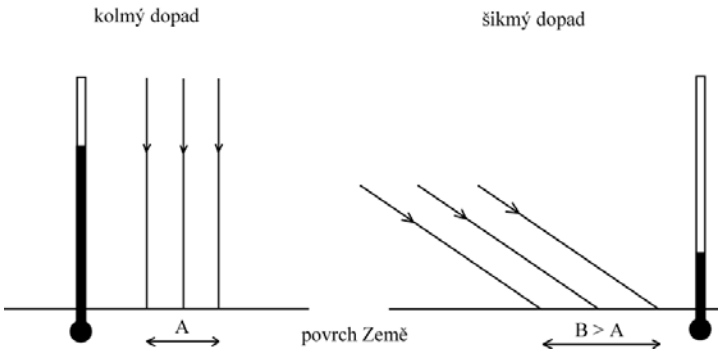
**Souhvězdí nebo znamení?**

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

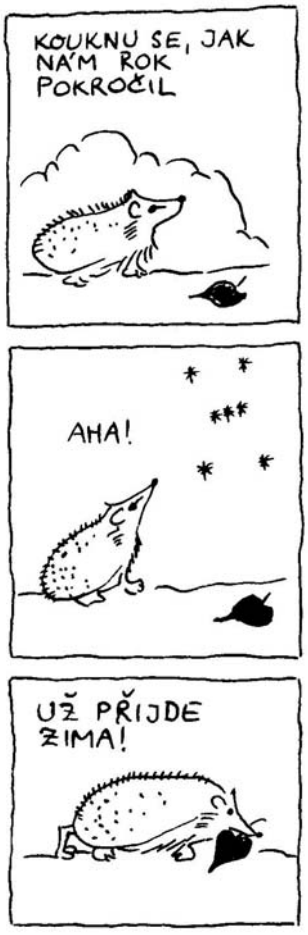
zemského rovníku pozvolna stáčí, takže v současnosti 21. března Slunce sice opět vstupuje do *znamení* Berana, ale nachází se v sousedním *souhvězdí* Ryb. Během roku tak Slunce projde dvanácti znameními, ale třinácti souhvězdími.

### Čtvero ročních období [2])

Země je veliký rotující setrvačník, jehož osa rotace svírá s rovinou oběhu Země kolem Slunce – *ekliptikou* – stále stejný úhel. Ten činí asi 66,5°. 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.




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

### 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 obšírnější, 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,

[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...

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 nemysli, 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

Obecně 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 Scheiner [1]). 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 znepřátelil 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 fóru; 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

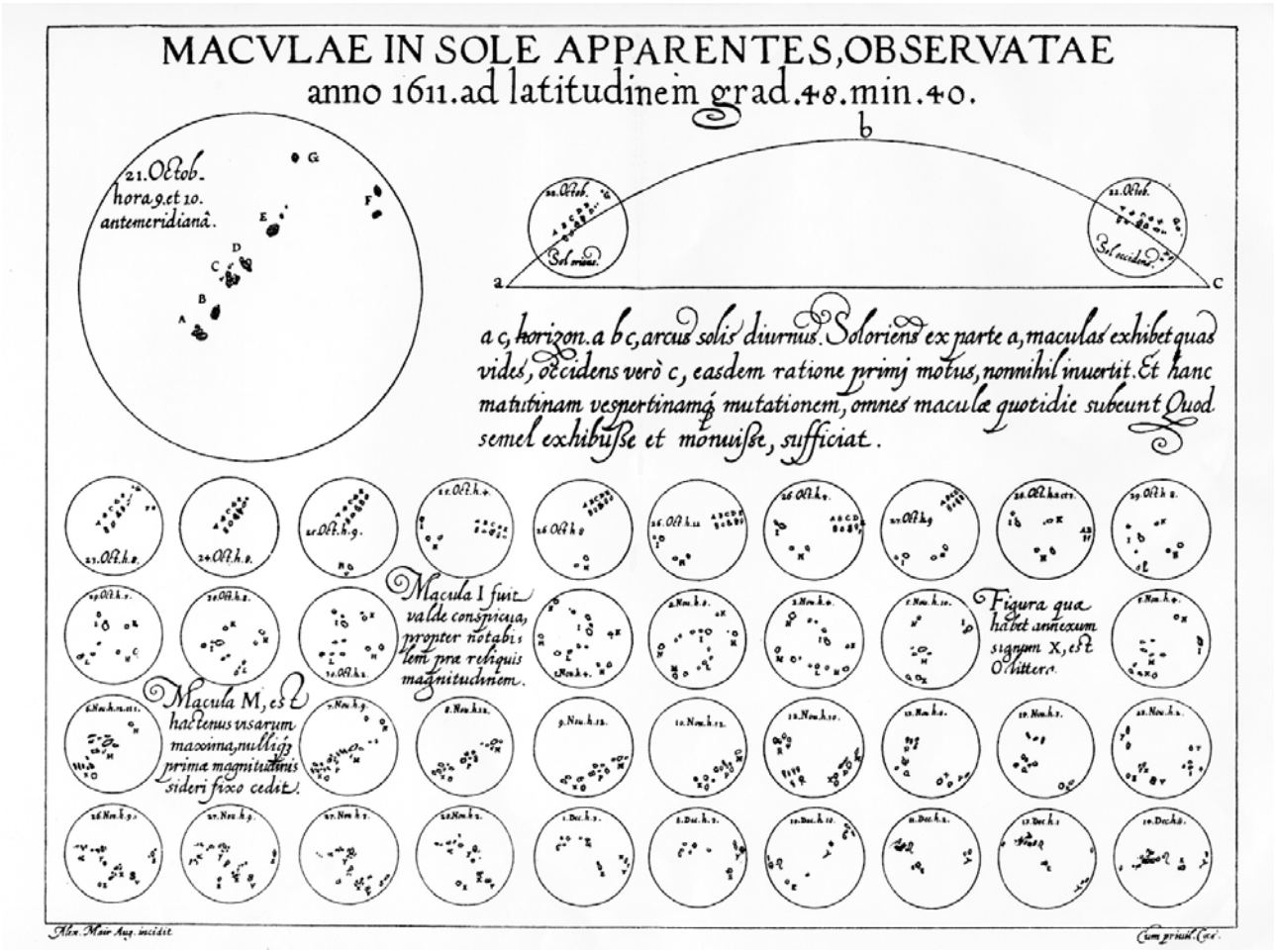
[1]) Čti: *christof šajner*.

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 Christopha 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 dírku. 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 vypočítali 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).

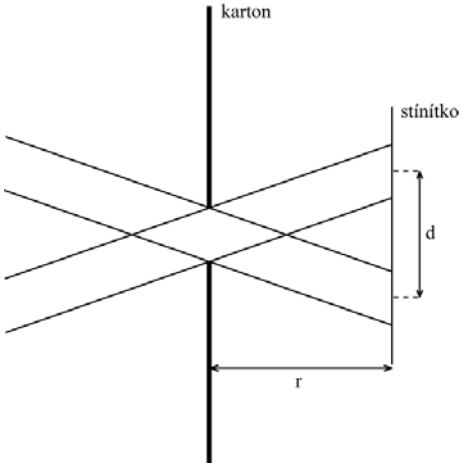
Úhlový průměr Slunce $\gamma$

$$\gamma = d/r$$

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

[1]) Čti: *kamera obskúra*.

*Sestavení experimentu:*

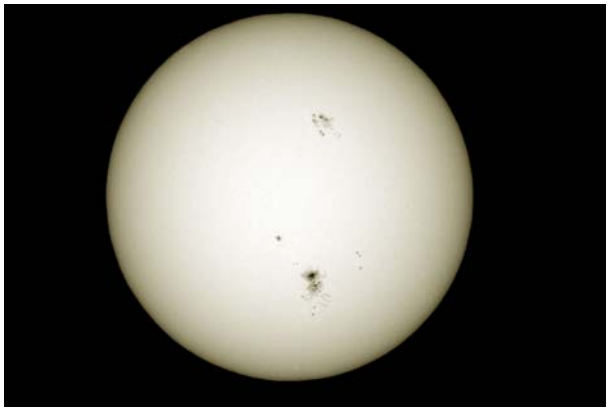



***Výsledky:***

| *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. prvý 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 ročním 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 nedělí 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 střádá 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 časné 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.

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

rady a „drobnosti“

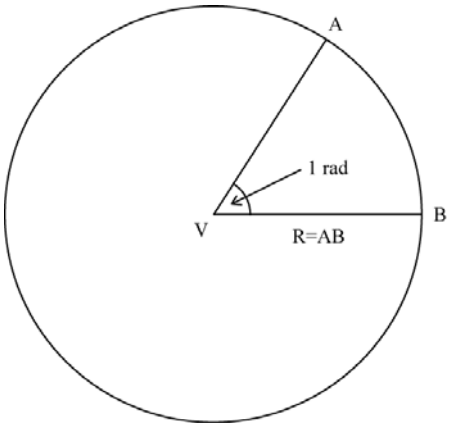
## Velká a malá čísla

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“! Zkrátka – 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° = 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 $2\pi$ rad = 6,28... rad ($\pi$ je Ludolfovo číslo). Pro přepočet velikosti úhlu ve stupních a v radiánech platí, že 360° = $2\pi$ rad.

Číslo pro zapamatování: 1 rad = 57,3°.

# 1.2. Naši sousedé: 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.

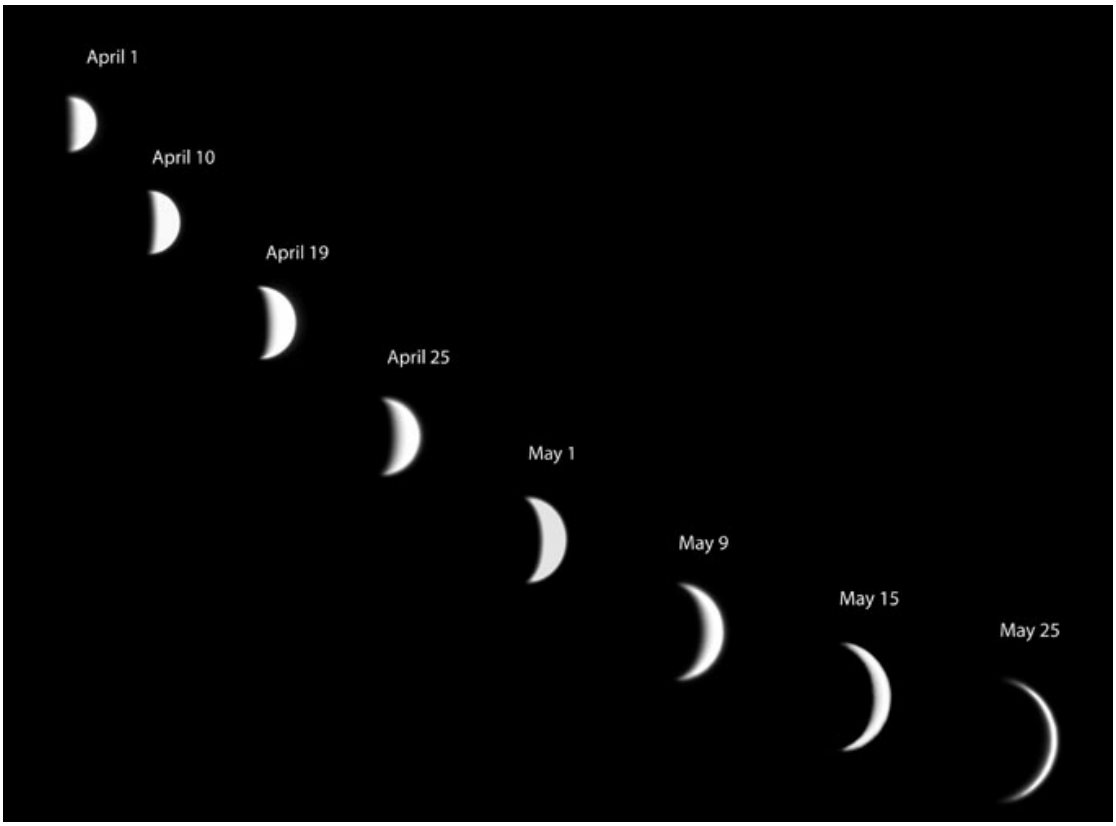
### Planety na hvězdném nebi

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 nestejnorodosti 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, neměnící 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 utvoří skupinu planet *vnějších*. Sám název napovídá, že sem spadá Mars a další planety, ještě vzdálenější od Slunce.

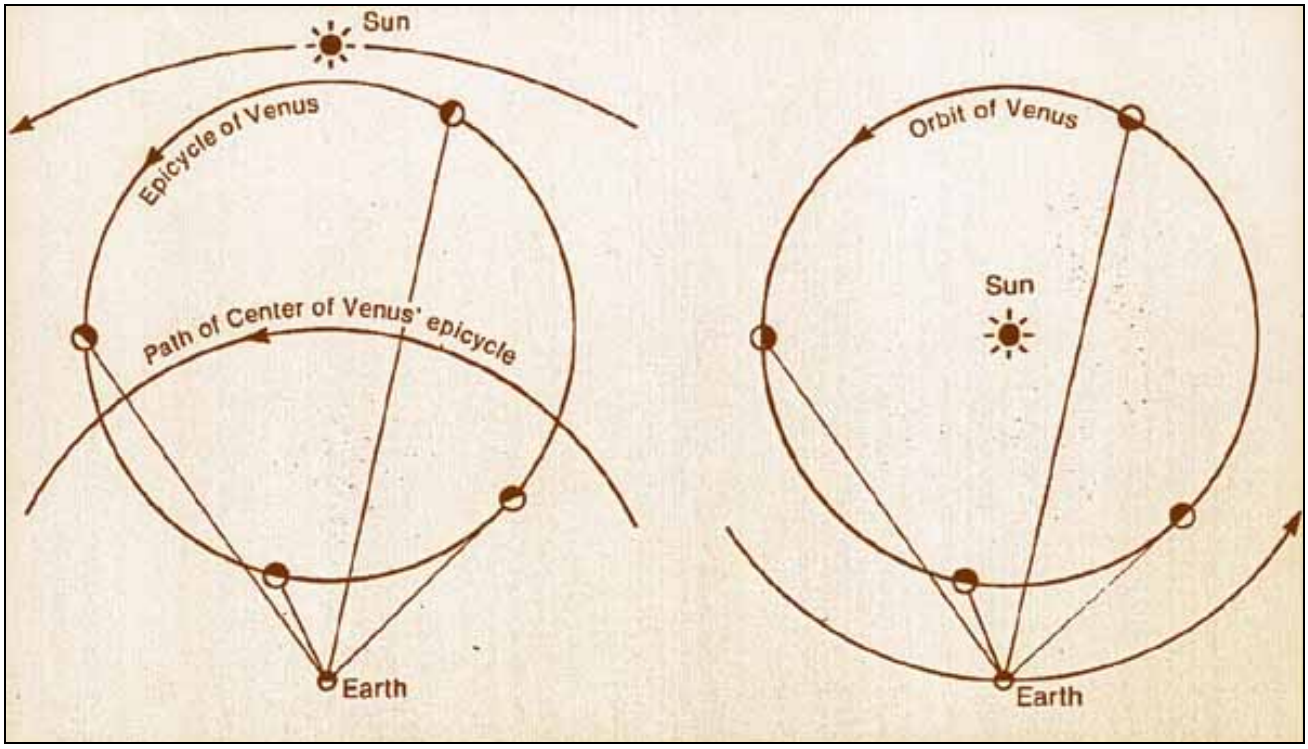



Fáze Venuše, jak je během dubna a května 2004 zaznamenal John Rummel.

[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.

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. Tvrdívá 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 $(26:13)^2 = 4:1$.

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.

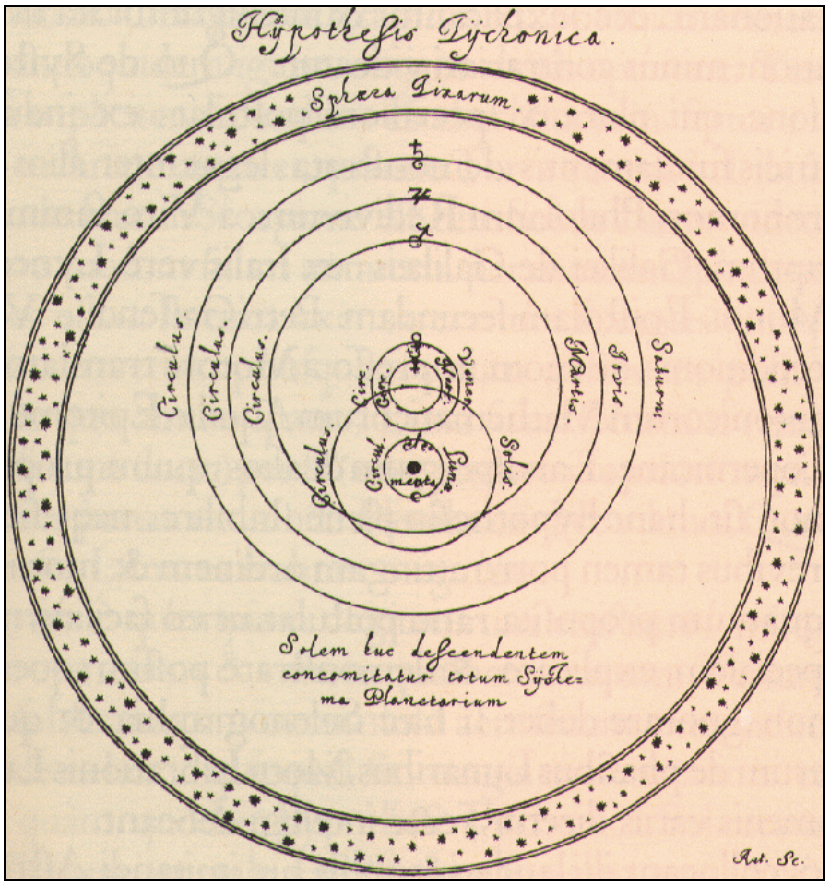
Rozšifrovaný rébus oznamoval (volně přeloženo), že *planeta Venuše jeví fáze podobně jako Měsíc*. Tvrzení, které ve své době pozornost bezesporu zasluhovalo.

Proč? Byla to doba, kdy Ptolemaiův 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-

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

Již při letmém pohledu na Ptolemaiův 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 nepřevýší 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 záludných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).

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 pozorovateli 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, Aristotelés, 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.

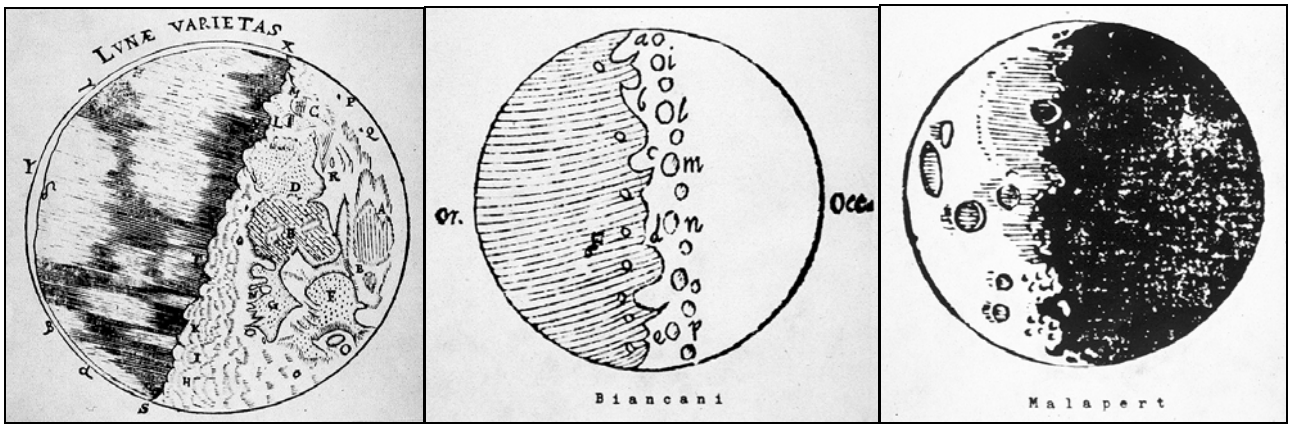
Langrenus, tak jako jeho současníci a předchůdci a později ještě celé generace badatelů, věřil, že tmavé skvrny, které vidíme na Měsíci i pouhým okem, jsou moře a oceány. Neměli bychom z tohoto omylu nikoho vinit, protože podoba tmavých skvrn i jejich tvary jsou natolik sugestivní, že se analogie s pozemskými 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 ričioli*.

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 nevzhledné 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).

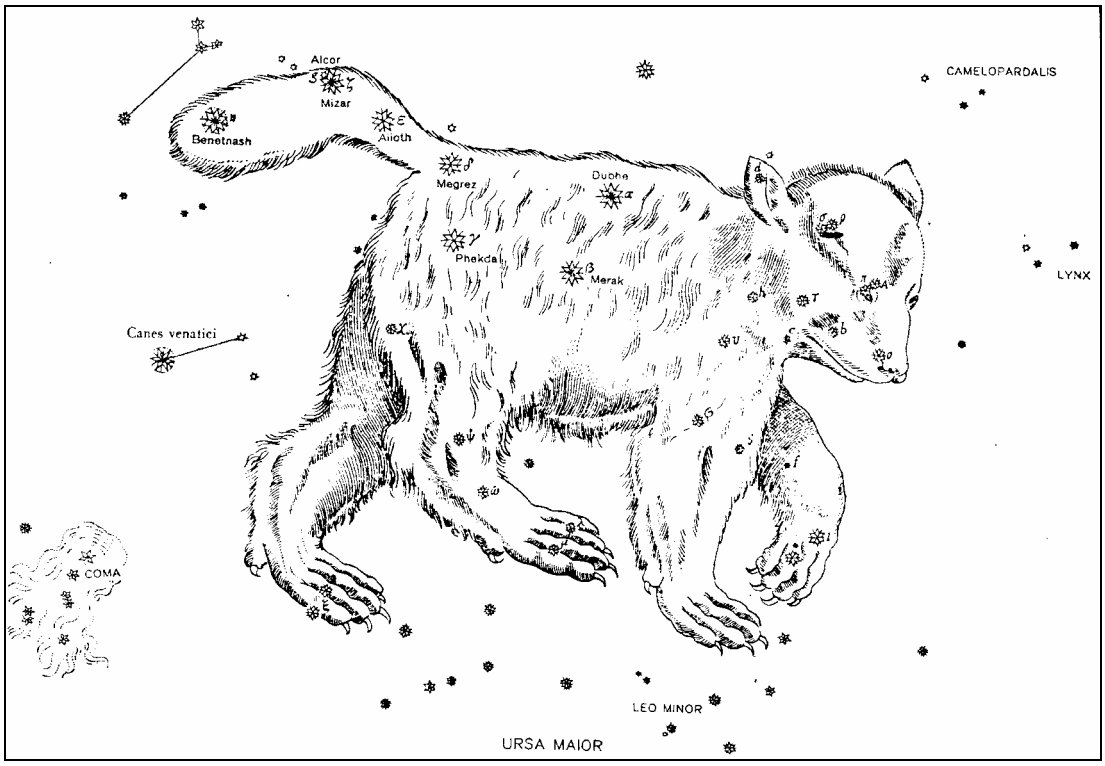
# 1.3. Noční nebe: hvězdy a souhvězdí

Začněme „inventurou“ toho, co můžeme z hvězdného světa pozorovat pouhýma 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 pouhýma 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.



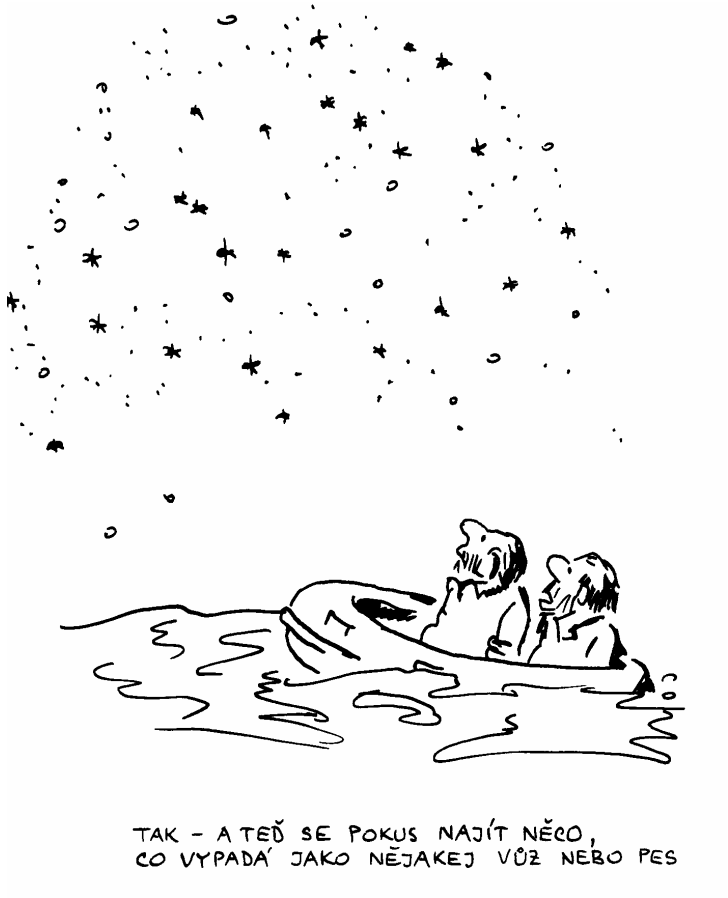

Souhvězdí Velké medvědice v atlasu *Uranometria* Johanna Bayera ze 17. století.

[1]) Čti: *ežen delpórt.*

| *Souhvězdí:* | *Rozloha ve čtverečních stupních:* |
|---|---|
| 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.




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

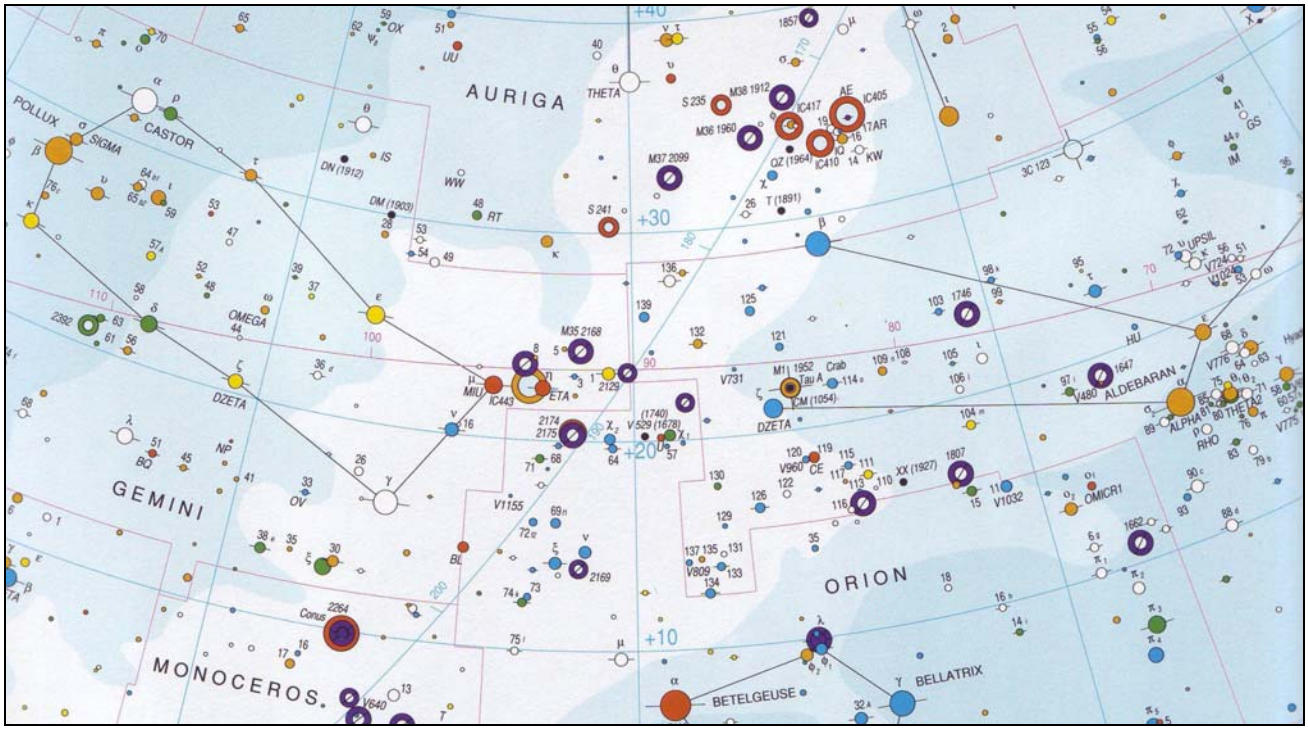
[2]) Viz otázka 2.1.26.

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...). Jasné hvězdy běžně označujeme malými písmeny řecké abecedy, ke kterým přidáváme jméno souhvězdí (nejčastěji je to třípísmenová 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 5513 [3]) ). 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)

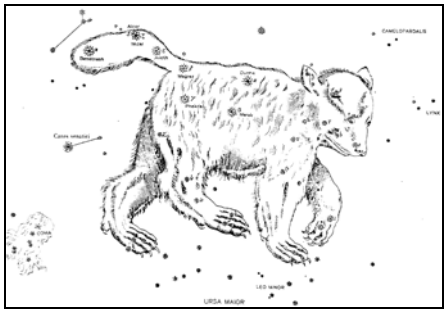
[3]) HD značí hvězdy z katalogu nazvaného *Henry Draper Catalogue* (čti: *henry drejpr katalog*).

**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 nabyl, 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)

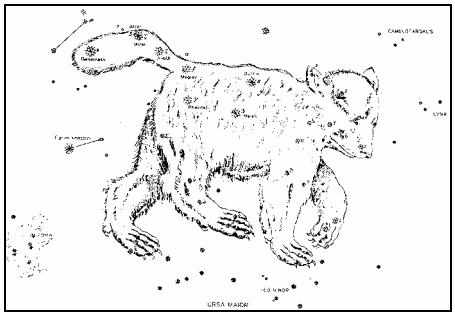
## otázky a příklady

**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 *ne*existuje(-í)? a) Jednorožec; b) Nosorožec; c) Moucha; d) Komár.

# 1. Astronomické zoo

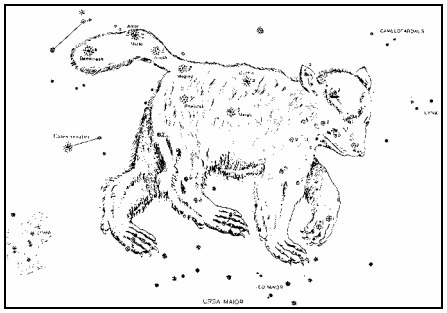



## citát

*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

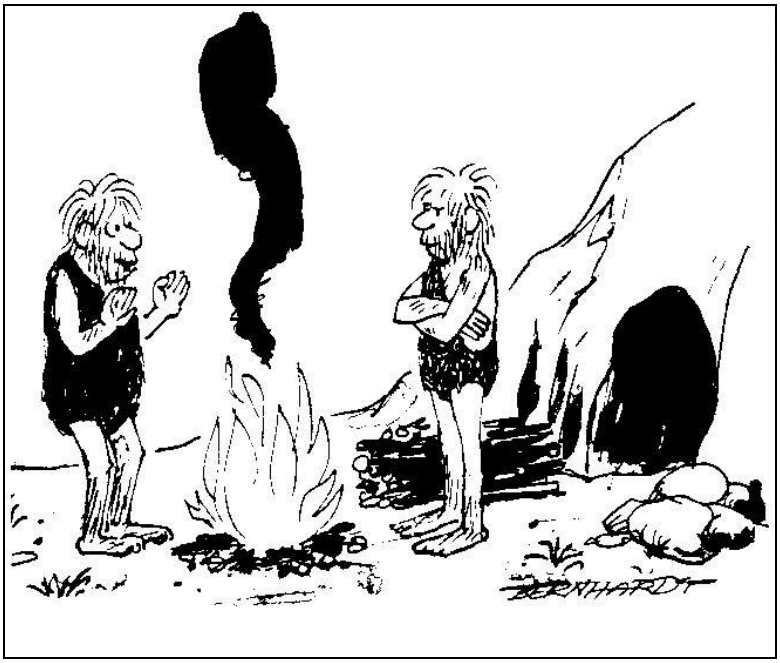
[1]) Čti: *džejmz džíns*.



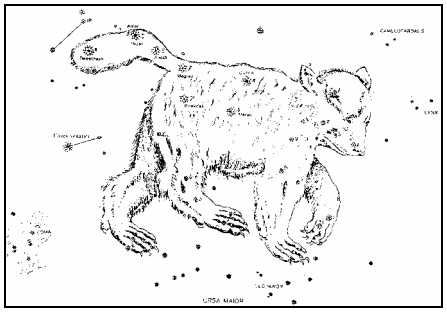

rady a „drobnosti“

# 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?



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.

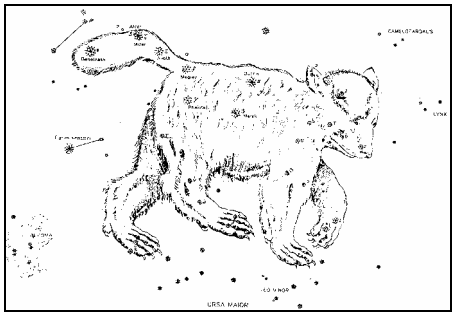
# 1. Astronomické zoo

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).



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.

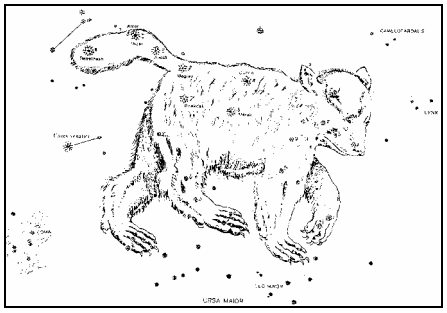
I když je obloha úplně čistá, doslova vymetená, silně září rozptýleným slunečním světlem. V běžný sluneční den přichází 80 procent světla od Slunce a 20 procent z oblohy. Čtvereček oblohy o rozměrech 1 úhlové minuty září stokrát více než dejme tomu Vega, Arktur nebo Kapella. A jedna úhlová minuta – to 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-

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? Pořiďte 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 záludných otázek – astronomie* (Aventinum, Praha 2003).



„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. Vypíšete-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 „Megalé 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 |

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

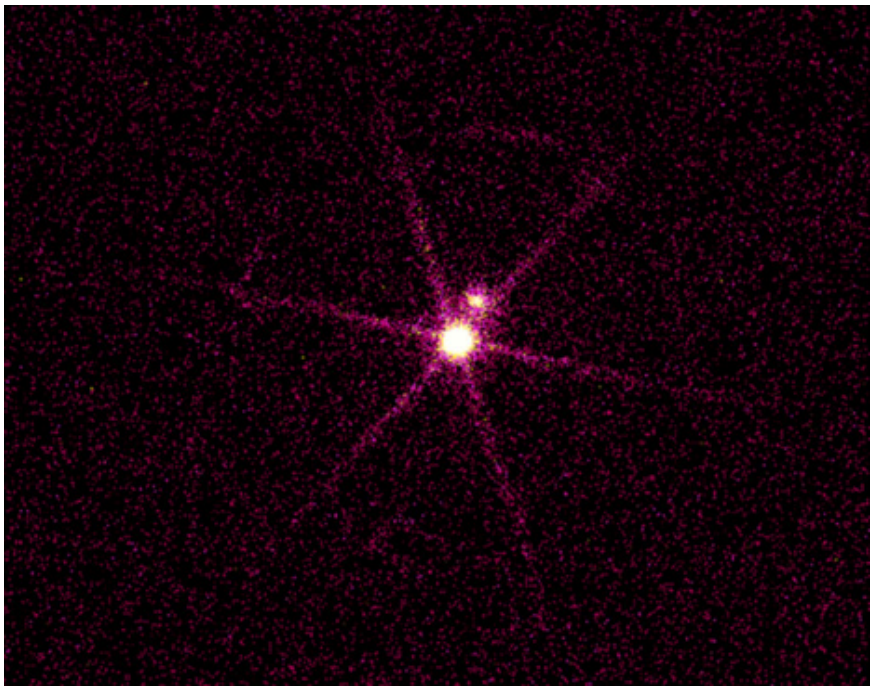
# 1.4. Hvězdy dvojité a nestálé stálice

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.



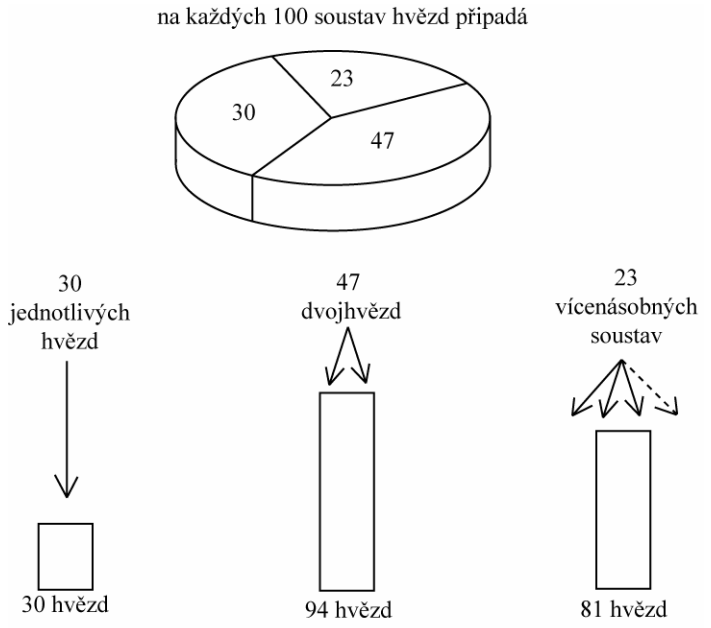
Dvojhvězda Sirius A a B na rentgenovém záběru, který pořídila 28. 10. 1999 družice Chandra. Foto: NASA/SAO/CXC.

[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.

### 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. Nechť 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. |

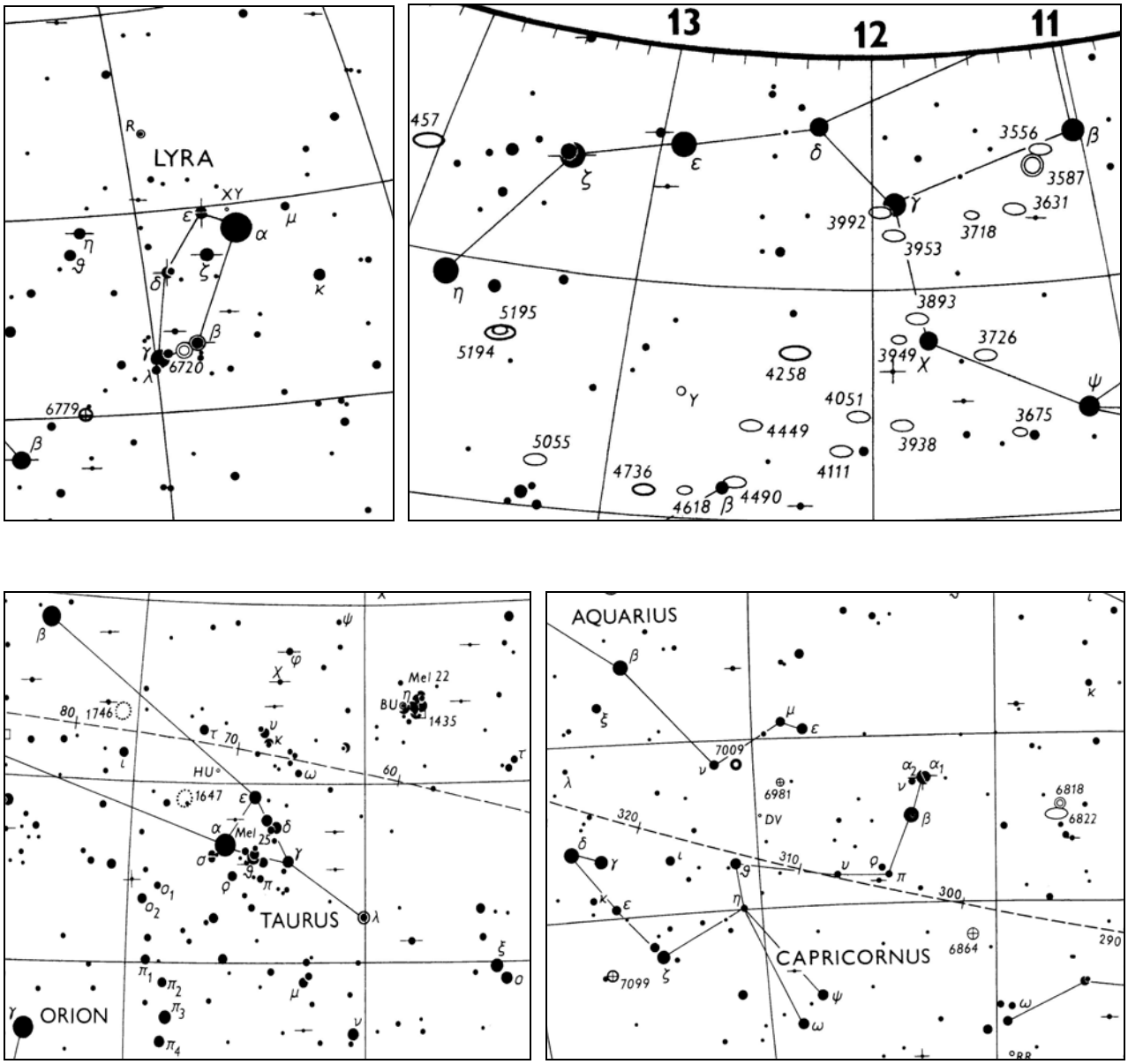



Četnost výskytu dvojhvězd.

### 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.

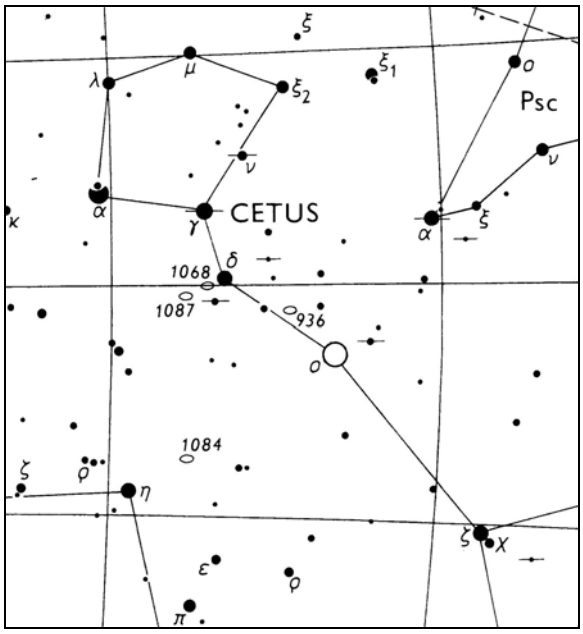


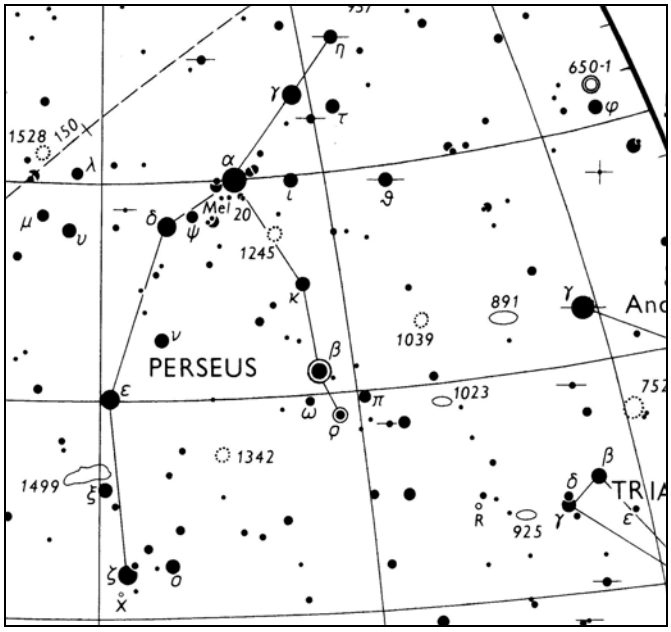

Okolí snadno pozorovatelných dvojhvězd ε Lyr, ζ UMa (Mizar a Alcor), ϑ Tau a α Cap (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

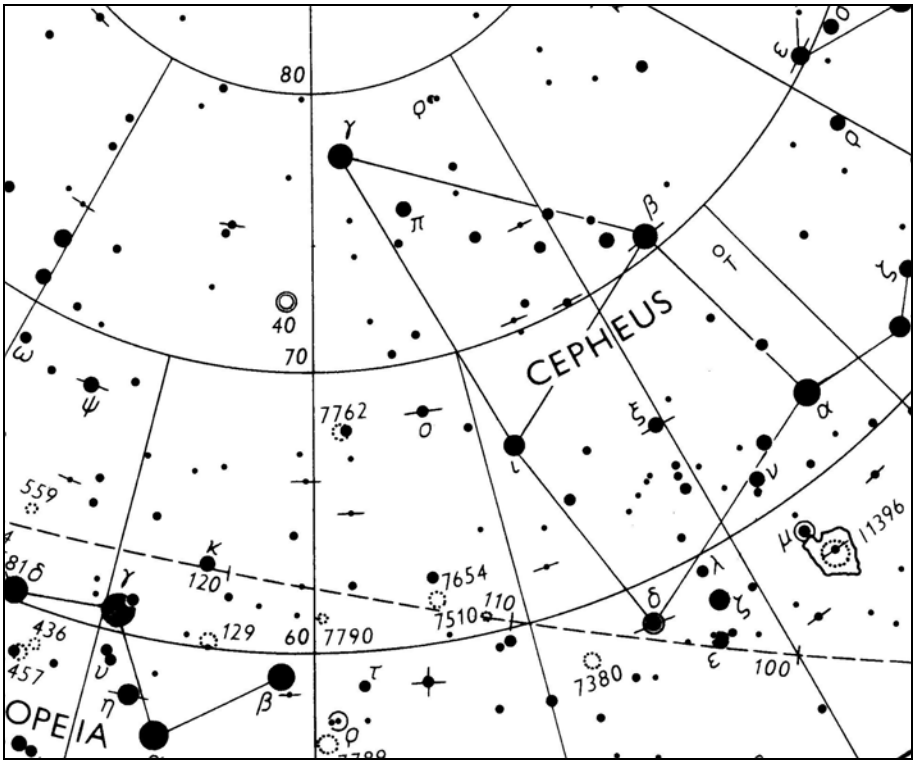
**Označování proměnných hvězd**

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).

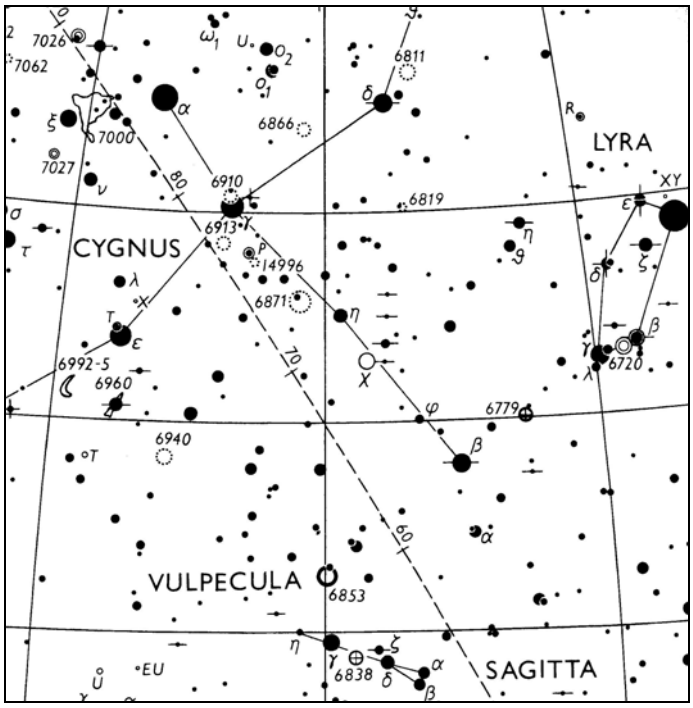
Když v daném souhvězdí nestačí všech 334 možností, jsou další proměnné hvězdy označeny V 335, V 336, ... plus název souhvězdí. Setkáme se tak s proměnnými hvězdami kupř.: Y Cam, AB Cas, V 1068 Cyg. Dokážete si představit složitější způsob označování? [2])



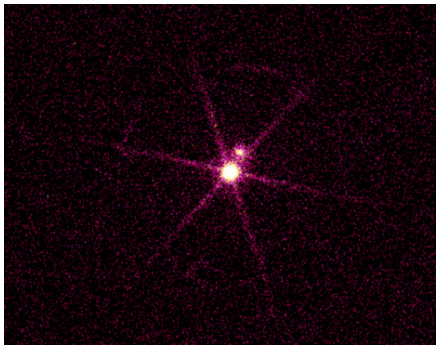




[2]) Úkol pro náruživé programátory: vytvořte algoritmus pro seřazení proměnných hvězd podle jejich „abecedy“.




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).



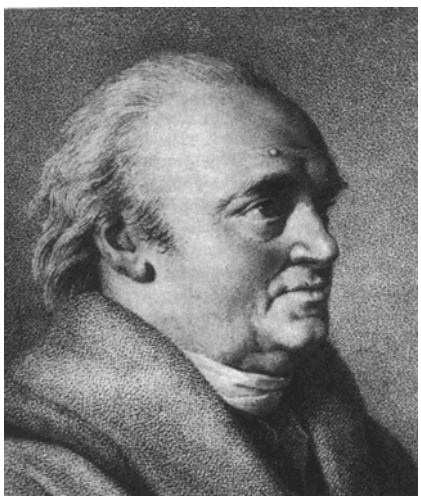
čítanka

# 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.

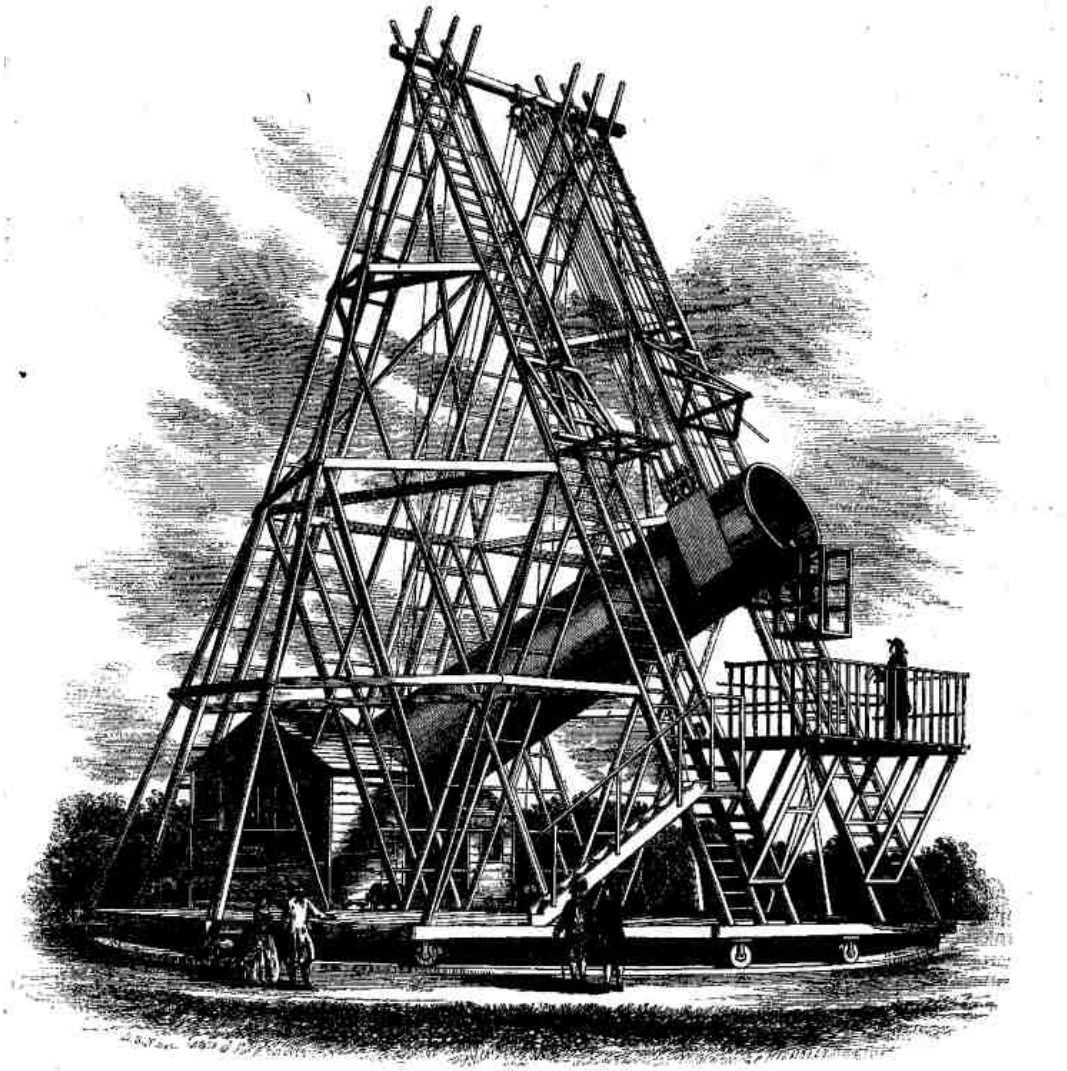


William Herschel.

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 obíhajících 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 samoúčelná, a to nelze připustit! Ne. Dvojhvězdy nesmějí existovat!

[1]) Čti: *džon mičel*.

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, vztažený 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.



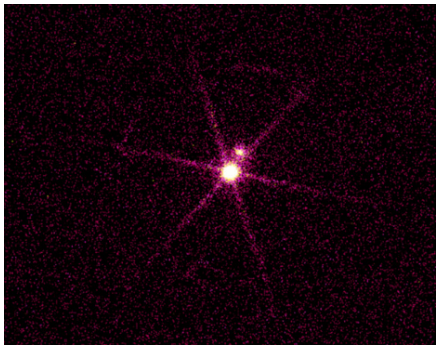
Zrcadlový dalekohled o průměru jednoho metru, s nímž pozoroval William Herschel. Přístroj se nezachoval, k dispozici je pouze jeho nákres.

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*.

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).

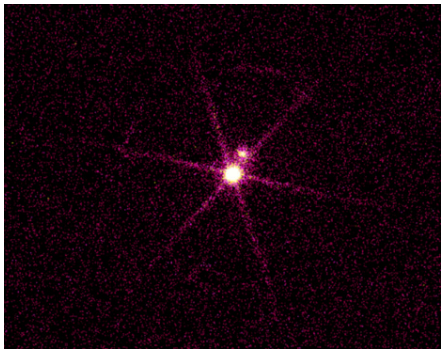


„luštěniny“

# 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 (mimochodem: 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 |



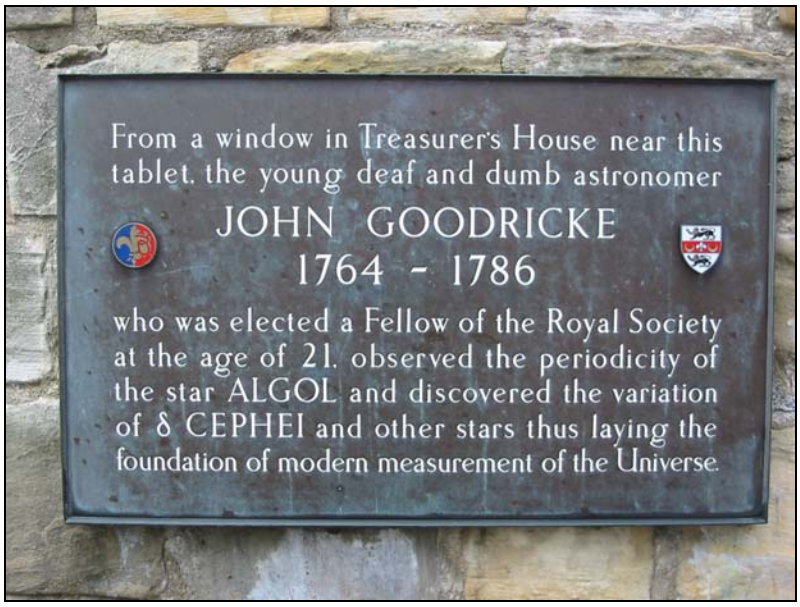
medailon

# 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*.

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. $12^d$ $8\frac{1}{2}^h$ | | | |
| | Dec. 28 $5\frac{1}{2}$ | $45^d$ $21^h$ | $2^d$ $20.8^h$ | 16 |
| 1783 | Jan. 14 $9\frac{1}{4}$ | 17 $3\frac{3}{4}$ | 2 20.6 | 6 |
| | 31 $14\frac{1}{2}$ | 17 5 | 2 20.8 | 6 |
| | Feb. 6 8 | 5 $17\frac{3}{4}$ | 2 21 | 2 |
| | 23 12 + | 17 4 | 2 20.6 | 6 |
| | 26 $9\frac{1}{2}$ | 2 $21\frac{1}{2}$ | 2 21.5 | 1 |
| | Mar. 21 $8\frac{1}{2}$ | 22 23 | 2 20.9 | 8 |
| | Apr. 10 10 + | 20 $1\frac{1}{2}$ | 2 20.8 | 7 |
| | 13 8 | 2 22 | 2 22 | 1 |
| | May 3 $9\frac{1}{4}$ | 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 abovementioned, recurs regularly and periodically about every 2 days and nearly $20\frac{3}{4}$ 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 oprášil 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.

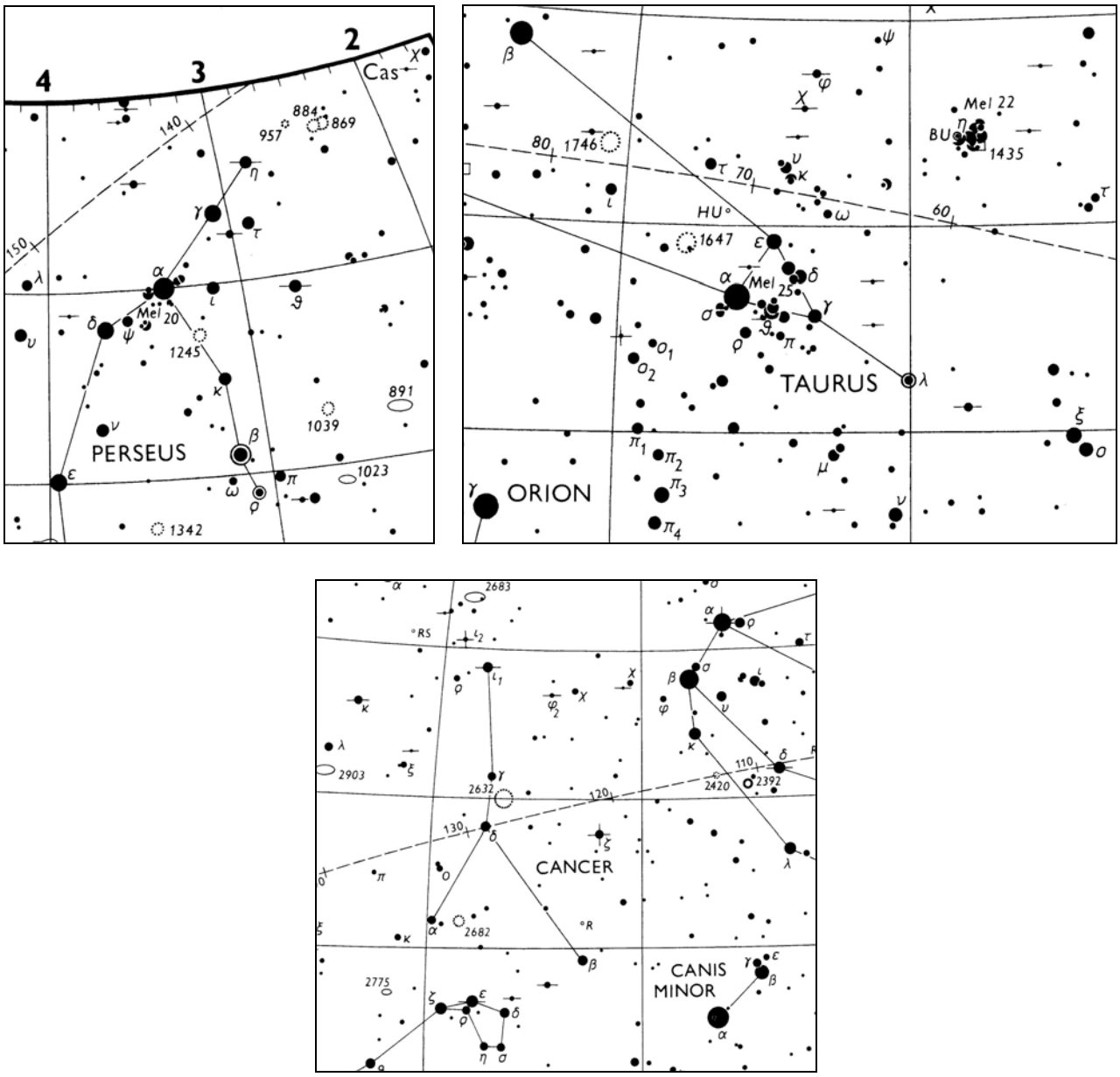
### Když je hvězd pohromadě více

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.

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 desetitisíců 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.

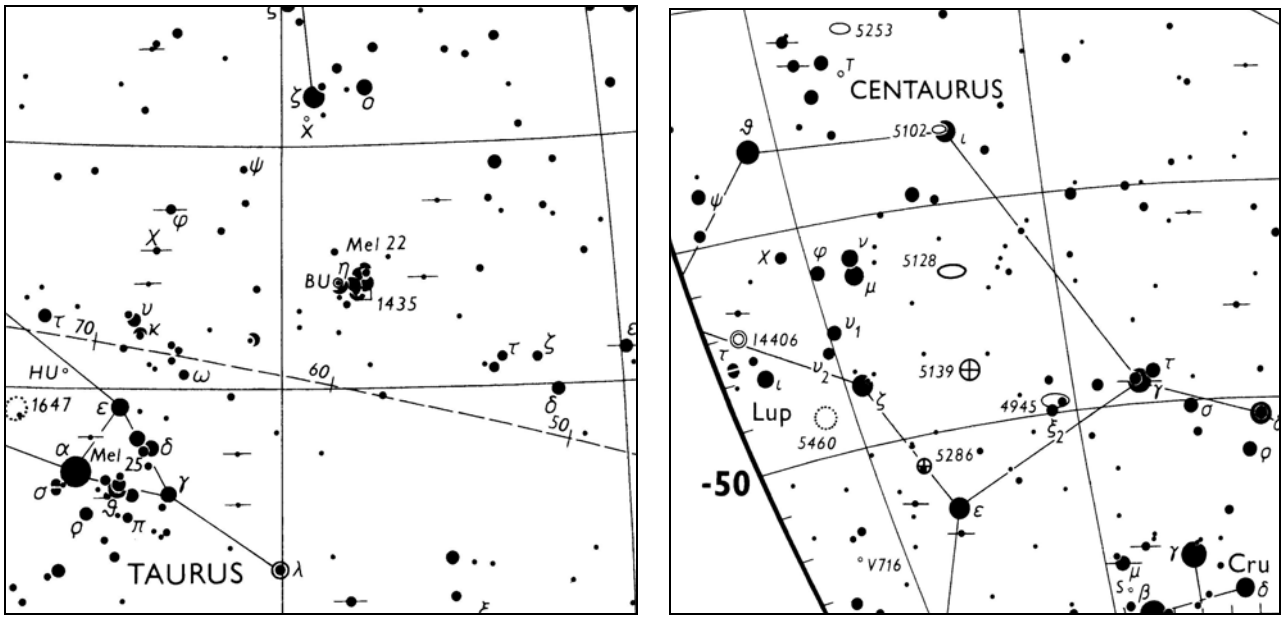



Otevřené hvězdokupy χ a h Per, Hyády (Mel 25) a Praesepe (M 44 = NGC 2632) (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

### Pohybové hvězdokupy

Asi u desítky otevřených hvězdokup, které jsou k nám nejblíže, 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.

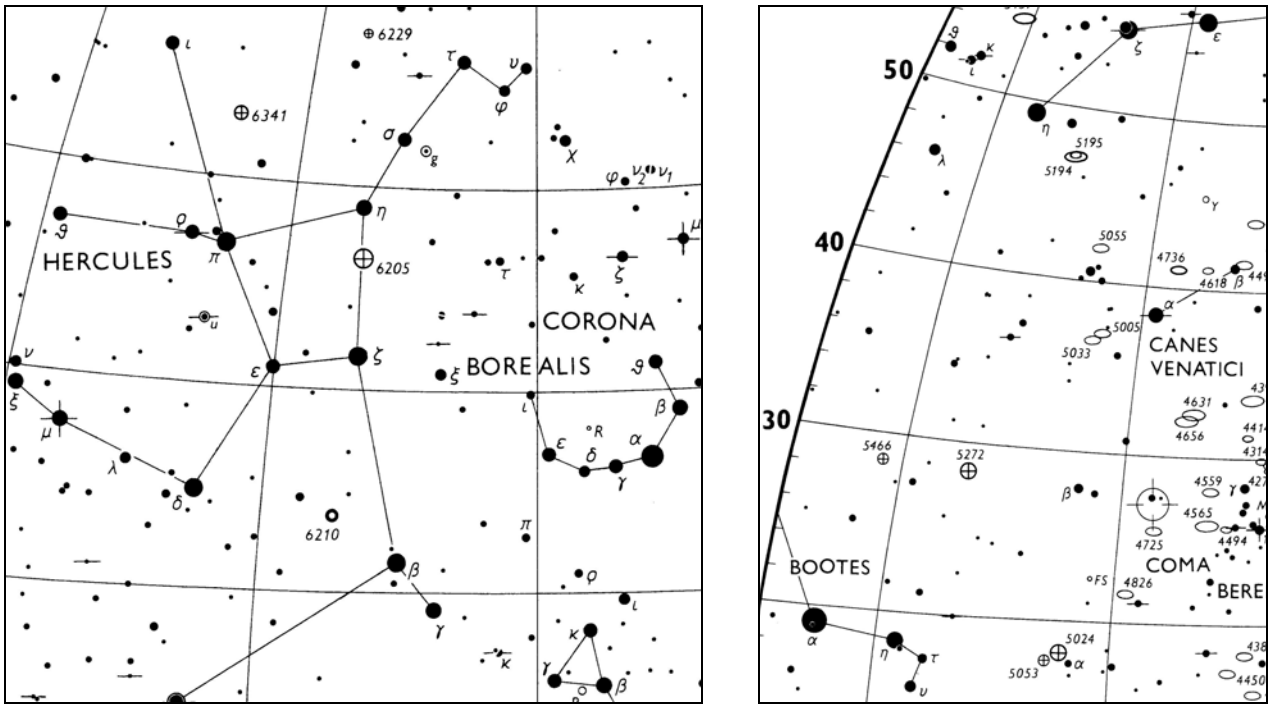
Mnohé pohybové hvězdokupy ani nevidíme jako kompaktní útvar, prozradí se jen společných pohybem hvězd v prostoru (takovou hvězdokupou je například pět jasných hvězd z Velkého vozu, Sirius a několik dalších slabších hvězd, rozesetých po hvězdné obloze). Studiem pohybových hvězdokup můžeme poměrně dosti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



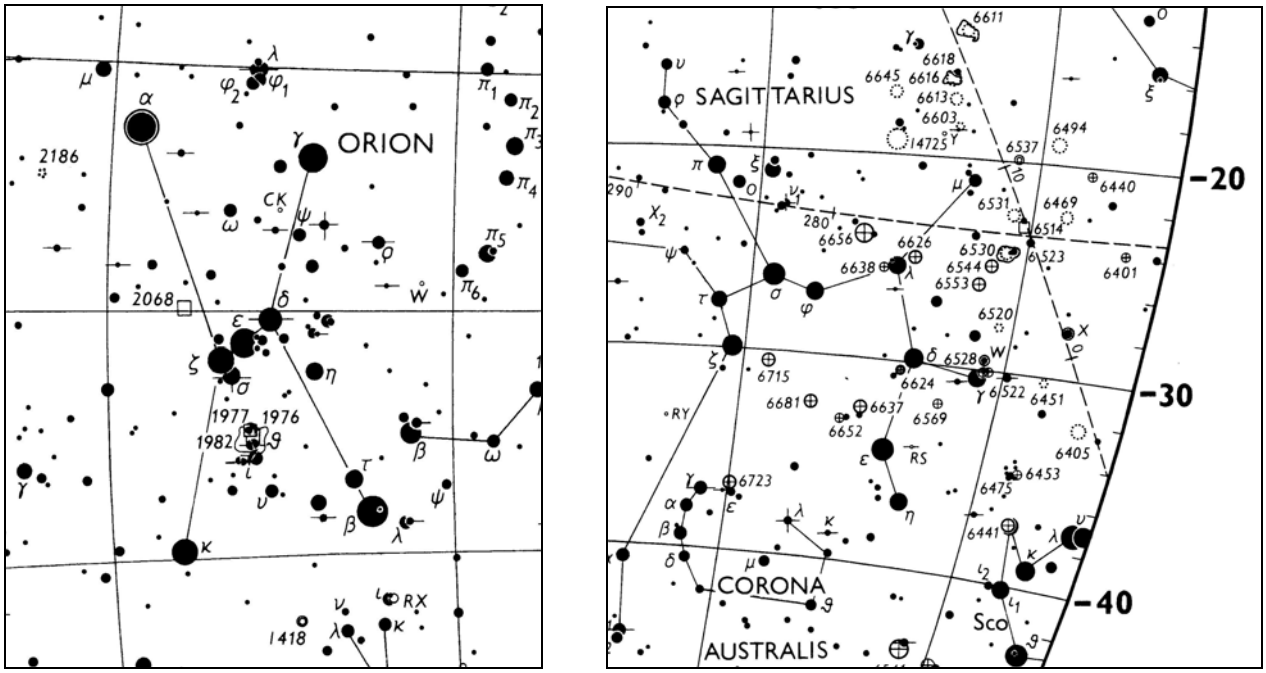

Otevřená hvězdokupa Plejády (Mel 22 = M 45) a kulová hvězdokupa ω Cen (NGC 5139) (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

### 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 vybuzeny blízkými horkými hvězdami.




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, přezdívaná 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 říkaje 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.

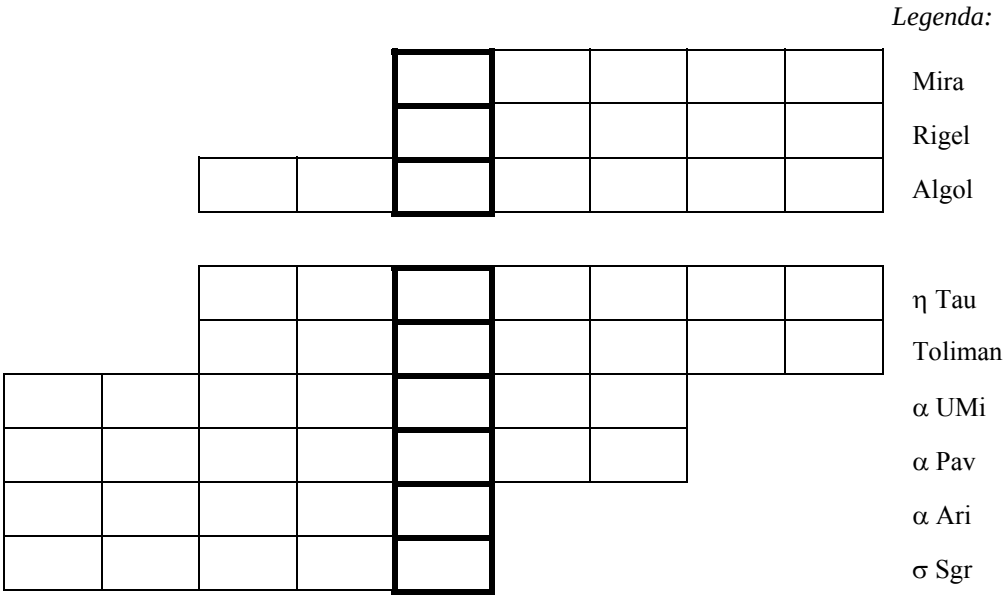
**Otázka 1.5.3.** Vysvětlete, proč velká tělesa, jako například cizí planety nebo vyhaslé hvězdy (pokud existují), nám prakticky nebrání ve výhledu do vesmíru, zatímco látka o stejné hmotnosti, rozptýlená jako mikroskopický prach, nám ve výhledu brání.

„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 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).



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 vznikal 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 nalézá 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 nalezl 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 dřívějška.

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 nalezl 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: *badóvijé.*
[3]) Čti: *delileho*.
[4]) Čti: *de klyny.*
[5]) Čti: *pjér méšen.*

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 Monceau [7]) považoval jednu otevřenou bránu za vchod do jeskyně, bez otálení tam vstoupil – a zřítil 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.

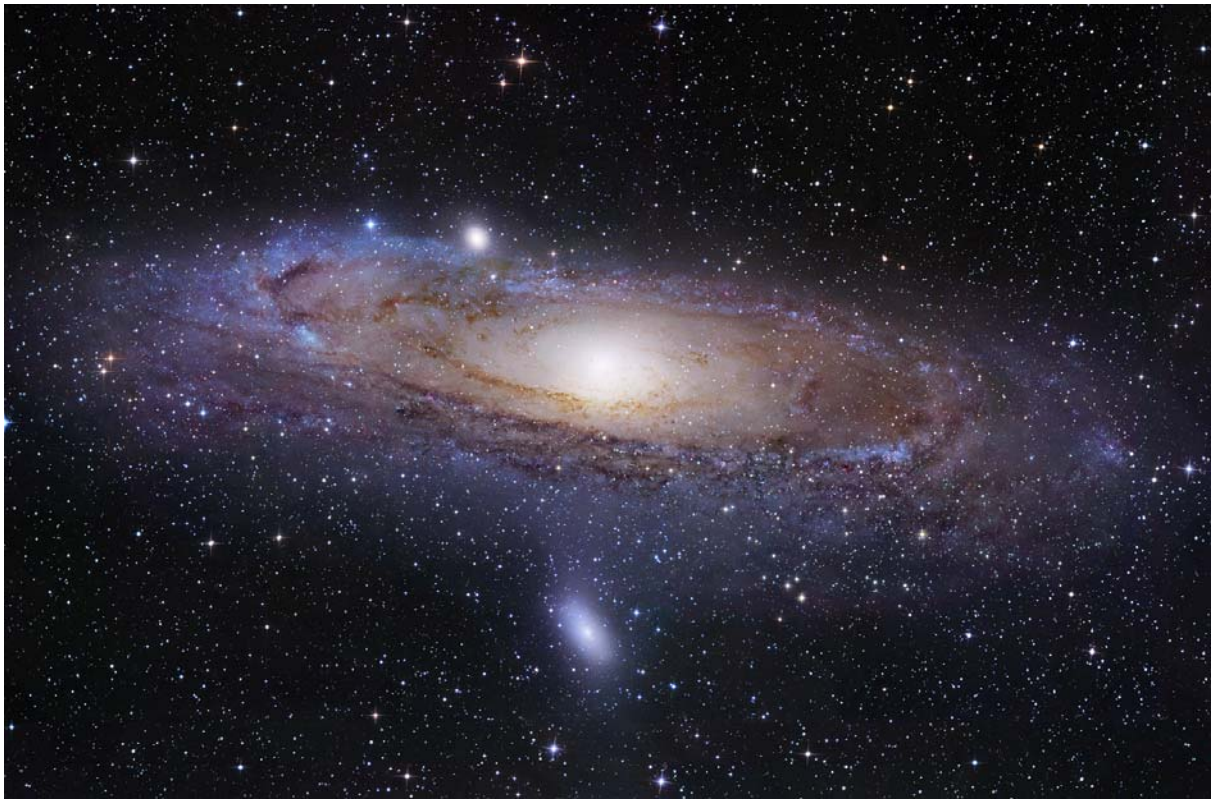
[6]) Čti: *konesáns de temp.*
[7]) Čti: *monsó.*

# 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.

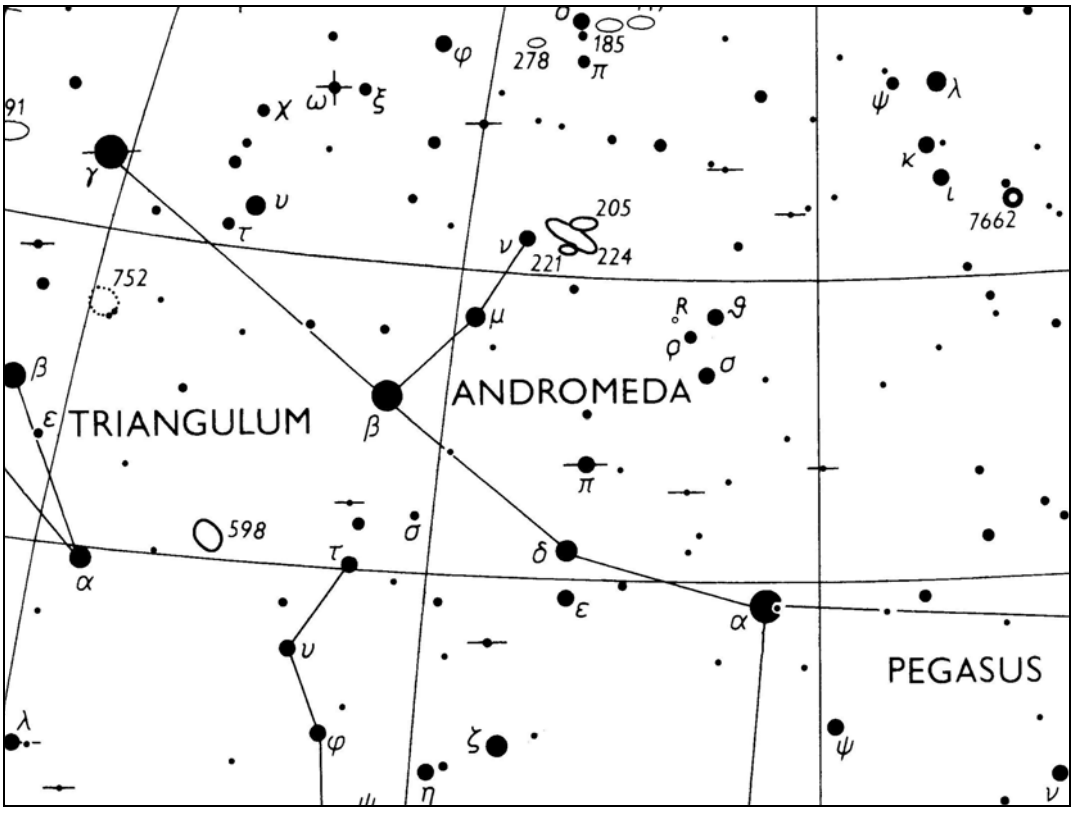


Galaxie M 31 v souhvězdí Andromedy (pod ní je ve tvaru malé eliptické skvrnky její průvodce M 32).

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.

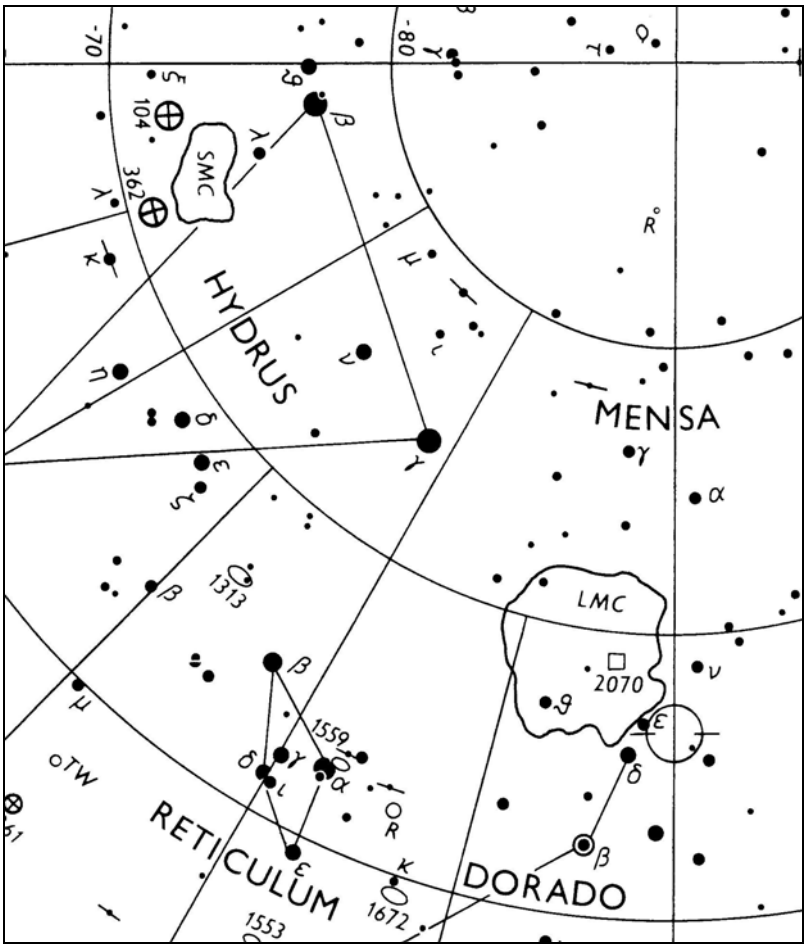



Galaxie M 31 (NGC 224) v Andromedě a M 33 (NGC 598) v Trojúhelníku (mapy převzaty z Malého atlasu hvězdné oblohy, autoři Z. Pokorný a V. Znojil).

### 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

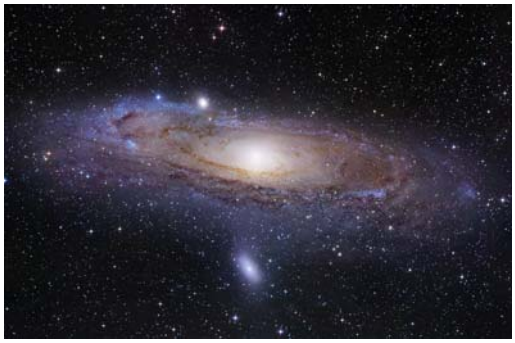
pořádek“. Jak již víme z předchozí kapitoly, velmi známým seznamem takových objektů je katalog, sestavený ve druhé polovině 18. století francouzským astronomem Charlesem Messierem. V něm jsou označeny objekty písmenem M a číslem, např. M 31. Velmi podrobný je *New General Catalogue* [1]) (ve zkratce 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)

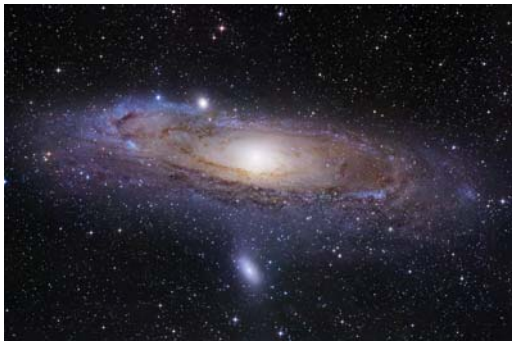
## otázky a příklady

**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) Jednorožec; 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

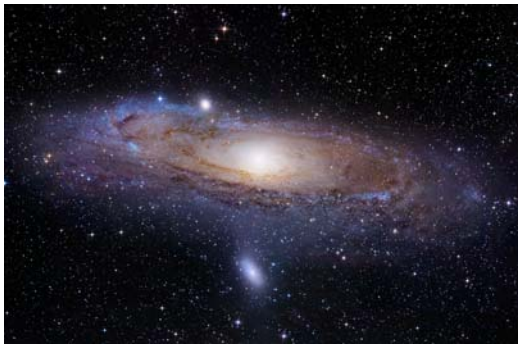


## citát

*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).

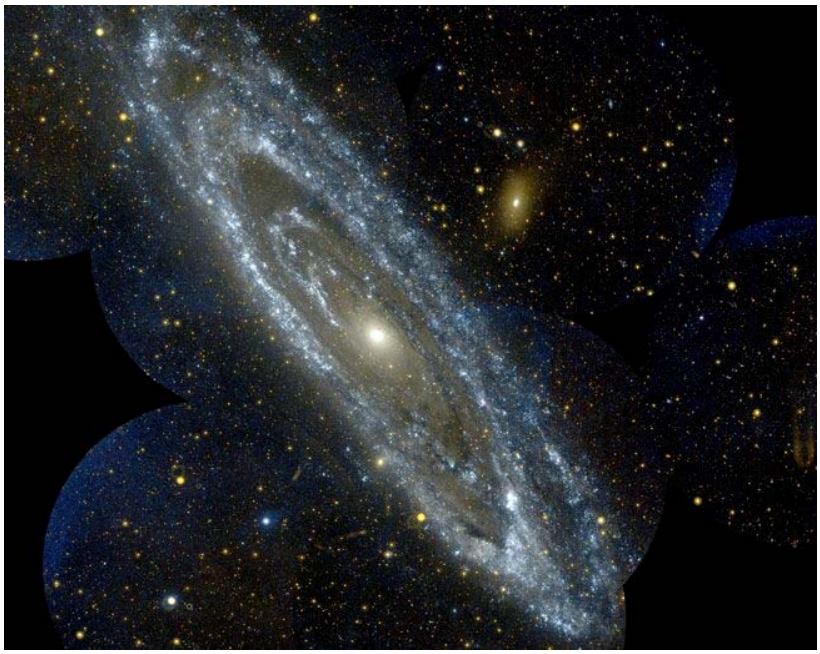
Docela zvláštní proměnná hvězda V838 Monocerotis s prachovou obálkou. Foto: NASA a Hubble Heritage Team (AURA/STScI).



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 – sondo 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

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.

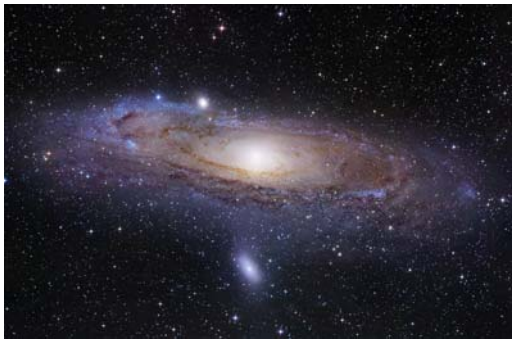
Máme vůbec šanci uvidět nějaký objekt mimo Galaxii? Ten by byl určitě dál než všechny hvězdy z naší soustavy, to by byl onen vzdálený objekt, který hledáme!

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 nejvzdálenějším 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 záludných 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.

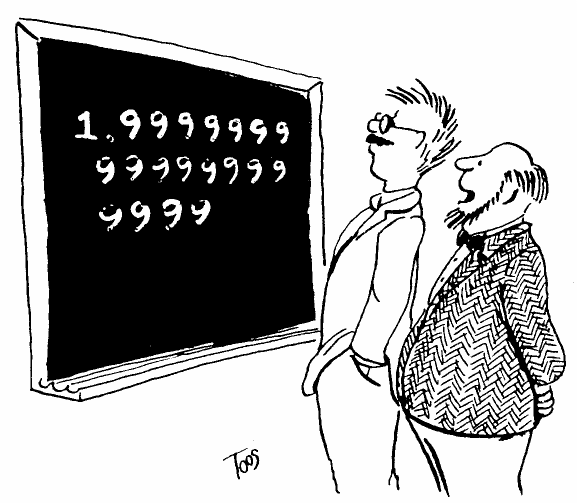


„luštěniny“

## Ach, ty zkratky!

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

| | | |
|---|---|---|
| | | O |
| | | |
| | | |



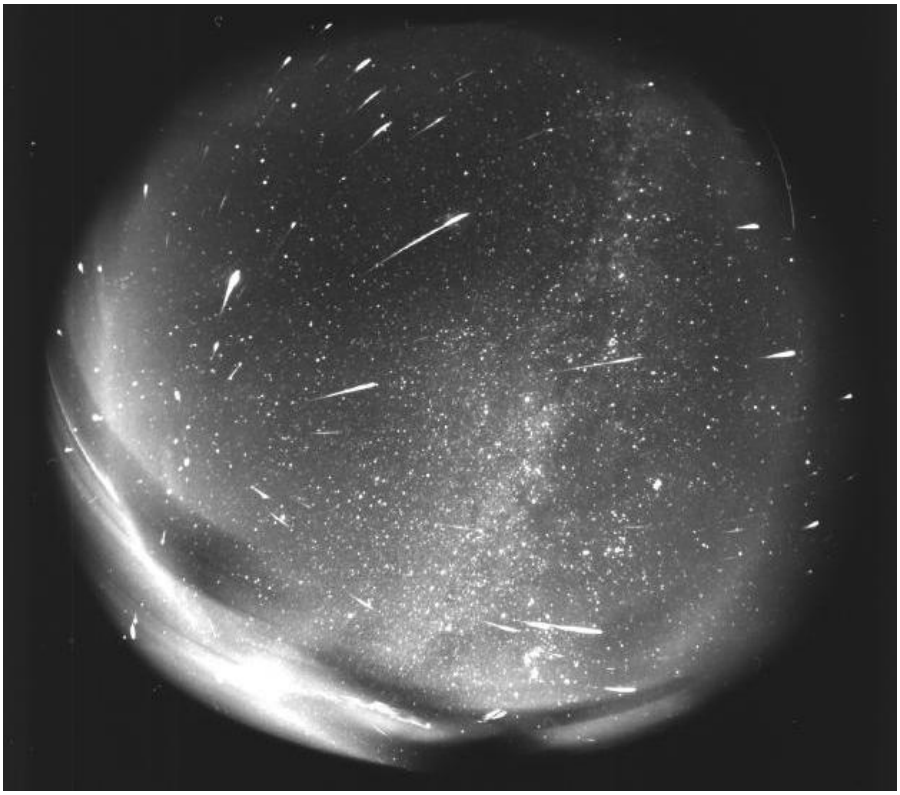

Tak to zaokrouhli, a jdeme na oběd!

# 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, vlétne-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.

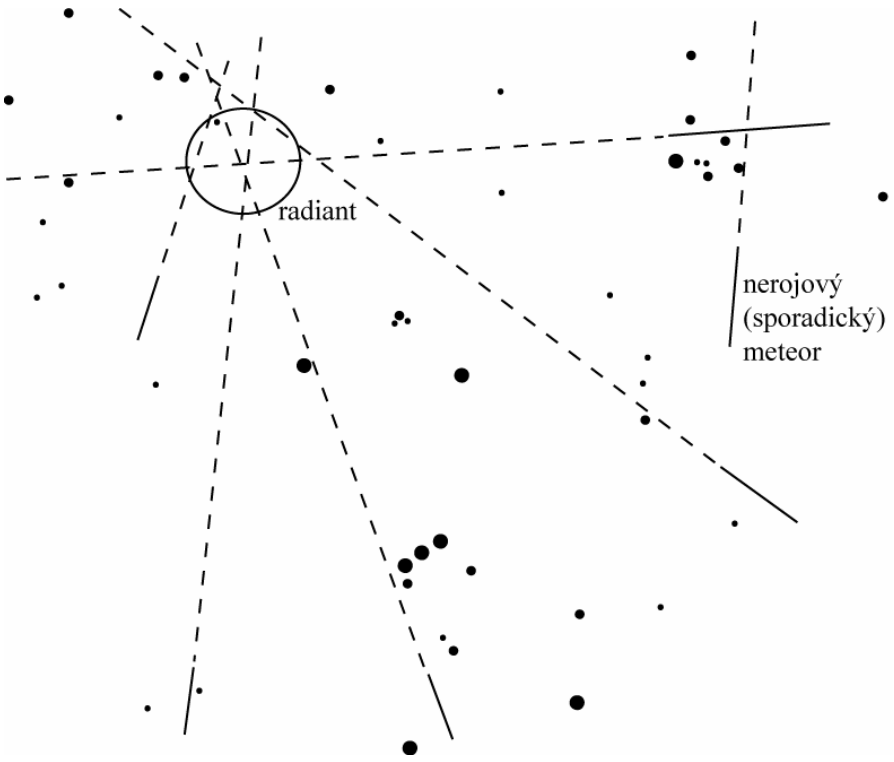
Jak bude meteor jasný, záleží na hmotnosti částice a na její rychlosti vůči Zemi. Meteory viditelné pouhýma očima jsou způsobeny částicemi o hmotnosti řádově miligramy a větší. Meteor jasnější než Venuše v době své největší jasnosti označujeme jako *bolid* [1]). Velká meteorická tělesa mohou být odporem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

**Když se rojí meteory**

Drobné částečky 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 vyletují 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 vyletují rojové meteory z jednoho bodu, podobně jako se v dáli „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 metací střelu; je to nepochybně šťastné pojmenování.

### 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 příletu ke Slunci obvykle ve vzdálenostech 2 až 5 astronomických jednotek [3]). 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, zvlášť 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).

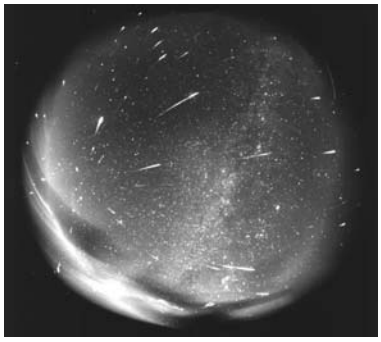
lovec komet má tudíž největší šanci na úspěch. Pozorovatel musí znát zpaměti několik set podobně vyhlížejících mlhovin, hvězdokup a galaxií, aby se při prohlížení oblohy kousek po kousku zbytečně nezdržoval nahlížením do hvězdného atlasu. A pak také musí mít skvělé pozorovací podmínky – z města to určitě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

| *Těleso:* | *Hmotnost (celá sluneční soustava = 100 %):* |
|---|---|
| Slunce | 99,866 |
| planety | 0,134 |
| komety | 0,000 3 |
| družice planet | 0,000 04 |
| planetky | 0,000 000 1 |
| meziplanetární prach | 0,000 000 000 001 |

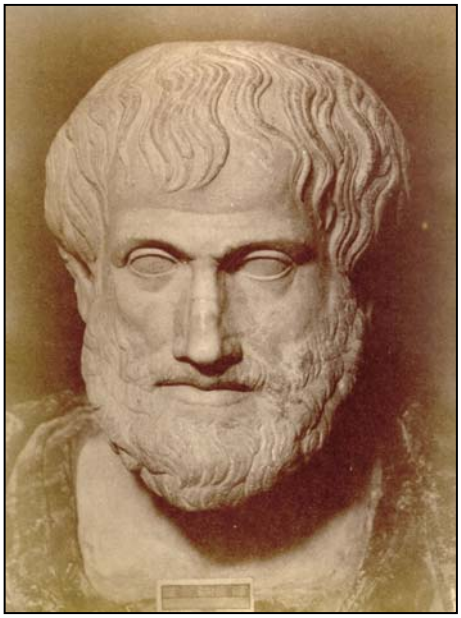
Poznámka: *planetky* jsou tělesa většinou kilometrových rozměrů, obíhající (až na malé výjimky) kolem Slunce v prostoru mezi Marsem a Jupiterem a nebo až za Neptunem. U více než 100 000 planetek známe dobře jejich dráhy (stav z roku 2005, toto číslo se prudce zvyšuje).



čítanka

# Zdeněk Pokorný: Co mají společného meteory s meteorologií?

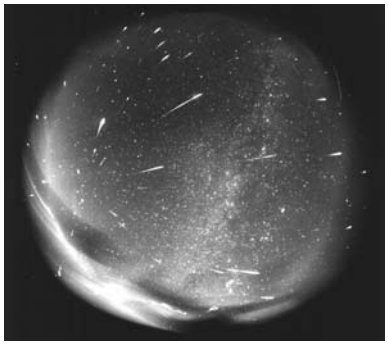
Podoba obou slov je nabíledni. Meteorologové pojmem meteory označují nejrůznější povětrnostní jevy jako vítr, déšť, bouřky či sněžení. Astronomové zas kraťoučký světelný jev, který nastane po vniknutí malého kosmického tělesa do atmosféry. Pro hlubší rozbor a vysvětlení sáhněme tedy po řecko-českém slovníku: *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 záludných 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 ohníčku, oči byly téměř úplně oslepeny plamenem, nebe bylo téměř dokonale zamračené – a přece jsme se podivovali záblesků, 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*.

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.“

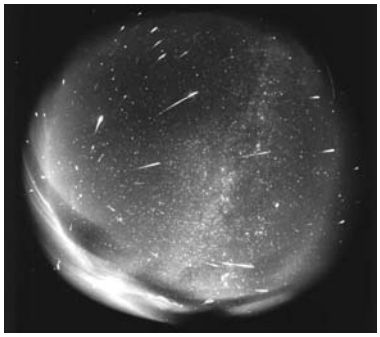
Na prosté lidi působil zjev neobyčejně mohutně; po ulicích měst i všude na venkově stáli lidé s hlavou obrácenou ke hvězdám a udiveně sledovali neočekávané a neznámé divadlo. V Portugalsku utíkali věřící do kostelů, domnívaje se, že nastává konec světa a nebe se řítí na zemi.

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 nepřipravenu, 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.*

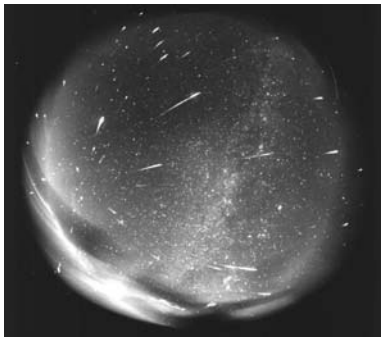
William Shakespeare, dramatik (1564 – 1616)

## 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 neuvedli. 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?



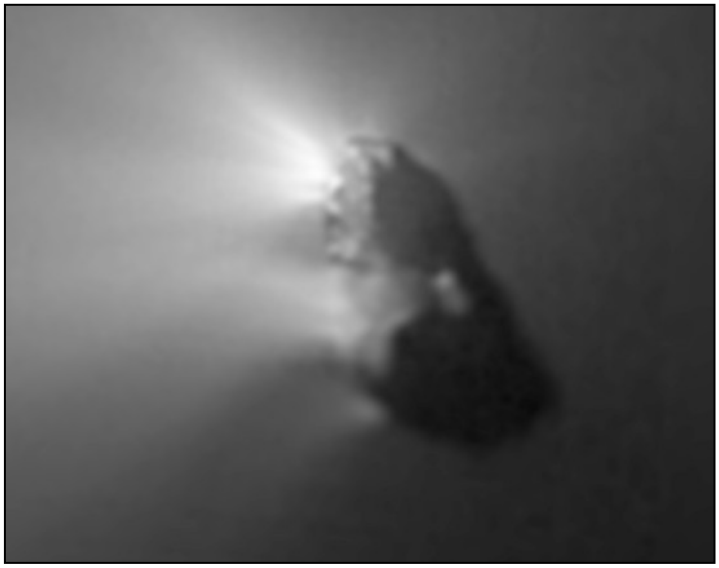
čítanka

# 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 lžíci toneru do xeroxu, několik mililitrů čpavku, špetku organického materiálu, dva hrníčky s obsahem 2 decilitrů (mohou být i plastikové), 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

manipulaci buďte opatrní a vždy používejte rukavice! Suchý led má teplotu kolem –80 °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.

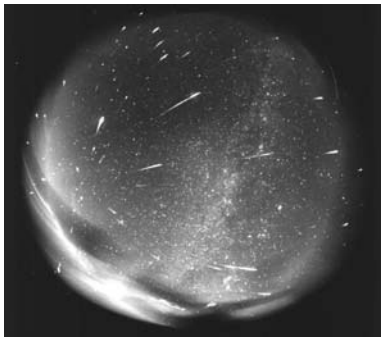
Výsledný koktejl nalijte do nepropustného silnostěnného igelitového pytlíku a poté opatrně přisypte dobře rozdrcený suchý led. Zvnějšku, ovšem pořád s rukavicemi, směs neustále promíchávejte a hněťte, dokud vám po několika sekundách neztuhne a nevytvoří malou kompaktní hrudku. Chraňte si přitom oči, 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 obláčků 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.



„luštěniny“

# 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 (poznamenáváme, že tajenkové slovo je uvedeno latinsky). A ještě jedna otázka: kolik názvů souhvězdí je v celé tabulce uvedeno?

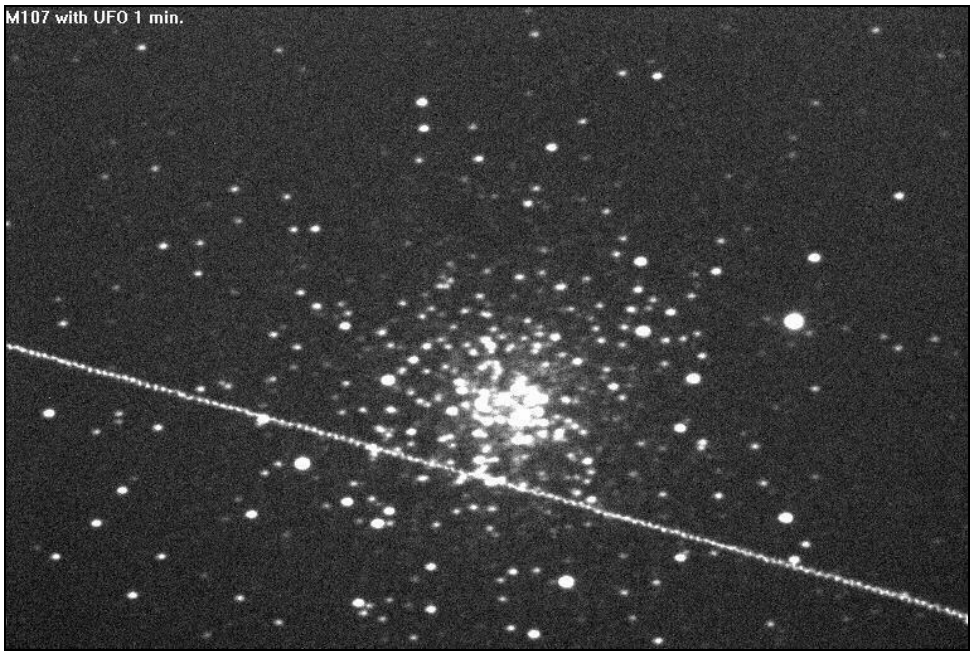
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | E | R | S | E | U | S | G | | M | I | N | I | L | U | P | U | S |
| S | C | U | L | P | T | O | R | | A | N | C | E | R | V | E | L | A |
| E | R | I | D | A | N | U | S | | I | B | R | A | 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

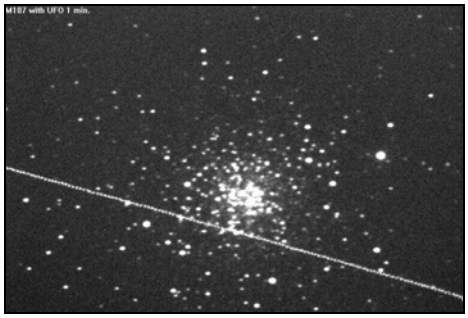
Ještě před půl stoletím přiváděly přelety jasných družic po nebi davy lidí k nadšení, nu a dnes přelet družice sotva koho vzruší víc než pohled na vysoko letící letadlo. Přesto je dobré, když umíte rozpoznat družici od meteoru.

**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.




Hvězdokupa 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 nejznámější 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-

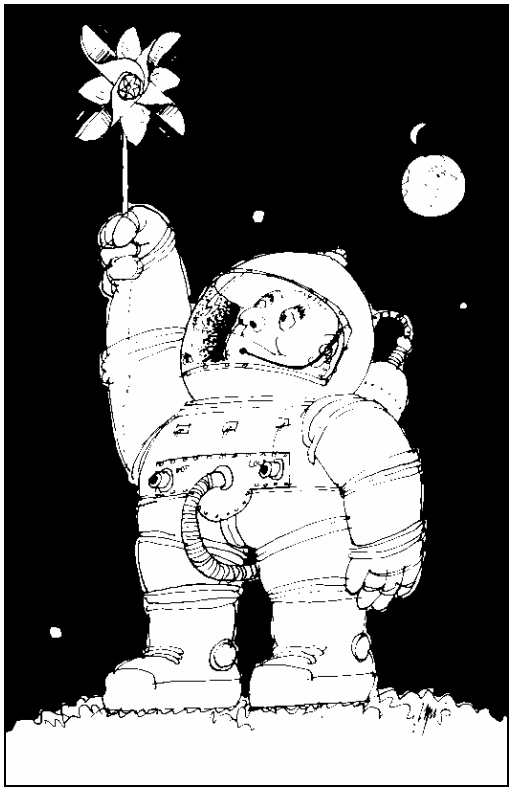
statečně jasná, musí se zároveň nacházet na nízké oběžné dráze. Jednoduše řečeno: čím bude blíže, tím bude jasnější. Samozřejmě záleží i na velikosti. Nejnápadnějšími umělými tělesy, která můžete spatřit, bývají raketoplán, Hubblův kosmický dalekohled či Mezinárodní kosmická stanice. Poloha Slunce se 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 nespatříte [1]). 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 nejhlouběji 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.

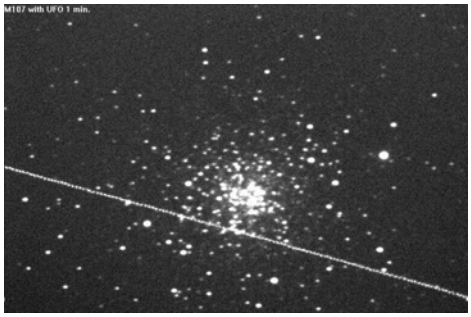
Příčinou půlnoční „pauzy“ družic je tudíž proměnlivá výška zemského stínu. Umělé satelity během ní ani neodpočívají, ani se nikde nezastavují. Létají neúnavně pořád dál, nic však na ně nesvítí a tak nám zůstávají ukryty ve tmě.

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. Složité je to ale to ale jen na první pohled. Když pochopíte princip, vše bude rázem jednoduché. Ostatně, je to jako s násobilkou: 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.

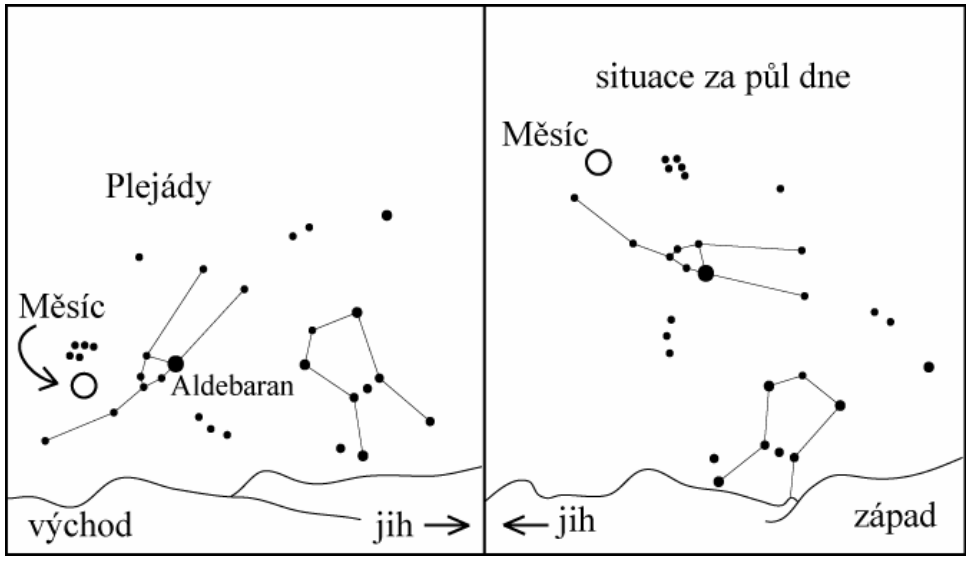
### Obloha a hvězdná obloha

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.

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.

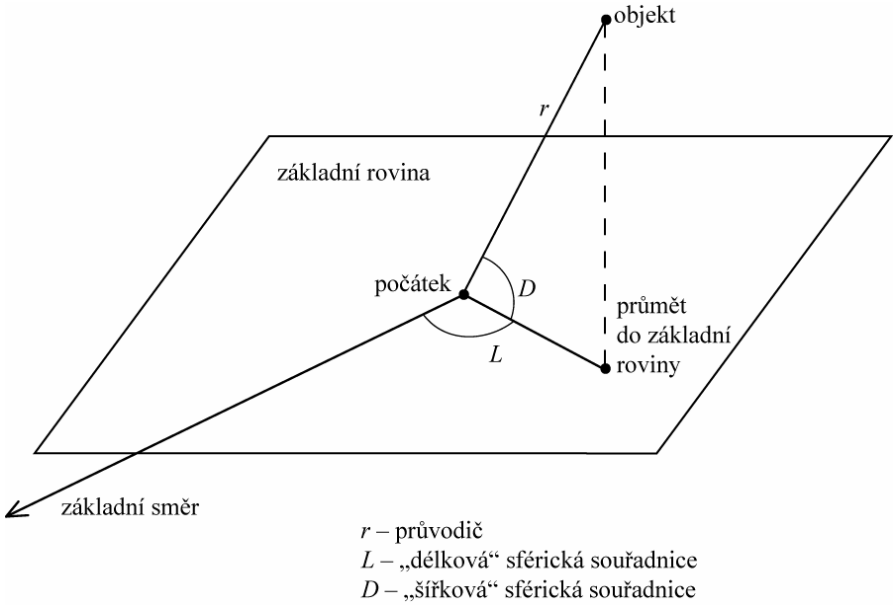
[2]) Dodejme, že takto zavedený pojem *obzor* má svou nespornou logiku: obzor *není totéž* co vodorovná rovina, procházející místem pozorování, a rozlišovat oba pojmy má svůj význam: nějaký kosmický objekt může být totiž nad vodorovnou rovinou, ale přesto pod obzorem, chceme-li jej pozorovat např. z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

**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).

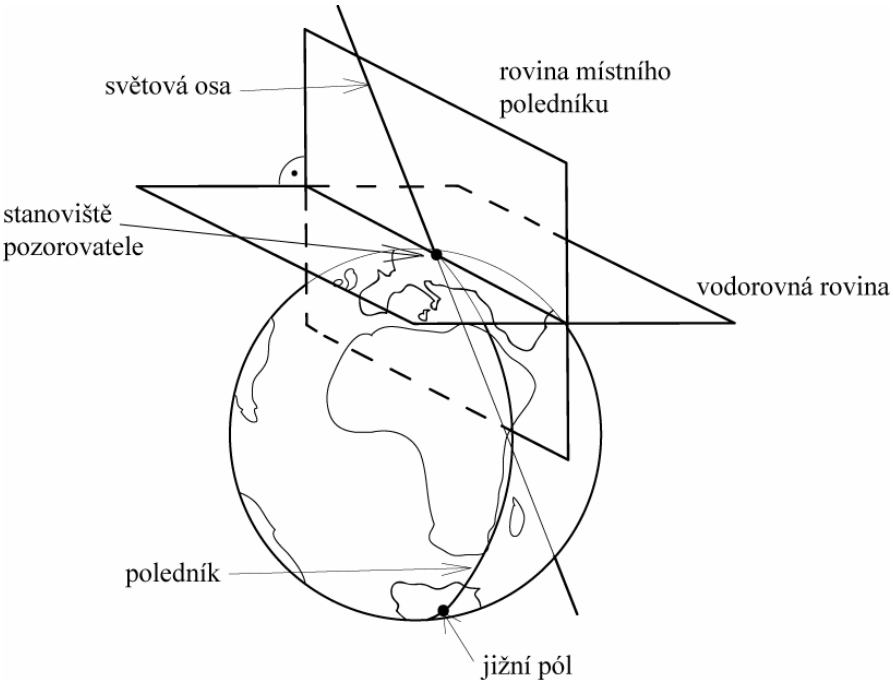
Jeden ze dvou základních směrů udává tzv. „pól“ soustavy. Rovina na něj kolmá, procházející počátkem, je „rovníkem“ soustavy. *Šířková souřadnice* je orientovaný úhel měřený od rovníku k pólům. K měření *délkové souřadnice* potřebujeme tzv. „poledník“: polorovinu danou dvěma směry – k pólu a k danému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



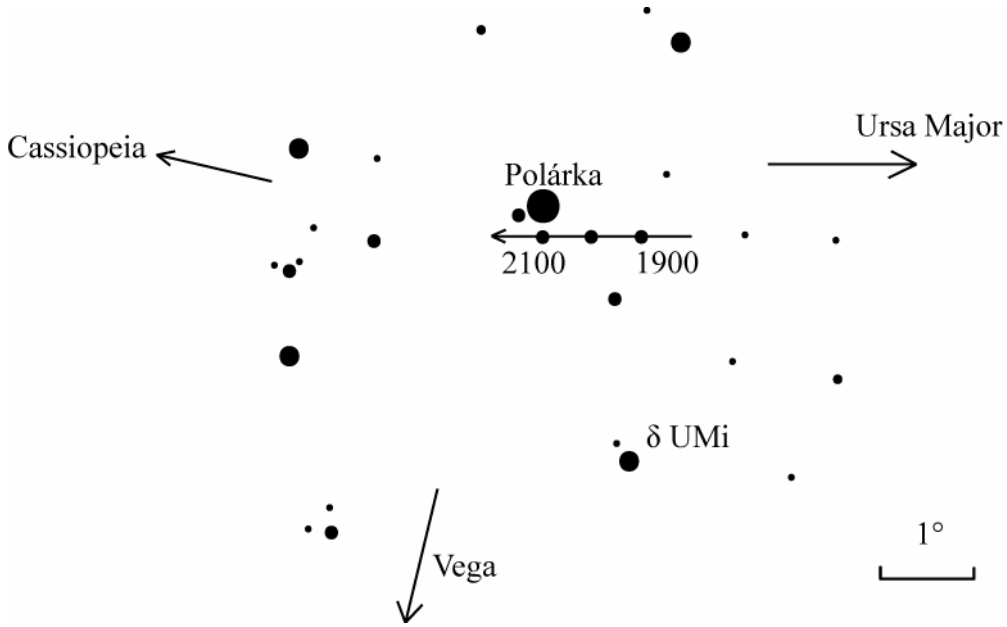

Sférická soustava souřadnic.

To ještě není vše, čeká nás další příděl 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*. Přímku 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.



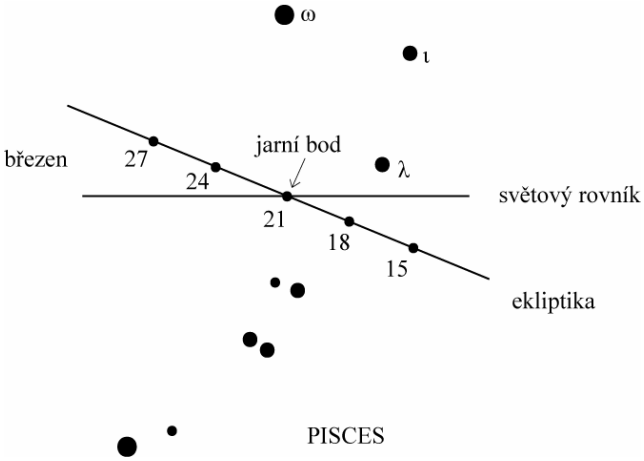

K definicím některých pojmů.



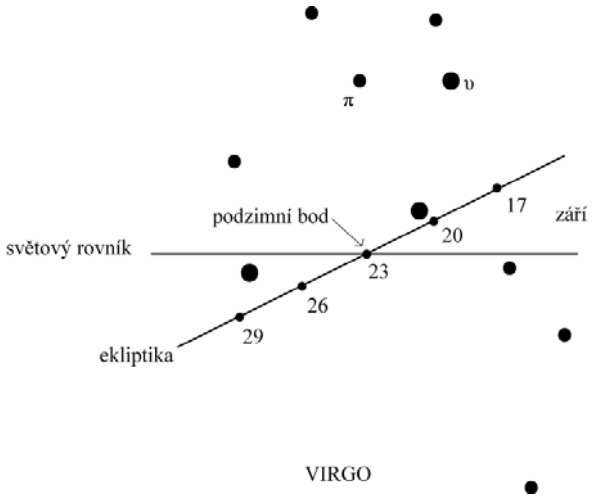

Poloha severního světového pólu.

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-

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




Jarní bod.




Podzimní bod.

[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, zakreslujeme ji z vnějšího pohledu; ten však nijak neodpovídá naší každodenní zkušenosti! Složitou transformaci 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.

**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:

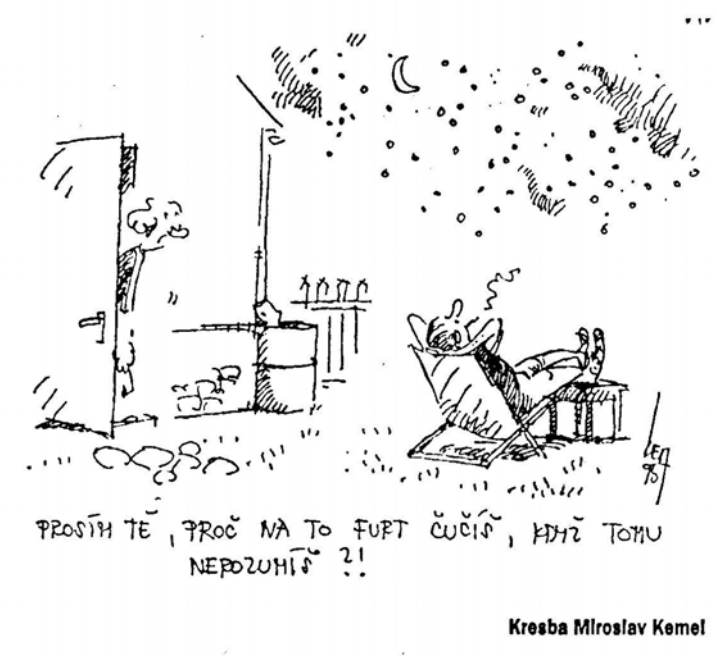
| | ***soustava obzorníková*** | ***soustava rovníková*** |
|---|---|---|
| „pól“ soustavy | zenit | severní světový pól |
| „rovník“ soustavy | vodorovná rovina | světový rovník |
| směr, který určuje základní poledník | jižní | jarní bod |
| délková souřadnice | azimut [7]) | rektascenze |
| šířková 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.




**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**

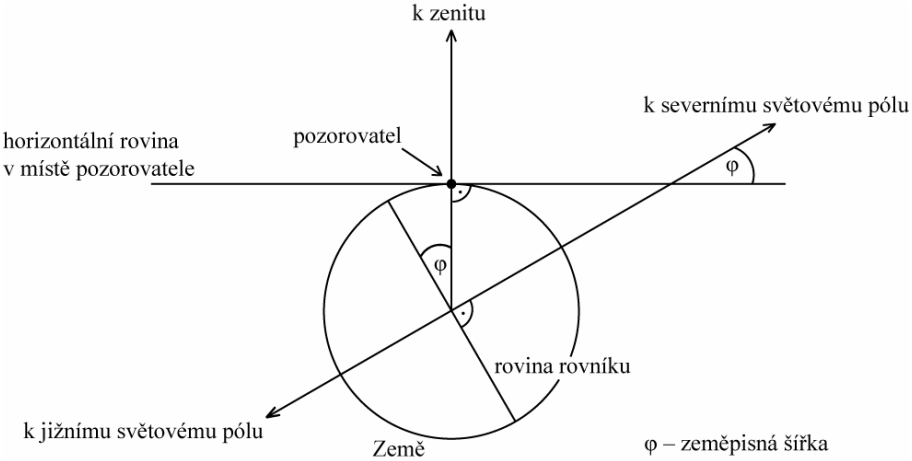
Jak vypadá hvězdná obloha odjinud, z jiných míst na Zemi? Změní se vůbec nějak? Určitě. Vzájemné seskupení hvězd se sice nijak nepromění, na to jsou rozměry Země doslova nepatrné, ale po-

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.



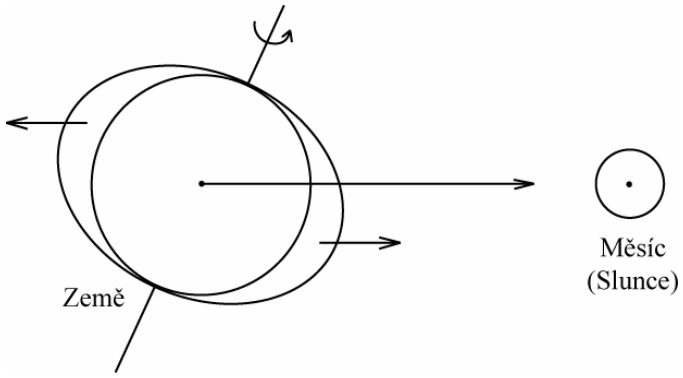

Výpočet výšky světového pólu.

*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°).




Vznik precese.

**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. Přepočet na běžné úhlové jednotky je sice jednoduchý, ale musíme být pozorní:

$1^h = 360°/24 = 15°$,
$1^m = 15'$,
$1s = 15''$.

Pozor: rozlišujte $1^m$ (časově úhlovou minutu), 1′ (úhlovou minutu) a 1 min (časovou minutu). Kdoví, 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?

**Otázka 2.1.8.** Ke správnému zodpovězení této otázky budete potřebovat trochu prostorové představivosti, ale zvlášť 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 × 23,5°? (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

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 zpaměti).

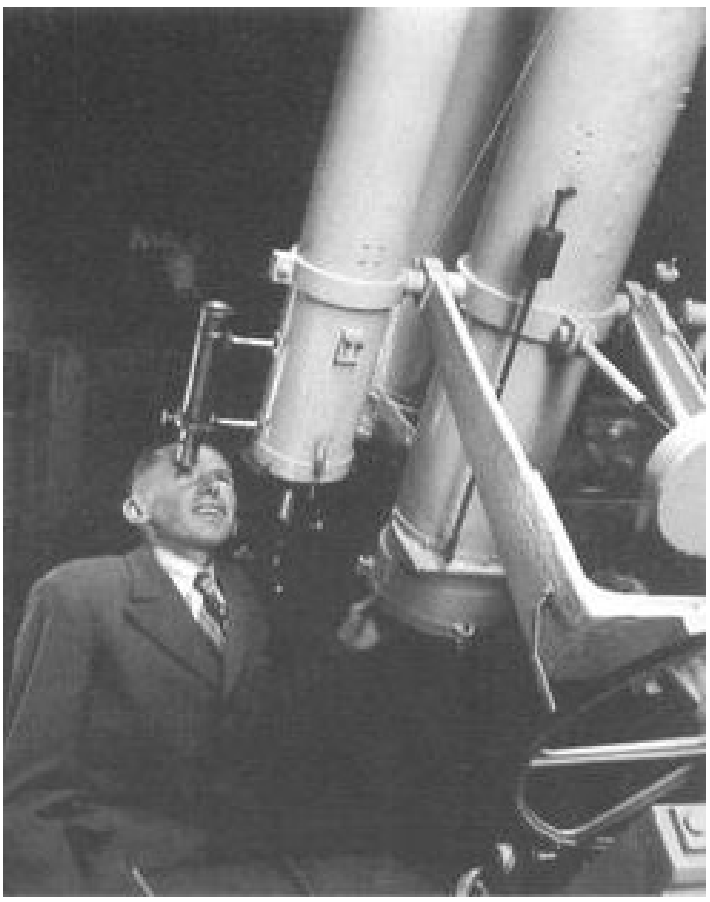
**Otázka 2.1.26.** Pro statistické účely je mnohdy dobré znát, kolik čtverečních stupňů má celá hvězdná obloha. Vypočítejte tuto hodnotu.

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.

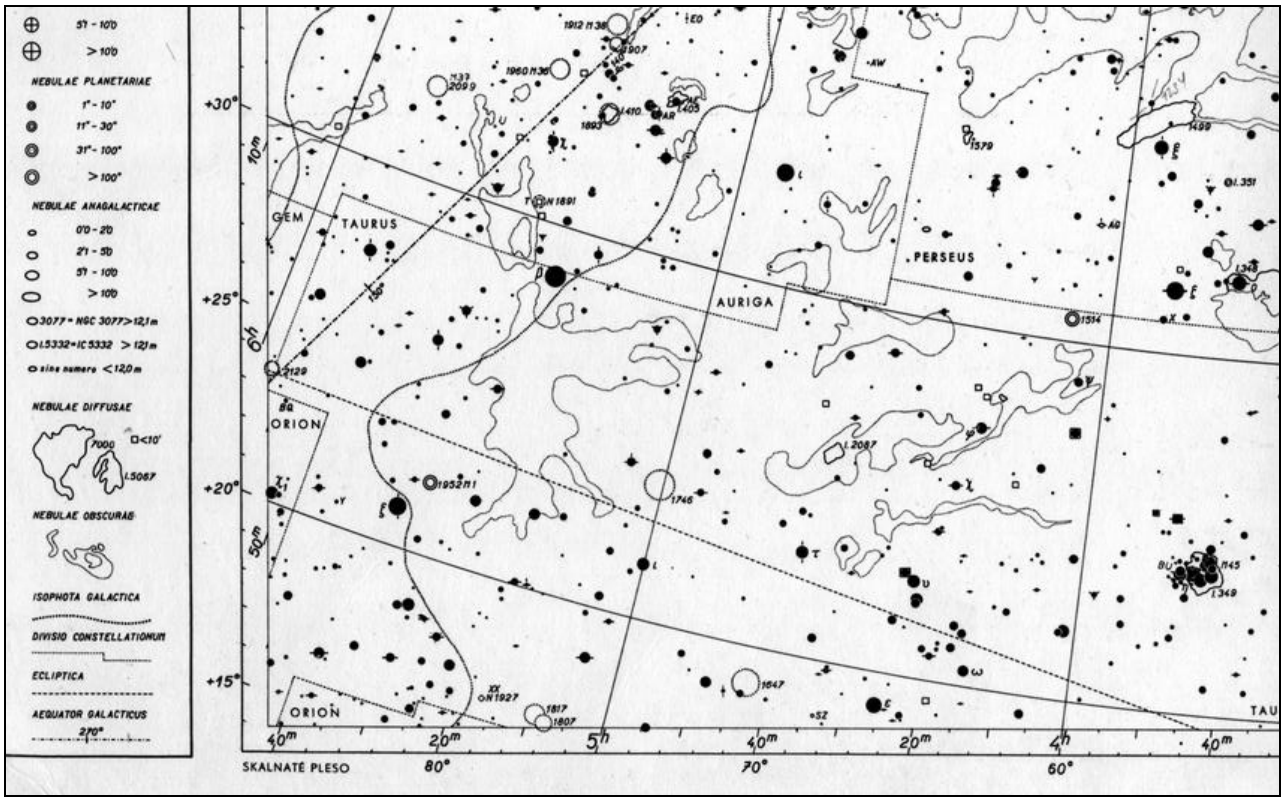


Bečvářova astronomická aktivita začala neokázale: na zahradě rodinné usedlosti v Brandýse nad Labem postavil roku 1927 svou první soukromou observatoř, spojenou s meteorologickou stanicí. Byla tu malá kopule se zrcadlovým dalekohledem o průměru 215 mm a později 240 mm, a nevelká temná fotokomora. Zrcadla 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 navrací do rodného Brandýsa, kde do-

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.)

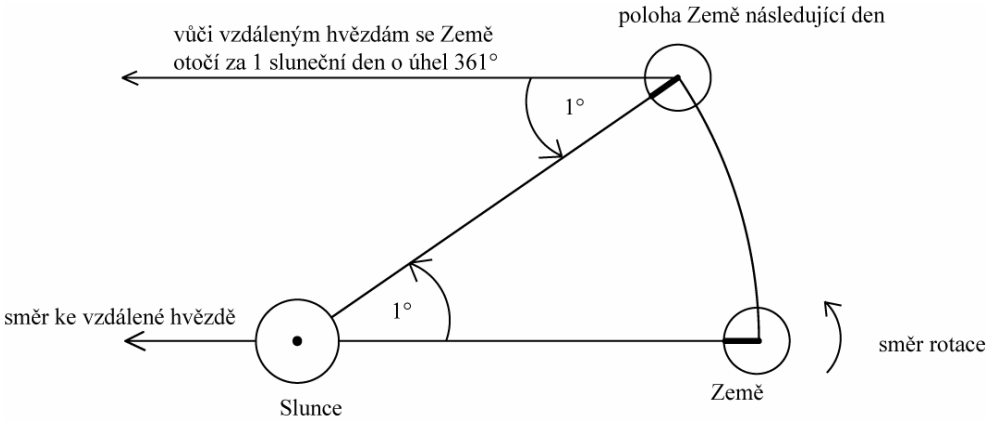
Vychází souhvězdí Orion. Foto: Jimmy Westlake.

[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 bezezbytku jen pro horní kulminaci.

### 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.

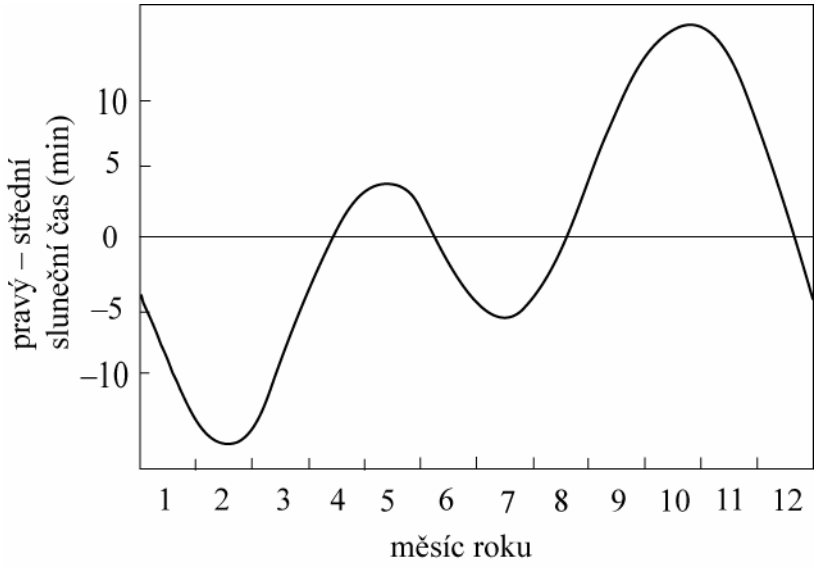



Rozdíl mezi hvězdným a slunečním dnem.

### 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

| časová rovnice = pravý sluneční čas – střední sluneční čas . |
|---|




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. Přepočet místních časů pro dvě různá místa na Zemi je poměrně jednoduchý: *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 pásů, 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.

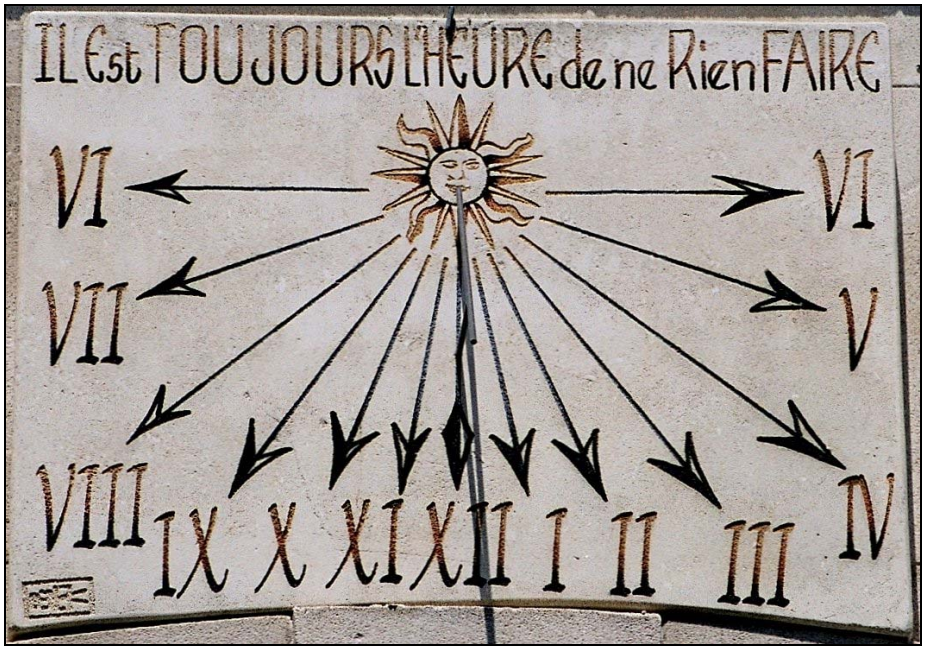
čítanka

# 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!



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 pochopitelně pásmový. Sluneční hodiny ukazují čas místní a pravý. Tyto časy jsou různé, za to ovšem sluneční hodiny nemohou. To, co mají ukazovat, ukazují přesně. Lze sestrojit 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 rozhlasovým signálem, tedy před dvacátými léty minulého století, bylo třeba se k nim utíkat všude tam, kam nedolehl poledni signál vyzváněný na železniční stanici.

Sluneční hodiny měly také svou významnou úlohu historickou. Byly sestrojovány v nejrůznějších provedeních – 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 záludných 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 zpaměti.)

**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?

**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 (nápověda 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 trajektorií 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?

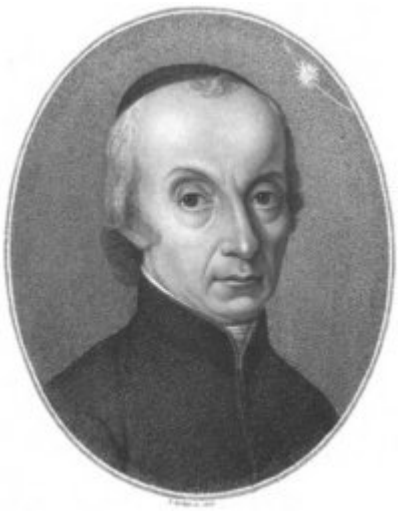
**Otázka 2.2.20.** Může někdy a někde pro určitý objekt na obloze platit, že se jeho azimut od okamžiku východu až po kulminaci nebude měnit?

**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.

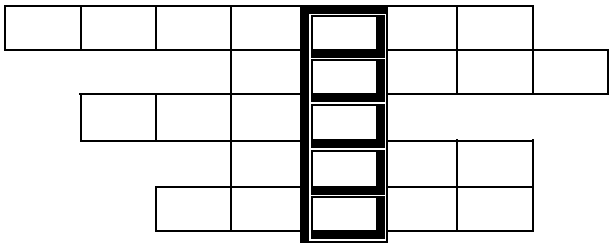
„luštěniny“

# 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 planetky 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“

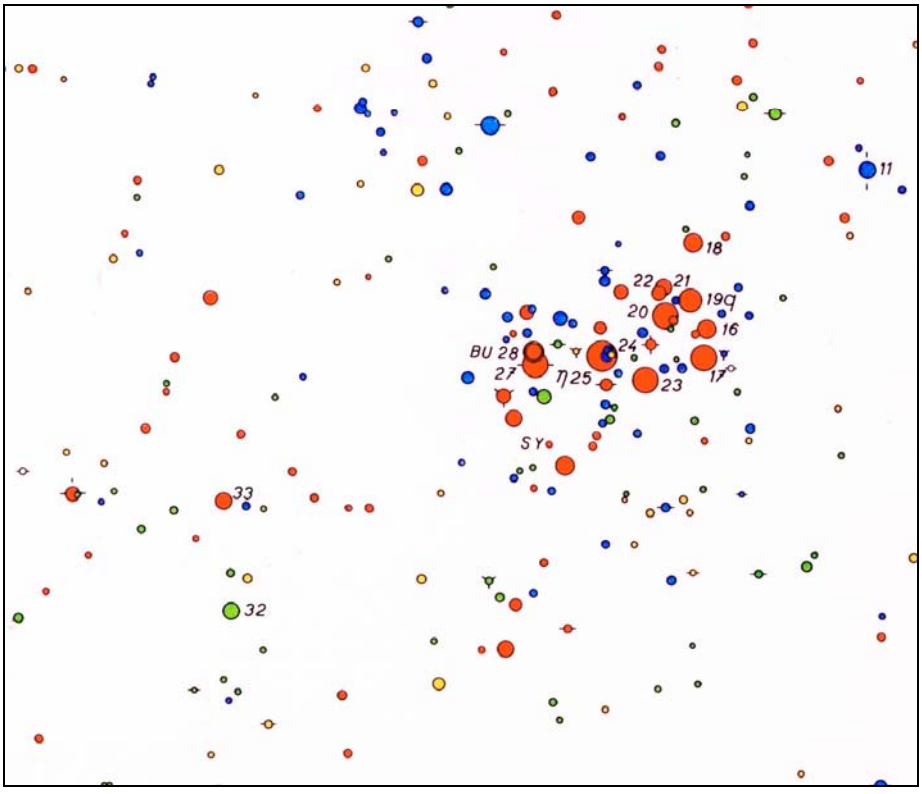
překrásná dvojhvězda ε Boo

tvoří dvojhvězdu s Alcorem

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 nezbavuje autora povinnosti navrhnout koncepci map 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 map je pozná až praxí). Tak jako je vhodné, aby se budoucí výrobce obuvi pokusil nějakou botu „ušít" 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.

Našim 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 $\alpha$ a deklinace $\delta$) se vztahují k epoše 2000. Jejich polohy zakreslete do obr. 2. Doporučený postup:

1. Stanovte rozsah kreslené oblasti v rektascenzi $\alpha$ a deklinaci $\delta$; je třeba zakreslit všechny hvězdy z tabulky 1 a dodržet stejná měřítka v obou osách ($1^h = 15°$) [1]). Rektascenze narůstá směrem doleva. (Výsledky poznačte 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 veliké 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 zapište 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.

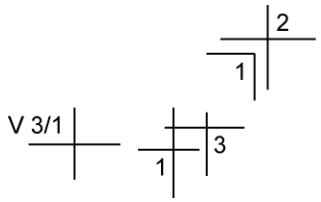
Ověřte si, že poměr průměrů (a ovšem i ploch) kotoučků hvězd lišících se o 1 magnitudu je jiný u hvězd slabých a jasných.

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.

velikostem v maximu a minimu 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.

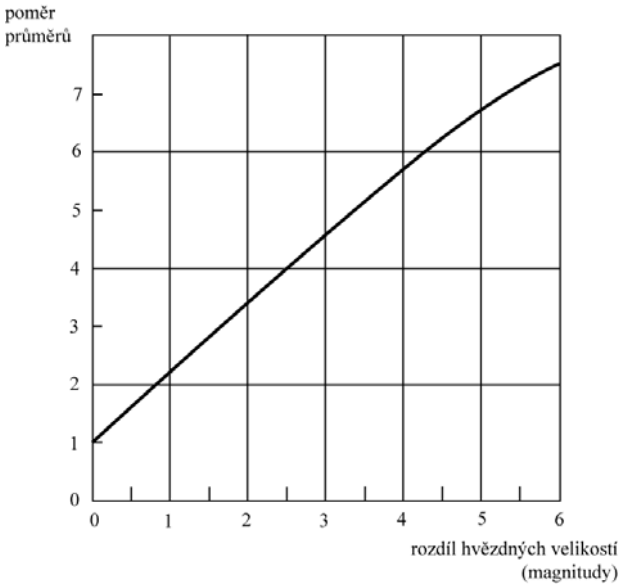
| α | δ | *x* (mm) | *y* (mm) | *Hvězdná velikost* (mag) | *Pořad. č. kotoučku* | *Poznámka* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 48 21 | 23 25 16 | | | 5,44 | | |
| 3 48 30 | 24 20 43 | | | 6,94 | | |
| 3 48 57 | 23 51 26 | | | 6,6 | | |
| 3 49 10 | 24 03 12 | | | 3,63 | | 27 Tau |
| 3 49 11 | 24 08 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 | | |

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

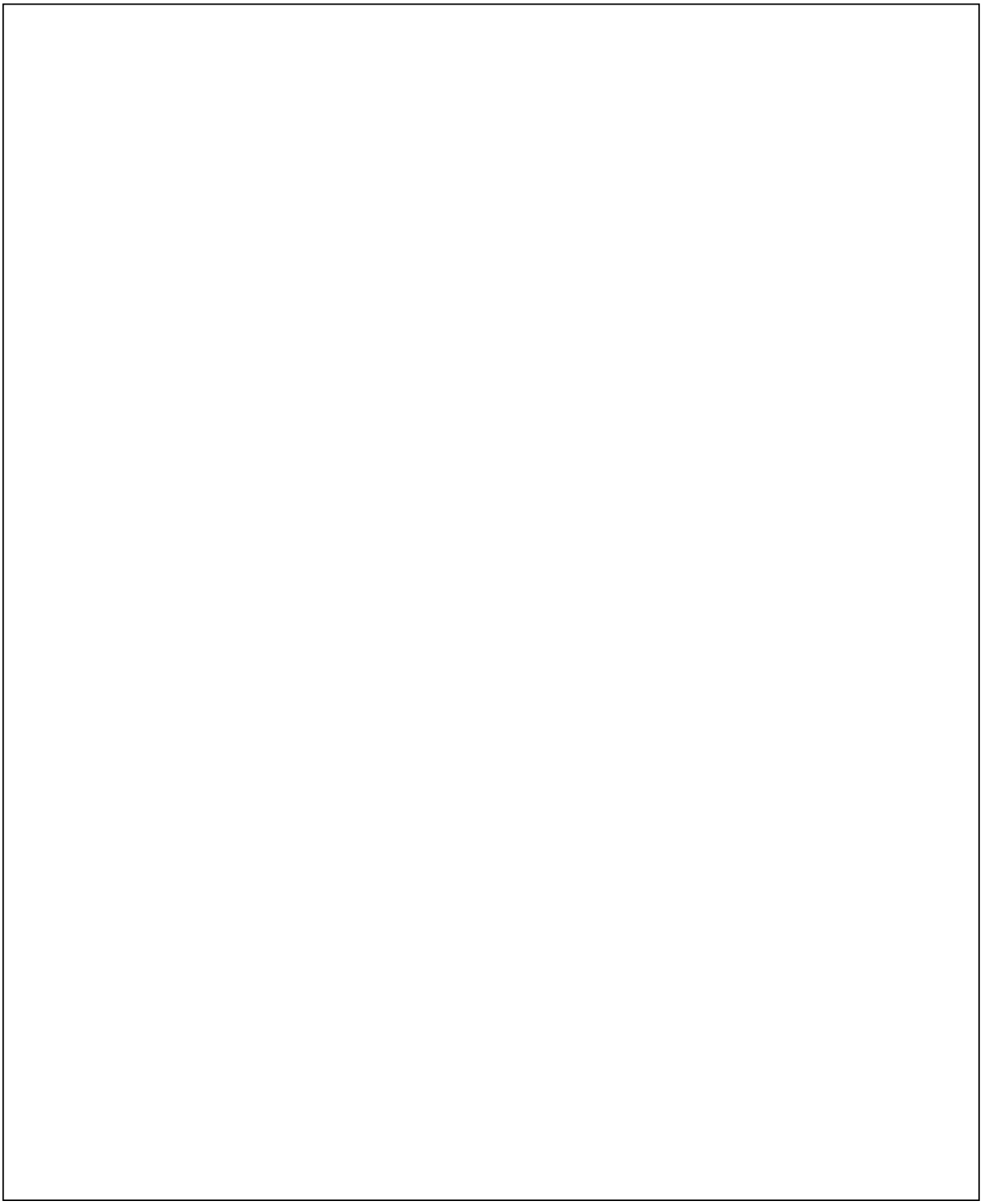
$\delta_{začátku}$ = ___°; $\delta_{konce}$ = ___°;
rozdíl $\delta_{konce} - \delta_{začátku}$ = ___° = ___ mm.

**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



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

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.

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 $\delta = 23° 17'$, zeměpisná šířka Greenwiche $\phi = 51° 29'$, 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)

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 naším 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 strefil 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).

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

### 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 vystřídají (např. od novu k novu) za dobu *delší* než je siderický měsíc: za 29,53... dne, což je tzv. *synodický měsíc* [2]).

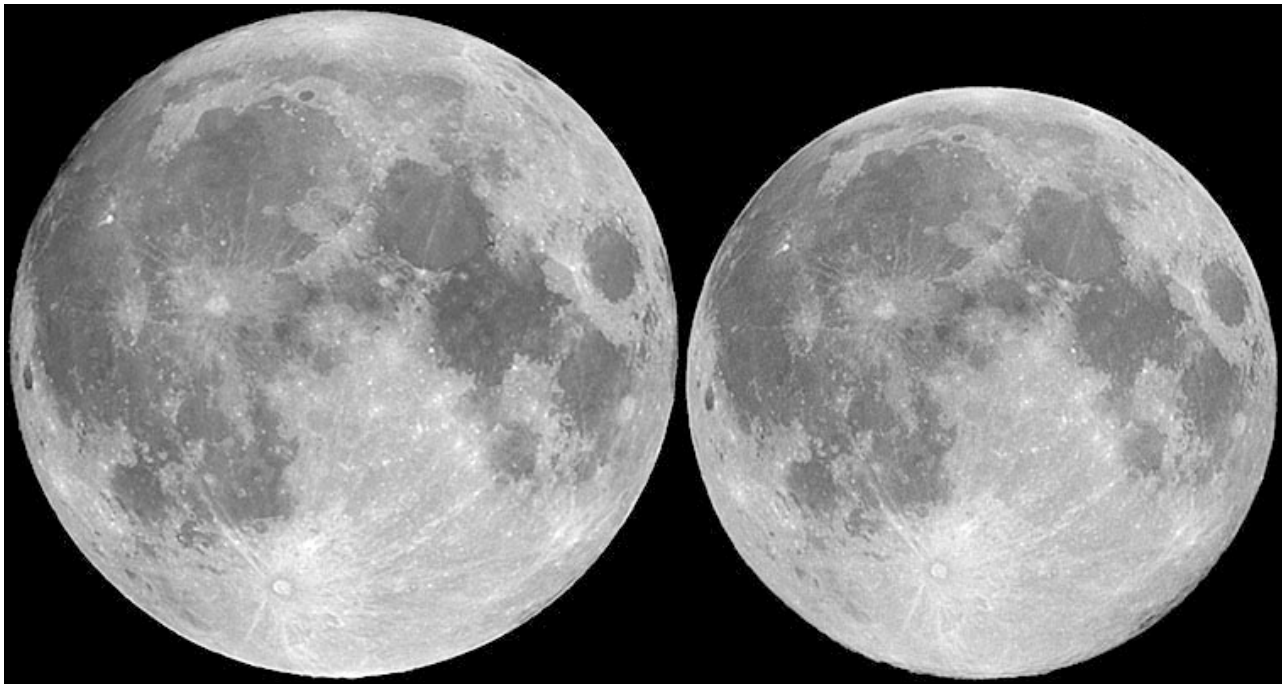
### Měsíční „tvář“

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 úplňkem sejde, uplyne právě synodický měsíc.

### 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 vejčitý 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 Slunce 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 úplněk 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.

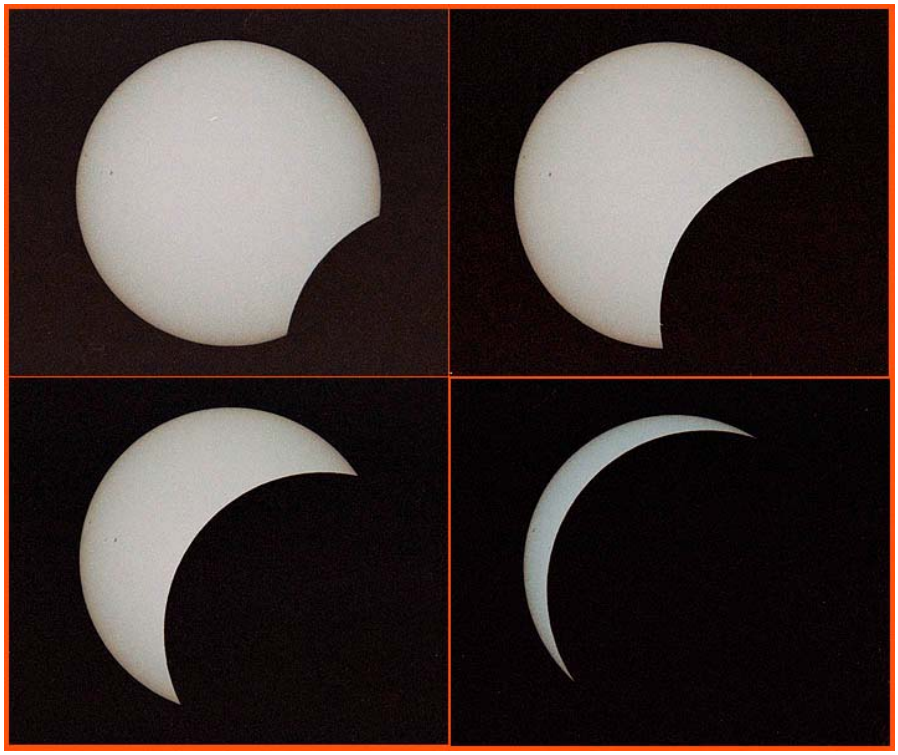
To je důsledek gravitačních poruch, způsobovaných především Sluncem. Proto měsíční zatmění nepatří mezi časté úkazy na našem nebi. Rozhodně si žádné z nich nenechejte ujít!

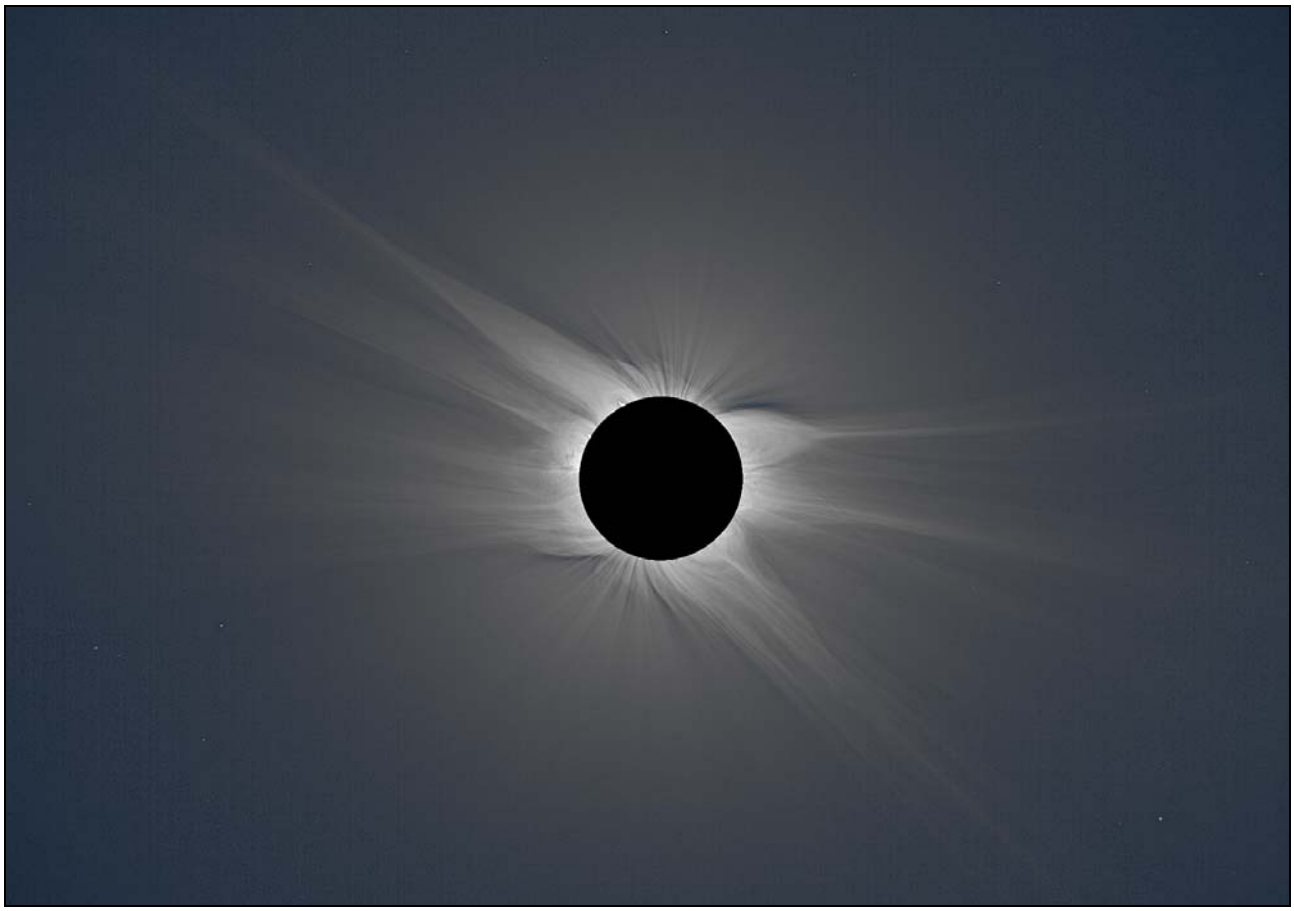
Tři snímky z konce fáze úplného zatmění Měsíce 24. 10. 2004 (začíná fáze částečného zatmění).

**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 potemnělého 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...





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

### První předpověď úplného zatmění Slunce

Pochází od řeckého filozofa Thaleta 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?

Pravidlo 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.

Stejnojmenná kapitola z knihy *100+1 záludných 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 nespatříme nikdy.

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 záludných 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: Zážitek, na který nelze zapomenout

Jsou věci, o kterých člověk velmi dobře ví, ale přesto, když nastanou, užasne nad jejich velkolepostí 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

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, obličeje 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 rozstřikoval 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)

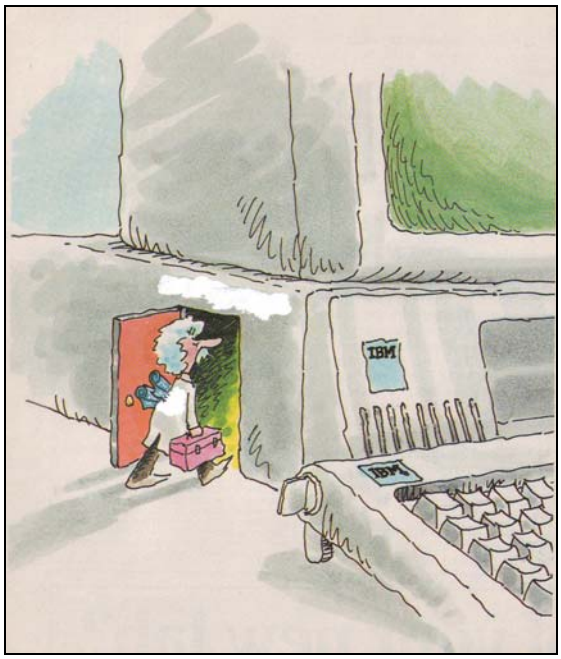
## otázky a příklady

**Otázka 2.3.1.** Je konec března, Měsíc je v úplňku. Jakou má přibližně rektascenzi? Nabízíme tyto možnosti: a) $0^h = 0°$; b) $12^h = 180°$; 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.** Zvídavá 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.

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

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 osvícený 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 zeměkouli. 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).

úloha k zamyšlení

# Hmotnost Země z pohybu Měsíce

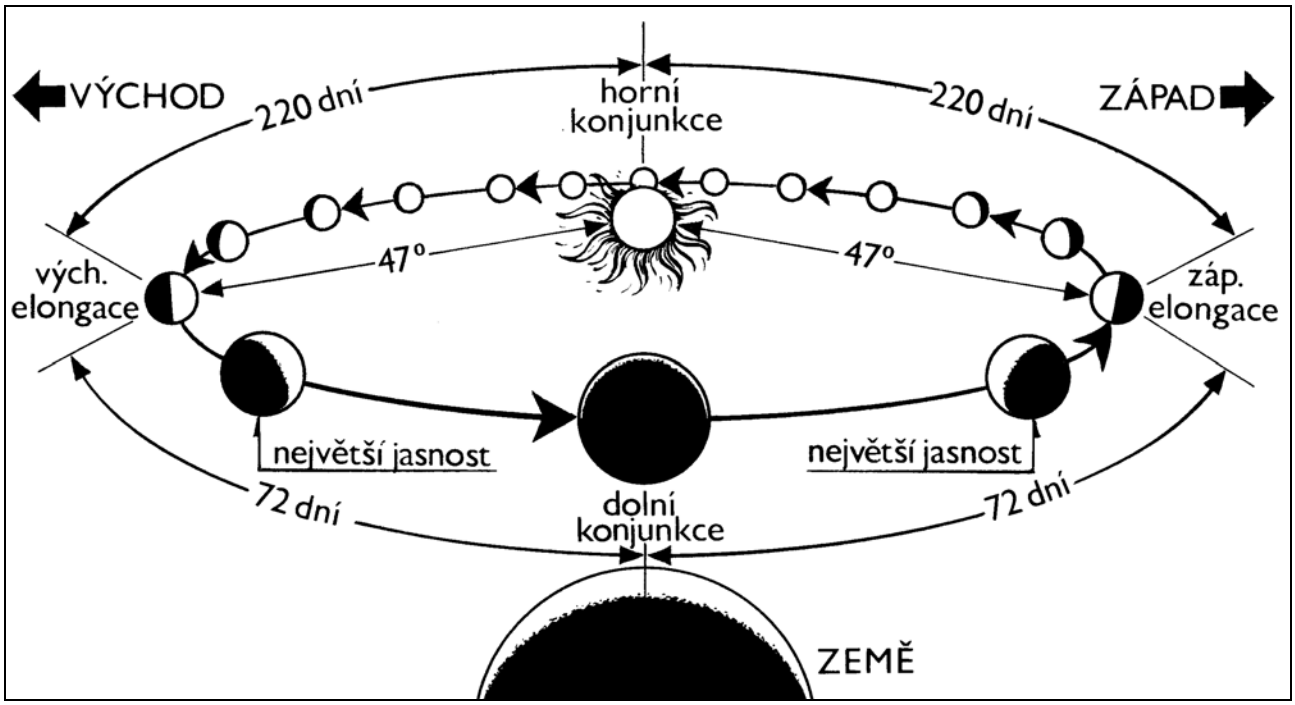
Na hvězdné obloze se Měsíc přesune (vůči vzdáleným hvězdám) o úhel 13,2° za den (to je střední hodnota). Střední vzdálenost Měsíce od Země činí $r$ = 384 000 km. Lze z těchto dvou údajů, jež jsou přímo měřitelné, vypočítat hmotnost Země? Pokud ano, vypočítejte ji, pokud ne, uveďte, která další pozorovací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

# 2.4. Tanec planet

Planety se na hvězdné obloze pohybují docela zvláštním způsobem, takže mnohému 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?**

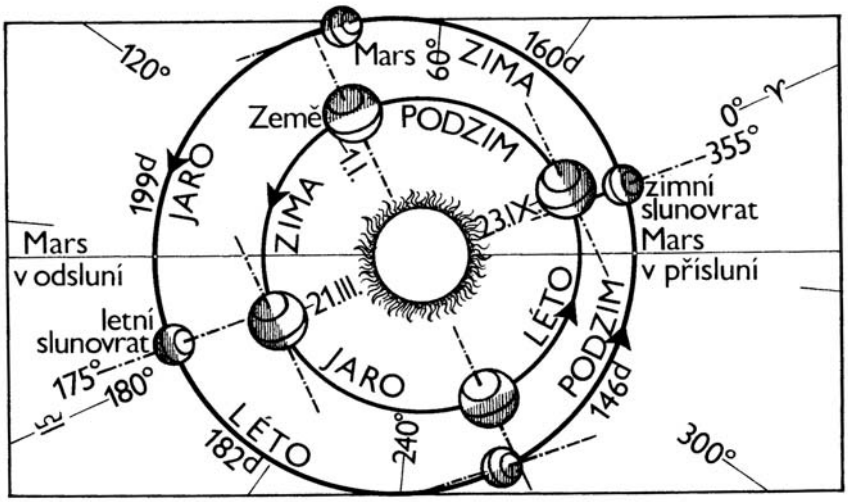
Na první pohled je patrné, že planety se nacházejí vždy poblíž ekliptiky. Oběžné roviny planet jsou vzhledem k ekliptice skloněny opravdu jen velmi málo – nanejvýš o několik stupňů. Proto planety nikdy nespatříme například v souhvězdí Draka, Labutě či Sochaře, ale vždy jen v některém ze souhvězdí ekliptikálních,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



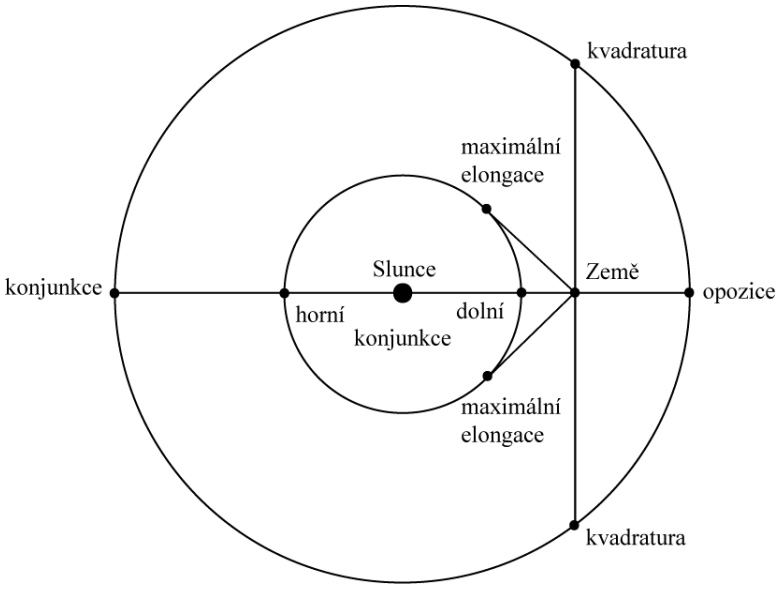

Dráha, fáze a úhlová velikost Venuše při pozorování ze Země během jednoho oběhu planety kolem Slunce. Velikosti kotoučků Venuše ve srovnání s úhlovým průměrem Slunce jsou 60krát zvětšeny. Kresba: Pavel Příhoda.

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

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.



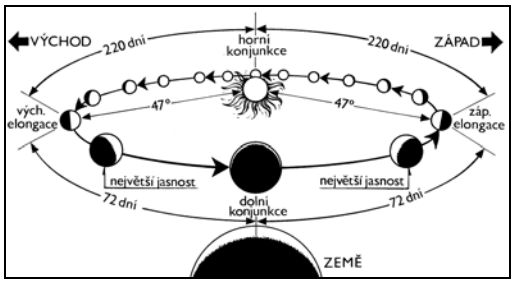

Významné polohy planet vzhledem k Zemi.

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

### 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.

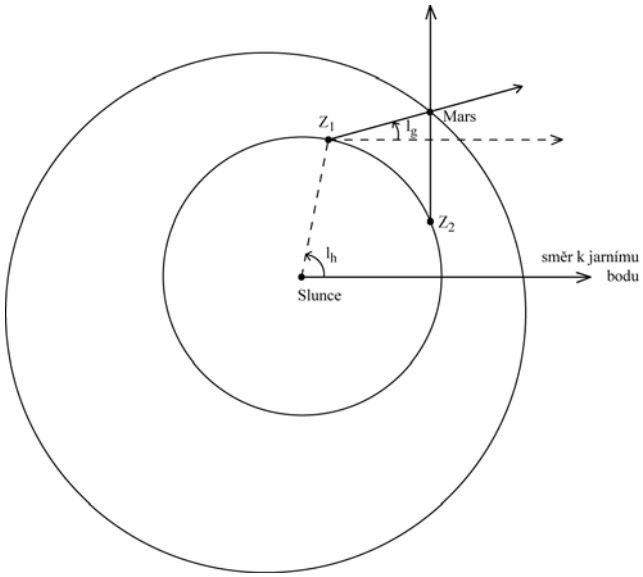



praktikum

# Oběh Marsu kolem Slunce (podle Keplera)

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 dní [1]). 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 dny. 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.

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 úhloměru 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 nejblíže a nejdále (přibližně).

4. Spojte polohy Marsu, kdy je ke Slunci nejblíže 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).

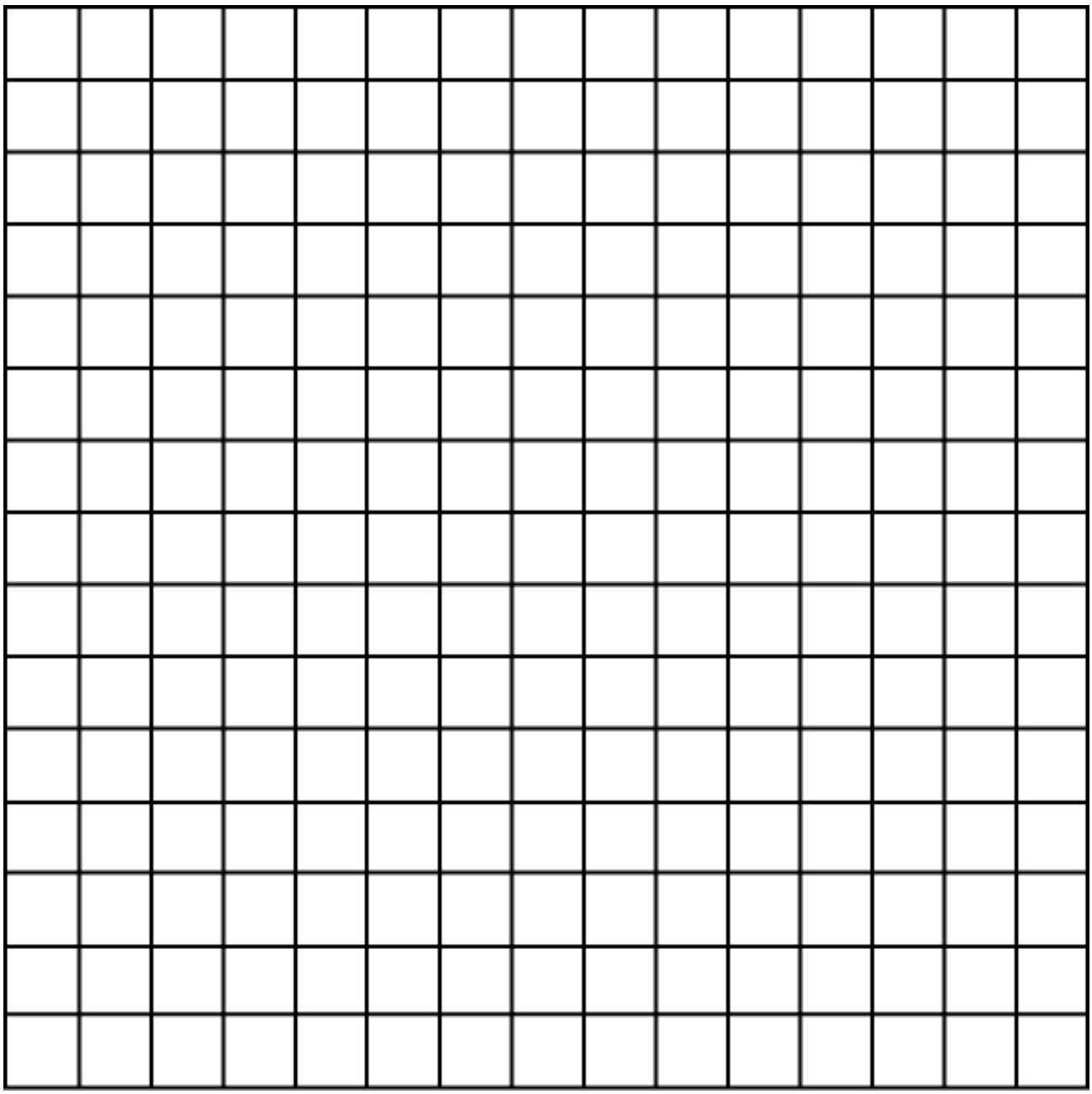
Zakreslete do obr. 2 takovou kružnici. Její poloměr můžeme považovat za střední vzdálenost planety od Slunce. Uveďte ji v astronomických jednotkách!

### *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 úhloměru opravdu byla *rovnoběžná* se směrem k jarnímu bodu.

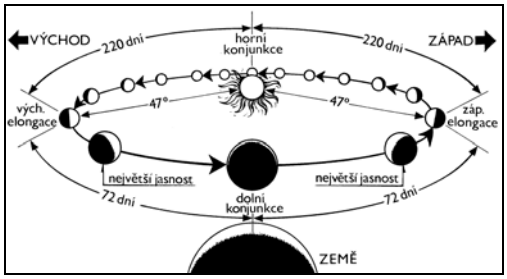


Obr. 2.

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.

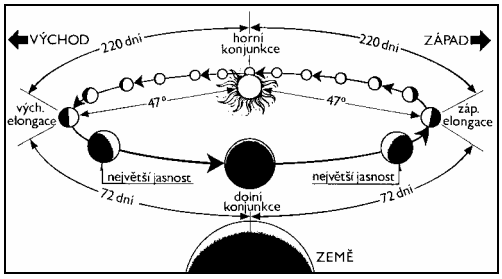
**Otázka 2.4.2.** Když se Venuše nebo Merkur nacházejí v největší západní nebo východní elongaci, vidíme osvětlenu právě polovinu kotouče planety. Souhlasí to?

**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°. 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.

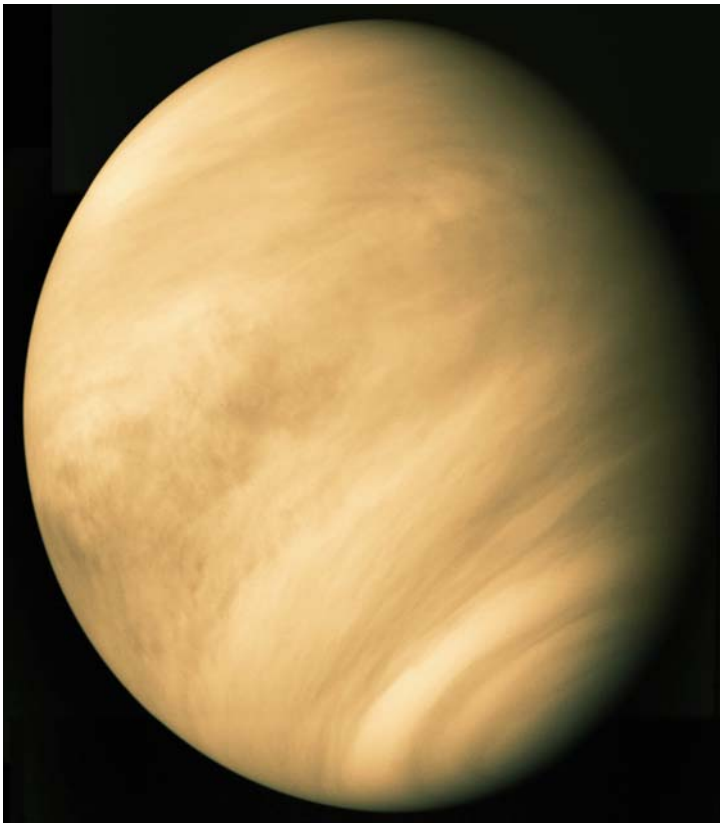
**Otázka 2.4.6.** Tato otázka zní přímo anekdoticky: jistý Albánec, který byl proslulý ostrostí svého zraku, tvrdil, že i ve dne viděl ze dna hluboké studny planetu Venuši. Myslíte, že jeho tvrzení je důvěryhodné? Nehádejte, ale zdůvodněte svůj názor.




## 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?



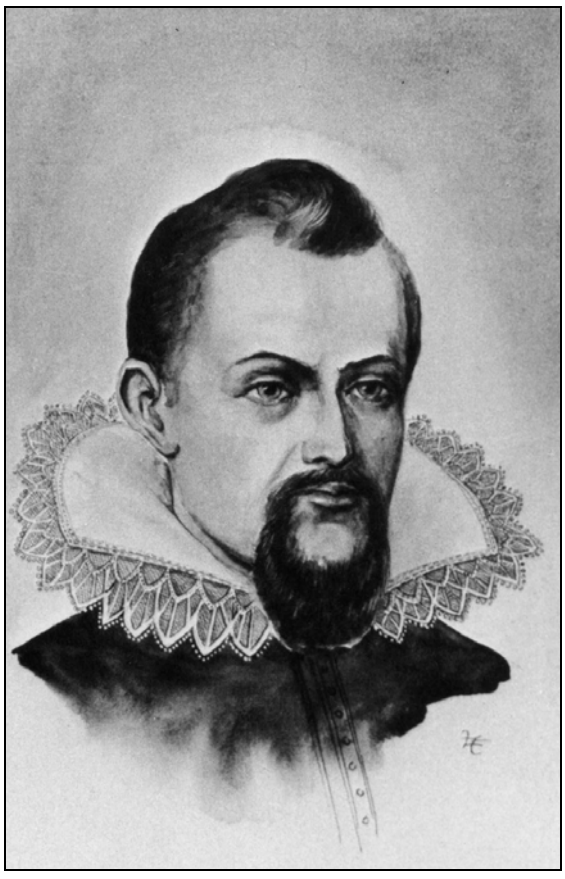
Snímek Venuše, který pořídila sonda Mariner 10 při průletu kolem planety.

# 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 učenci 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.

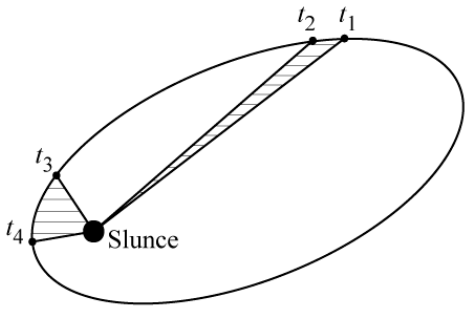


### První Keplerův zákon

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 rychlostí [3]).




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 platí [4]).

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 *rady a „drobnosti"* o kuželosečkách v této kapitole.

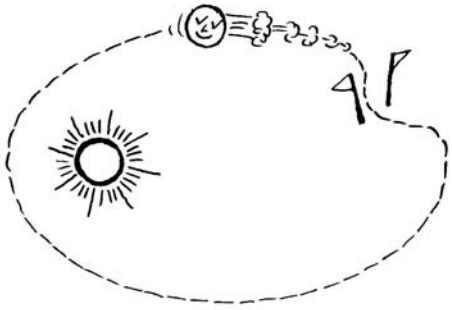
[2]) Historická zajímavost: tento „první" zákon formuloval Kepler až jako *druhý* roku 1605, neboť nejdříve objevil ten, který dnes označujeme jako jeho druhý zákon.

[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 úmorné snaze nalézt vztah mezi velikostí dráhy a dobou oběhu planety dospěl ke správnému výsledku teprve 15. května 1618. Bylo to dlouhé údobí hledání pravdy, s mnoha slepými cestami a omyly.

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 uveďme, 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

Obávám 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 šejdíř, 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 Tychona 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 Tychona 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 „přírucí 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 myslil 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 vymyslil svůj systém, kompromis mezi Ptolemaiem a Koperníkem: planety obíhaly ko-

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

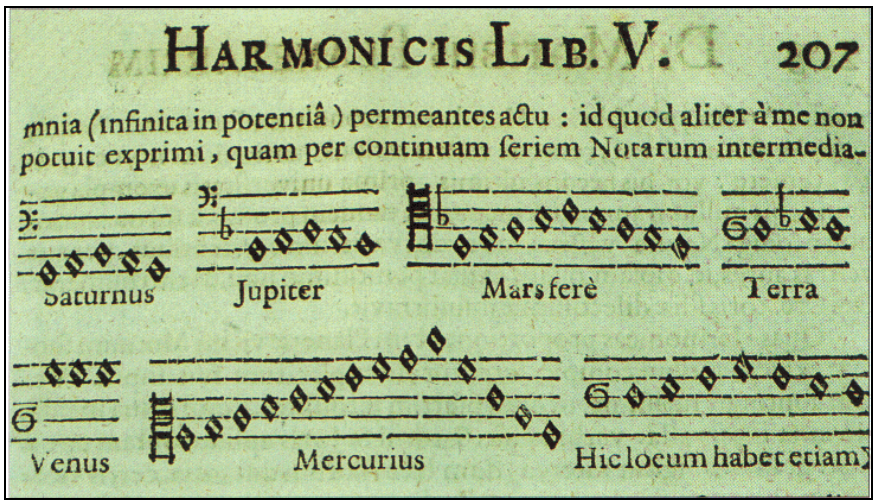
Ten pojem je ještě živý, i když mnozí už nevědí, jaký vlastně má mít obsah. Často i v hovoru prohodíme „to je hudba sfér“ – a myslíme na něco dokonalého, někdy si myslíme případně totéž, jako kdybychom řekli „hudba budoucnosti“. Není to tak docela přesně. Co vlastně má být sféra? Řecky je to koule, ale 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 nalezl 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, jíž 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 vytěžit co nejvíc. Trval na jejich základním přesvědčení, že příroda je

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 matematických 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).

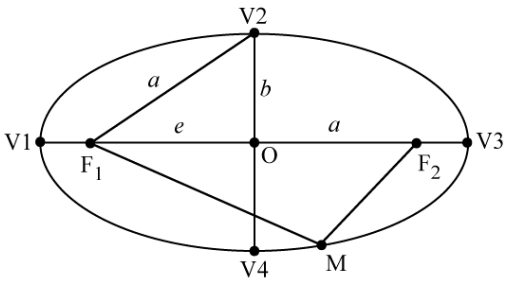
rady a „drobnosti“

# 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.

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:

| *centrální těleso* | *bod* $V_1$ | *bod* $V_3$ |
|---|---|---|
| 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).

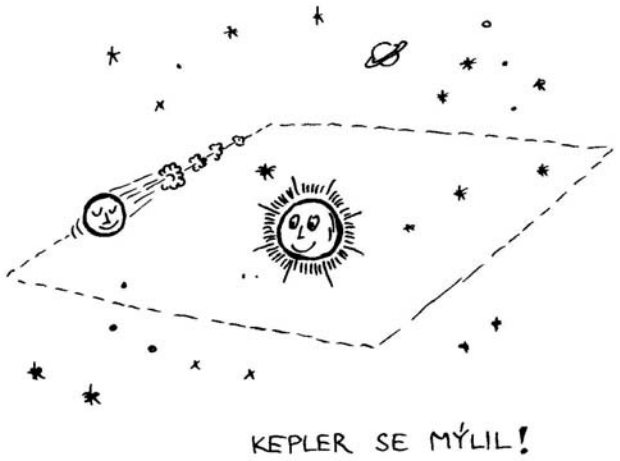
**Otázka 2.5.4.** Ve kterém bodu trajektorie je *okamžitá* oběžná rychlost planety rovna její *střední* rychlosti? Pokud se vám tato úloha zdá obtížnou, pak přijde vhod malá nápověda: uvažte, na čem závisí oběžná rychlost planety. Pak si jen uvědomte definici elipsy, představte (nebo nakreslete) si ji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

**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 pociťovala beztížný 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 beztíže. V beztížném 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 beztíže 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?

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 Kasiopeje, 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

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

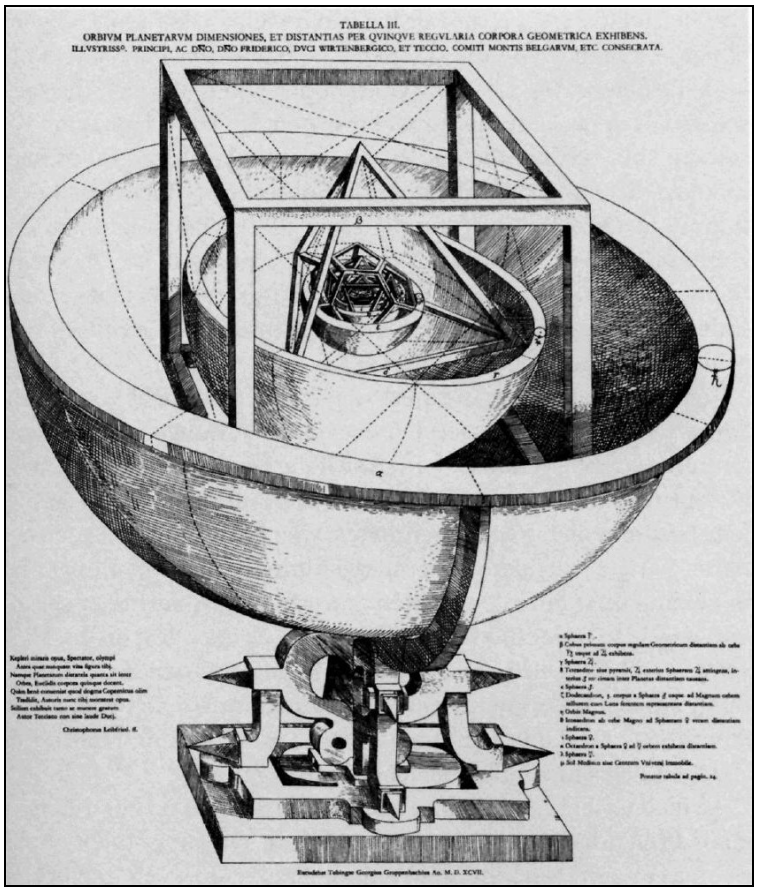
# Johannes Kepler

### 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 dánských 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 Tychona 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 zdráv. Často vstávám a procházím se...“ (překlad Zdeněk Horský).



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. Knížka se jmenovala *Sen čili měsíční astronomie* a popisovala život údajných Měsíčňanů. 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.

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.

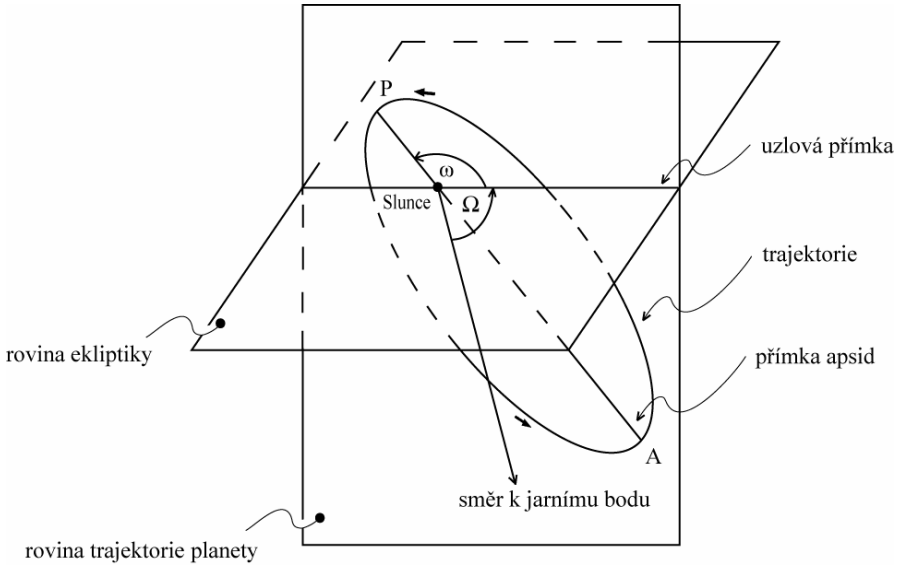
Trajektorie planet budeme určovat ve vztažné soustavě, kde Slunce je na místě a soustava nerotuje. Trajektorie planet, planetek a mnohých komet jsou v prvním přiblížení elipsy, v jejichž společném ohnisku leží Slunce. Tvar, rozměry, orientaci elips v prostoru a polohu tělesa plně určuje šest nezávislých 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 $\Omega$ (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 $\omega$; měří se od směru výstupného uzlu (viz obr. 1).




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 27. 7. 2005 (viz tabulka 1). Ze siderické doby oběhu $P$ se vypočítá střední denní pohyb $n = 360°/P$ (ověřte si údaje v tabulce 1!). Pomocí této veličiny vypočítejte a zakreslete polohu Země a Marsu vždy pro 1. 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. Srovnejte 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.)

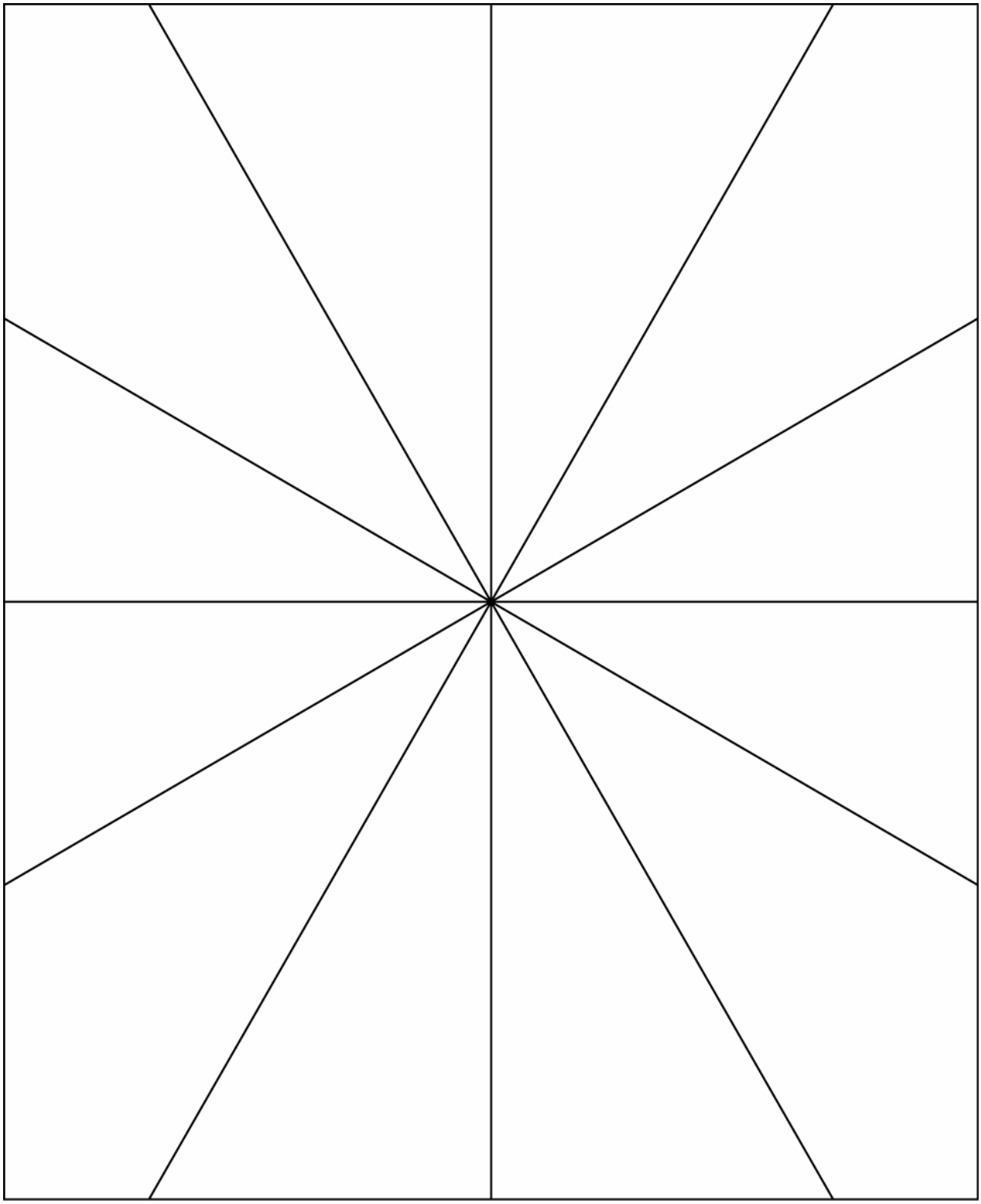
8. Kolika stupňů dosahuje největší úhlová vzdálenost (maximální elongace) Venuše od Slunce pro pozemského pozorovatele? Jak velká je tato maximální elongace Země od Slunce pro pozorovatele na Marsu? (Opět odečtěte z obr. 2 nebo vypočítejte.)

### *Vstupní data, výsledky:*

**Tabulka 1**

| *Planeta* | $i$ (°) | Ω (°) | ω (°) | $e$ | $a$ (AU) | $t$ (datum) | $n$ (°/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 |

(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.

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

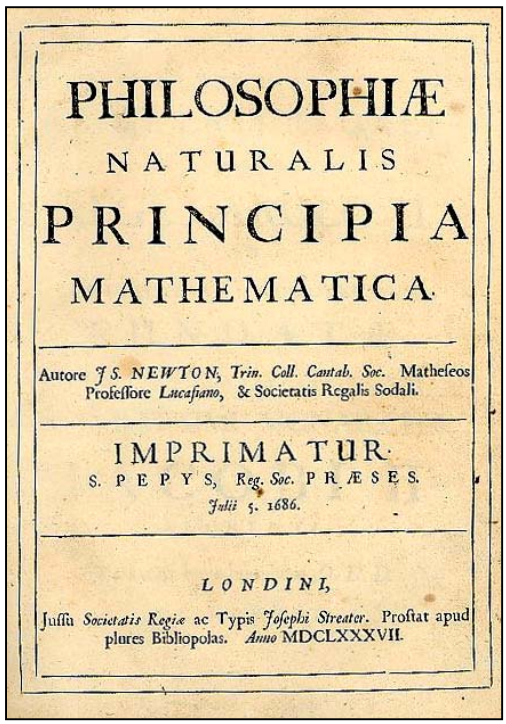
Největší a nejmenší možná vzdálenost Země od Marsu v době opozice je _____.

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

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 vyvozují z pouhého předpokladu gravitace ke středu Slunce, které ubývá nepřímo úměrně se čtvercem vzdálenosti od něho. Bylo rozhodnuto, aby panu Newtonovi byl napsán děkovný 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.“


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Autore *J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheſeos Profeſſore *Lucaſiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.
*Julii* 5. 1686.

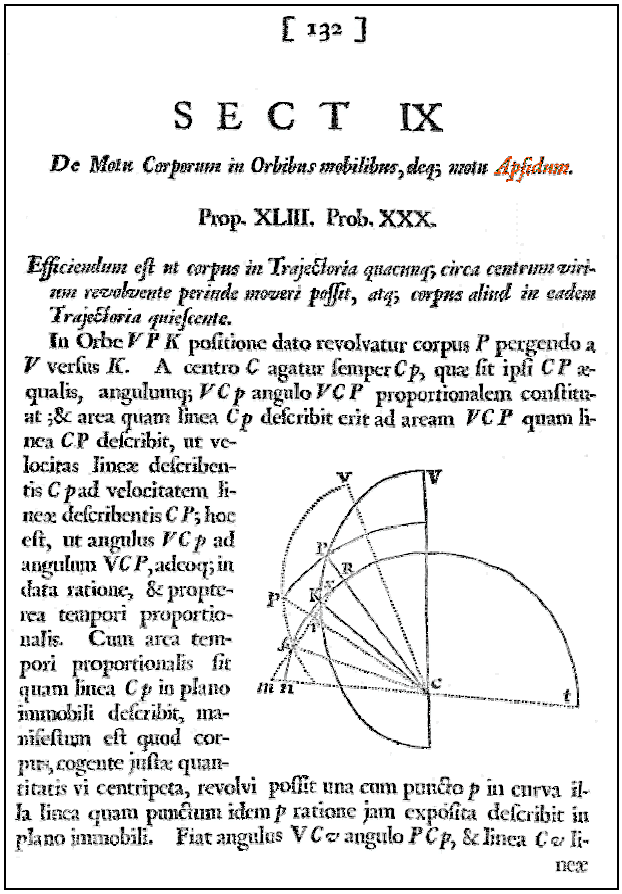
*LONDINI,*
Juſſu *Societatis Regiæ* ac Typis *Joſephi Streater*. Proſtat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.

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 princípija matemátika*.

ných historek. Kupříkladu tou, jak Newton seděl na zahradě v rodné vesnici Woolsthorpe [2]) (kde žil od srpna 1665 do března 1667, když v Anglii řádil 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 světle.“*



[ 132 ]

SECT IX

*De Motu Corporum in Orbibus mobilibus, deq; motu Apſidum.*

Prop. XLIII. Prob. XXX.

*Efficiendum eſt ut corpus in Trajectoria quacunq; circa centrum virium revolvente perinde moveri poſſit, atq; corpus aliud in eadem Trajectoria quieſcente.*

In Orbe *V P K* poſitione dato revolvatur corpus *P* pergendo a *V* verſus *K*. A centro *C* agatur ſemper *C p*, quæ ſit ipſi *C P* æqualis, angulumq; *V C p* angulo *V C P* proportionalem conſtituat ;& area quam linea *C p* deſcribit erit ad aream *V C P* quam linea *C P* deſcribit, ut velocitas lineæ deſcribentis *C p* ad velocitatem lineæ deſcribentis *C P*; hoc eſt, ut angulus *V C p* ad angulum *V C P*, adeoq; in data ratione, & propterea tempori proportionalis. Cum area tempori proportionalis ſit quam linea *C p* in plano immobili deſcribit, manifeſtum eſt quod corpus, cogente juſtæ quantitatis vi centripeta, revolvi poſſit una cum puncto *p* in curva illa linea quam punctum idem *p* ratione jam expoſita deſcribit in plano immobili. Fiat angulus *V C c* angulo *P C p*, & linea *C c* lineæ

Dnes už také pomalu zapomínáme na obtíže, s nimiž se Newton setkával při prosazování svých myšlenek. Musel vyvracet chybné názory uznávaných myslitelů, například Descartovu [3]) teorii éteru. Rozčilovaly ho neustálé invektivy Roberta Hookeho [4]), 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: *dékártovu*.
[4]) Čti: *húkeho*.

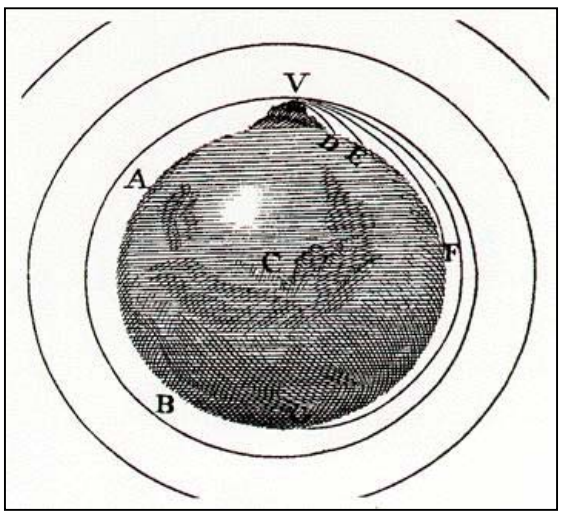
čítanka

# 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 srovnatelném s velikostí družice jen nepatrné. 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 řeknou 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.

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).

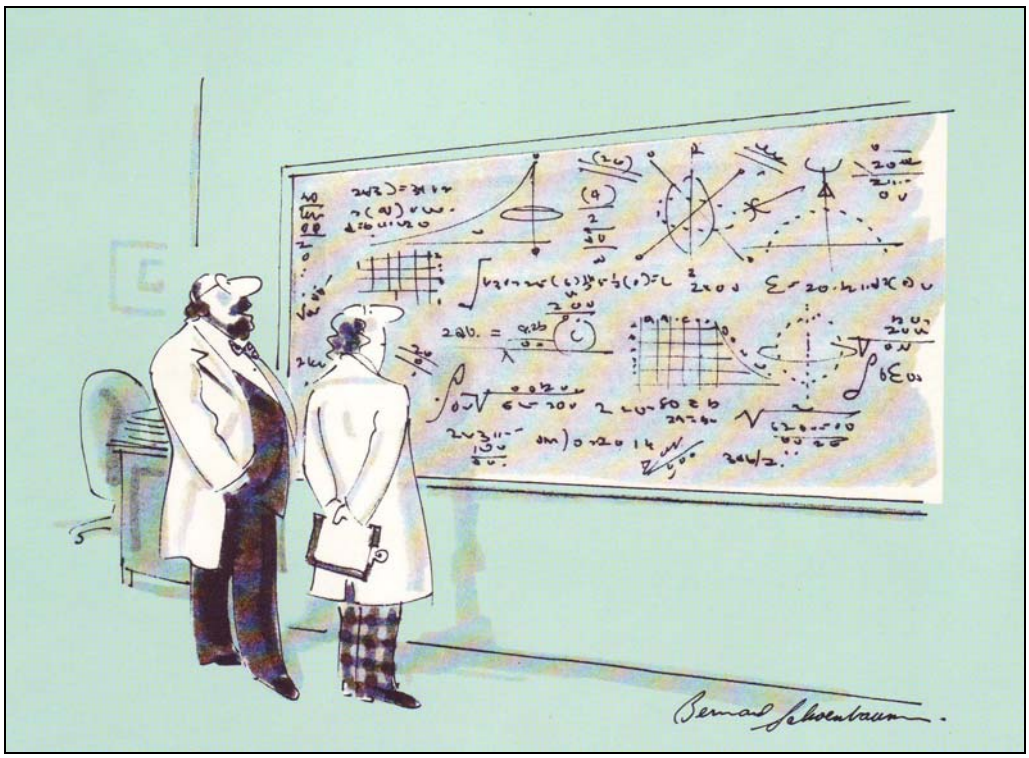
Při jisté mezní rychlosti poletí náboj tak rychle, že řekněme za jednu sekundu spadne k zemi právě o tolik metrů, o kolik se na vzdálenosti, kterou urazí za sekundu, zemský povrch zakřiví. Náboj bude tedy neustále padat „vedle“ Země, bude se volně pohybovat v téže výšce nad povrchem. Konkrétně pro družici, 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).

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?

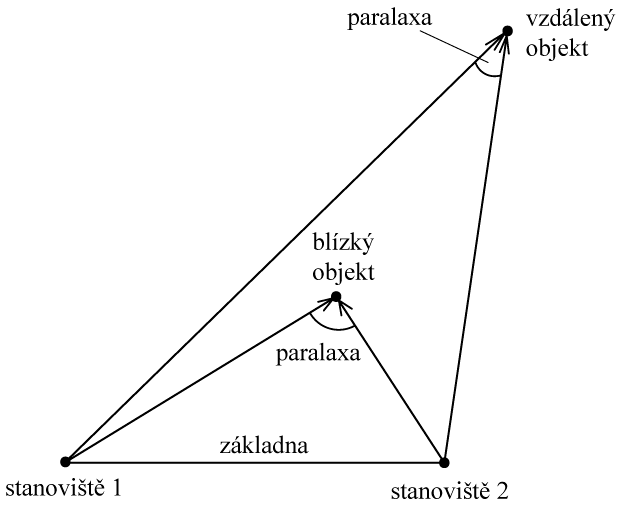
Otázka je jednoduchá, ale odpověď již tak snadná není. Musíme si vysvětlit, jak astronomové postupují, když se snaží zjistit vzdálenosti hvězd a dalších kosmických objektů. Je zajímavé, že v řadě případů používají stejné postupy jako „obyčejní lidé“ v každodenním životě.

**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.




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 – *radiolokace*. 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, jakýmže důmyslným postupem zjistili starověcí astronomové například to, že Mars je blíž než Jupiter? Vždyť o skutečných rozměrech sluneční soustavy neměli ani potuchy! Ve skutečnosti využili intuitivní představy, že *bližší* 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 nepřímo úměrná jejich vzdálenosti. *Prostorové* představy tedy opřeli o měření *časová*.

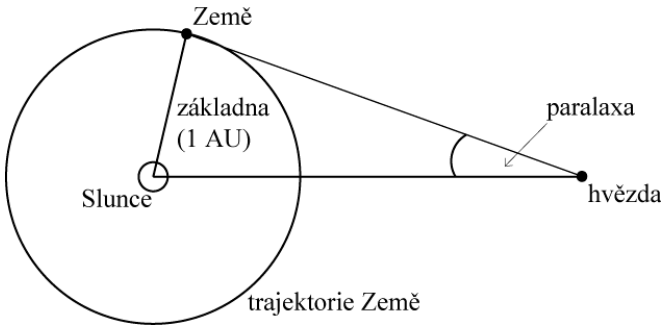
**Když kilometr nestačí**

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 kilometrů) [3]).

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 vzdáleností [5]).

Uveďme si trochu více čísel a převodních vztahů:

1 pc = 206 265 AU = $3{,}1 \cdot 10^{16}$ m
1 ly = 0,307 pc
1 pc = 3,26 ly




K definici paralaxy hvězd.

Mezi paralaxou $\pi$ 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.

### Když neměříme – alespoň odhadujeme

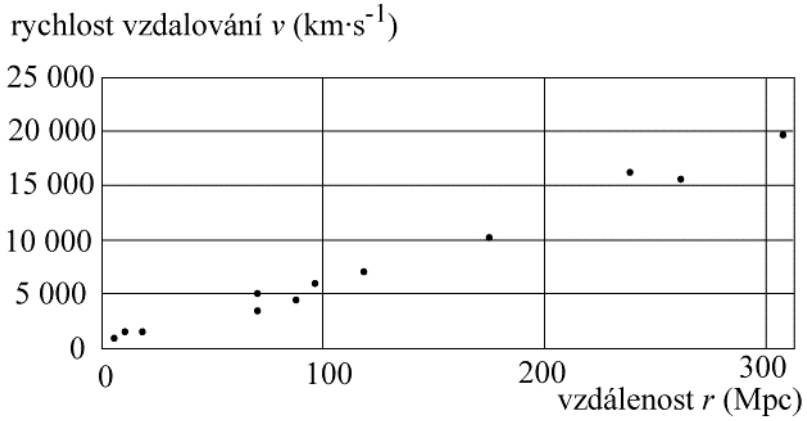
Přímá měření vzdáleností jsou zatím možná jen u blízkých hvězd. U vzdálenějších objektů jsme odkázáni pouze na uvážlivé *odhady* vzdáleností. Můžeme například předpokládat, že méně jasné hvězdy jsou od nás dál než hvězdy jasnější. Jenže pozor! Zde existují dva možné zdroje chyb. První: mlčky předpokládáme, 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 hvězd [6]). 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 vztah [7])

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.

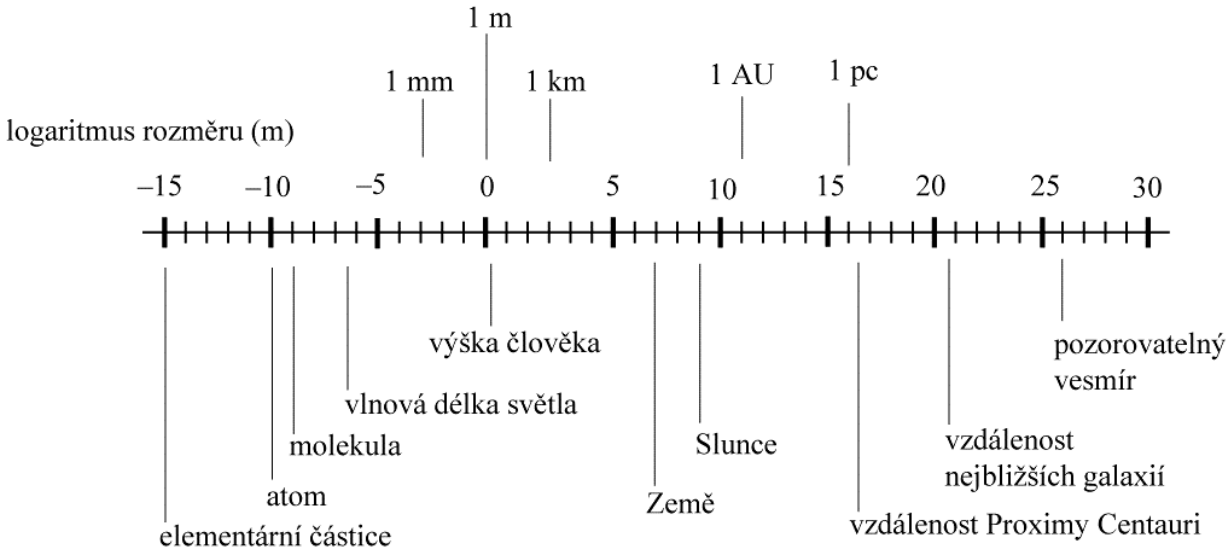


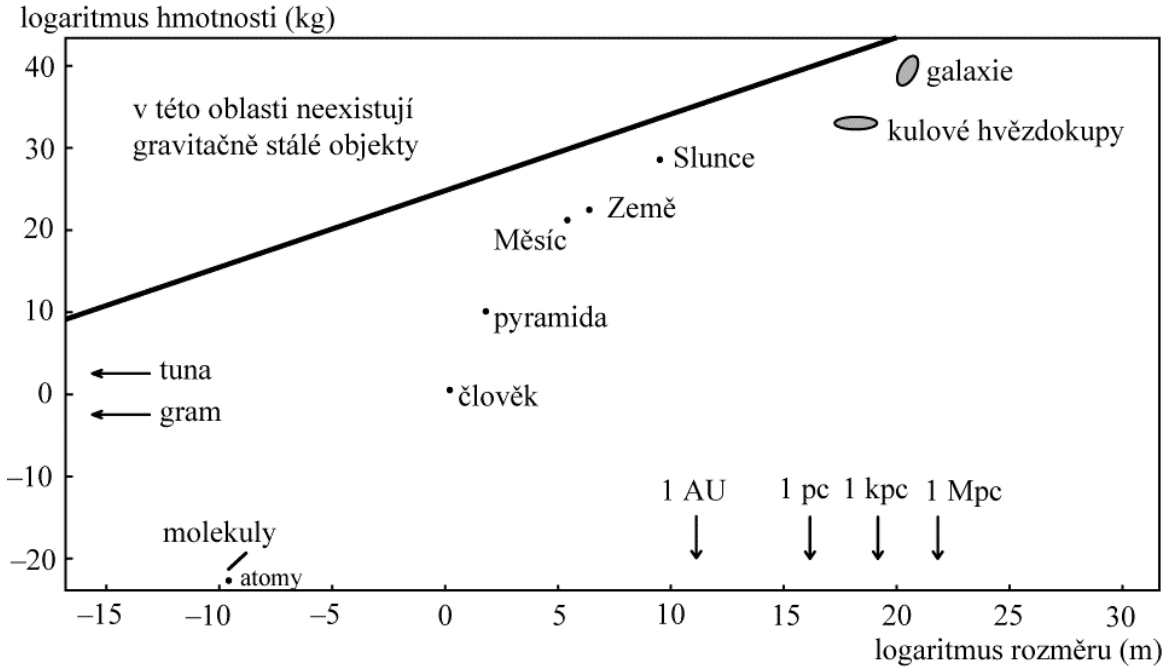

Hubblův vztah.

[6]) Slovo *extinkce* pochází z latinského *extinctio* – zničení, zánik.
[7]) Čti: *hablův*.

***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 × 20 × 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 Hubblovu konstantu? (To je snadná otázka – vyjděte z její definice.) a) Mpc·km·s; b) Mpc·km·$s^{-1}$; c) km·$s^{-1}$·$Mpc^{-1}$; d) Mpc/km/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?

**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 $\alpha$ 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 $\alpha$ Centauri (v rovníkové souřadnicové soustavě), když Cen má na naší hvězdné obloze rektascenzi $\alpha = 14^h\ 40^m$ a deklinaci $\delta = -61°$? 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?

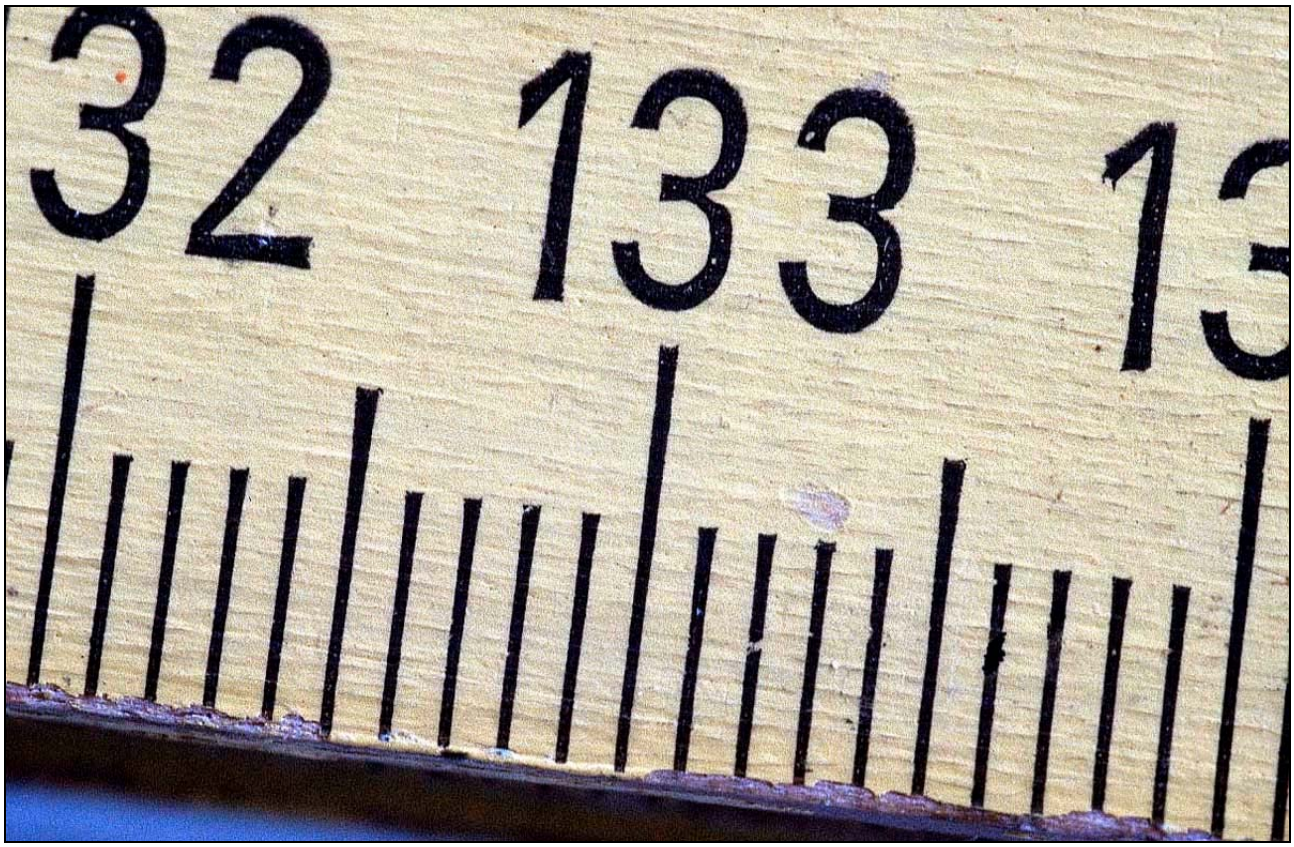
# 2. Vše je v pohybu

## 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)



čítanka

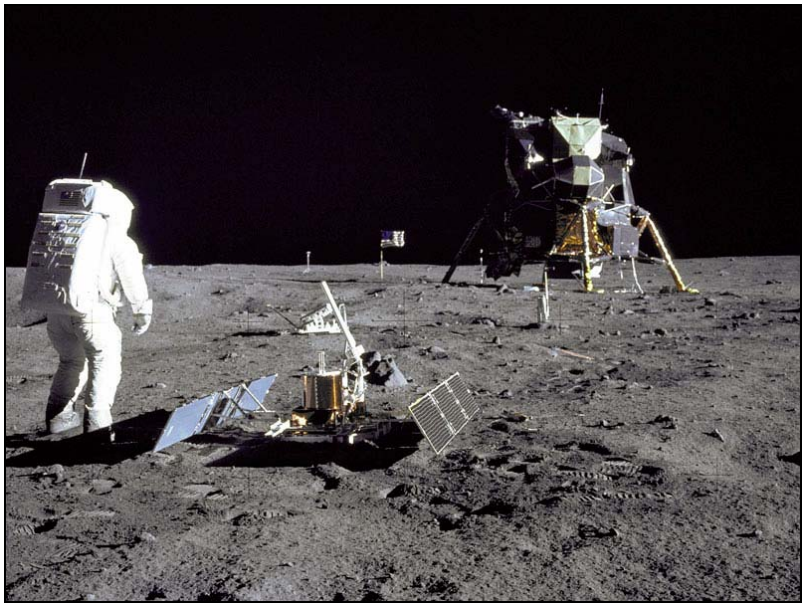
# Norman Mailer: Nádherná pustina

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 částečkami 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 blíž 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.

*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; poznačte 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).

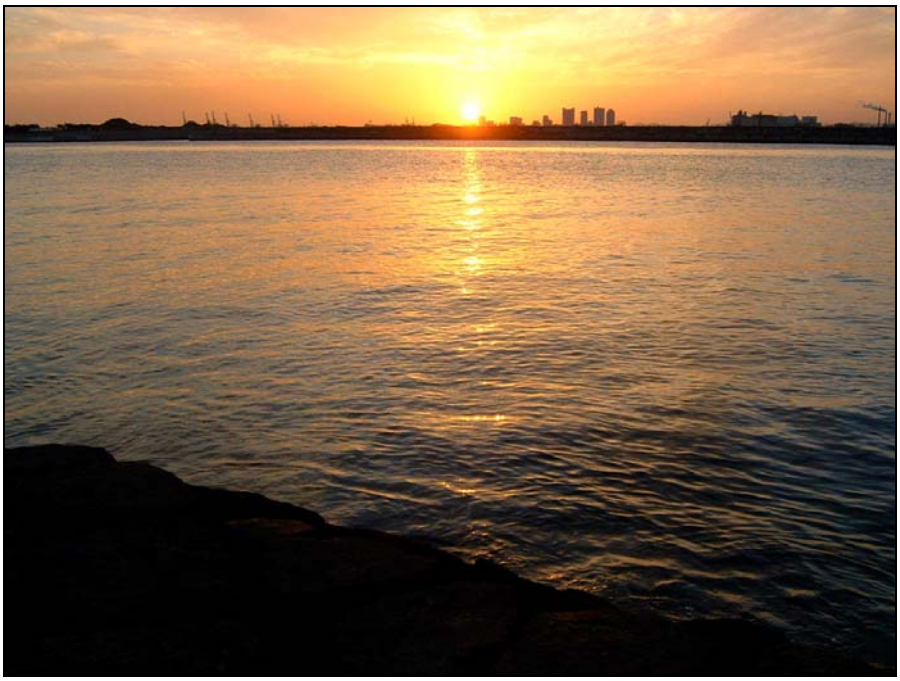
3. Svítí-li krátce po západu Slunce v místech, kde Slunce právě zapadá, nějaká jasná „hvězda“, je to určitě Venuše, protože jen tato planeta může být Večernicí (a nebo obdobně ráno Jitřenkou).

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.

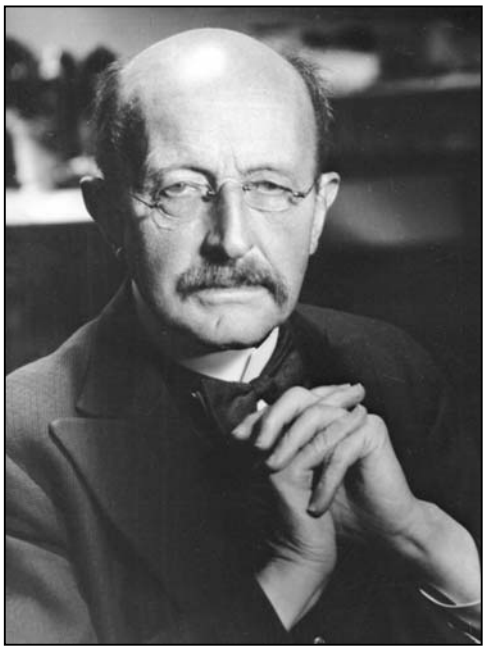


I když tento pohled na zapadající Slunce má roli spíše ilustrativní, je také připomenutím faktu, že za všechny naše pohledy do okolí vděčíme fotonům, dopadajícím na sítnici našich očí.

### Vlna nebo částice?

Nechci, aby se z našeho výkladu vytratila astronomie, ale fyzice se v této části opravdu nevyhneme. Nejdříve si povězme, 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 bezesporný.



*(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).

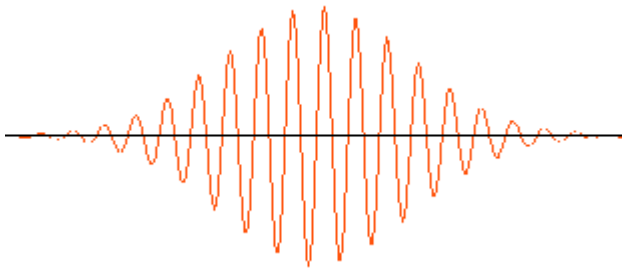
Jak vidíte, záření má povahu jak vlnovou, tak i částicovou, takže si je můžeme představit třeba jako vlnové klubko. Musíme ale připustit, že je to jen náš pohled (a nedokonalý pohled), který nám pomáhá pochopit, co je elektromagnetické záření. Představy podle „zdravého rozumu“ tu selhávají, protože s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

Uveďme si dva základní vztahy pro elektromagnetické záření, které svazují kmitočet $\nu$ a vlnovou délku $\lambda$, resp. kmitočet $\nu$ 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 $km \cdot s^{-1}$), h je Planckova konstanta ($h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J·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.



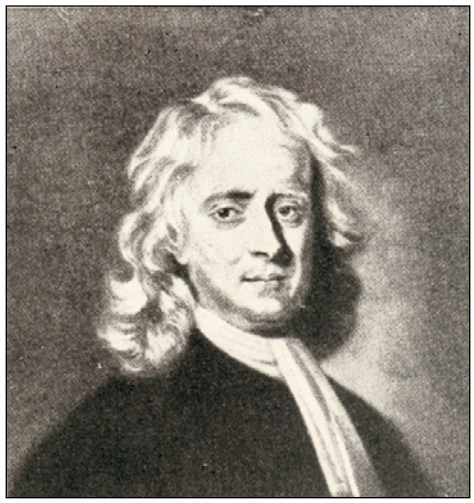
Představa vlnového klubka.

čítanka

# Rudolf Kippenhahn: Huygens, nebo Newton?

Newton si představoval světlo jako proud malých částeček – korpuskulí, které letí přímočaře prostorem a v oku vyvolávají světelný vjem. Jeho současník Christian Huygens [1]) naproti tomu věřil, že světlo je kmitání všepronikajícího média, něco jako vlny na vodní hladině. Dnes víme, že pravdu měli oba. Světlo se někdy chová jako složené z částeček, 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?



Isaac Newton

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.

[1]) Čti: *hejchens*.

# 3. Naše skleněné a rádiové oči

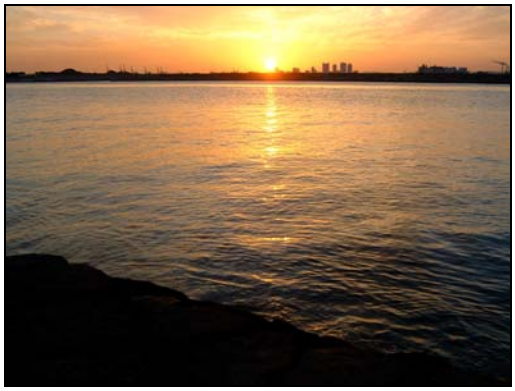
Christian Huygens

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 hroutící 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? Přijde 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 chlouba:*
*kdo si myslí, že dost umí,*
*začíná být trouba.*

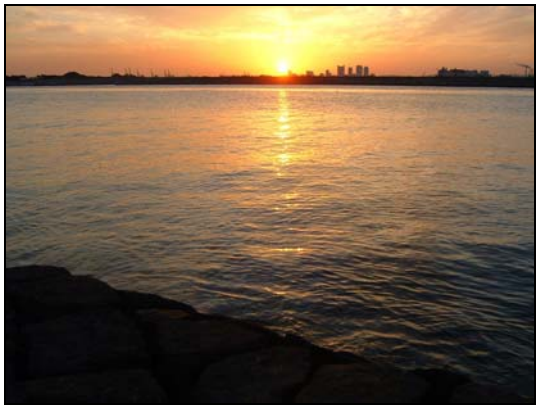
Friedrich von Logau, básník (1604 – 1655),
překlad Karel Havlíček Borovský

## 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.



úloha k zamyšlení

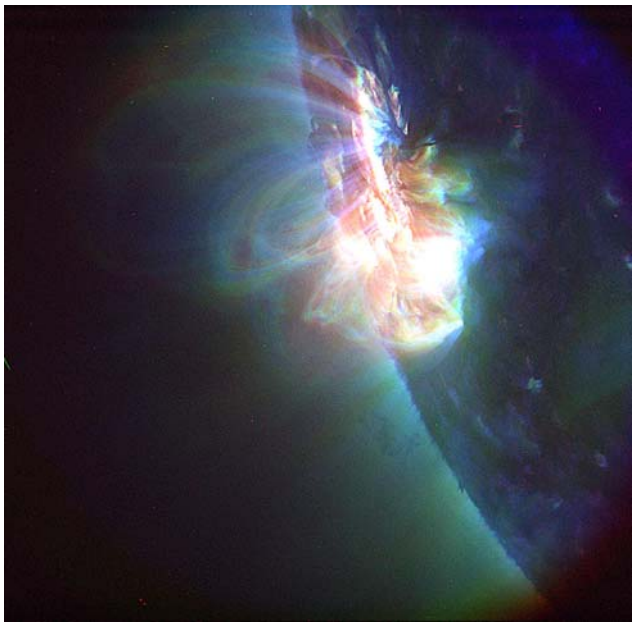
# Sluneční fotony

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

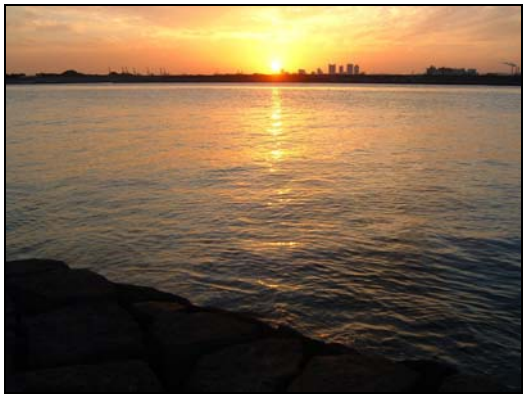
a) Předpokládejme, že se sluneční záření skládá z fotonů výhradně o vlnové délce $\lambda$ = 550 nm. Kolik fotonů dopadá každou sekundu na 1 $m^2$ plochy kolmé ke směru šíření záření, umístěné na té části zeměkoule, která je přivrácena ke Slunci?

b) Střední vzdálenost Země od Slunce činí $r$ = 1 AU. Jaký je výkon Slunce (ve wattech) 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.



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.

# 3.2. 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.

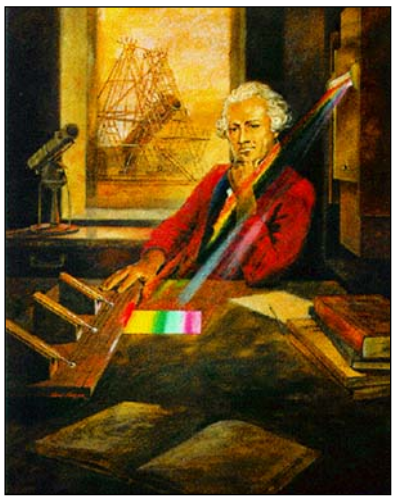
[1]) Viditelné záření je světlo v pravém slova smyslu. V souvislosti s ním poznamenejme, že se v astronomii u řady veličin používá přídavné jméno *vizuální* (např. vizuální dvojhvězda). Je to z latinského *visus*, což znamená pohled, oči, vidění. Rozlišujme však slova *vizuální* a *optický*; to druhé 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.

| *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.

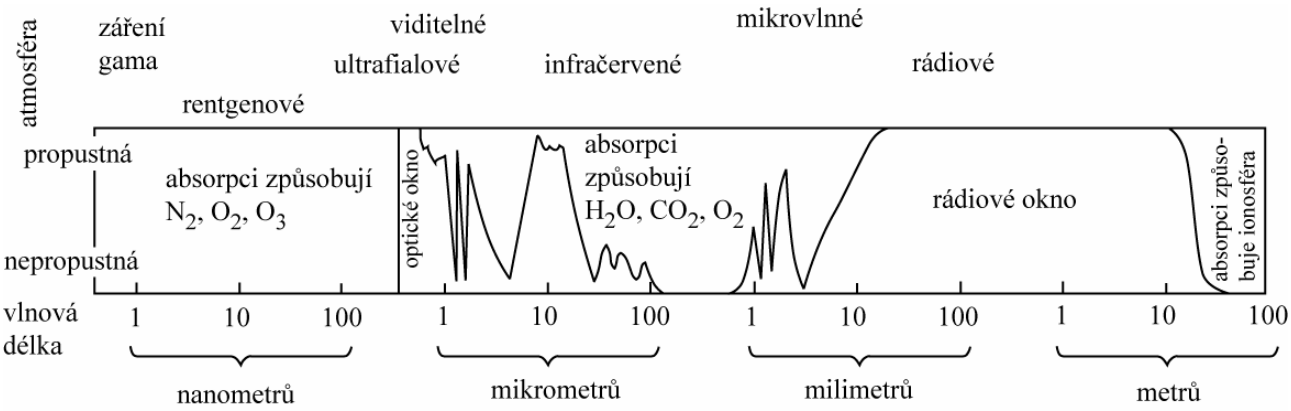
Rádiové záření, tak důležitý zdroj informací pro soudobou astrofyziku, jako první experimentálně studoval roku 1887 Heinrich Hertz. Bylo mu teprve 30 let, když se mu podařilo generovat záření o vlnové délce od 10 do 100 metrů pomocí jiskrového výboje mezi elektricky nabitou a uzemněnou koulí. Mimozemské 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.



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 mikrovlnného 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 – )

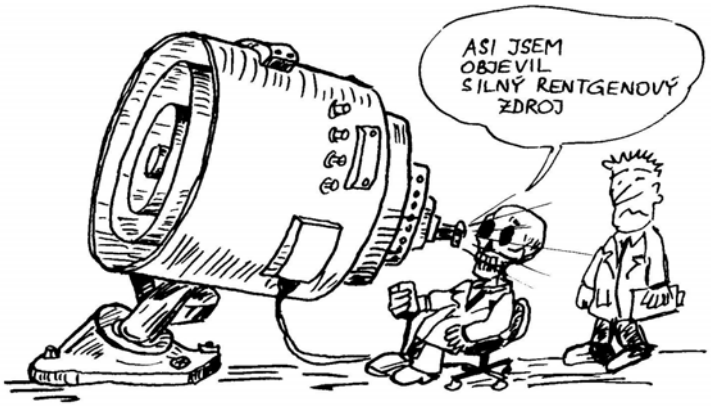
## otázky a příklady

**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. Ängströmovi. U nás tato jednotka již není povolena, nicméně ve starší literatuře se s ní můžete setkat. Platí, že 1 Å = $10^{-10}$ 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.



**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.

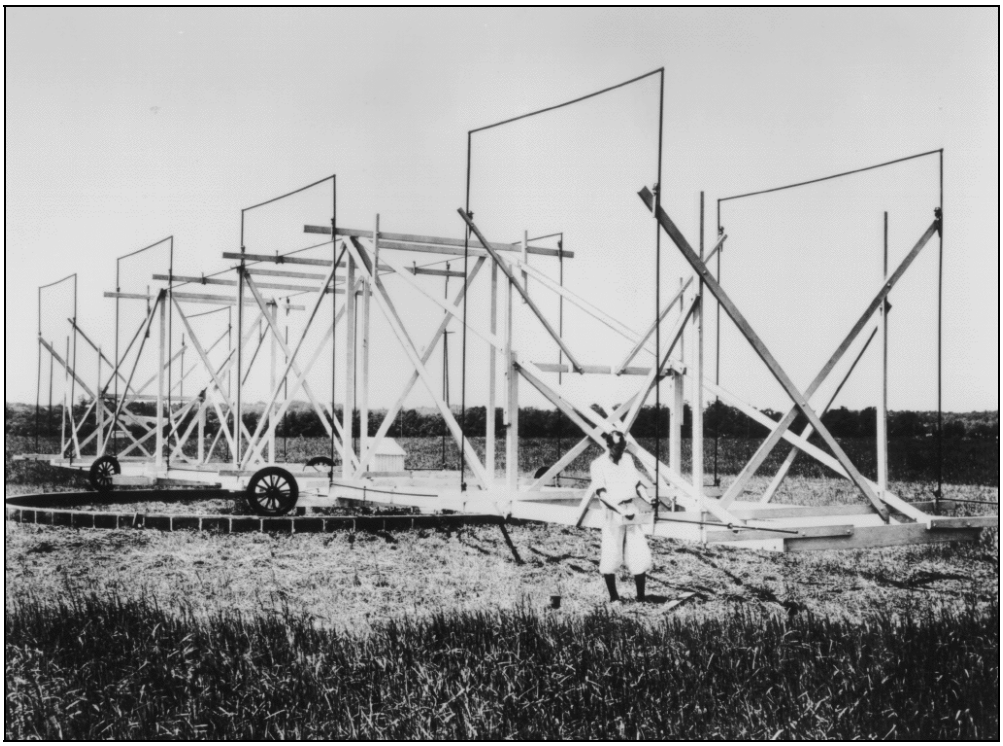
**Otázka 3.2.6.** Proč ke sledování ultrafialového záření z vesmíru je zapotřebí družic nebo výškových raket, zatímco v případě infračerveného záření stačí pozorovat třeba jen z balonů?

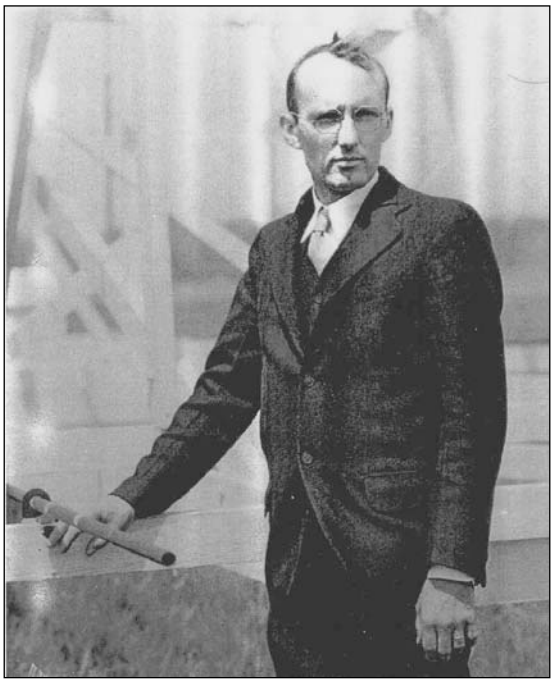
medailon

# 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 prkýnky 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.





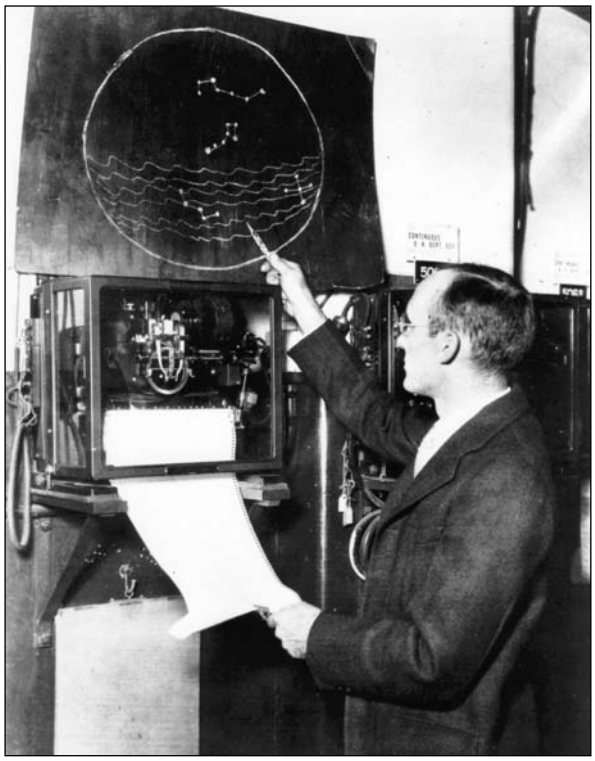
Úkol, který Jansky řešil, můžeme vyjádřit jednou větou: měl zjistit zdroj rušení transatlantského rádiového spojení, které vadilo zákazníkům a Bellově společnosti tudíž kazilo obchody. „Nemůžeme chtít po zákazníkovi, aby platil 75 dolarů za tříminutový hovor, do kterého mu neustále něco syčí," prohlásil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

Monstrum, přezdívané Janského kolegy „kolotoč", se dooopravdy 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 zesílení 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 Střelce. 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 měsíců, 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.

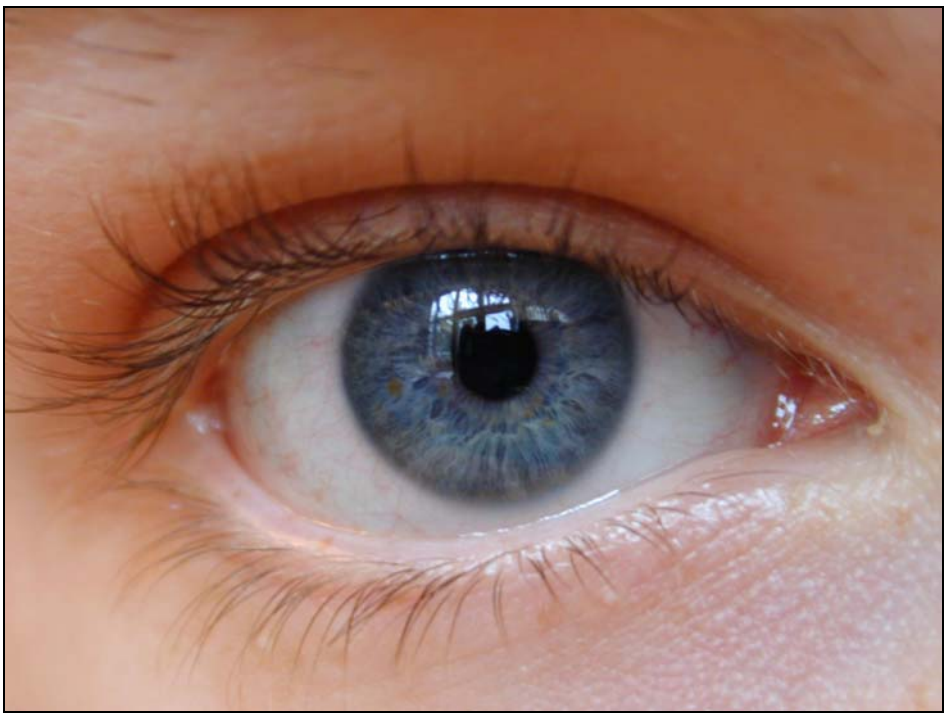
Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (příběh „Objev, který přišel příliš brzy" z připravované knihy *Zlaté století astronomie*, Aventinum Praha).

# 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 *zorničká* nebo *panenka* [1]).



Za duhovkou je *oční čočka*, která má dvojvypuklý 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.

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 tmu*, 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).

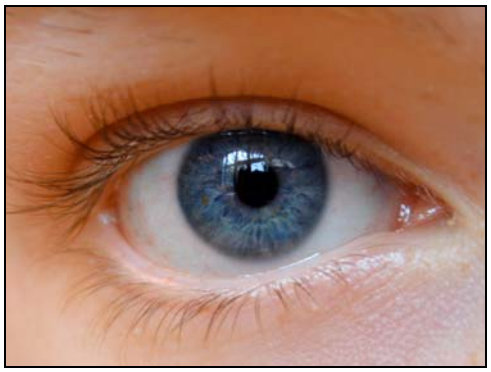
Tyčinky v lidském oku.

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 vitaminu 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 tmu.

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



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

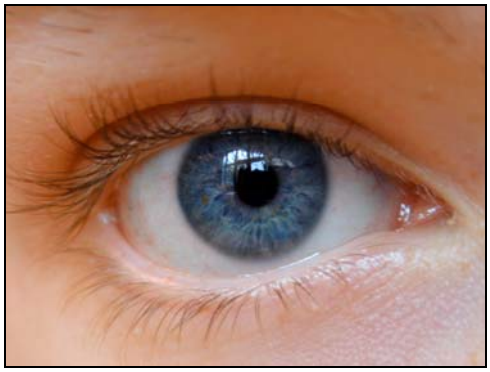
Za první a současně zcela vyčerpávající vysvětlení hvězdicovitého vzhledu hvězd vděčíme německému učenci Hermannu von Helmholtzovi, který se mimo jiné zabýval i fyzikou našich smyslů. Ve svém pojednání *Úspěchy teorie zraku* píše: „Obrazy světelných bodů, které v oku vznikají, jsou nepravidelně hvězdicovité. 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 kšticí 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 zřítelnici 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 záludných 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)

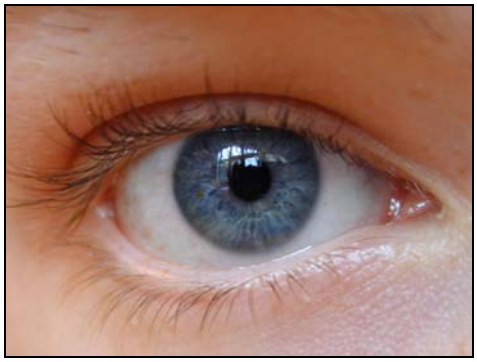
## otázky a příklady

**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

**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 pouhýma 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-

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 pouhýma 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.

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?**

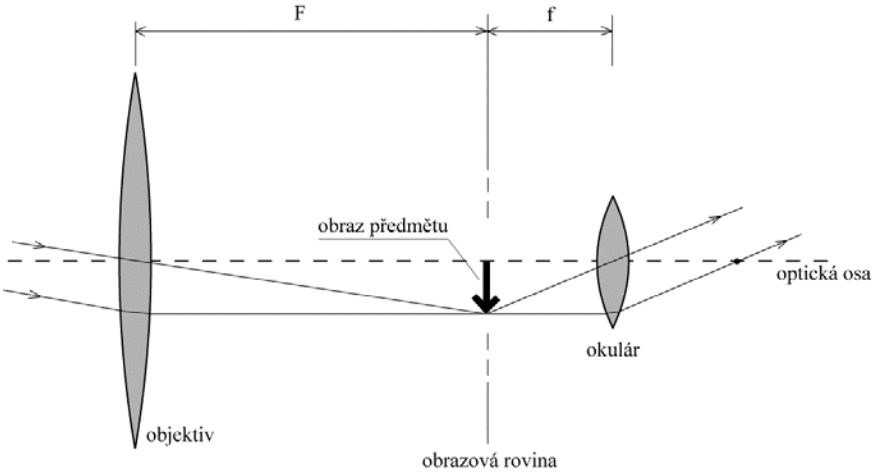
Astronomické dalekohledy používáme ze dvou důvodů. Jednak nám „přibližují“ vzdálené předměty, přesněji řečeno *zvětšují jejich úhlové rozměry*, takže pomocí dalekohledu rozlišíme na sledovaném objektu, například na Měsíci, více detailů než při pohledu pouhýma očima. Druhý důvod jejich využívání můžeme 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 pouhýma očima vůbec nejsou vidět.

Sběračem světla nemusí být jen tzv. *spojná čočka*, jak jsme zvyklí vídat 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 spojné čočky, nazýváme někdy též dalekohledem *Keplerovým*. Johannes Kepler roku 1611 ve spise *Dioptrica* ukázal, že dalekohled lze sestrojit 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 nesestrojil a při svých pozorováních ani nepoužíval. Do praxe Keplerův dalekohled zavedli astronomové až o několik let později.

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

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

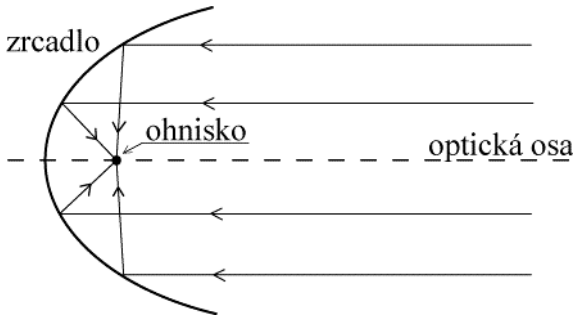
(pro malé úhly můžeme funkci tangens nahradit přímo velikostí úhlu). Úhlové zvětšení $z$ dalekohledu je pak rovno

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

tedy

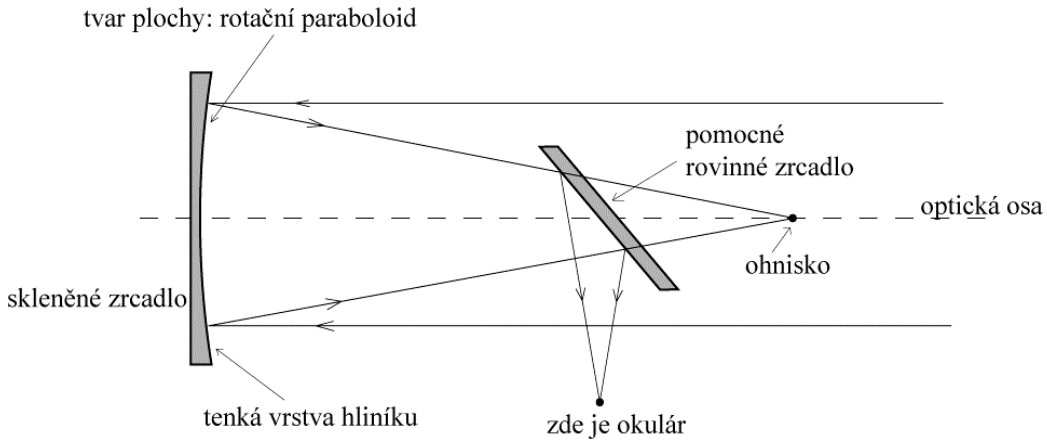
$$z = f_1/f_2.$$

Soustředění rovnoběžných paprsků do jednoho bodu – ohniska – lze provést nejen spojnou čočkou, ale i dutým zrcadlem, jehož odrazná plocha má tvar rotačního paraboloidu [2]). 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 (*refraktory*) 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.

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

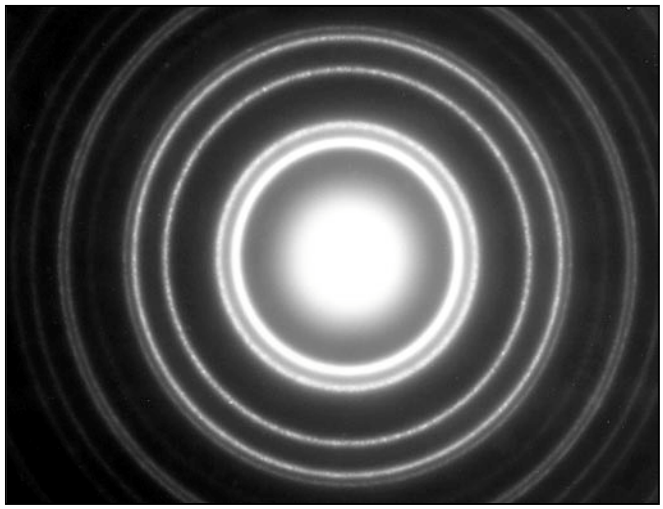
Jedním ze základních úkolů dalekohledu je zvětšování úhlových rozměrů objektů. Oceníme to při sledování Měsíce či planet. Úhlové zvětšení $z$ je rovno poměru ohniskových vzdáleností objektivu $F$ a okuláru $f$: $z = F/f$.

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 neprojevily 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.



Ohybový jev při pozorování osamělé hvězdy.

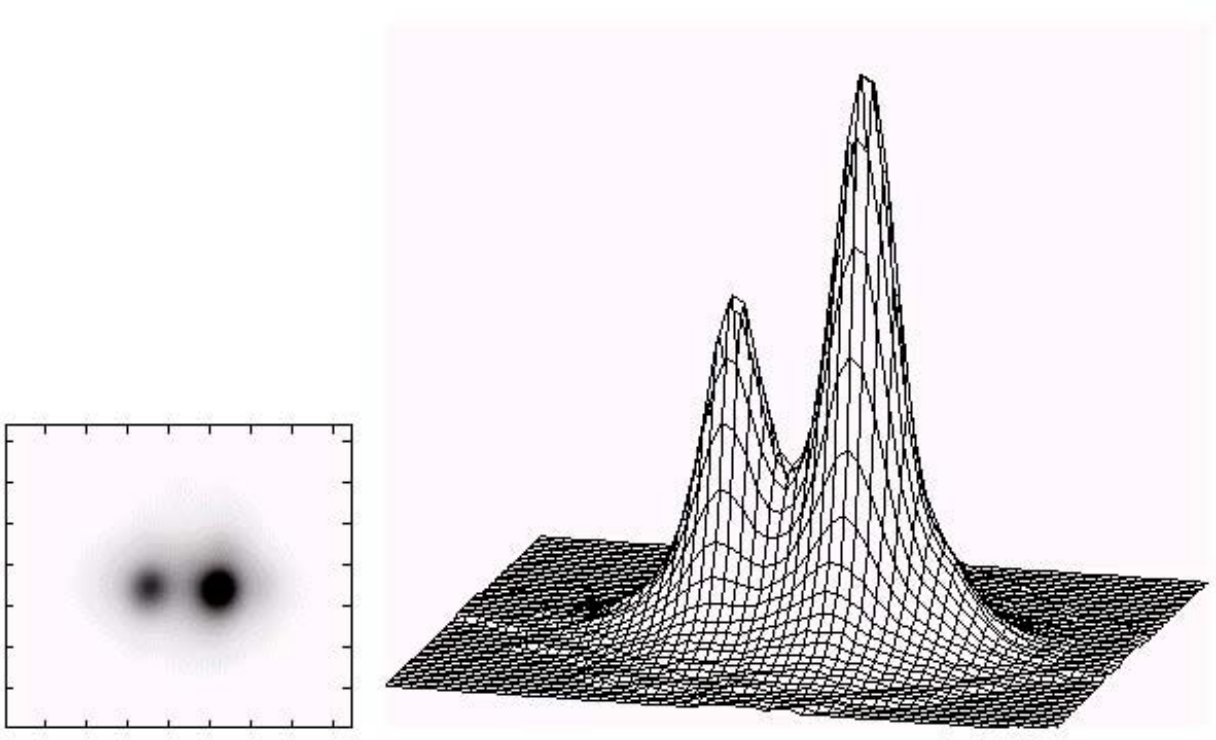
Uveďme jej nejdříve slovně: rozlišovací schopnost je tím lepší, čím větší je průměr objektivu a čím je kratší vlnová délka záření.

Nyní si uvedeme matematickou podobu vztahu, který udává teoretickou rozlišovací schopnost dalekohledu (ta skutečná závisí též na kvalitě konkrétního dalekohledu, pozorovacích podmínkách

apod., a je v každém případě horší než hodnota teoretická). Z vlnové optiky plyne, že rozlišíme dva zdroje vzdálené od sebe o úhel $\alpha$

$$\alpha = 1{,}22\ \lambda/D,$$

kde $\alpha$ je úhel vyjádřený v radiánech, $\lambda$ 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 $\lambda$ dosadíme hodnotu 555 nm (na toto záření je lidské oko nejcitlivější), dostaneme pro rozlišovací schopnost dalekohledu výraz $\alpha = 140/D$. Rozlišovací schopnost $\alpha$ vychází v úhlových vteřinách.

**Světelnost dalekohledu**

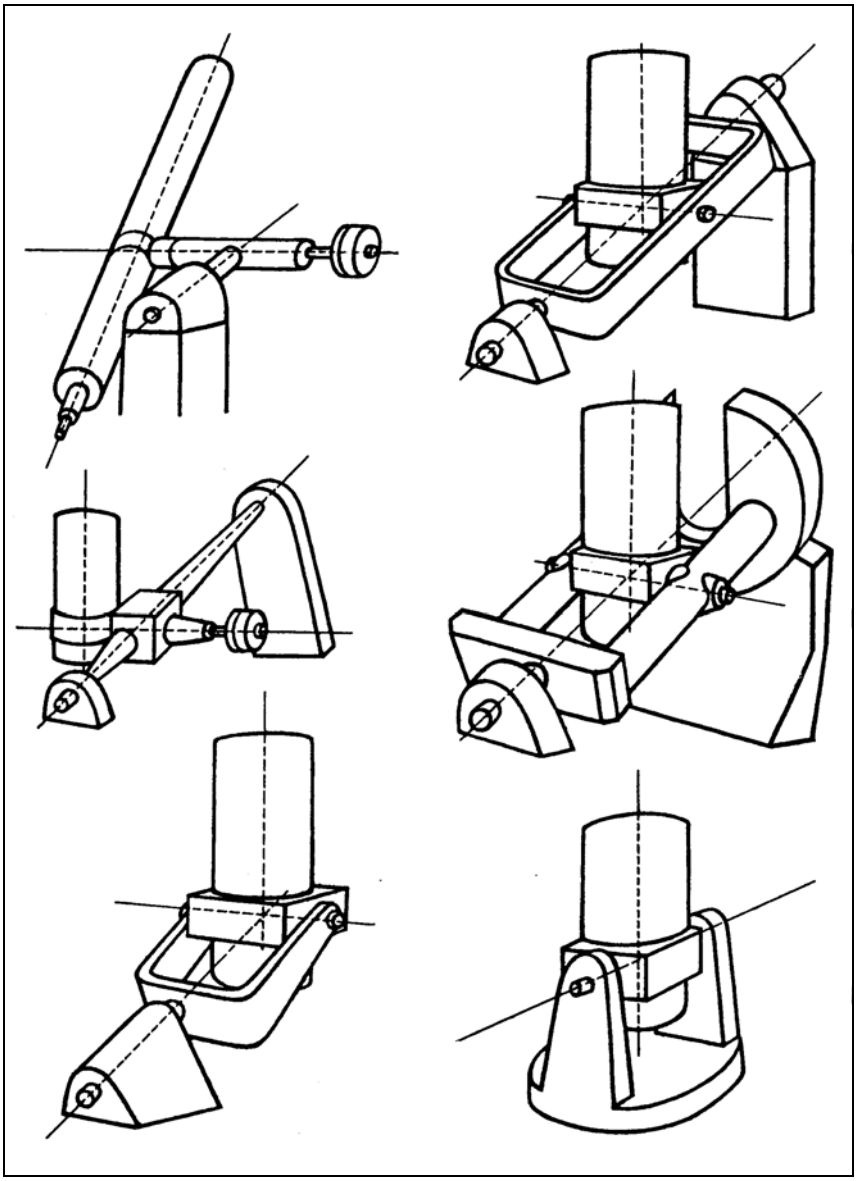
Jedná se o poměr průměru objektivu $D$ k jeho ohniskové vzdálenosti $f$. O světelnostech nad asi 1:5 (tedy např. 1:4, 1:3) hovoříme jako o světelnostech velkých.

**Montáže dalekohledů**

Záhy po vynálezu dalekohledu vznikala doslova monstra – několik desítek metrů dlouhé teleskopy, jimiž se pozorovalo jen s největším vypětím sil. Dochovaly se zkazky 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-

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 *deklinační osa*).



Různé typy montáží astronomických dalekohledů. Vždy jsou vyznačeny polární a deklinační 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.

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.

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 vteřin [4]), 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: *sáing* (bohužel žádný český výraz se zatím neujal).
[4]) Teoretická rozlišovací schopnost dalekohledu bývá o řád lepší, jak si snadno spočítáte.

**Největší mezi velkými**

Největšími astronomickými dalekohledy jsou vesměs reflektory. Zde jsou seřazeny podle průměru hlavního zrcadla.

| *Stanoviště observatoře (komu patří dalekohled)* | *Průměr zrcadla* |
|---|---|
| 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 |
| *největší dalekohledy světa ve stavbě:* | |
| 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 zakrývané 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, spatřím 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 zpaměti, jako tento: Chcete fotografovat oblohu fotoaparátem 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?

**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?

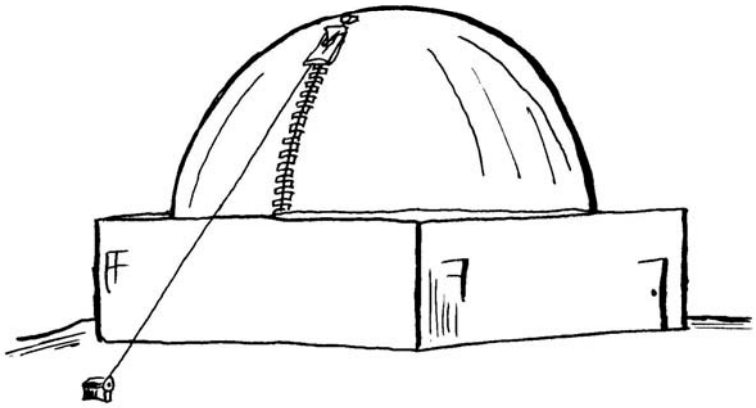
**Otázka 3.4.8.** Ověřte si, že po dosazení vlnové délky $\lambda = 555$ nm do obecného vztahu pro rozlišovací schopnost dalekohledu skutečně dostanete uvedený vztah pro $\alpha$ v úhlových vteřinách.

**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 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 nezřídka 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, kmitočet záření; c) kmitočet záření, průměr dalekohledu, zvětšení.

**Otázka 3.4.15.** Okulár u dalekohledu s ohniskovou vzdáleností 2 m dává zvětšení 60. Jakého zvětšení dosáhneme s týmž okulárem u dalekohledu, jehož ohnisková vzdálenost činí 3000 mm? a) stejného zvětšení; b) zvětšení 40; c) zvětšení 90.

**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 líčeních 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. Tísnili se v ulicích, jako se tísní i dnes.

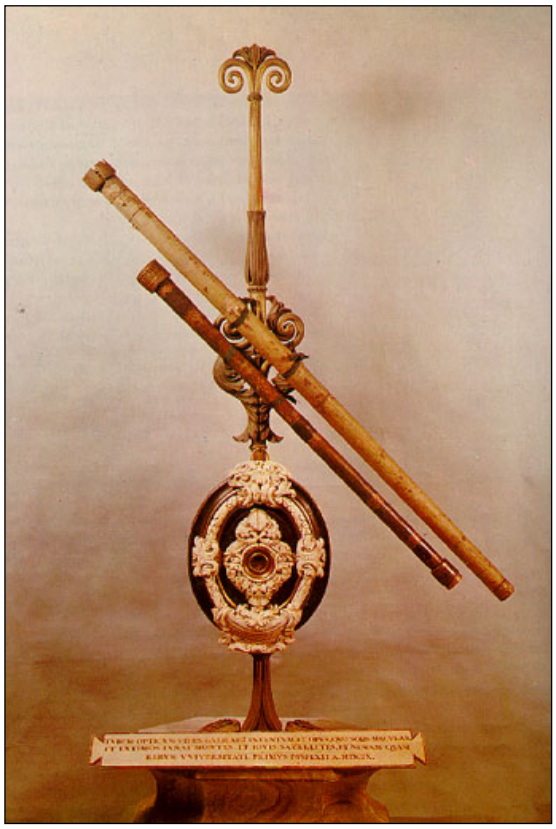
Benátčané byli praktičtí, věcní lidé. Galileo se věnoval intenzivně základním vědám v Pise. Avšak Benátčané, aspoň podle mého názoru, si ho najali jako profesora matematiky v Padově hlavně pro jeho nadání k praktickým vynálezům. Některé z jeho přístrojů se dochovaly v historické sbírce *Accademia Cimento* [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 zpeněžili. 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 čimento*.

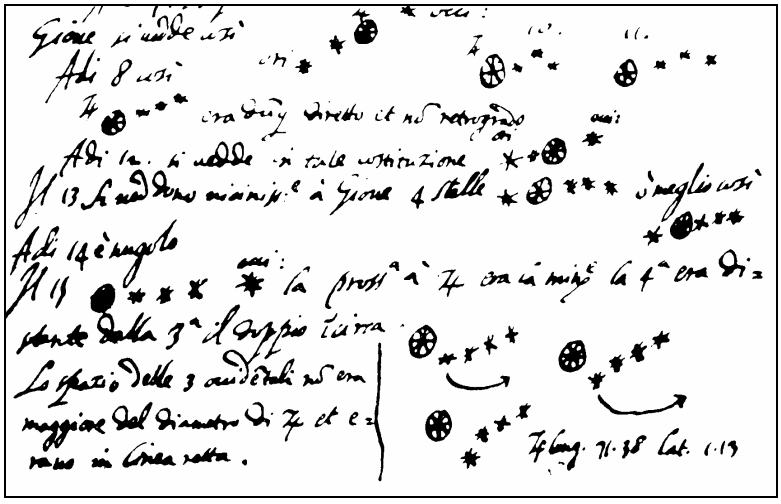
zvětšoval asi trojnásobně, tedy přibližně tak, jako dnes lepší operní kukátko. Než se však vydal na benátský Campanile, zvýšil zvětšení na osmi až desetinásobek. To už byl skutečný dalekohled. Z vrcholu Campanilu, odkud je rozhled na třicet kilometrů, jím bylo vidět nejen lodi plující na obzoru, ale 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 vyjíti i vícekráte 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?

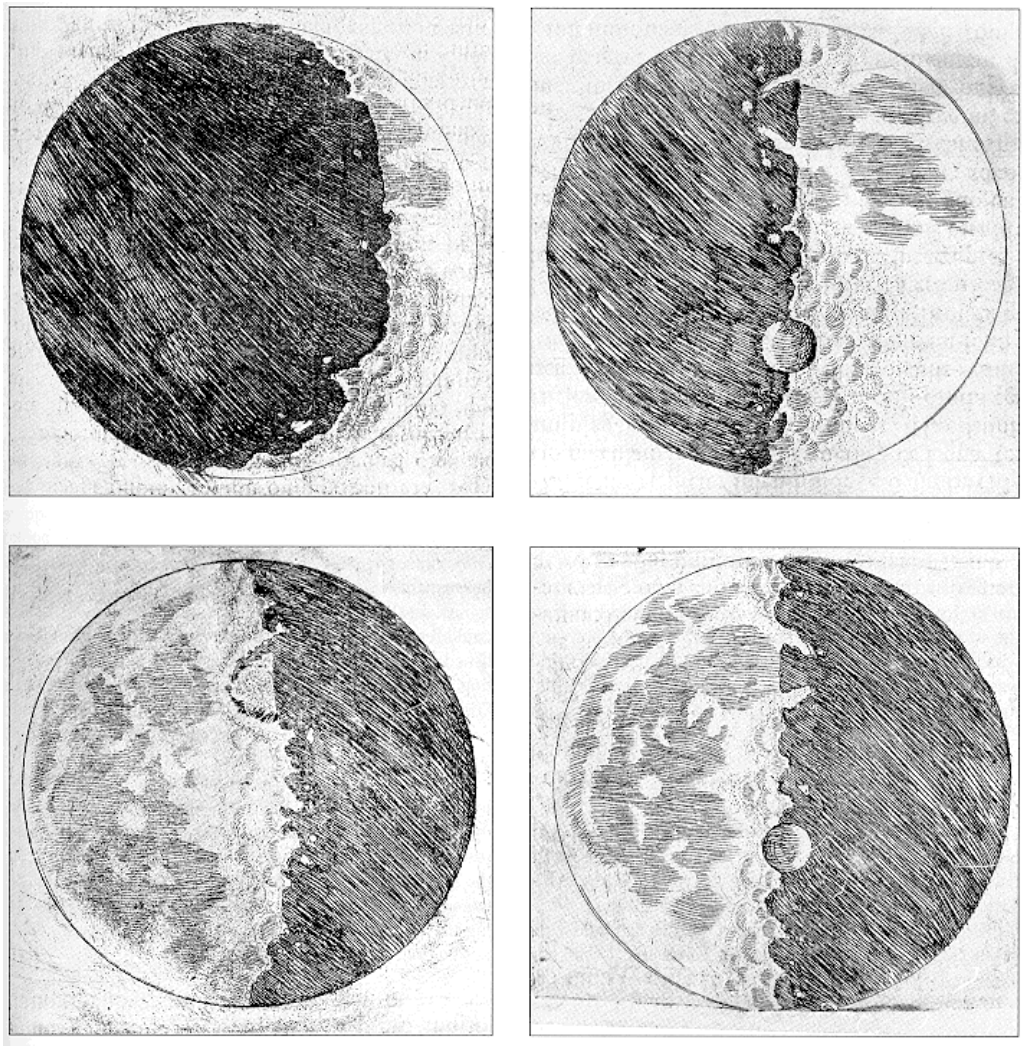


# 3. Naše skleněné a rádiové oči

*Uviděl jsem myriády hvězd, dříve nikdy nespatřených, 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 nespatřil.*

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, patři 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 údolími.*



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 Ptolemaiův systém přestal být upotřebitelný. Koperníkova 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

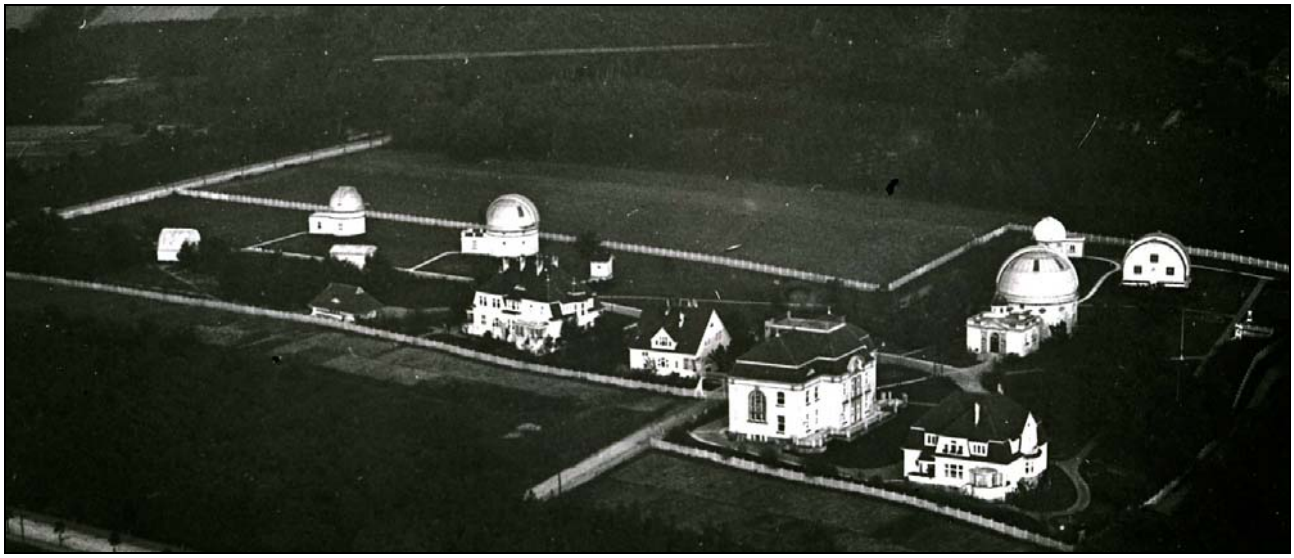
V roce 1935 zemřel jeden z největších astronomů-amatérů, optik hamburské hvězdárny Bernhard Schmidt. V té době jen málo lidí tušilo, jaký přínos astronomii se zrodil v hlavě tohoto výstředního muže, který nemiloval pravidelnost pracovního dne, který nedbal o svůj zevnějšek právě tak jako o svoje zdraví. 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. Zmrzačení 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 neskonalé 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-

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.

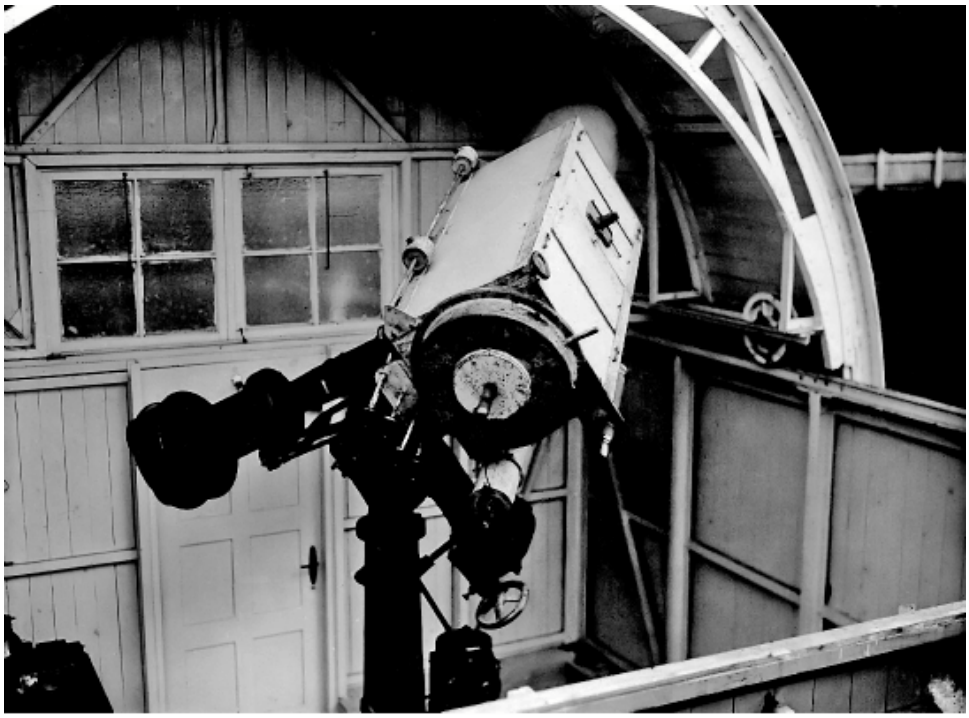
Úkol, který měli před sebou fotografové, bylo mapování hvězdné oblohy. Použití reflektoru k tomuto účelu bylo nemyslitelné již proto, že mapování by trvalo několik tisíc let. Schmidt o úkolu dlouho přemítal, ale stále nenacházel řešení. Až jednoho večera, kdy odpočíval na palubě lodi vezoucí jej a kolegy 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-

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.

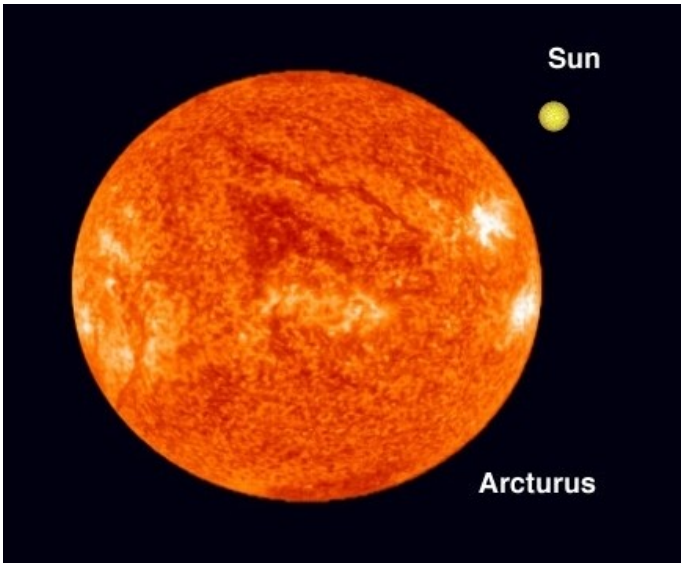


Schmidtova komora na hvězdárně v Hamburku – Bergedorfu.

úloha k zamyšlení

# Zorné pole dalekohledu

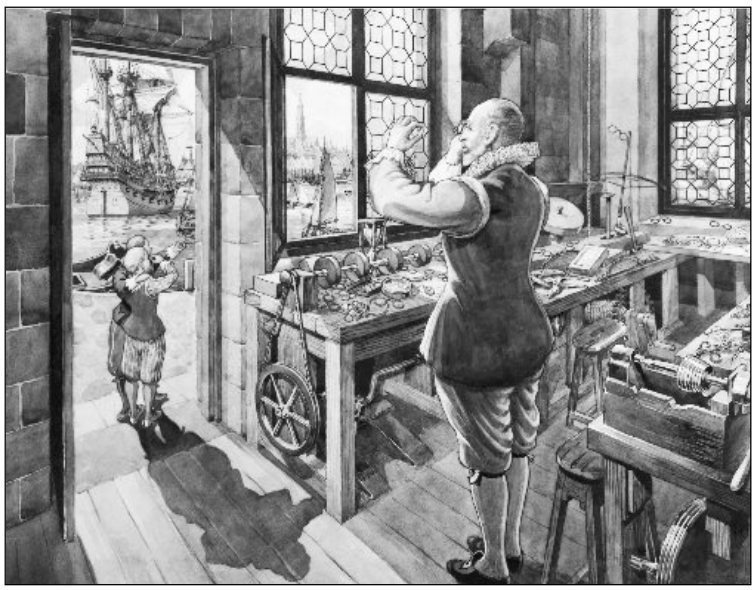
Hvězda α Bootis, známá jako Arcturus, prošla zorným polem nehybného dalekohledu podél průměru (tedy středem zorného pole) za dobu $t$ = 120 s. Jaký je úhlový průměr $d$ zorného pole tohoto dalekohledu? (Máte již pohromadě všechny potřebné informace k výpočtu?) Považujete tuto metodu zjišťování velikosti zorného pole dalekohledu za dostatečně přesnou? (Když ano, zdůvodněte proč, když nepovažujete, pokuste se navrhnout jinou.)



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 učence, 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 sestrojen, vymyslel a zhotovil přístroj podobný. Jeho dalekohled, který se zcela vyrovnal holandskému, zvětšoval asi troj-

[1]) Čti: *liprshej*.

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 vskutku nevídané věci: měsíční povrch není ani rovný ani hladký, ale naopak hrubý, nerovný, jako povrch Země samotné, s mnoha vyvýšeninami, rozeklanými hlubokými stržemi a údolími. 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 neostré, ale přesto byl jejich tvůrce fascinován záplavou hvězd, které dosud nikdo nespatřil. 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

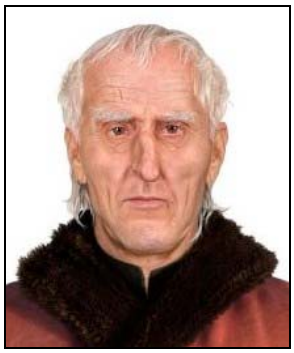
*V divočině kolem vysokohorské observatoře na Kitt Peaku v Arizoně je živá příroda zastoupena především skunky. Jedné noci se jistému skunkovi podařilo nějak proklouznout do kuchyně. Kuchař ho stačil zahnat do komory na smetáky a zavřel dveře. Další hodinu se pak několik světových astronomických kapacit 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.*

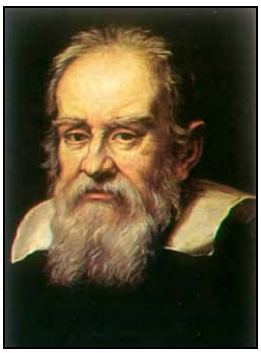
G. S. Mumford (*Kitt Peak National Observatory Contributions* č. 551, 1970). Překlad: Jiří Grygar.

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 Hubblův 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 Hubblova 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.

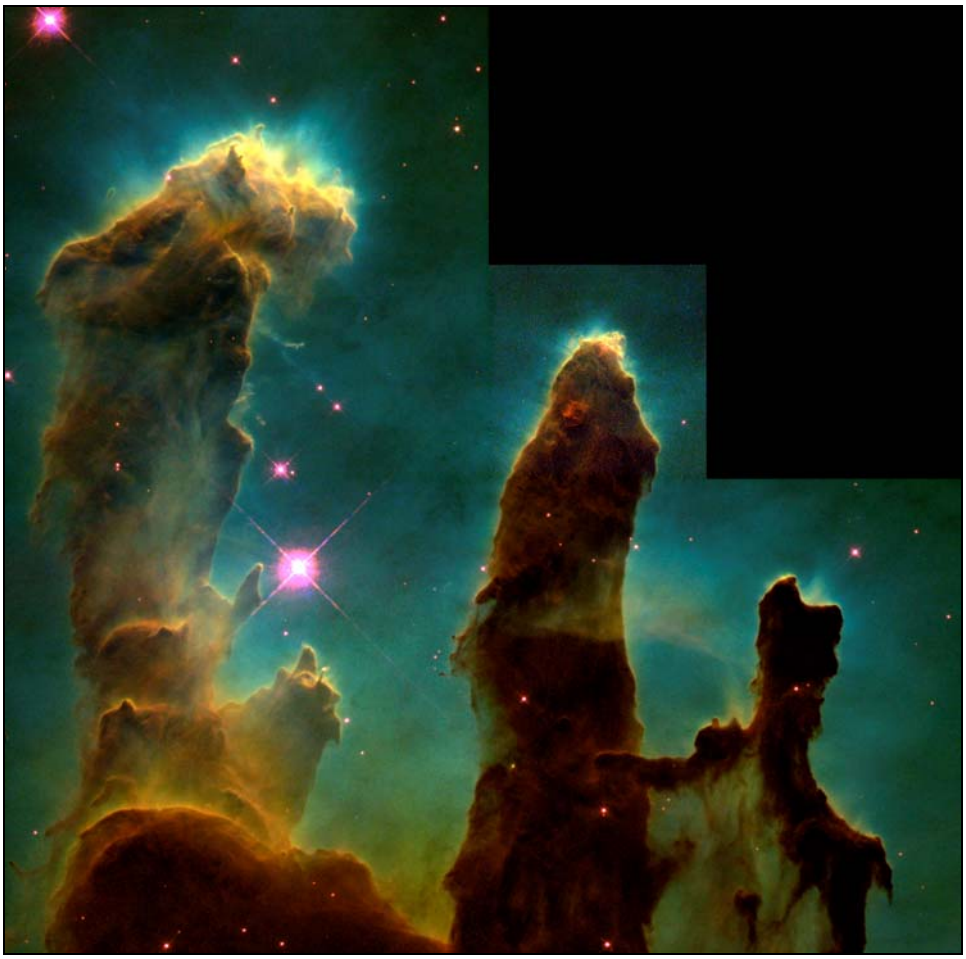
[1]) Čti: *lajmen spicer*.
[2]) Čti: *čelindže(r)*.

**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 Hubblova 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 observatoří světa.



Nejznámější snímek, pořízený až dosud Hubblovým 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 Hubblův 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: Comptonova [4]) observatoř pro sledování objektů v oboru záření gama, rentgenová observatoř Chandra [5]) 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 Comptnova. Observatoř pracovala v letech 1991 – 2000, již neexistuje.

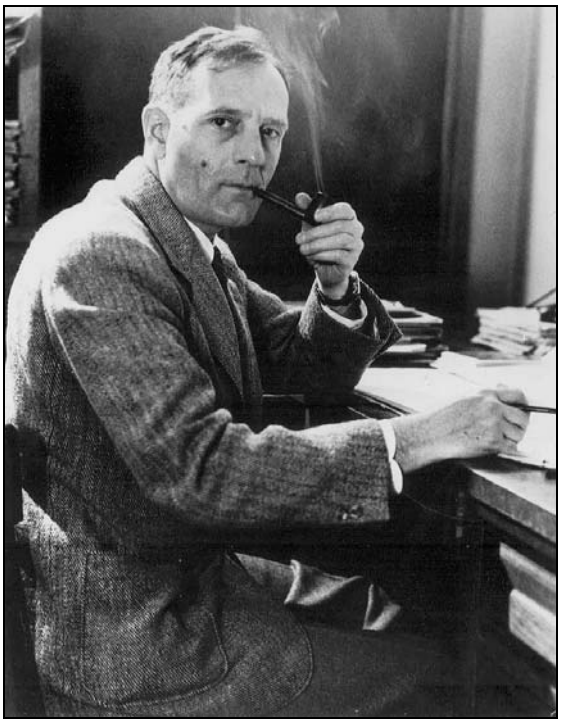
[5]) Čti: *čandra*, podle indického fyzika Subrahmanyana Chandrasekhara (viz medailon v kap. 6.1).

# 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.

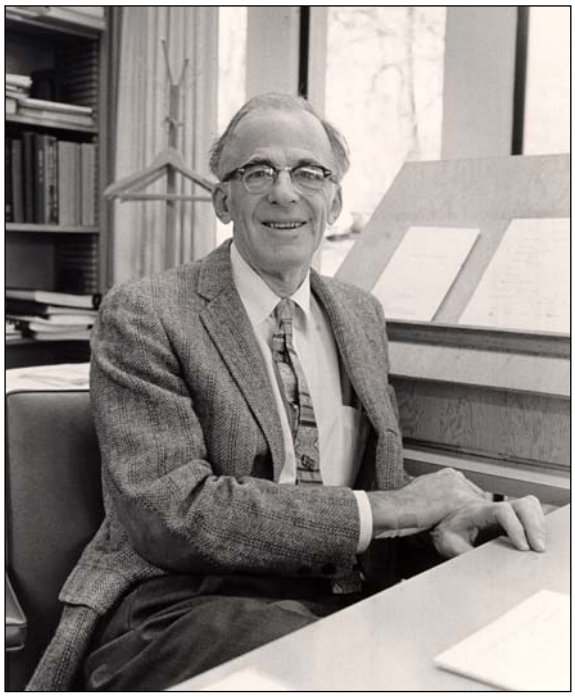


medailon

# 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 ovšemže 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*.

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.

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 trychtýře [1]).

**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 největší [2]). 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.** Srovnejme 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?

medailon

# Grote Reber

### (22. 12. 1911 – 20. 12. 2002)

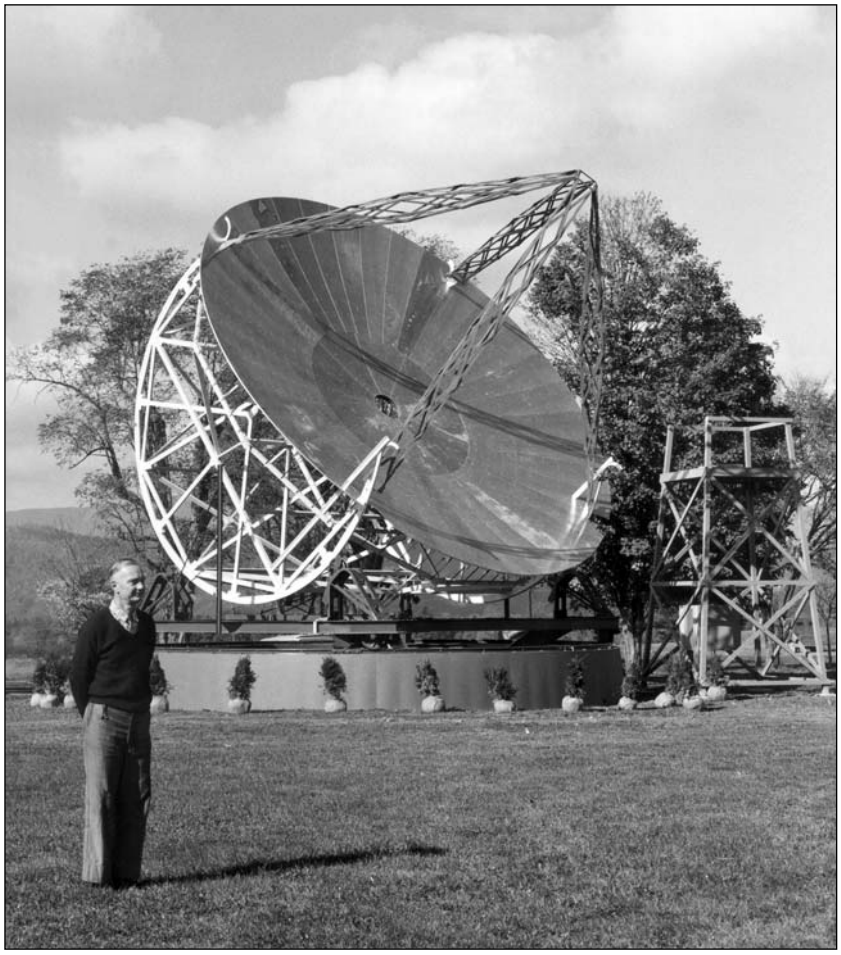
Janského první radioastronomická pozorování v odborné veřejnosti zapadly, ze světa ale úplně nezmizely. Po přečtení jeho článků se mladý a nadšený radioamatér (nyní již elektroinženýr ve firmě Stewart-Warner Comp., která navrhovala radiopřijímače) Grote Reber rozhodl, že bude pokračovat v Janského pozorováních. 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. Nezbývalo 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 trámků, 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. pasážní přístroje, používané astronomy k přesnému zjišťování poloh hvězd.

Je až neuvěřitelné, jaké reakce tato stavba vyvolala. Námitky měli zejména sousedé. Když pršelo, 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 Přímětických, kde ho místní vesničané obvinili, že jeho zařízení 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 přeladil 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 zamířil 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

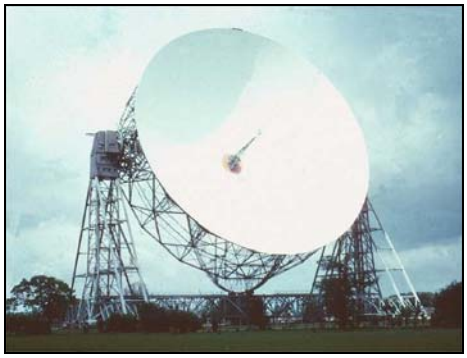
***Nikdy, nikdy nebýt průkopníkem velké vědy!***

*Na podzim roku 1945 přijel Bernard Lovell se dvěma trajlery naplněnými bednami s radarem a pojízdným 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..*

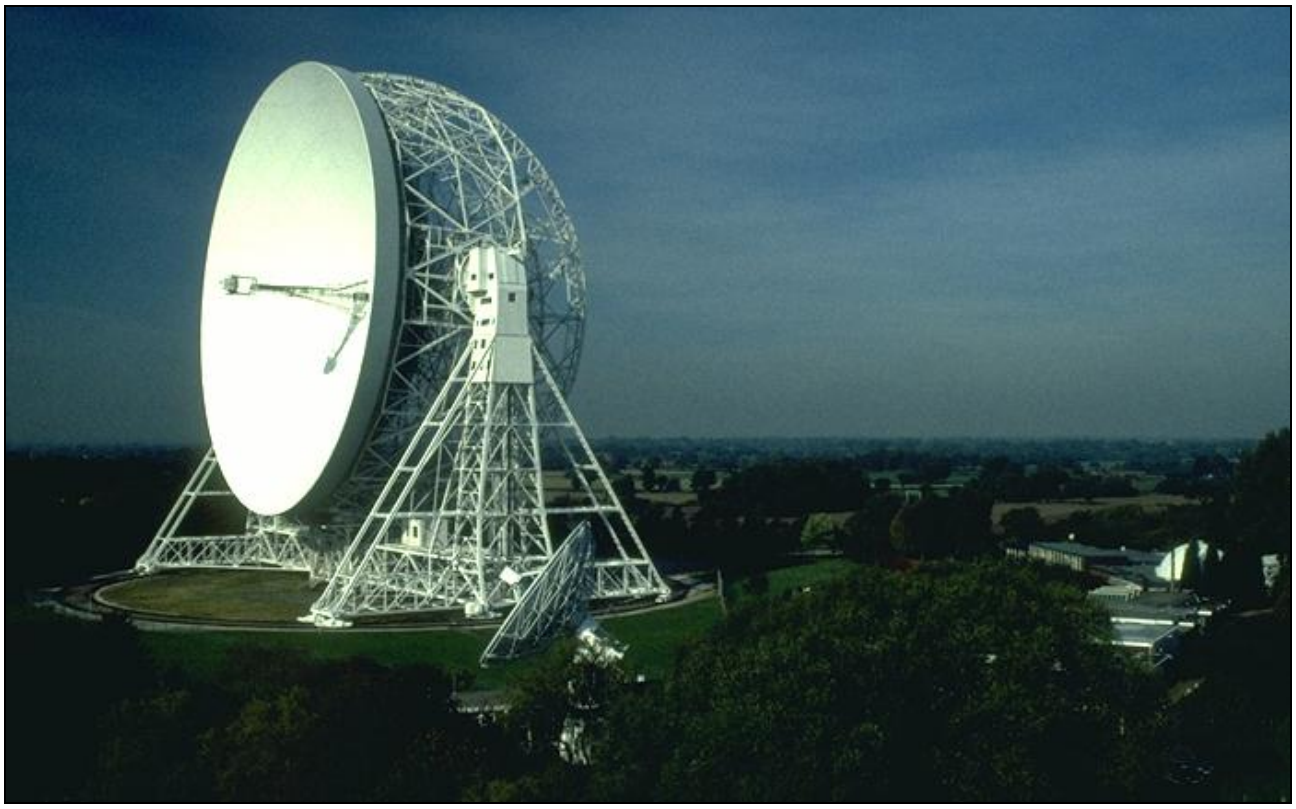
[1]) Čti: *džodrel benku*.

# 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 předepsat 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 dluzích kolem 730 000 dolarů!*



Mark 1 – radioteleskop v Jodrell Banku v roce 1965 a nyní.



*Lovell a radioteleskop však byli zachráněni šťastným přičiněním 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 nevraživost 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. 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 poměřujeme 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.

doplněk

# Dopplerův jev

Poprvé byl formulován Christianem Dopplerem v roce 1842, když byl profesorem matematiky na pražské technické univerzitě. Odvoďme 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 $\lambda$ vyslaného světla je

$$\lambda = c\ T,$$

vlnová délka $\lambda'$ světla přicházejícího k pozorovateli

$$\lambda' = c\ T'.$$

Pro poměr vlnových délek $\lambda'$ a $\lambda$ tedy dostáváme

$$\lambda'/\lambda = T'/T = 1 + v_r/c.$$

Tytéž úvahy platí i v případě přibližování zdroje k pozorovateli, jen $v_r < 0$.

úloha k zamyšlení

## Kuriózní dopravní přestupek

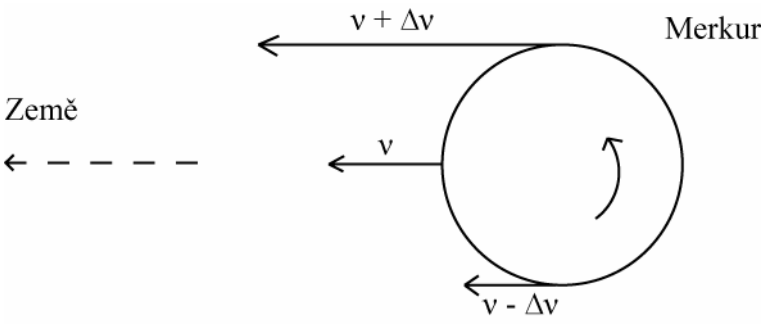
Vypráví se tento vtip: řidič vjel ve městě do křižovatky na červenou. Zastaví ho dopravní policista a uděluje mu pokutu na nerespektování světelných signálů. Řidič se však hájí tím, že červené světlo vůbec neviděl, neboť se mu vlivem Dopplerova jevu změnilo na zelené. Strážce pořádku, znalý fyziky(!), mu proto tento přestupek 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?

praktikum

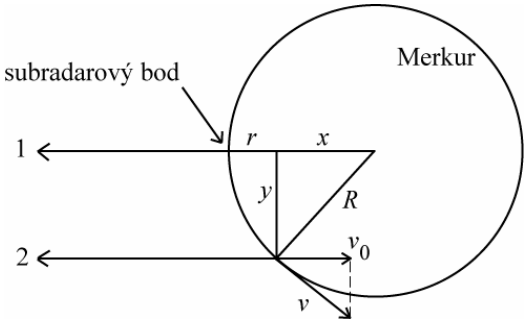
# Rotace Merkuru

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.




Obr. 2. Rozklad signálu v čase.

Pro časové zpoždění $\Delta t$ signálu 2 vůči 1 platí

(1) $\Delta t = 2\, r/c$ (neboť $r = c\, \Delta t/2$),

kde $c$ je velikost rychlosti světla. Z obr. 2 plyne

(2) $x = R - r, \quad y = \sqrt{(R^2 - x^2)}$,

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 frekvenčnímu posunu $\Delta\nu$ na základě Dopplerova jevu:

(3) $2\, v_0/c = \Delta\nu/\nu$.

Řeckým písmenem $\nu$ je označena frekvence vyslaného impulsu. Z podobnosti trojúhelníků (obr. 2) plyne

(4) $v/v_0 = R/y$,

kde $v$ je hledaná rychlost rotace. Perioda rotace $P$ je pak rovna

(5) $P = 2\, \pi\, R/v$.

*Poznámka:* dokážete vysvětlit, proč je ve vztahu (3) uveden koeficient 2?

**Pracovní postup:**

1. Změřte frekvenční posun $\Delta\nu$ na obr. 3: tužkou si na záznamu pro $\Delta t$ = 120 μs (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 zapište 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 1 [1]). Poznámka: frekvence $\nu$ = 430 MHz, 1 den = 86 400 s.

3. Hodnoty $P$ získané pro čtyři různá časová zpoždění zprůměrujte a srovnejte s přesnou hodnotou periody rotace, získanou sondou Mariner 10: 58,646 ± 0,005 dne (2/3 oběžné periody 87,9693 dne = 58,6462 dne).

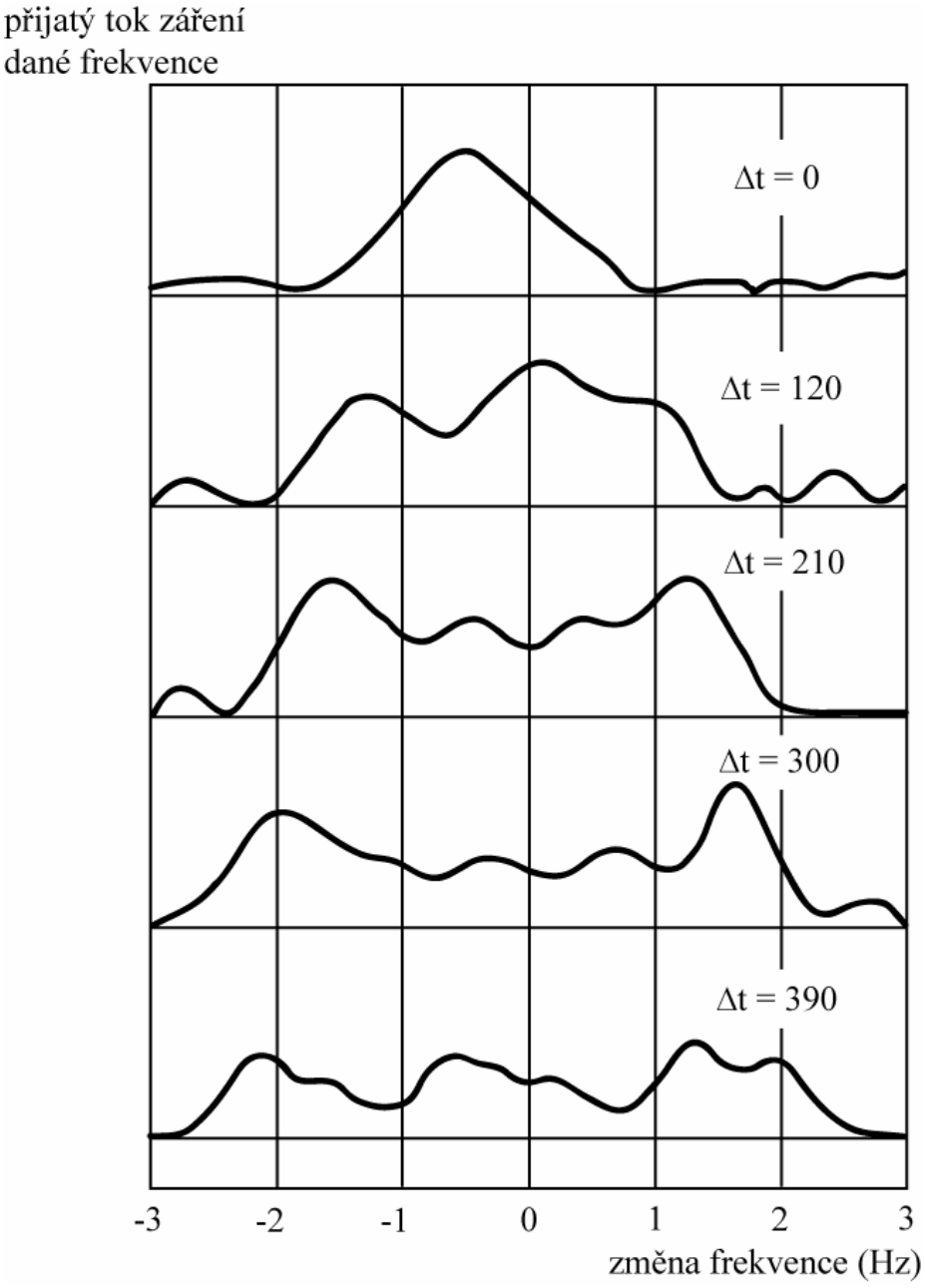
4. Ze známé velikosti rychlosti světla $c$ = 299 790 km $s^{-1}$ a ze vzdálenosti Merkuru od Země (vypočítáme ji ze 3. Keplerova zákona) lze velmi přesně určit velikost astronomické jednotky v kilometrech. Vypočítejte ji, když víte, že v den pozorování 17. 8. 1965 nastala tato konfigurace Slunce, Země a Merkuru: Merkur

[1]) Případně si napište krátký program pro výpočet; při jeho ladění se ovšem bez postupného výpočtu uvedených veličin neobejdete.

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:***




Obr. 3. Záznamy radarových signálů odražených od Merkuru (Δ*t* 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.

**Tabulka 1**

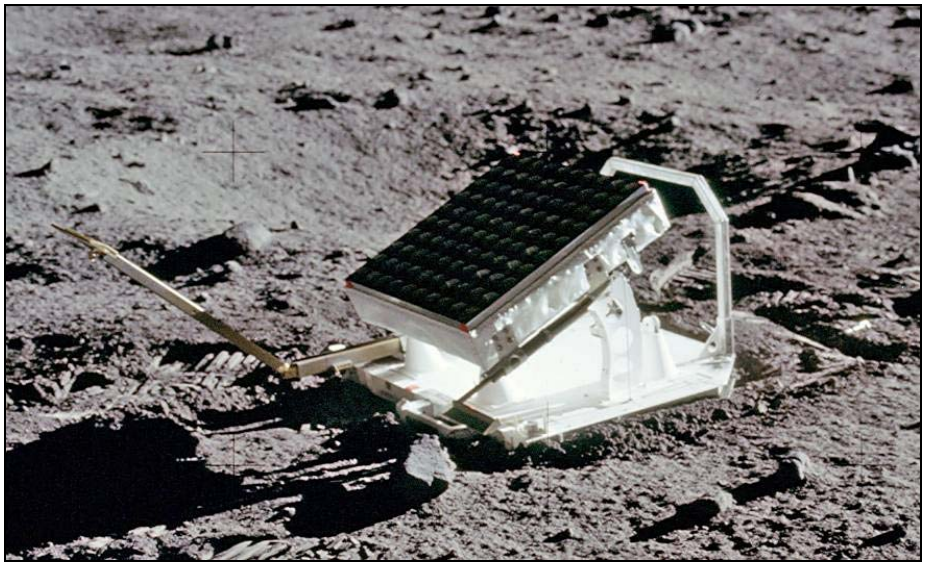
| $\Delta t$ (μs) | $\Delta\nu$ (Hz) | $r$ (km) | $x$ (km) | $y$ (km) | $v_0$ (km s$^{-1}$) | $v$ (km s$^{-1}$) | $P$ (dny) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 120 | | | | | | | |
| 210 | | | | | | | |
| 300 | | | | | | | |
| 390 | | | | | | | |
| | | | | | | aritmetický průměr: | |

Podle bodu 4: délka 1 AU = _____ km.

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 $\lambda = 694{,}33$ nm s energií $E = 3$ 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?



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 pevné 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

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“, jíž 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 Buysem-Ballotem, jenž jako pohybujícího 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 níž se Doppler pustil do vybudování nového moderního pracoviště, však narušilo vážné nedorozumění s profesorem matematiky téže univerzity, slovenským rodákem Jozefem Petzvalem (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 díků tomu, kdo „pomocí studia a vědy pronikl hluboko do tajemství přírody“.

Autorem medailonu je Jiří Grygar.

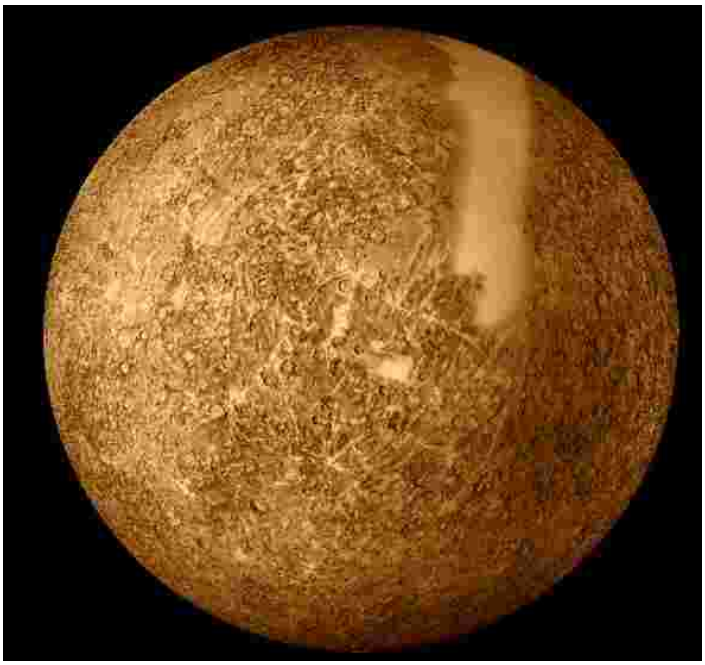
[1]) Čti: *fizó*.

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 obzvlášť 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 Merkuru (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 roztříděno 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 mozkem.

**Jasnost a hvězdná velikost**

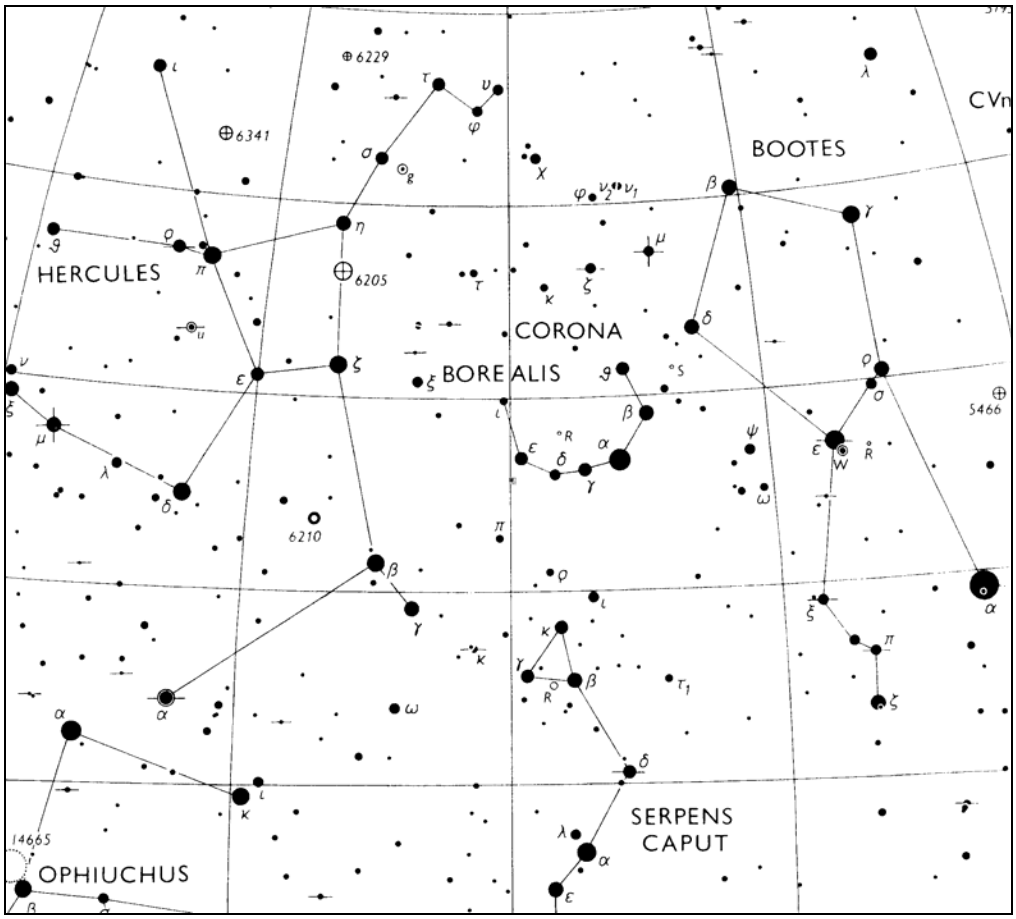
Moderní fyzikální definice fotometrických pojmů používaná astronomy vychází sice ze staré terminologie, dává jí však přesný obsah. Jedním ze základních pojmů je *jasnost*. Co označuje?

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.

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 magnitudy [2]).

**Hvězdné velikosti některých objektů**

Uveďme si pro srovnání hvězdné velikosti některých kosmických objektů. Čísla se pochopitelně neučte zpaměti, ale o to víc srovnávejte.

| *Kosmický objekt* | *Hvězdná velikost* |
|---|---|
| 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 pouhýma 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**

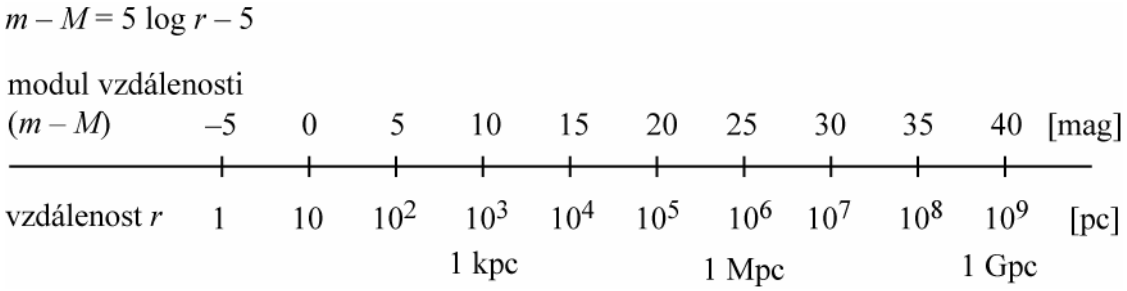
Jasnosti hvězd, o nichž jsme dosud pojednávali, jsou vztaženy k pozorovateli nacházejícím se na Zemi. Hvězdy jsou však od nás různě daleko, takže pouhým porovnáním jasností, aniž bychom vzali v úvahu *vzdálenosti* hvězd, nemůžeme určit, jak mnoho hvězdy září (tedy jaké jsou jejich *zářivé výkony*). K 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...).

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 $\pi$ 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*.




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 vymezíme pouze *část spektra* (dokonce nemusí jít o část vizuální oblasti spektra, ale třeba o infračervenou). Pak hovoříme o měření hvězdných velikosti 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 délkou [3]).

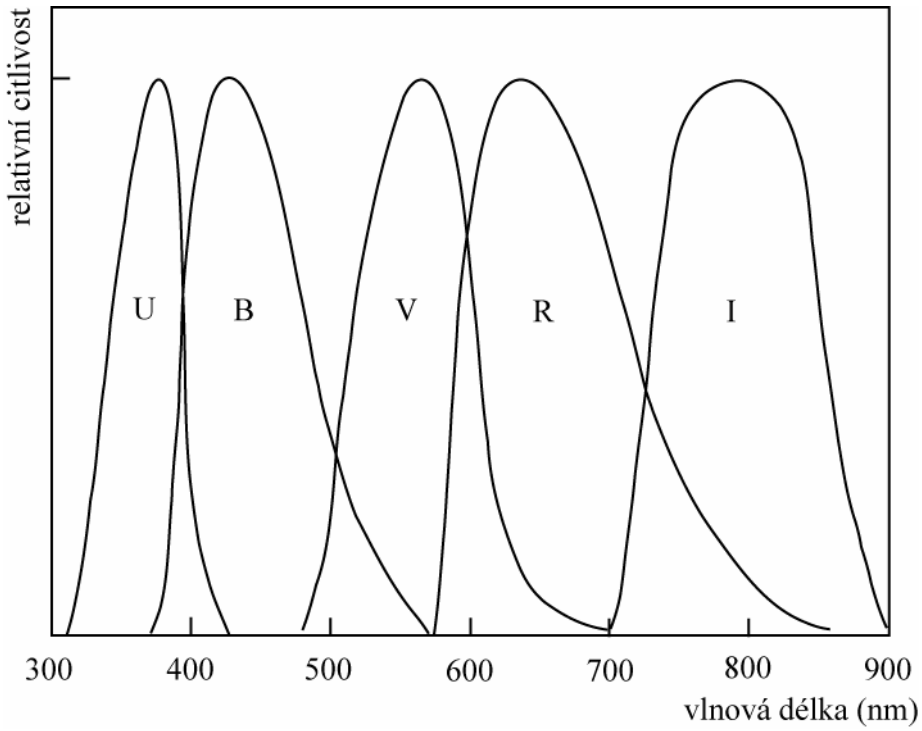
Dnes se v astronomii běžně používá několik desítek různých barevných systémů. Jeden z nejrozšířenějších (a také jeden z nejdéle používaných) je *barevný. systém UBV*. Zkratka napovídá, kterou část spektra tento systém pokrývá: U (ultraviolet) – ultrafialovou, B (blue) – modrou, V (visual) – žlutozelenou (podobá se, i když přesně neodpovídá, spektrální citlivosti oka). Na systém UBV navazují v dlouhovlnné oblasti spektra barvy R (red) – červená, I (infrared) – infračervená atd. (systém UBVRI).

Zopakujme a upřesněme pojem barevný index: víme, že

$$\textit{barevný index} = m_{\text{krátkovlnná oblast}} - m_{\text{dlouhovlnná oblast}}.$$

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.




Barevný systém UBV(RI).

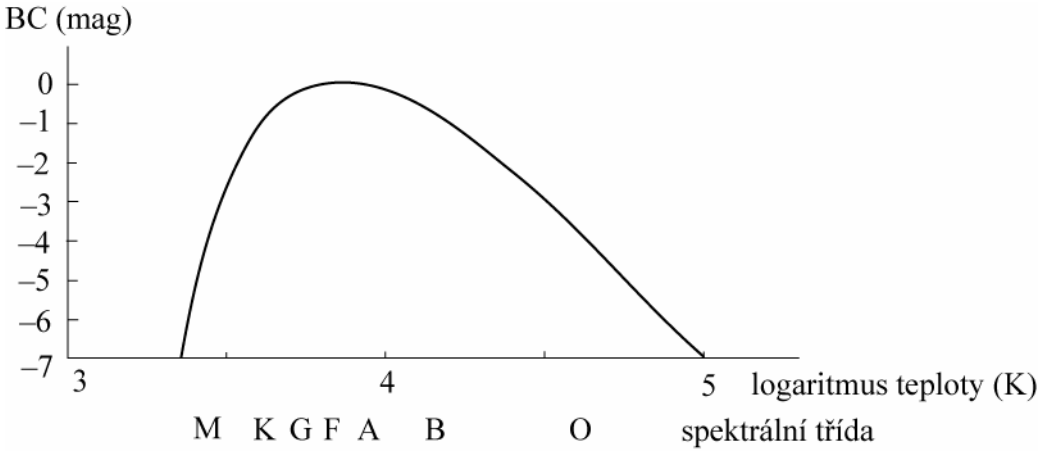
**Bolometrické veličiny**

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*:

$$BC = m_{\mathrm{bol}} - m_{\mathrm{viz}} = M_{\mathrm{bol}} - M_{\mathrm{viz}}.$$

Bolometrická korekce *BC* není zanedbatelně malou korekcí, u některých hvězd činí až několik magnitud! Je zřejmé, že teprve absolutní *bolometrická* hvězdná velikost $M_{\mathrm{bol}}$ je mírou zářivého výkonu hvězdy.




Bolometrická korekce *BC* v závislosti na povrchové teplotě hvězd (pojem *spektrální třída* bude zaveden v kapitole 4.4. *Hvězdy ve spektroskopu*).

doplněk

# 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 zrakového 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.

doplněk

# 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:

$$j_1/j_2 = j_2/j_3 = \ldots = j_5/j_6 = \rho,$$

kde $j_i$ jsou jasnosti (tedy osvětlení) hvězd $i$-té velikosti a $\rho$ 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 $\rho = 2{,}512\ldots$ . 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 pouhýma 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.

**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. Připusťme, 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. Seřaďte 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 |
| Sirius | –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?

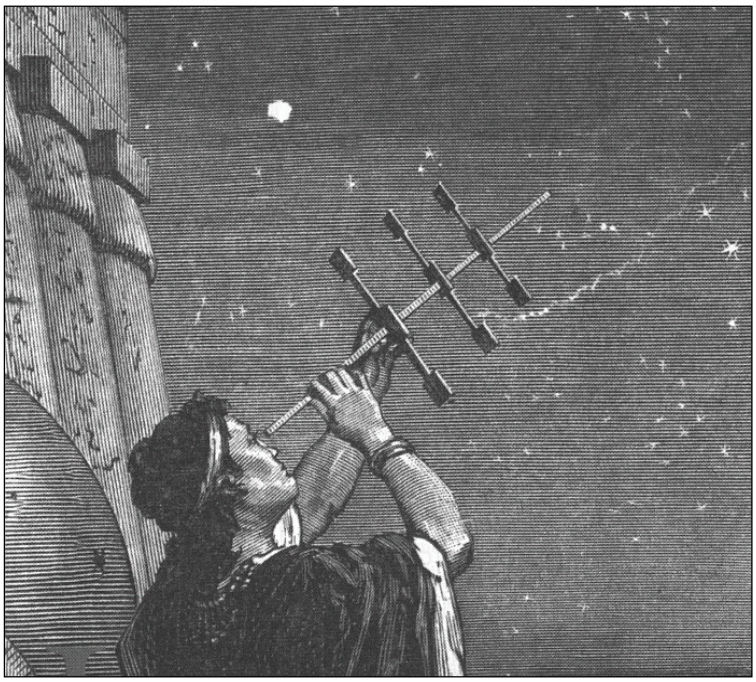
medailon

# 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.

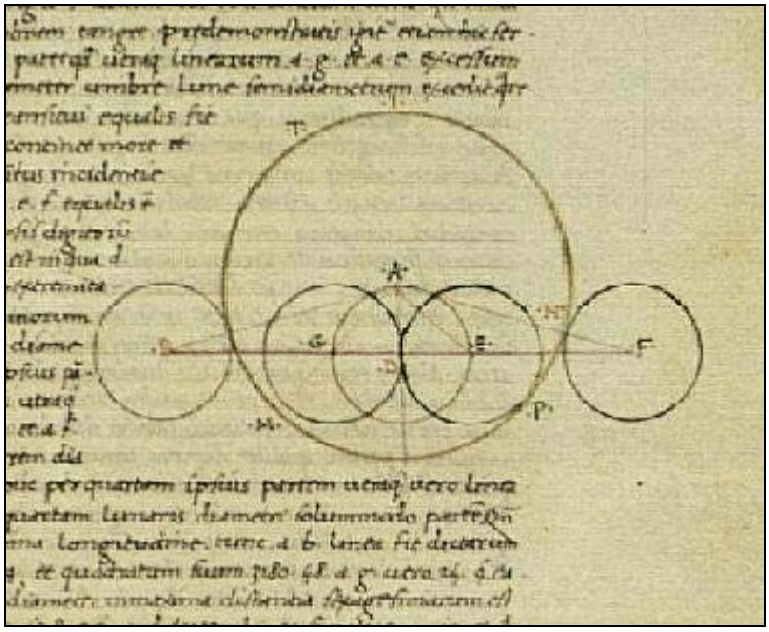


Z jeho (nedochovaného) katalogu pak čerpal počátkem druhého století našeho letopočtu jiný slavný starověký hvězdář Klaudios Ptolemaios, jenž tak vlastně Hipparchova data zachoval natrvalo ve spise se souhrnným názvem Almagest. Jelikož od doby sestavení Hipparchova katalogu uplynulo více než dva tisíce 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 pořídit nejobsáhlejší a nejpřesnější katalog hvězd v celých astronomických dějinách. Katalog obsahuje polohy, pohyby, vzdálenosti a jasnosti zhruba jednoho milio-

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.

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? Srovnejte 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).

*Cílem výpočtů nejsou čísla, ale pochopení podstaty věci.*

Richard Wesley Hamming, matematik a počítačový expert (1915 – 1998).

doplněk

# 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

$$M = m + 5 - 5 \log r.$$

úloha k zamyšlení

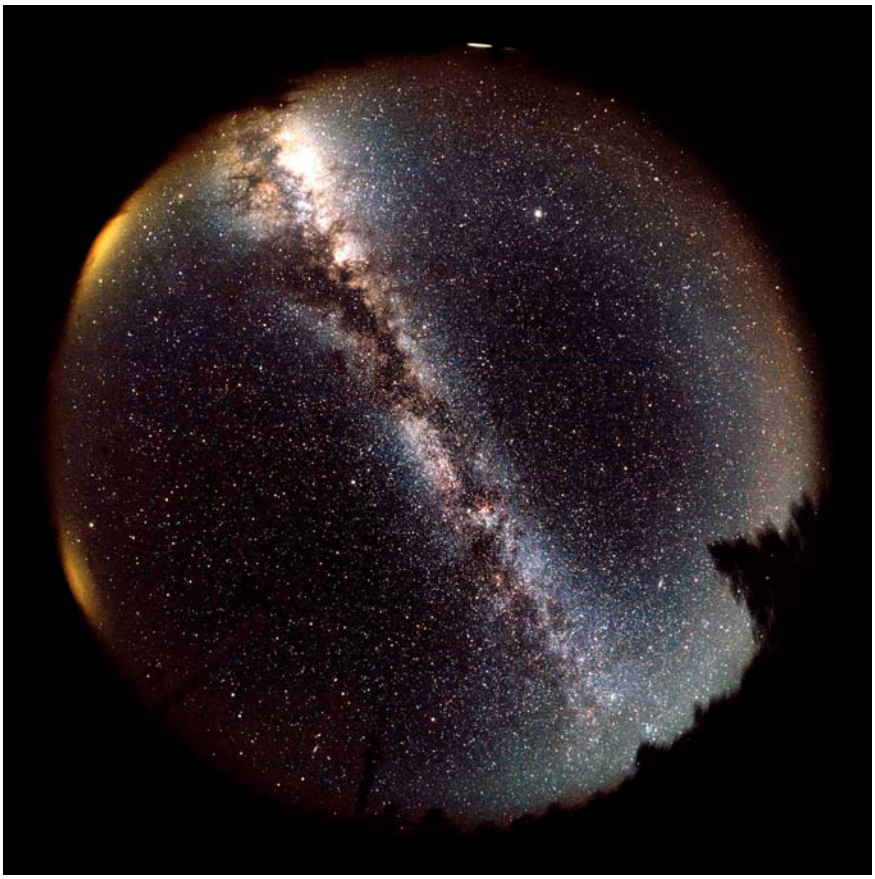
# Kosmická loď na cestě k Proximě Centauri

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).

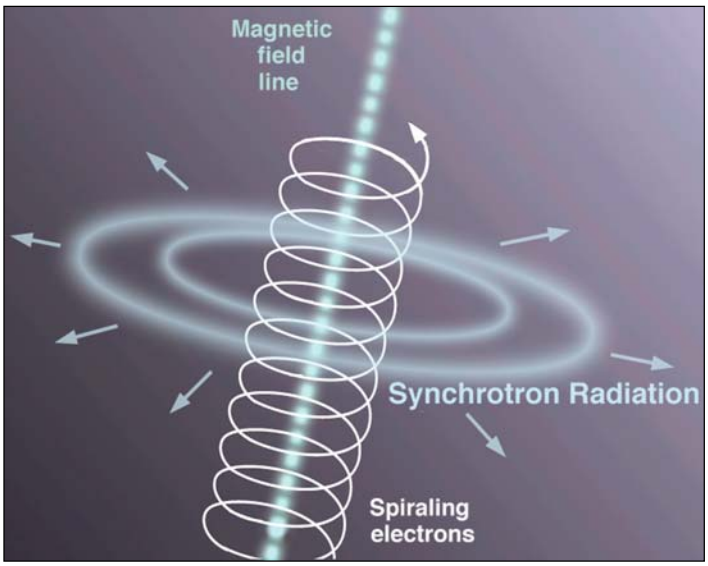
**Jak vzniká záření?**

Každý atom, molekula či elementární částice, například elektron, má určitou energii. Ke změně této energie může dojít zejména *vyzářením (emisí)* 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).

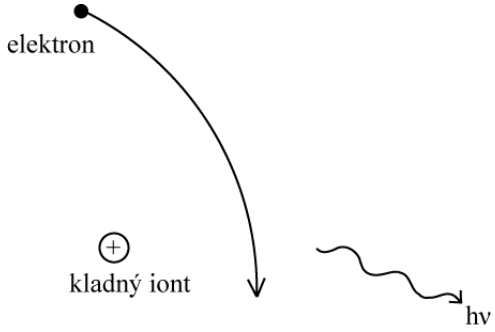
**Záření volných částic**

Uvažujme, jak probíhá elektromagnetické vyzařování u volných částic. Vyzařovat mohou jen elektricky nabité 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.




← Vznik synchrotronového záření – způsobují je elektrony letící v magnetickém poli (viz text).

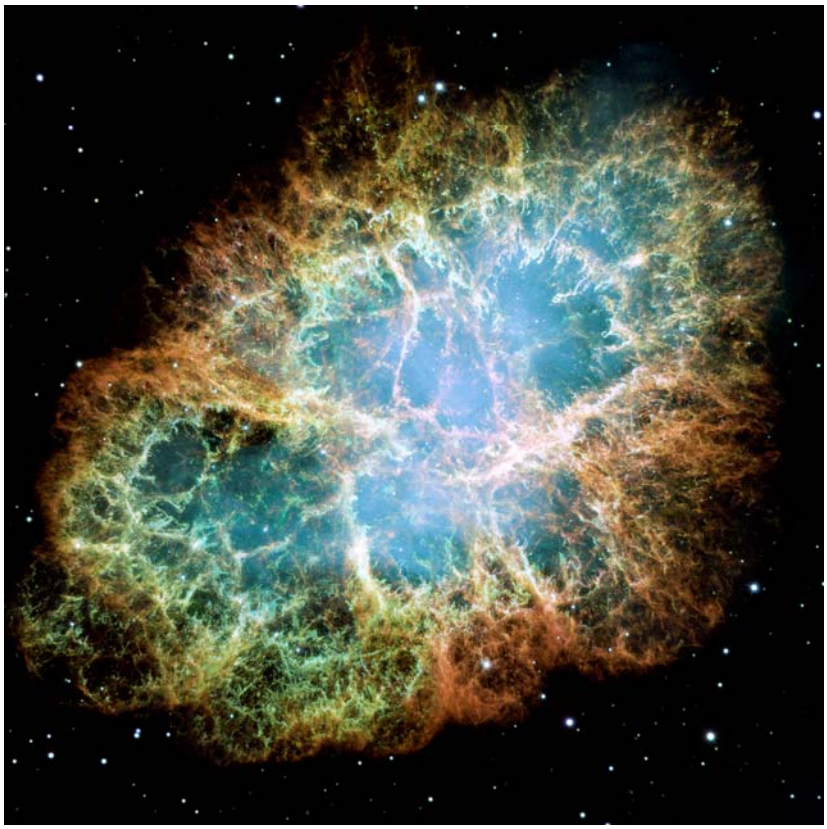
Názorným příkladem je tzv. brzdné záření (viz obrázek na další straně): proletí-li elektron kolem kladného iontu, jeho dráha se zakřiví a rychlost se změní. Změna hybnosti je vyrovnána vyzářením fotonu s energií hν. Kinetická energie elektronu se přitom sníží, elektron je přibrzděn (odtud název tohoto záření).




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-

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.

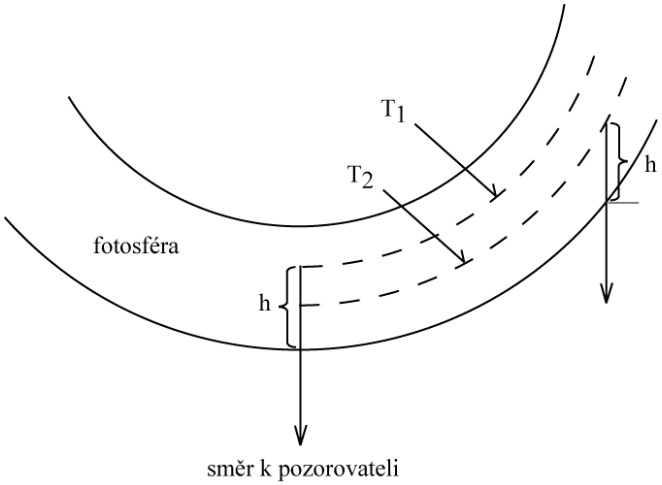
**Tepelné záření**

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?**

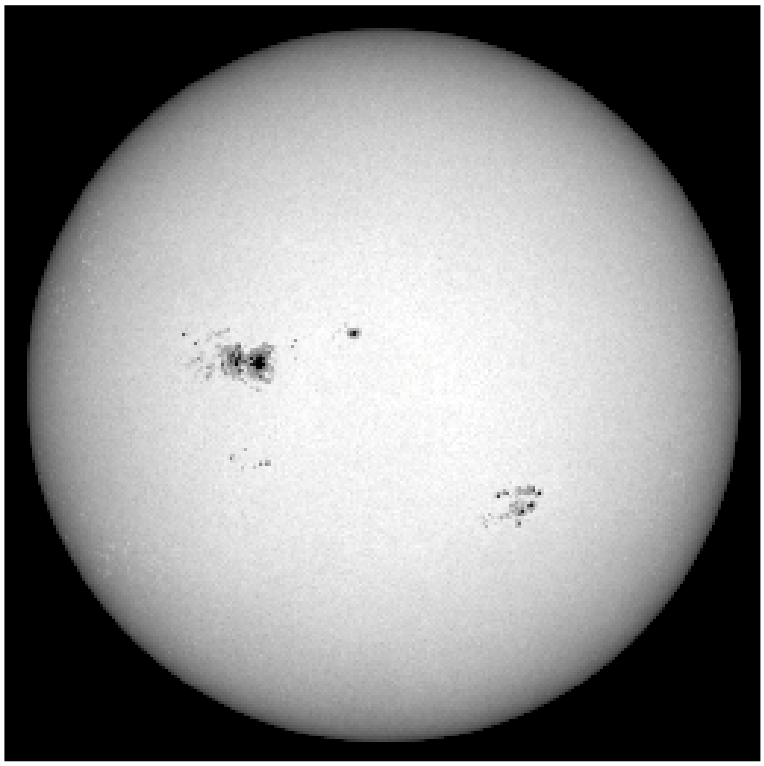
Je to důsledek jednoho ze zákonů, popisujících vyzařování absolutně černého tělesa (Stefanova-Boltzmannova zákona). Ve fotosféře (tedy vrstvě, odkud k nám přichází pozorované záření) platí, že teplota látky s výškou *klesá*. Při pohledu doprostřed slunečního kotouče dohlédneme do jisté hloubky. Tato 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.



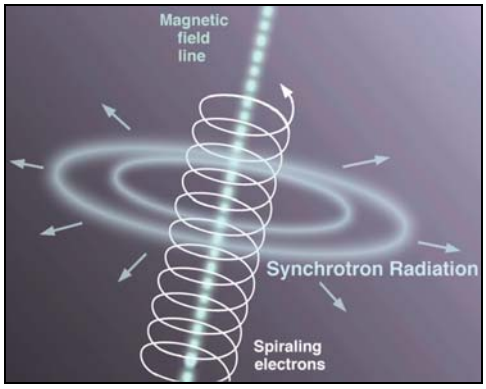

h – hloubka ve fotosféře
$T_1$, $T_2$ – teploty ($T_1 > T_2$)

Vznik okrajového ztemnění u hvězd.

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.

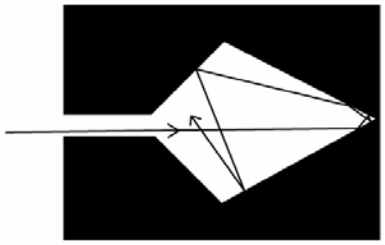



doplněk

# Absolutně černé těleso

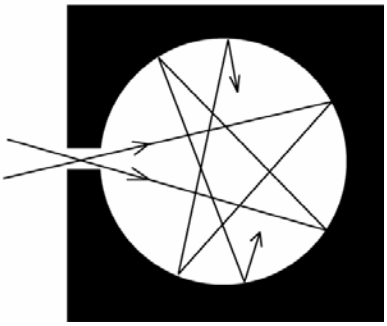
Tento pojem zavedl Gustav-Robert Kirchhoff roku 1860. Je to – po pravdě řečeno – termín dosti nevhodný, protože tělesa jsou „černá“, když nezáří, zatímco absolutně černé těleso září (a jeho barva závisí na teplotě). S černou barvou to však jistou souvislost má: když hledíme zvenku do malého otevřeného 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);

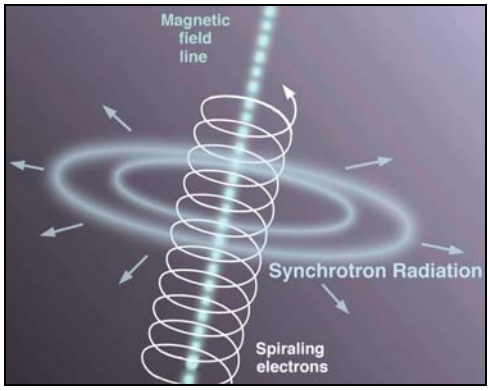
– tím více se posouvá ke *kratším* vlnovým délkám maximum vyzařování; proto stále teplejší předmět mění své zabarvení z červeného na žluté a bílé, a mění je pak i na modré, jenže naše oči velmi jasný předmět vnímají už jen jako bílý.

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

fyzikou), že elektromagnetické pole uzavřené v dutině si vyměňuje energii s jejími stěnami nespojitě – po kvantech o velikosti rovné hν.

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 $\lambda_m$, na níž se vyzařuje nejvíce energie, se řídí *Wienovým zákonem posuvu:* $\lambda_m = b/T$, kde konstanta $b = 2{,}898.10^{-3}$ m·K.




čítanka

# Zdeněk Mikulášek: Jakou barvu má vesmír?

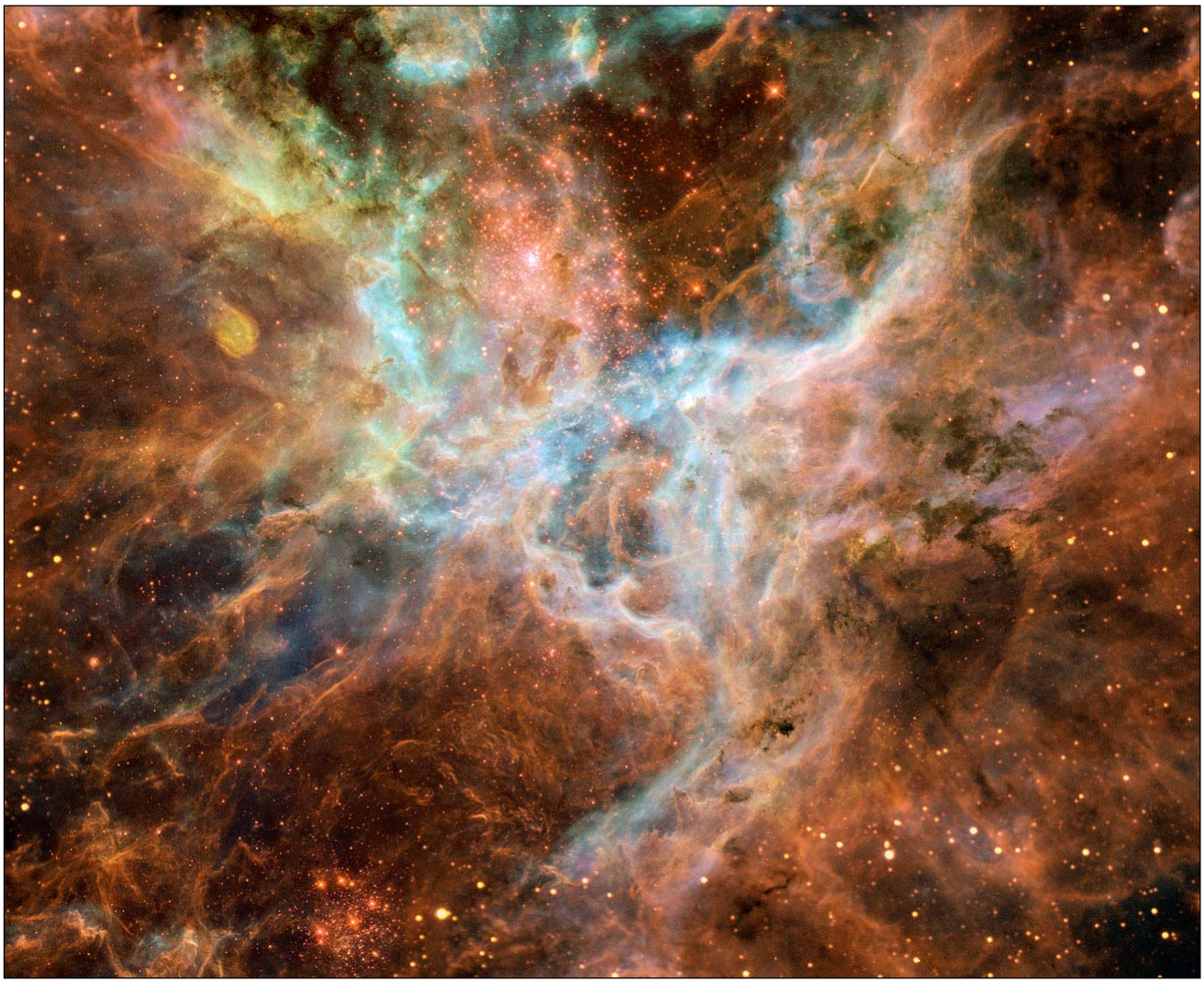
Budete-li se nepředpojatě probírat nepřibarvovanými snímky hvězdné oblohy, dříve nebo později musíte dojít k závěru, že vesmír vlastně není příliš barevný. Je spíš černobílý. Když už tu něco svítí, pak je to v podstatě bílé, nejvýše s nádechem do modra nebo do oranžova. Vždy ale jde o lomené tóny, žádné 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 čerň 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 částečkami 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 zvlášť 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 všímat záření, začne je pohlcovat, začne i sám zářit.

Rozsáhlé oblasti horkého vodíku nacházíme v okolí zvlášť žhavých hvězd. Vodík je tu na své vysoké teplotě udržován zejména neviditelným ultrafialovým zářením horkých hvězd, které v tomto oboru vyzařují 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

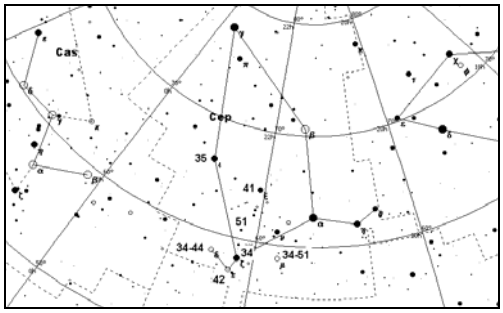


Mlhovina Tarantule, známá astronomům spíše jako 30 Doradus ve Velkém Magellanově oblaku (snímek: Hubblův kosmický dalekohled).

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).




praktikum

# Vzdálenost cefeid

Cefeidy – pulsující proměnné hvězdy – slouží k určování vzdáleností ve vesmíru, jsou svého druhu „majáky“ rozesetými 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) vyneste 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 odečtěte příslušné periody a hvězdné velikosti; $m_{\text{stř}}$ je střední hodnota maximální a minimální hodnoty hvězdné velikosti: $m_{\text{stř}} = (m_{\max} + m_{\min})/2$. Hvězdné velikosti odečítejte s přesností na desetinu magnitudy. Výsledky zapisujte do tabulky 3 a vyneste do grafu (obr. 2); tyto čtyři body označte odlišně od ostatních (prázdným kroužkem, křížkem apod.).

3. Vynesenými body na obr. 2 proložte přímku. 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 přímky vynesenými body. Stupnici $M$ vynášejte na pravou svislou osu, měřítko musí zůstat stejné! Výhodné je volit posuv o celistvý počet magnitud.

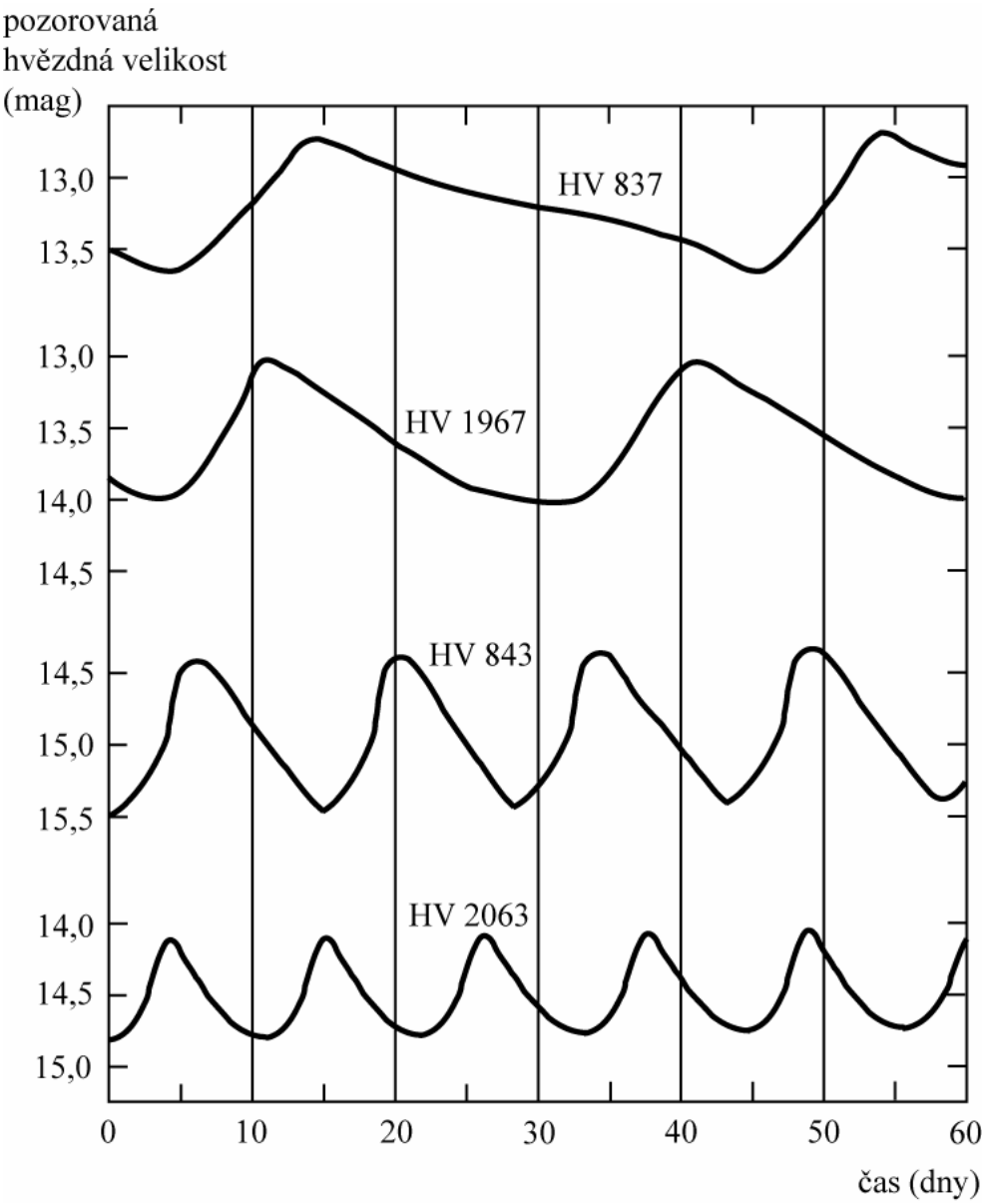
Nově vynesenými body proložte přímku.

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

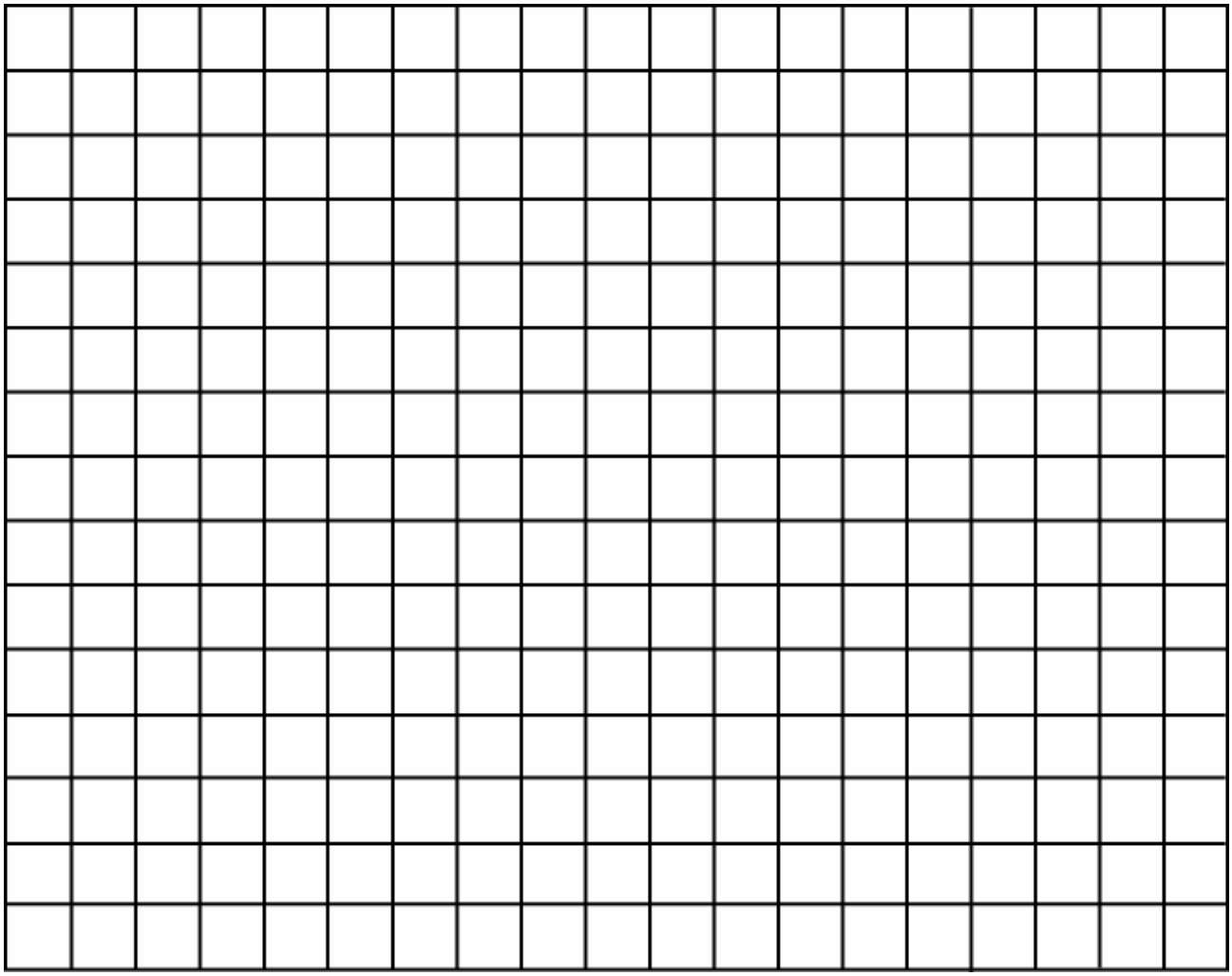
$$m - M = 5 \log r - 5.$$

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.



Obr. 2.

**Tabulka 1**

| *Hvězda* | *m* (mag) | *P* (dny) | log *P* |
|---|---|---|---|
| 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**

| *Hvězda* | log *P* | *M* (mag) | *Hvězda* | log *P* | *M* (mag) |
|---|---|---|---|---|---|
| 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 |

**Tabulka 3**

| *Hvězda* | $m_{max}$ | $m_{min}$ | $m_{stř}$ | $P$ (dny) | log $P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| HV 837 | | | | | |
| HV 1967 | | | | | |
| HV 843 | | | | | |
| HV 2063 | | | | | |

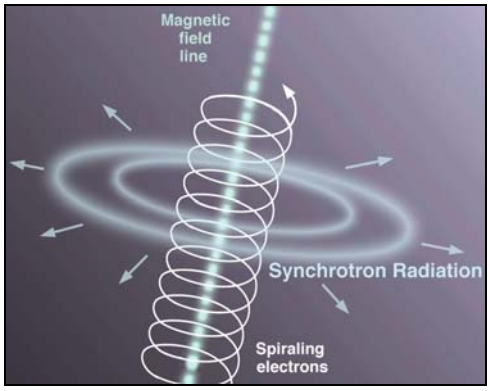
rozdíl škál $m$ a $M$: _____

průměrná vzdálenost obou přímek v obr. 2: _____

modul vzdálenosti ($m - M$) = _____

vzdálenost $r$ = _____

# 4. Všechna kosmická tělesa září

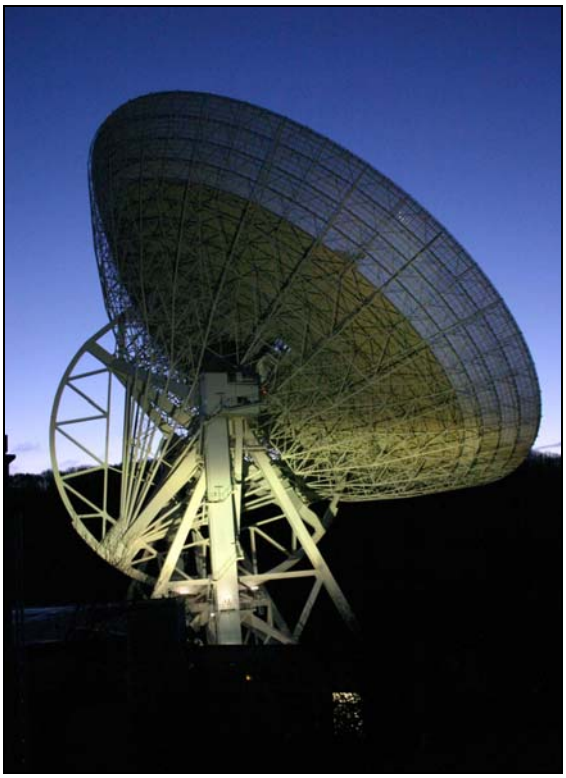



## citát

***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 nepřečetl, odešel k radioteleskopu a tam zmíněné záření objevil.*

T. R. McDonough (Sky and Telescope 58, 1979, str. 518). Překlad: Jiří Grygar.



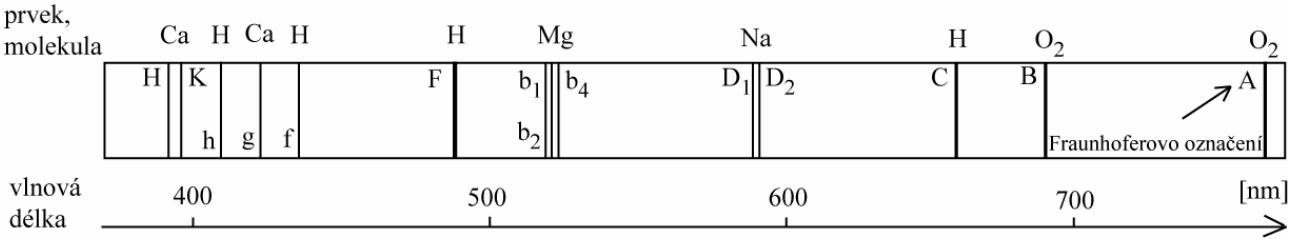
# 4.3. Trocha spektroskopie

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.




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:

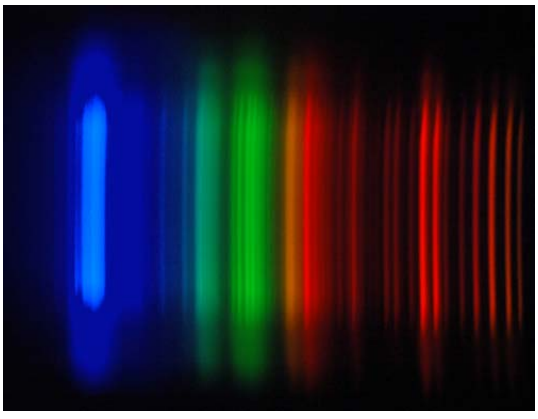
1. Jednotlivé prvky v plynném stavu mají spektrum složené z čar, jejichž počet a vlnové délky jsou za všech fyzikálních podmínek (teplota, hustota, tlak) vždy stejné, mění se jen výraznost čar.

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 předznamenaly bouřlivý rozvoj spektroskopie.

### Roztřiďme 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 spojité 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 Comte [1]) dokončil své proslulé šestisvazkové dílo „Kurs pozitivní filozofie“, uveřejnil filozofické pojednání o astronomii. Na samém počátku vyhlašuje 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. Roscoeovi [2]). 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: nalezl, 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: *ózist kómt.*
[2]) Čti: *roskeovi.*

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 Schwarzwaldu. Z okolních kopečků lze podél Rýnu uvidět 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.“

Gustav Kirchhoff (stojící) a Robert Bunsen.

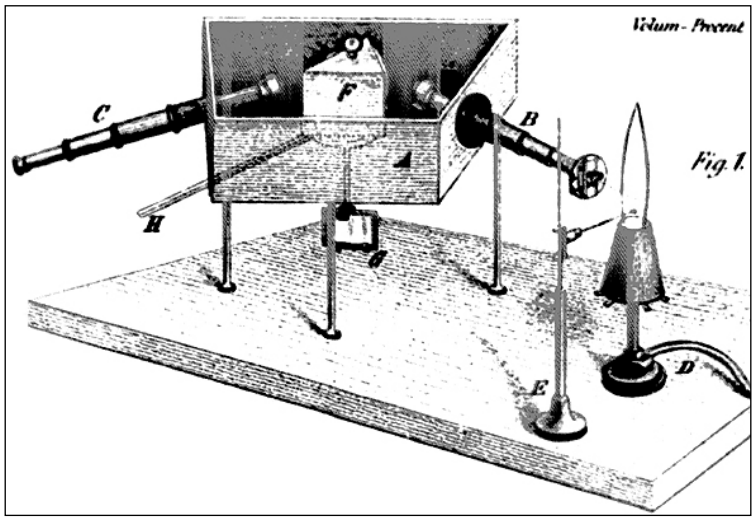
Dost možná, že právě tato příhoda byla na počátku Kirchhoffových výzkumů povahy tmavých Fraunhoferových čar ve slunečním spektru. Již dříve Fraunhofer zjistil nápadnou shodu v poloze výrazné tmavé čáry ve žluté oblasti slunečního spektra (tuto čáru označil písmenem D) a jasné žluté čáry, která se téměř 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 nalezl, 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 spojitého spektra. V následující práci uvádí svůj věhlasný zákon záření: poměr emisního a absorpčního koeficien-

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 Foucaltem [3]). Podobně jako Kirchhoff chtěl i Foucalt 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 Foucalt tento neobvyklý jev nedokázal vysvětlit. Zřejmě netušil, že jasná čára D v oblouku uhlíkové lampy vzniká sodíkovým znečištěním. Foucalt též nezjistil, že laboratorní absorpční čáry a absorpční čáry sluneční příslušejí 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.*

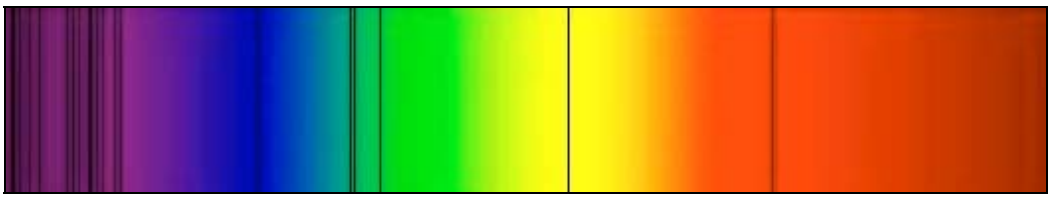
# 4. Všechna kosmická tělesa září

*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 spektroskopií? a) Dopplerův jev; b) foton; c) frekvence záření; d) modul vzdálenosti; e) barevný index.

medailon

# Joseph Fraunhofer

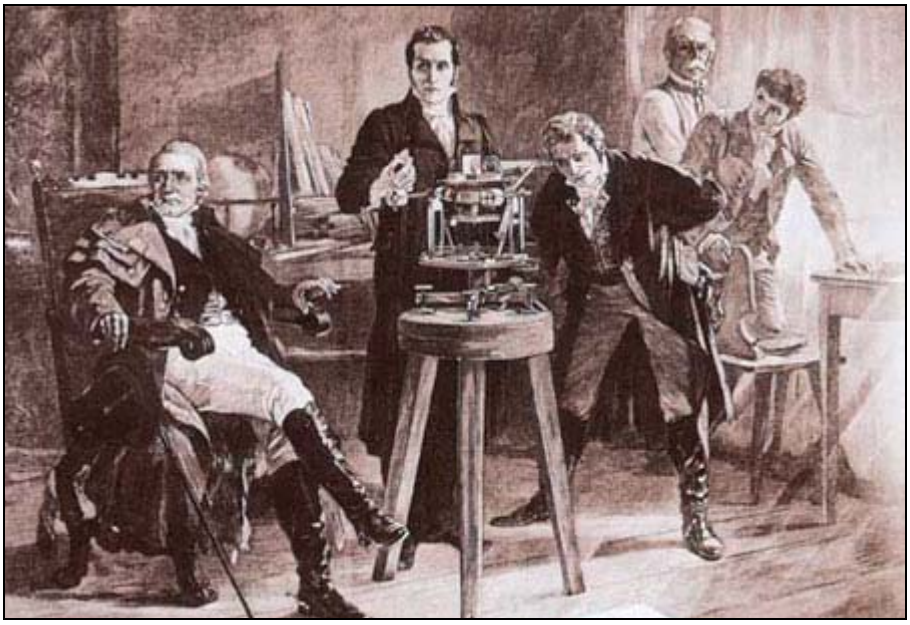
### (6. 3. 1787 – 7. 6. 1826)

„Chtěl jsem nalézti, zda v barevném obrazu slunečního světla je vidět podobný světlý proužek jako v barevných obrazech osvětlovacích lamp, ale místo toho jsem v dalekohledu našel takřka nepočítaně silných a slabých vertikálních linií, které ale jsou tmavší než zbývající část barevného obrazu; některé se zdají býti dokonale černé.“ Těmito slovy popsal v roce 1816 v jednom pojednání o lomu světla objev: tmavé spektrální čáry, kterých od červeného k fialovému 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 spektru mohl s nebývalou přesností zjišťovat index lomu skel, z nichž zhotovoval objektivy, jež vykazovaly jen nevelkou barevnou vadu. Tehdy už byl 29letý Fraunhofer uznávaným optikem, přístroje jím navrhované a konstruované patřily 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 výchovu formálně převzal Weichselberger. Do děje ale zasáhla náhoda: přístavba dílny jeho mistra se 21. července 1801 zřítila a pod troskami zůstali mistrová a Joseph. Mistrovou vyprostili mrtvou, Joseph jako zázrakem přežil. Záchranné 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 nalezl Joseph uplatnění ve sklárnách v Benediktbeuernu, kde zakrátko vedl výrobu technické optiky. Podařilo se mu výrazně



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.

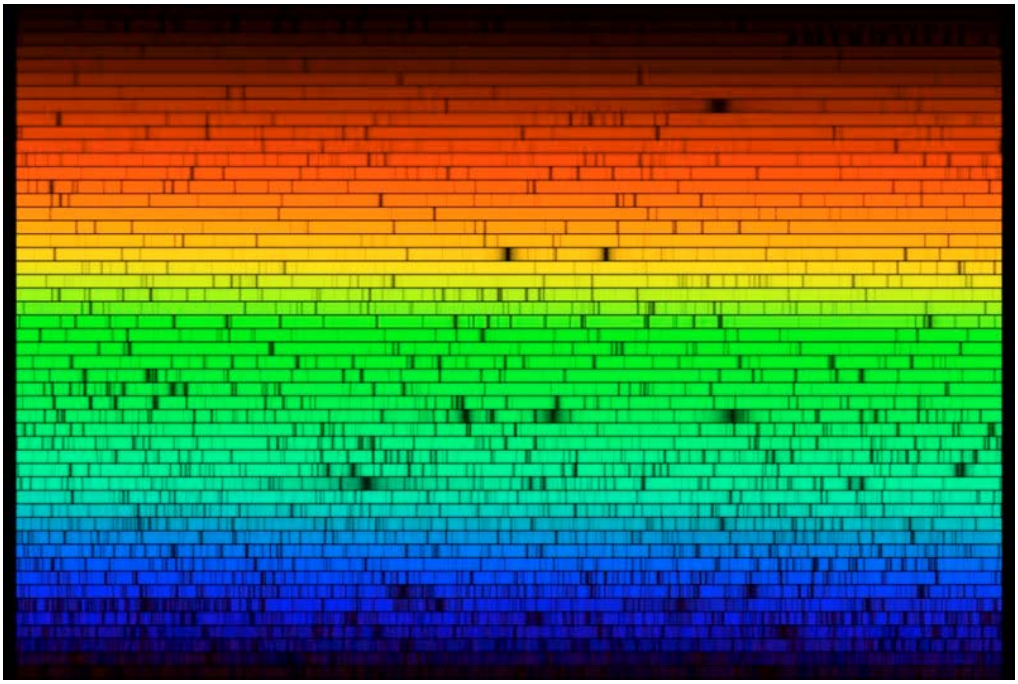
Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný.

# 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. Připomenu, 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*.

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:

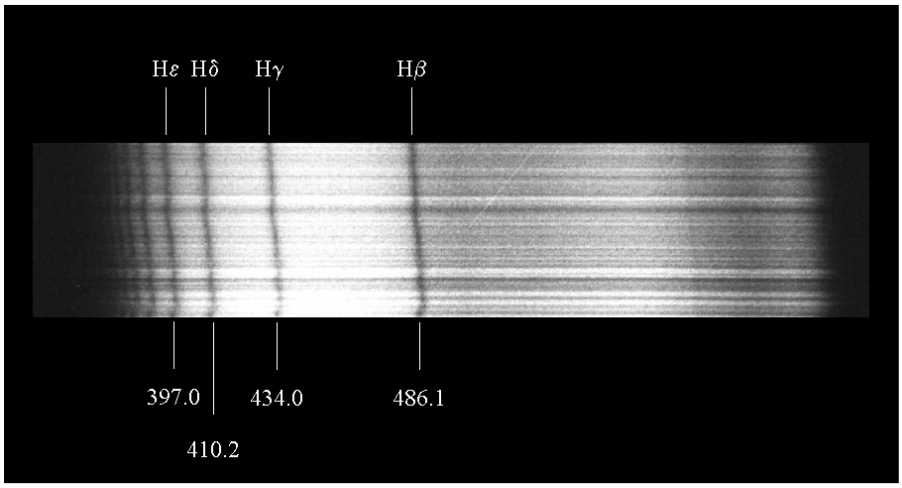
(Q – P – W –) O – B – A – F – G – K – M – L (– R – N – S)

(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*.

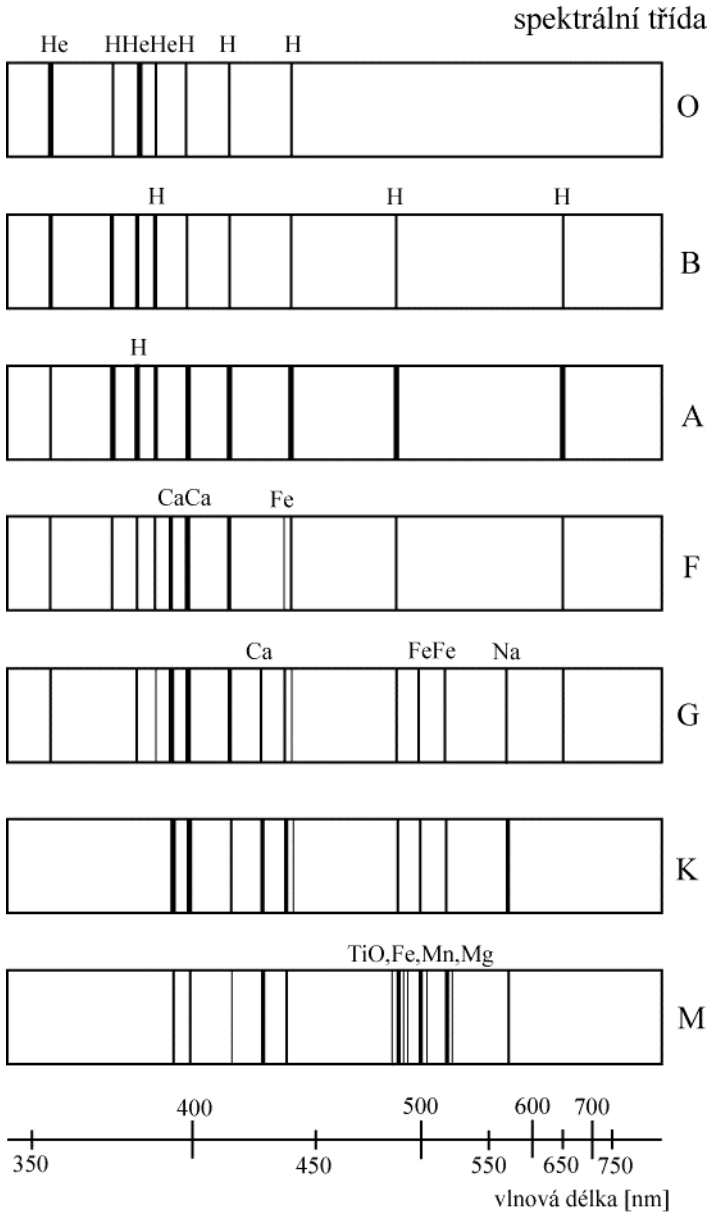
### Rozmanitá spektra hvězd

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.



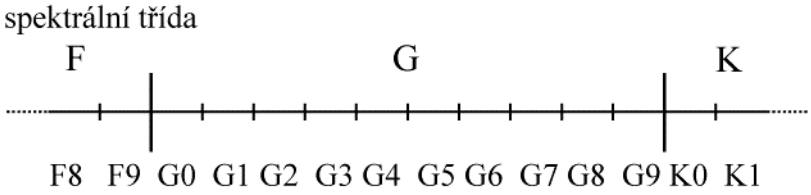

Spektrum hvězdy Sirius. Výrazné jsou tmavé absorpční čáry vodíku (čísla udávají vlnovou délku v nm).

[2]) Čti: *hagins*.
[3]) Čti: *moryová*.
[4]) Čti: *k(h)enonová*.
[5]) Čti: *drejpra*.




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.

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 roztřídění hvězd na *rané* a *pozdní* již zůstalo.

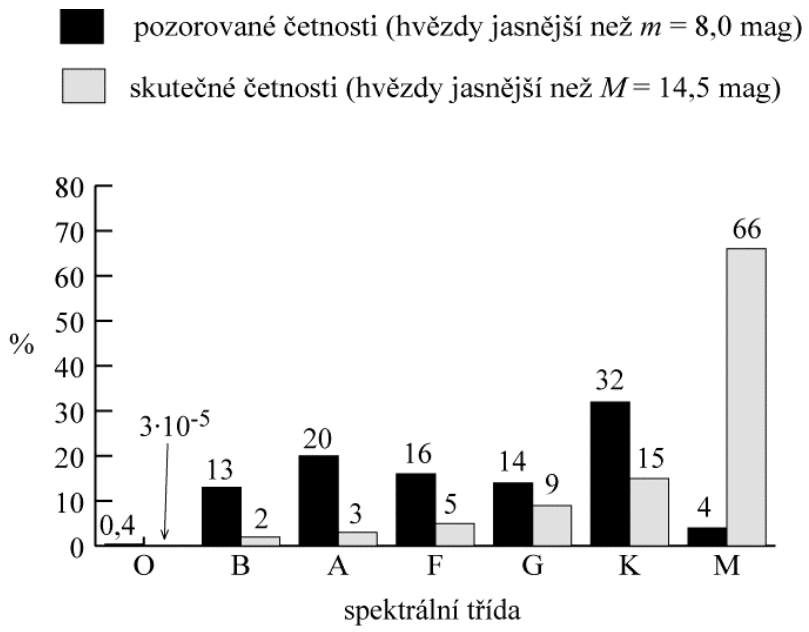
***Spektrální třídy a povrchové teploty hvězd:***

| *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 nejvíc!



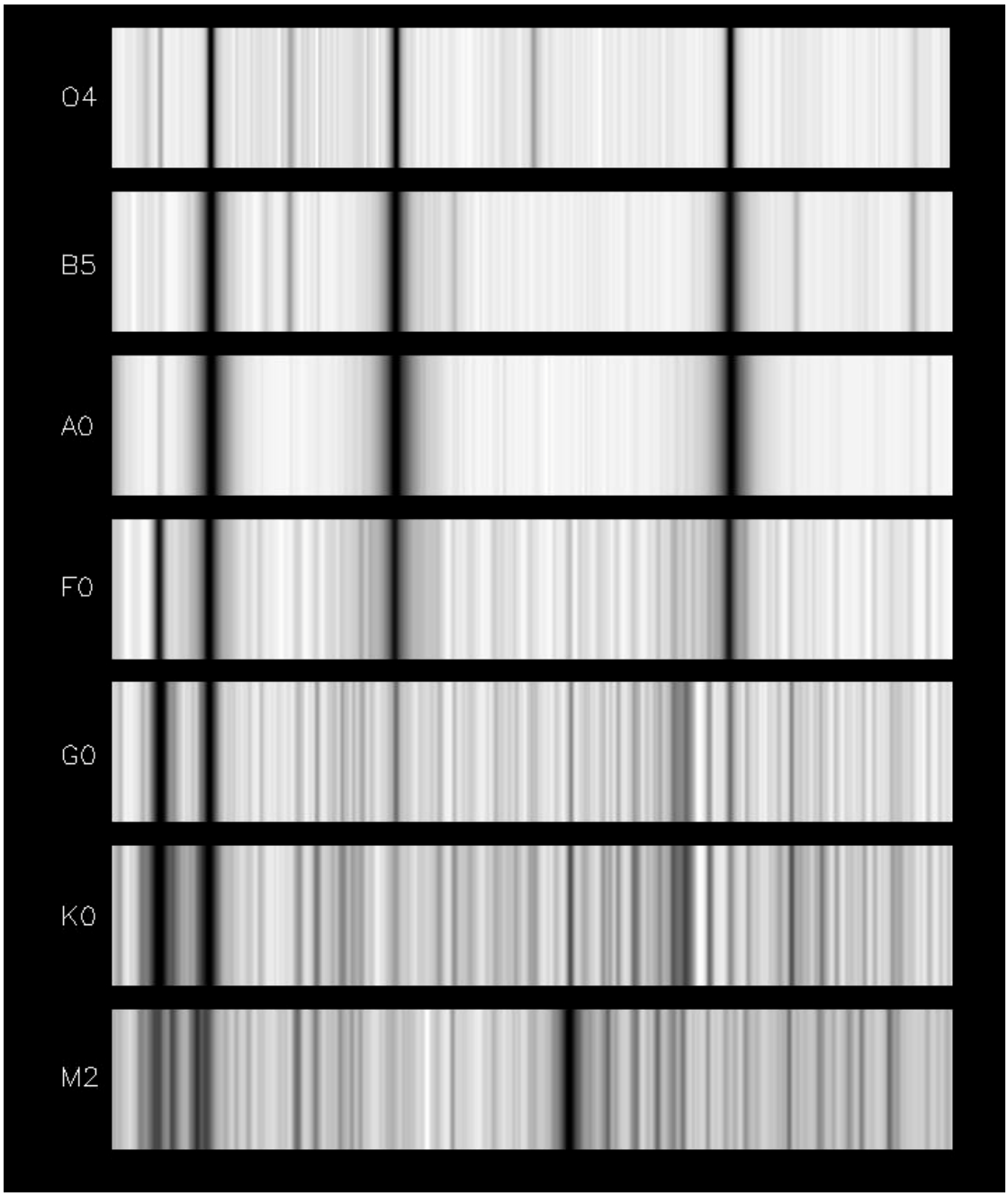

Pozorované a skutečné četnosti výskytu hvězd různých spektrálních tříd jsou již na první pohled odlišné. Když se při výběru neomezíme jen na nejjasnější hvězdy, jsou nejčetněji zastoupeny relativně chladné hvězdy spektrální třídy M [6]).

[6]) Tato informace určitě odpovídá tomu, jaké fyzikální parametry má „typická“ hvězda – viz kapitola 1.1.

**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.

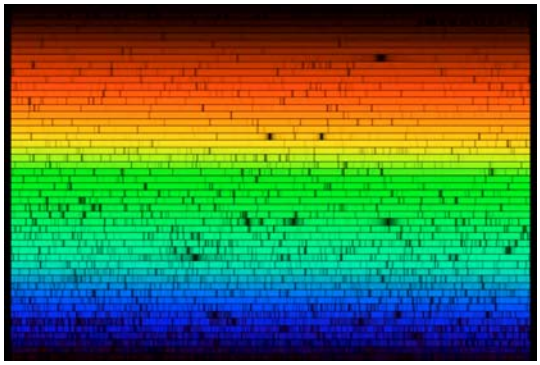


**Kdy září vodík?**

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 příslušejí 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.

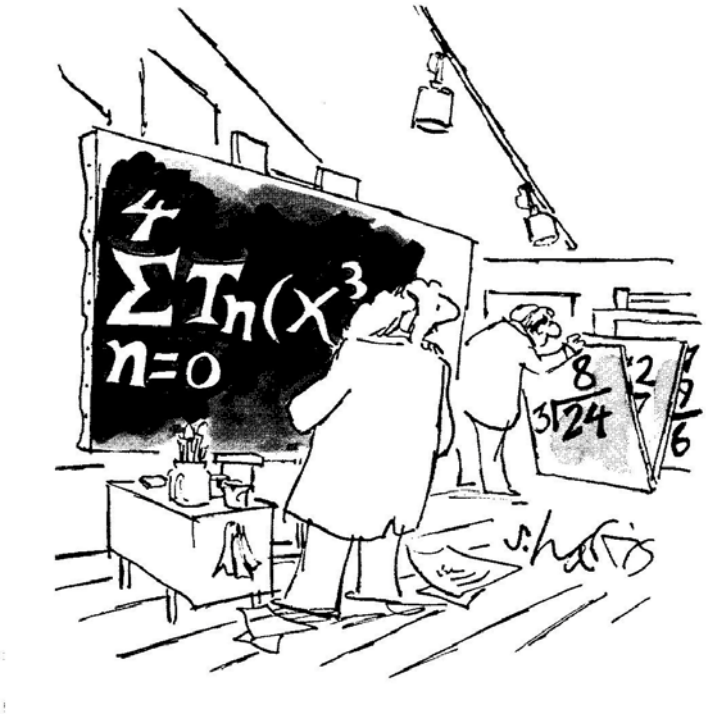
**Otázka 4.4.6.** Pozorujeme tři hvězdy s různými barevnými odstíny. Jen jedna z níže uvedených posloupností zabarvení představuje zároveň seřazení hvězd od nejchladnější po nejteplejší. Označte tuto posloupnost. a) načervenalá, namodralá, nažloutlá; b) načervenalá, nažloutlá, namodralá; c) taková posloupnost 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?

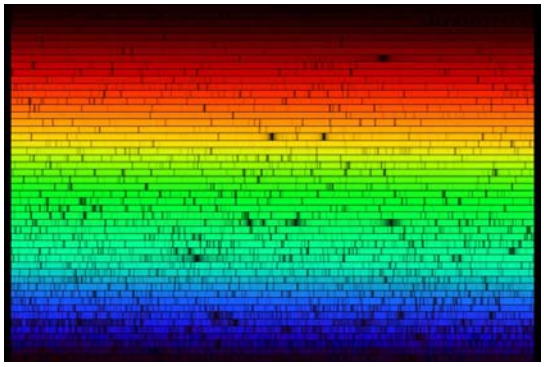
**Otázka 4.4.8.** Pro hvězdy spektrální třídy A jsou ve spektru typické: a) vodíkové čáry; b) molekulární čáry; c) čáry kovů (železa, niklu, wismutu...).

**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.

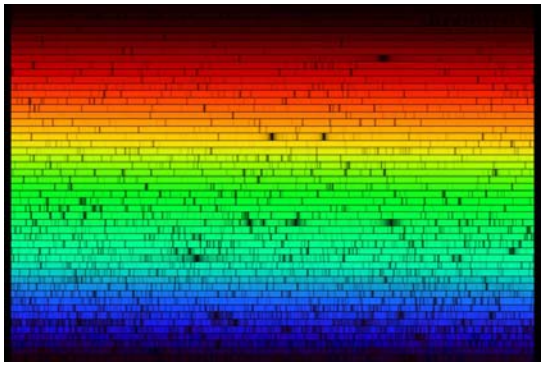
Do roku 1915 klasifikovala na čtvrt milionu hvězd, měsíční dávka činila 5000 hvězd. Aby dosáhla tohoto výkonu, pečlivě si práci zorganizovala. U malého stolku, zespodu prosvětleného, lupou prohlížela skleněné fotografické desky se spoustou spekter. Asistentu pak jen hlásila výsledky. Když se dostala 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-

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 příšerně zdlouhavá, únavná, ale naprosto nezbytná. Annie Cannonová ji podstoupila.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (zpracováno podle článku Barbary Weltherové, *Mercury*, 1984, 28–29).



speciální otázky

# Čísla a zase čísla

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 půlnoci do půlnoci) 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.

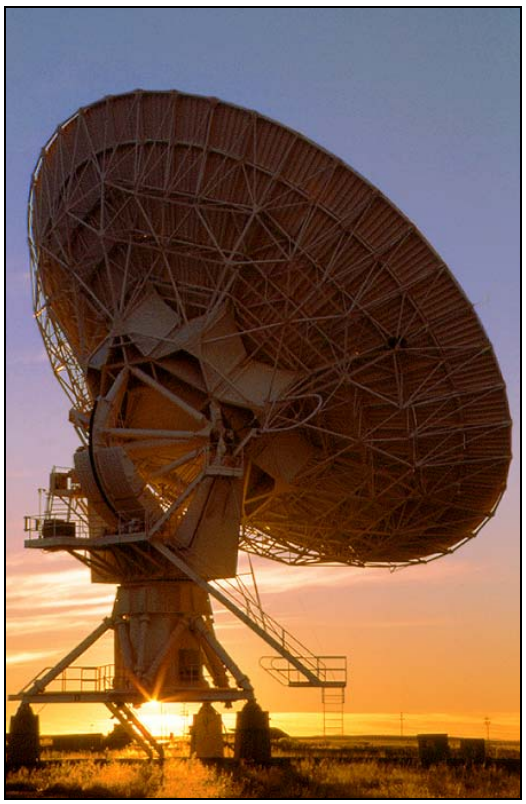
5. Jupiter, který obíhá kolem Slunce ve vzdálenosti zhruba 5 AU, dokončí jeden svůj oběh přibližně za 112 let.

# 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]).



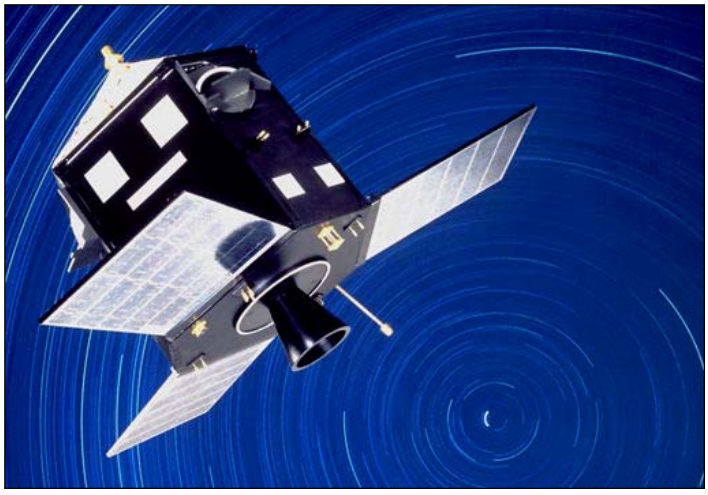
Radioteleskop sítě VLA v Socorro (Nové Mexiko, USA).

[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 odrážeče (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.

### 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.

| | *střední přesnost jednoho měření* |
|---|---|
| Ptolemaios (asi 100 n.l.) | ± 500" |
| Tycho Brahe (1600) | ± 100" |
| Hevelius (1680) | ± 18" |
| Bradley (1750) | ± 2" |
| Bessel (1825) | ± 0,7" |
| moderní pozorování (1950) | ± 0,1" |
| družice Hipparcos (1995) | ± 0,002" |



Družice Hipparcos (European Space Agency).

### Měříme paralaxy hvězd

Měření paralaxy je klasickou přímou metodou určování vzdáleností kosmických objektů. Nejdelší 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

$$a = 1 + (m - M)/5.$$

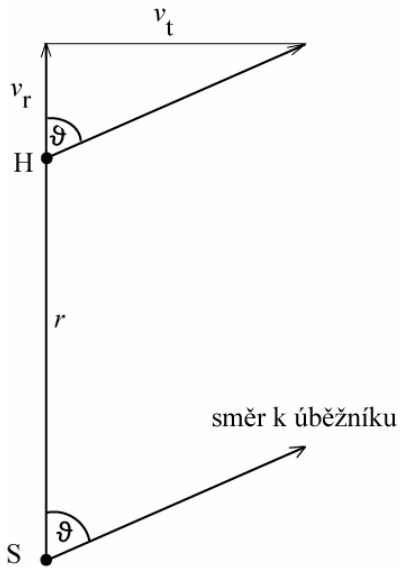
doplněk

# 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 $\vartheta$. Z pozorování známe radiální rychlost hvězdy vr (změříme ji na základě Dopplerova jevu) a vlastní pohyb hvězdy za rok $\mu$ (zjistíme jej z přesných měření poloh hvězdy). Velikost tečné složky rychlosti vt (kolmé na složku vr) je rovna (viz obr. vpravo)

$$v_t = v_r \operatorname{tg} \vartheta.$$




Vlastní pohyb hvězdy za rok je roven $\mu$. Je to zorný úhel $\vartheta$, pod kterým se nám jeví úsečka o délce dané součinem rychlosti $v_t$ a doby jednoho roku ve vzdálenosti Hyád.

Paralaxu $\pi$ 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 $\mathrm{km \cdot s^{-1}}$, proto $a$ dosazujeme v kilometrech a čas v sekundách) a po úpravě předchozího vztahu dostaneme pro paralaxu $\pi$

$$\pi = 4{,}74\ \mu / v_t = 4{,}74\ \mu / (v_r \operatorname{tg} \vartheta).$$

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

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?

Wilhelm Struve.

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 přímluvu 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 svém 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).

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 záludných, ale *lepší je vrabec v hrsti než holub na*

*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 kráčím dlouhými kroky dvě hodiny a nikde se nezastavuji. Sto kilometrů – to je horší: nejsem z těch, kteří by tuto vzdálenost ušli na jeden zátah, 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 uveďme, 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 záludných 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?

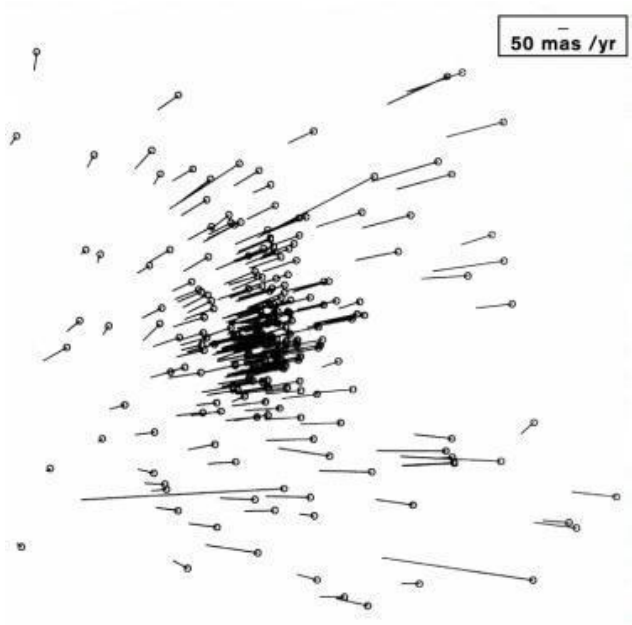
**Otázka 5.1.5.** Když určujeme vzdálenosti blízkých pohybových hvězdokup na základě vlastních pohybů jednotlivých hvězd hvězdokupy, dosahuje relativní chyba měření asi: a) maximálně 1 až 2 promile; b) několik procent; c) sto procent i více.

praktikum

# Vzdálenost hvězdokupy Hyády

Hyády v souhvězdí Býka jsou nejbližší otevřenou hvězdokupou a též hvězdokupou pohybovou. Co nejpřesnějšímu 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 tisícin úhlové vteřiny za rok.

Připomeňme si vztah, odvozený v doplňku této kapitoly, který použijeme pro výpočet paralaxy $\pi$ (a tudíž vzdálenosti r) pohybové hvězdokupy Hyády:

(1) $\pi = 4{,}74\ \mu/(v_r \operatorname{tg} \vartheta)$,

kde $\mu$ je vlastní pohyb hvězdy (z hvězdokupy) za rok, $v_r$ je její radiální rychlost a $\vartheta$ 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 $\alpha$ a deklinace $\delta$) a složky vlastních pohybů za rok v rektascenzi ($15\ \mu_\alpha \cos\delta$) a deklinaci ($\mu_\delta$). Doplňte v tabulce hodnotu celkového vlastního pohybu $\mu$ za rok, kterou vypočítáte ze vztahu

(2) $\mu = \sqrt{[(15\ \mu_\alpha \cos\delta)^2 + \mu_\delta^2]}$.

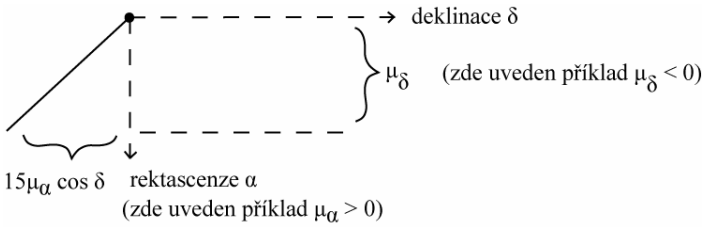
Použití vztahu (2) je oprávněné, neboť složky vlastního pohybu v rektascenzi a deklinaci jsou natolik malé, že pravoúhlý *sférický* trojúhelník přejde v *rovinný*, kde $\mu$ tvoří přeponu (můžeme proto použít Pythagorovu větu).

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 $3^h50^m$ do $7^h0^m$, pro deklinaci od 0° do 30°. Měřítka v obou osách musí být stejná ($1^h = 15°$, $4^m = 1°$);

– 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 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 $\vartheta$. Chcete-li pracovat přesněji, musíte vzít v úvahu, že nejde o případ v rovině, ale sférický. Úhel $\vartheta$ lze vypočítat ze základních vztahů sférické trigonometrie pro úhlovou vzdálenost dvou bodů daných svými sférickými souřadnicemi. Protože výpočet není zcela jednoduchý, použijte hodnot $\vartheta$ uvedených v tabulce 1.

5. Poněvadž již znáte hodnoty veličin $\mu$, $v_r$ a $\vartheta$, vypočítejte pomocí vztahu (1) paralaxu $\pi$ pro všech 8 hvězd a výsledky zprůměrujte. Vzdálenost $r = 1/\pi$ (v parsecích), kterou takto vypočítáte, srovnejte 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).

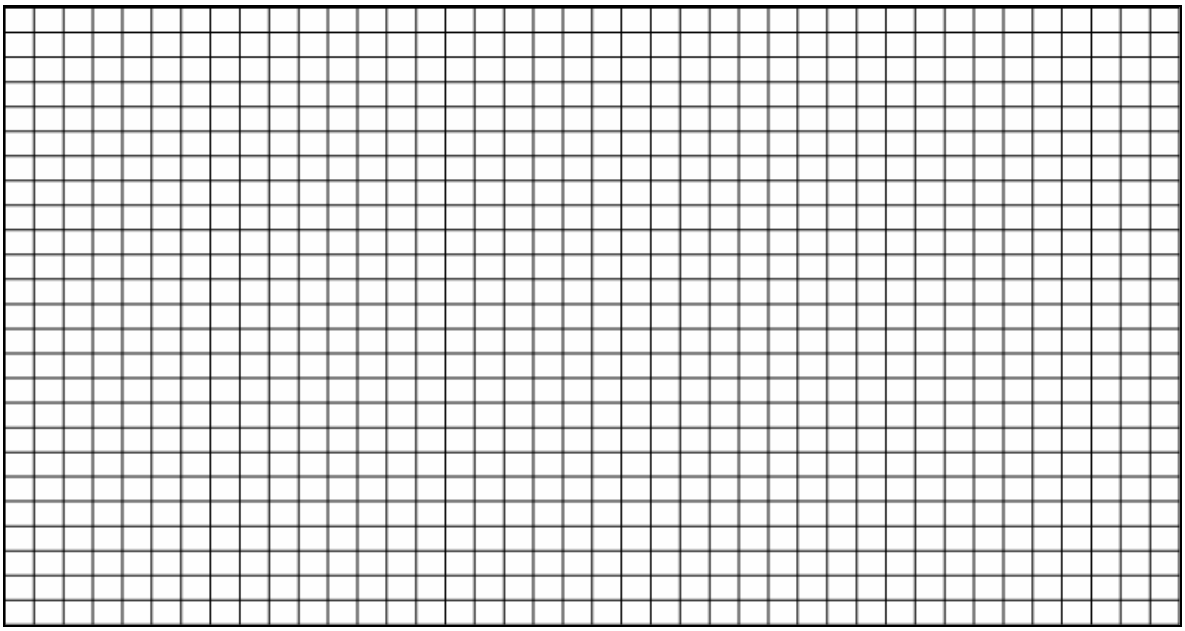
***Vstupní data, výsledky:***

**Tabulka 1**

| *Číslo hvězdy* | $\alpha$ (2000) | $\delta$ (2000) | $15\mu_\alpha \cos\delta$ | $\mu_\delta$ | $\mu$ | $\vartheta$ | $v_r$ (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 $\pi$: _____

Vzdálenost $r$ (v parsecích): _____



Obr. 1. Polohy a vlastní pohyby osmi hvězd z Hyád.

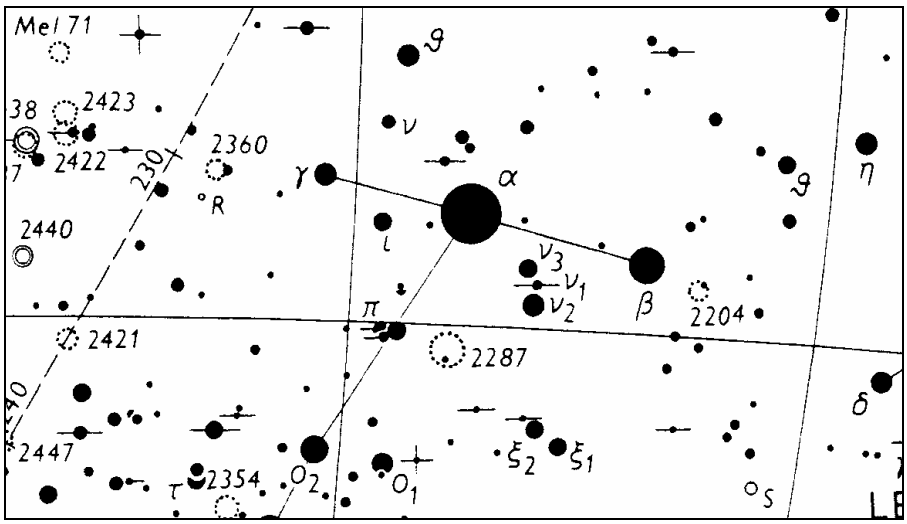
úloha k zamyšlení

# 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

a) Huygensovou metodou, tedy za předpokladu, že Sirius a Slunce *opravdu* mají stejný zářivý výkon;

b) 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**

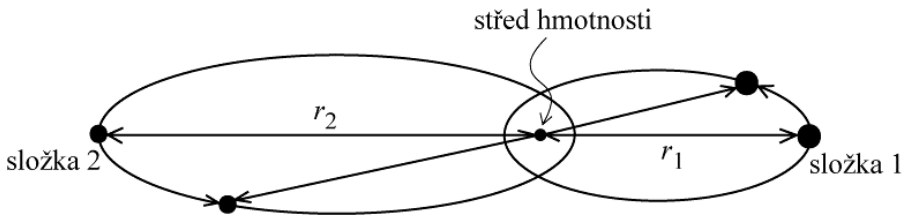
Hmotnost je nejpodstatnější charakteristikou hvězdy, protože na její velikosti závisí stavba a vývoj hvězdy. Bohužel právě hmotnost je veličinou, která se u hvězd zjišťuje s největšími obtížemi. Prakticky jediná přímá metoda je použitelná pouze u dvojhvězd. Známe-li vzdálenosti složek dvojhvězdy od středu 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 $\pi$ 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 $M_1/M_2 = r_2/ r_1$.

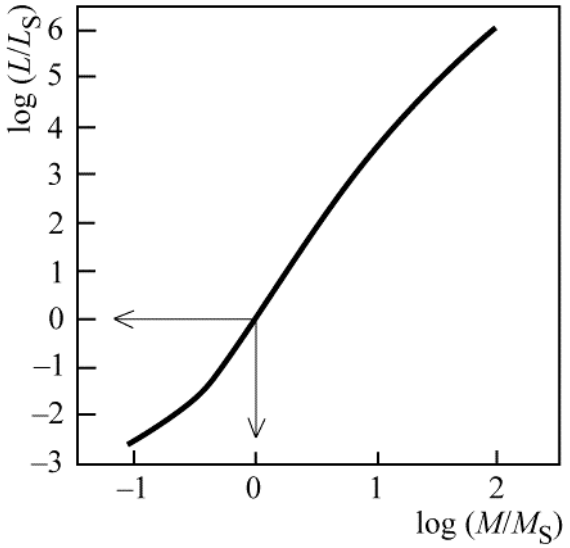
**Hmotnosti osamocených hvězd**

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. Nejásejme 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 $L$:

$$L = a\, M^{\,b},$$

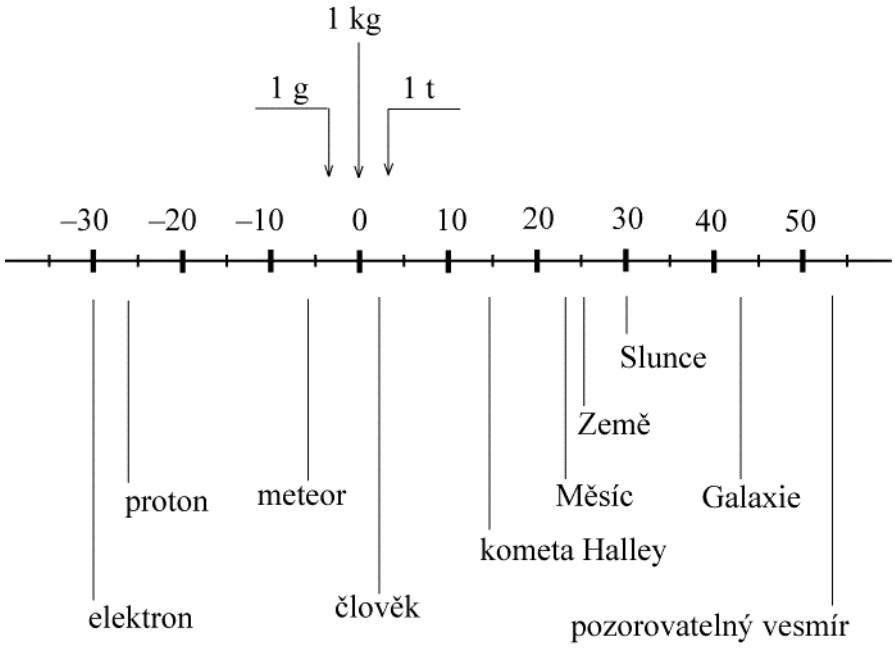
kde $a$, $b$ jsou konstanty. Konstanta $b$ má hodnotu blízkou 3.



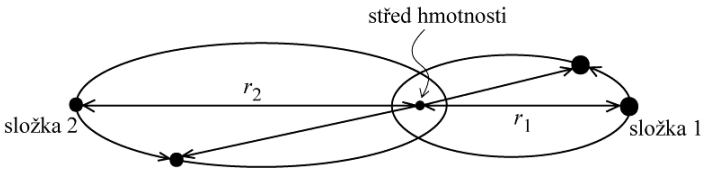

Schematický průběh závislosti hmotnost – zářivý výkon hvězdy (hmotnosti $M$ a zářivé výkony $L$ jsou uvedeny ve slunečních jednotkách).

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 praktiku 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.




Hmotnosti objektů ve vesmíru (vodorovná škála hmotností je uvedena v logaritmické míře a v kilogramech).




*Dobrá pozorování nikdy neumírají, uvadají jen teorie.*

Harlow Shapley, astronom (1885 – 1972)

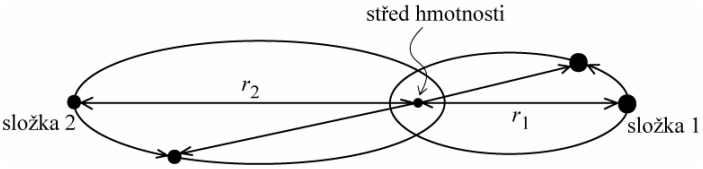
## otázky a příklady

**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].




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**, $\mu_1$, $\mu_2$ hmotnosti složek, pak třetí Keplerův zákon bude mít tvar

(1) $a^3/P^2 = \mu_1 + \mu_2$.

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) $a = a''\, r = a/\pi$,

kde $a''$ je velká poloosa vyjádřená v úhlových vteřinách, $r$ vzdálenost v parsecích, $\pi$ je paralaxa. Po dosazení vztahu (2) do (1) dostáváme pro tzv. dynamickou paralaxu výraz

(3) $\pi^3 = a''^3/[P^2(\mu_1 + \mu_2)]$.

**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 $\pi$.

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) $M_k = m_k + 5 + 5 \log \pi, \quad k = 1, 2.$

3. Závislost hmotnost – zářivý výkon $M = f(\mu)$ umožní stanovit (pro každou složku) odhady hmotností $\mu_1$ ($\mu_2$). 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) $\log \mu = p\, M + q$,

kde konstanty p, q nabývají hodnot:

| rozsah $M$ (mag) | p | q |
|---|---|---|
| $M < 0$ | –0,12 | 0,46 |
| $0 \le M \le 7{,}5$ | –0,10 | 0,46 |
| $7{,}5 < M \le 11$ | –0,14 | 0,75 |

Veličina $M$ je absolutní bolometrická hvězdná velikost.

4. Přesnější hodnoty $\mu_1 + \mu_2$, získané výpočtem ze vztahu (5), dosaďte 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 _____**

| *Cyklus výpočtu* | $\mu_1$ | $\mu_2$ | $\pi$ | $M_1$ | $M_2$ | log $\mu_1$ | log $\mu_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,0 | 1,0 | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |

**Tabulka 2.**

| *Dvojhvězda* | $m_1$ (mag) | $m_2$ (mag) | $a$" | $P$ (roky) | *Dynam. paralaxa* | *Trigon. paralaxa* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 70 Oph | 4,2 | 6,0 | 4,56" | 87,71 | | 0,193" |
| $\alpha$ Cen | 0,0 | 1,2 | 17,58" | 79,92 | | 0,754" |
| $\gamma$ Vir | 3,5 | 3,5 | 3,70" | 168,68 | | 0,094" |
| $\xi$ Boo | 4,7 | 7,0 | 4,90" | 151,51 | | 0,145" |

# 5.3. Rozměry hvězd

Ve velikostech hvězd jsou obrovské rozdíly. Porovnáváme-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.

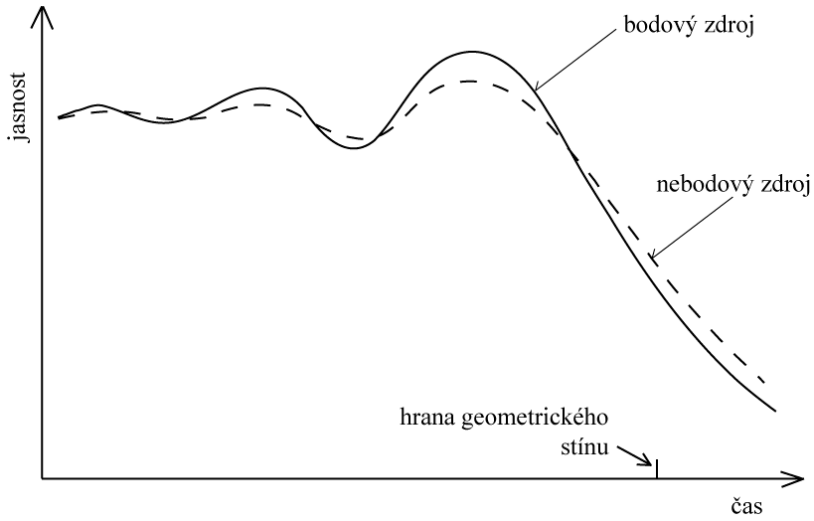
Dva desetimetrové reflektory Keckovy observatoře na Havajských ostrovech slouží jako obří interferometr.

### 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 tisíciny 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.

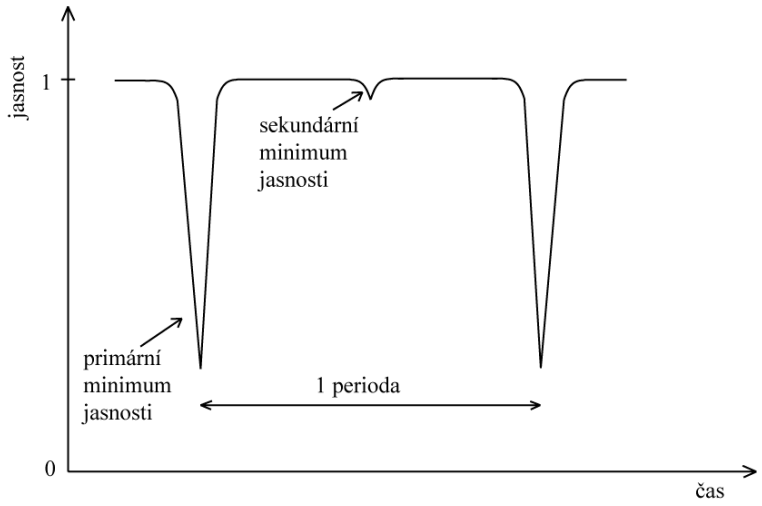



Fotometrický záznam zákrytu hvězdy Měsícem.

### 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).

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 katalozích najdeme v současné době na 10 000 položek.




Schematizovaná světelná křivka algolidy.

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 blíž 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 nepřímo 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].

doplněk

# 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:

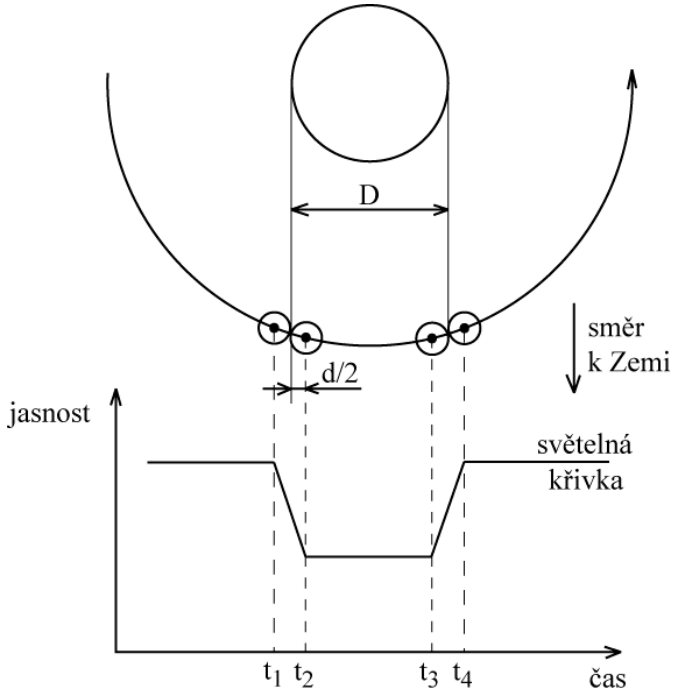
$$(t_4 - t_1)/P = (D + d)/(2\,\pi\, r) \quad \text{a}$$

$$(t_3 - t_2)/P = (D - d)/(2\,\pi\, r)\ .$$

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:

$$2\,\pi\, r = P \cdot v,$$

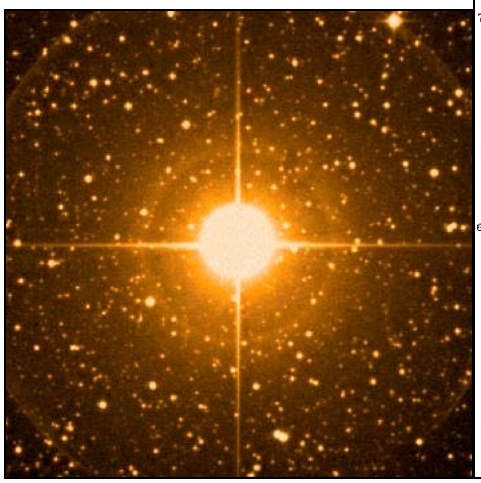
a pak lze vypočítat i velikosti $D$ a $d$ v kilometrech.

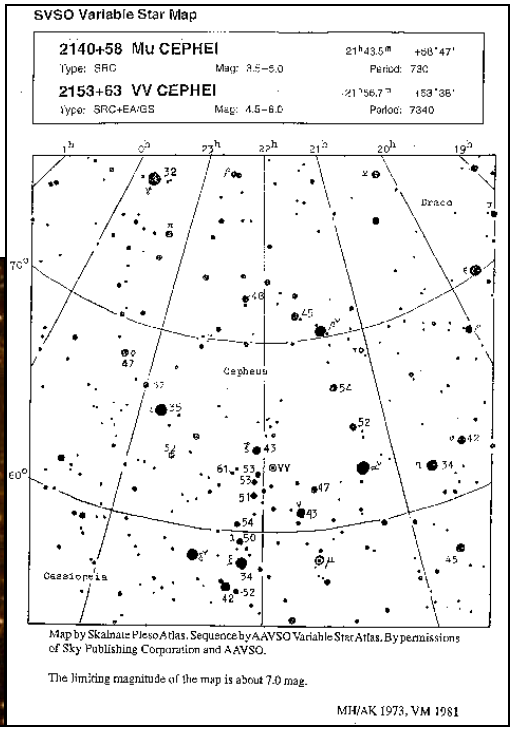


úloha k zamyšlení

# 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 přivézt 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.

### 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 dvojí: 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 nejčetnější?

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.

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.

| *Druh meteoritu:* | *pády:* | *nálezy:* | *antarktické nálezy:* |
|---|---|---|---|
| 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 nebývalém 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**

Zdálo 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.

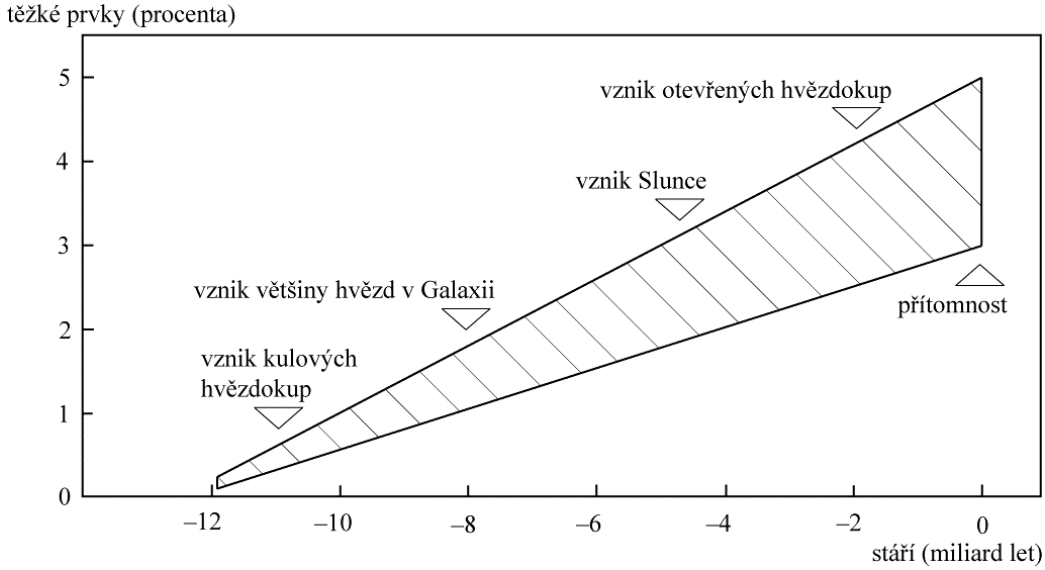
Sluneční vítr je pokračováním svrchní vrstvy atmosféry (tzv. koróny), která je ještě opticky přímo pozorovatelná.

Sluneční vítr podává přímou informaci o chemickém složení svrchní vrstvy Slunce, odkud vylétá. 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 promíchaná. 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 odpovídá *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 | $1{,}7\cdot10^{-5}$ |
| helium 4 | 0,04 |
| kyslík | $5\cdot10^{-4}$ |
| neon | $7{,}5\cdot10^{-5}$ |
| křemík | $7{,}5\cdot10^{-5}$ |
| argon | $3{,}0\cdot10^{-6}$ |
| železo | $4{,}7\cdot10^{-5}$ |

**Chemické stárnutí vesmíru**

Příliš se nezmýlíme, 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 podrobnější 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 procento 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.




Četnost výskytu těžších prvků ve vesmíru v závislosti na čase.

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 slovutný 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. Nezbývalo 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 uhlíkaté chondrity.

Jsou-li meteority něco vzácného, co si zaslouží důkladné zhodnocení, pak uhlíkaté chondrity představují mimořádně zajímavý materiál. Z vědeckého hlediska je to látka z nejcennějších a ve srovnání s horninami Měsíce uhlíkaté 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. Uhlíkaté 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 nevynutí, ale rozpadne se a shoří. Dopad uhlíkatého meteoritu na zemský povrch je vlastně z mechanického hlediska malý zázrak, protože uhlíkaté chondrity jsou tím nejkřehčím kosmickým kamením, které vydrží průlet zemskou atmosférou.

Vzácnost uhlíkatých 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 uhlíkaté chondrity, které byly sebrány okamžitě po pádu. Navíc (a to málokterý geolog nebo mineralog připustí)

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: amorfní 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.

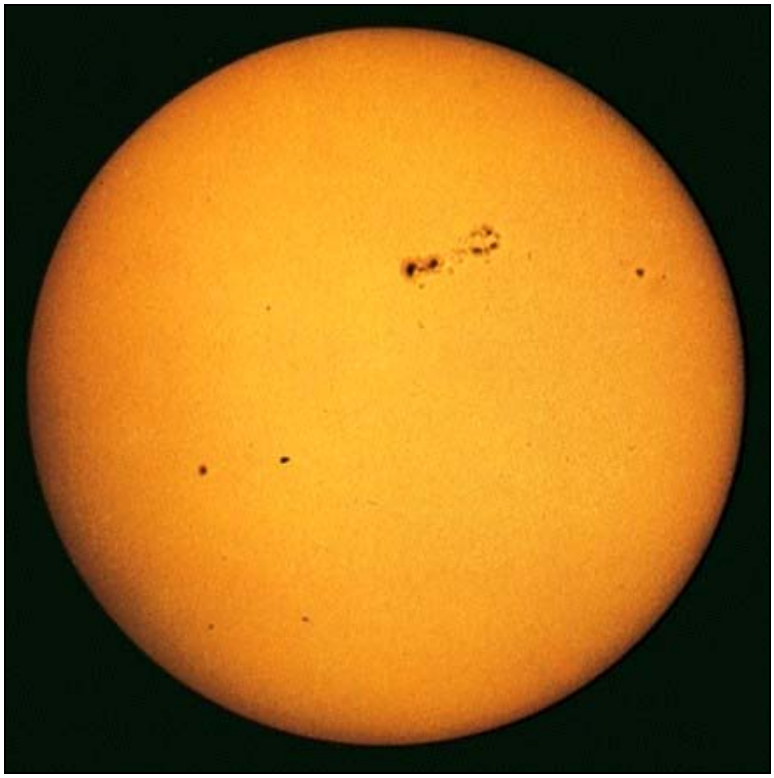
# 5. Jak astronomové měří a váží

*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-

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 omšelých 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 výzkumníka 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, nalezly 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 obzvlášť 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

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 nepřekonala 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-Exupery 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-Exupery 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 záludných otázek z astronomie* (Rovnost, Brno 1996).

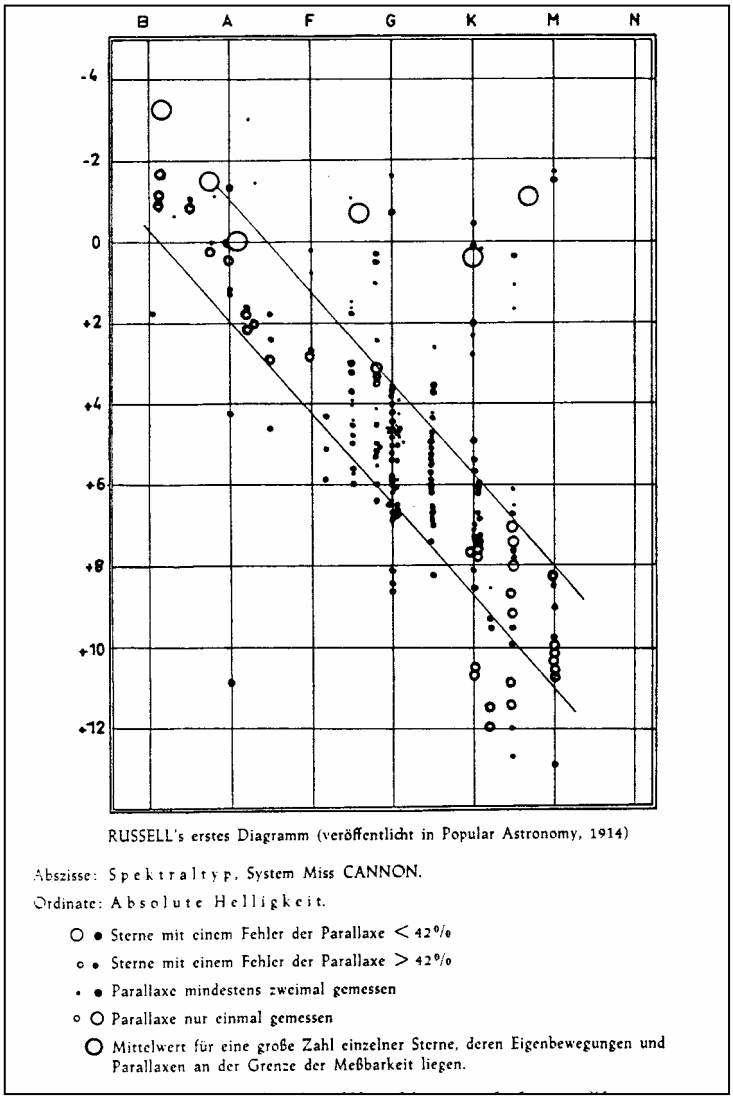
# 5.5. Hvězdy v diagramu

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 Russella [1]).

### Trocha historie

V roce 1905 si dánský astronom Ejnar Hertzsprung (1873–1967) povšimnul, že vedle malých červených hvězd (malých rozměry i výkony) 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).




RUSSELL's erstes Diagramm (veröffentlicht in Popular Astronomy, 1914)

Abszisse: Spektraltyp, System Miss CANNON.
Ordinate: Absolute Helligkeit.

○ ● Sterne mit einem Fehler der Parallaxe < 42%
○ ● Sterne mit einem Fehler der Parallaxe > 42%
• ● Parallaxe mindestens zweimal gemessen
○ ○ Parallaxe nur einmal gemessen
○ Mittelwert für eine große Zahl einzelner Sterne, deren Eigenbewegungen und Parallaxen an der Grenze der Meßbarkeit liegen.

### 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*.

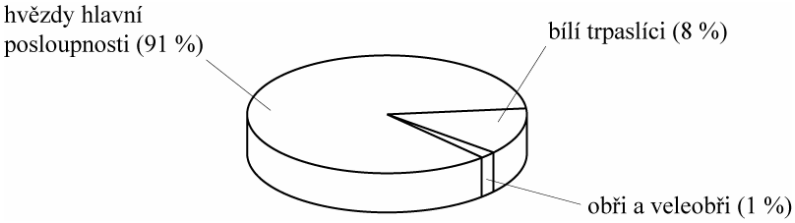
s malým výkonem. Jde o *hlavní posloupnost*; obsahuje přes 90 procent všech hvězd včetně našeho Slunce.

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 „obři“, „veleobři“, „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 diagram [3])

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.

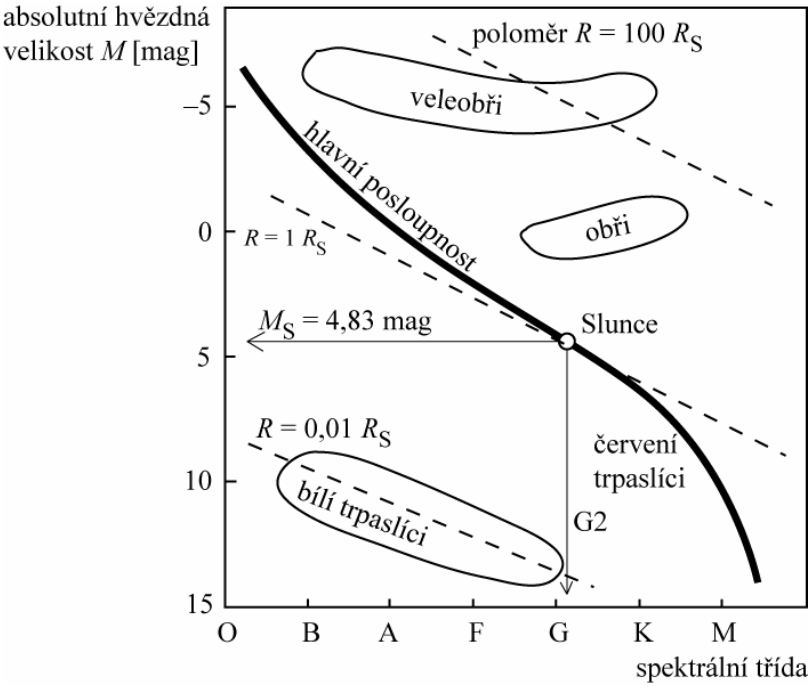
Například pomocí tohoto diagramu můžeme odhadnout *vzdálenost* hvězdy: stačí znát její spektrální třídu a příslušnost hvězdy k hlavní posloupnosti, obrům či trpaslíkům (a to lze za jistých okol-

[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 větví 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.

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.



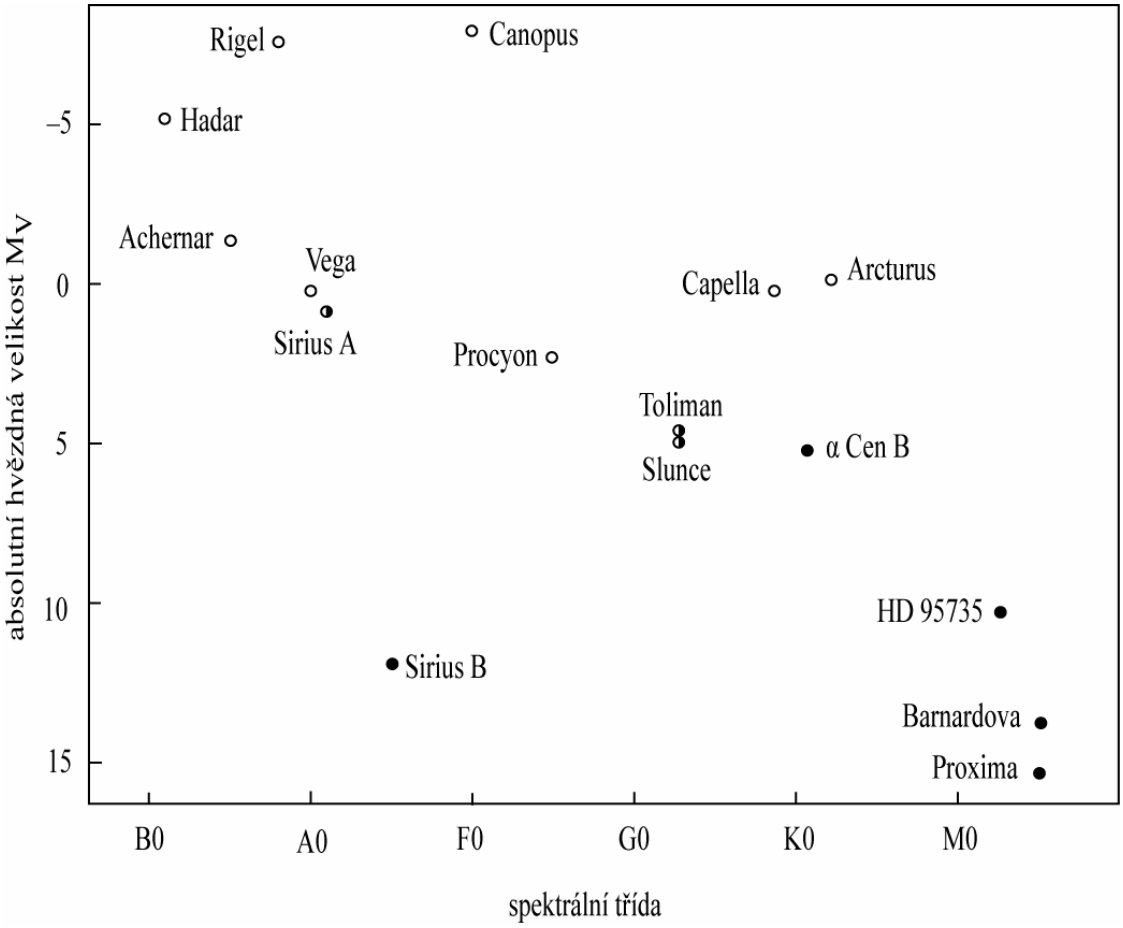

Schematický vzhled Hertzsprungova-Russellova diagramu.

**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 sestrojit barevný diagram, v němž na svislou osu vyneseme nikoli pozorované, ale již *absolutní* hvězdné velikosti. Pro jinou hvězdokupu, jejíž vzdálenost neznáme, sestrojíme 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.




Hertzsprungův-Russellův diagram pro nejjasnější hvězdy (prázdné kotoučky a nejbližší hvězdy (plné kotoučky).

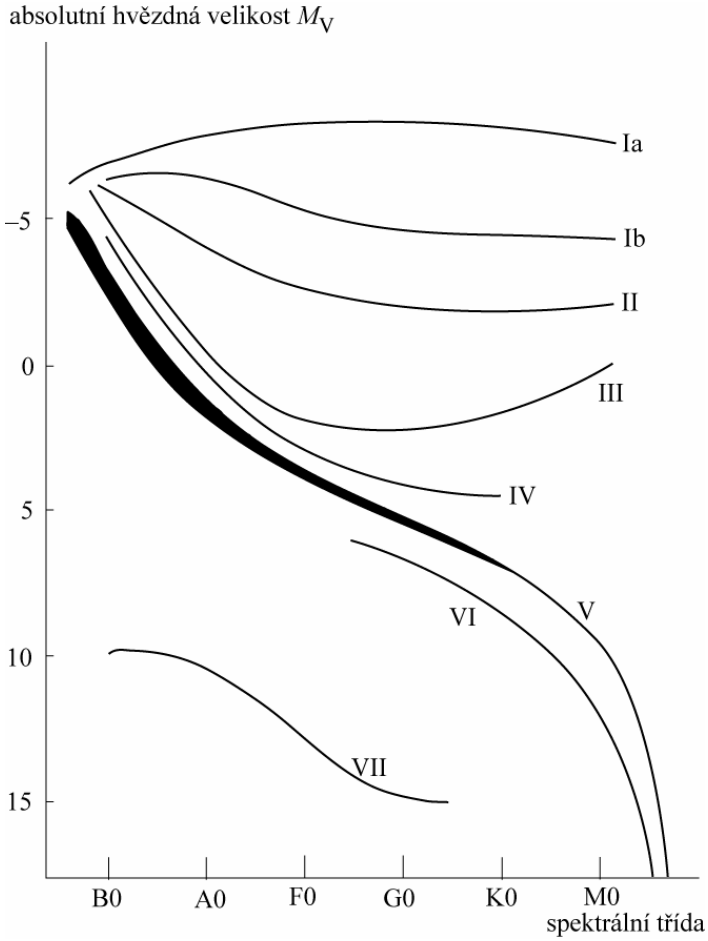
**Luminozitní [4]) třídy**

Hrubé třídění hvězd na veleobry, obry, hvězdy hlavní posloupnosti a trpaslíky se zjemňuje zavedením dalšího parametru při klasifikaci spekter – tzv. *luminozitní 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 *luminozitní 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 luminozitní třídě spolu se spektrálním typem hvězdy rámcovou informací o *velikosti* hvězdy.

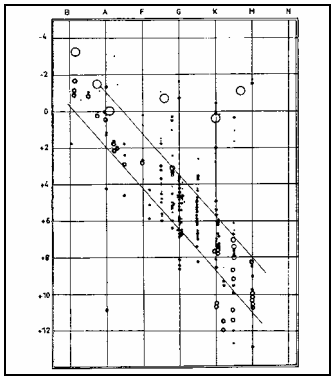
[4]) Latinské *luminosus* označuje světlý, jasný.
[5]) Zavedli ji Herbert Morgan a Phillip Keenan, proto se označuje jako Morganova-Keenanova (MK) klasifikace.

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




Luminozitní třídy.

[6]) Někdy se označují jako *nadobři*.



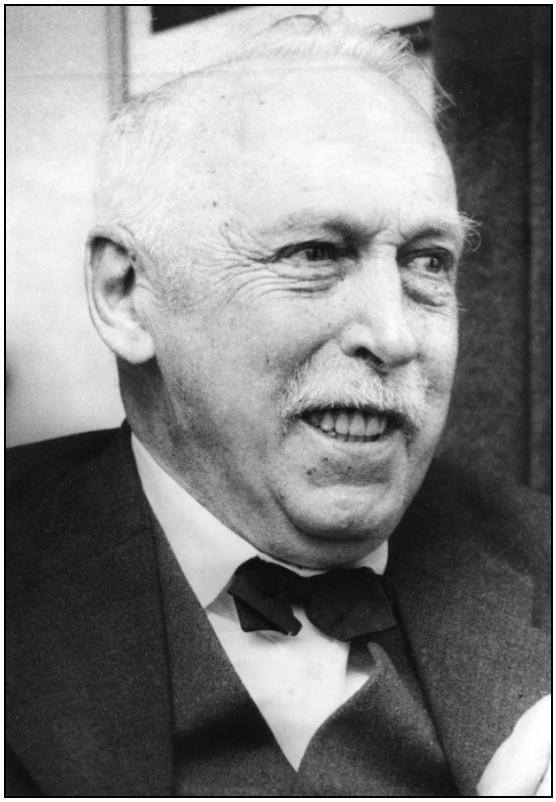
čítanka

# 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, zůstával 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.

Henry Norris Russell.

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.

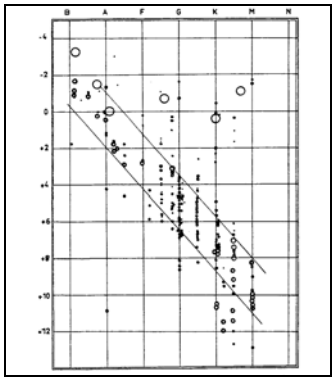


Ejnar Hertzsprung.

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 roku 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?

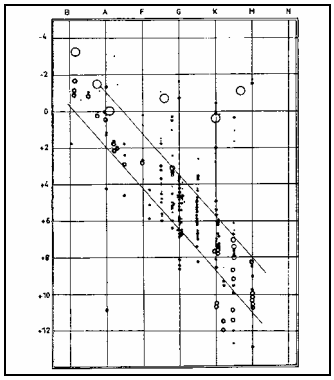
**Otázka 5.5.9.** Které z následujících tvrzení *není* pravdivé? a) Určíme-li spektrální třídu hvězdy, známe alespoň přibližně její povrchovou teplotu. b) Průměr hvězdy, absolutní hvězdná velikost a povrchová teplota hvězdy spolu navzájem souvisejí. c) I když známe jen barevný index hvězdy, můžeme pomocí 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?




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 Sp 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 1 [1]). 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 letmý 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.

Odhadněte, kolikrát větší objem zaujímají uvedené nejjasnější hvězdy ve srovnání s vypsanými 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, zapište 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 | |

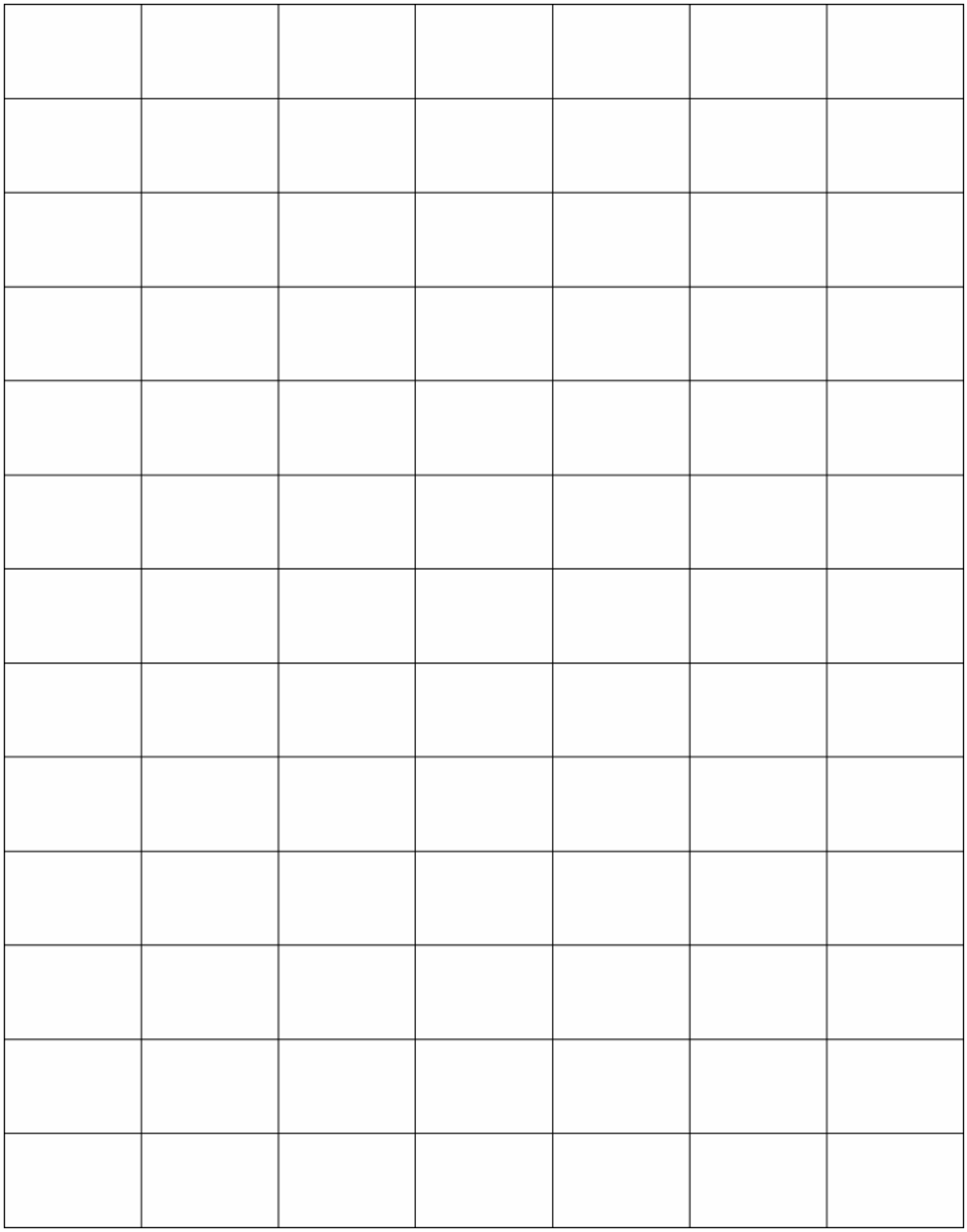
**Tabulka 2. 26 nejbližších hvězd**

| *Hvězda* | *M* (mag) | Sp | *Hvězda* | *M* (mag) | Sp |
|---|---|---|---|---|---|
| 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**

| *Hlavní posloupnost* | | *Obři* | | *Veleobři* | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sp | *M* (mag) | Sp | *M* (mag) | Sp | *M* (mag) |
| 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 zaujímají objem přibližně _____ větší.



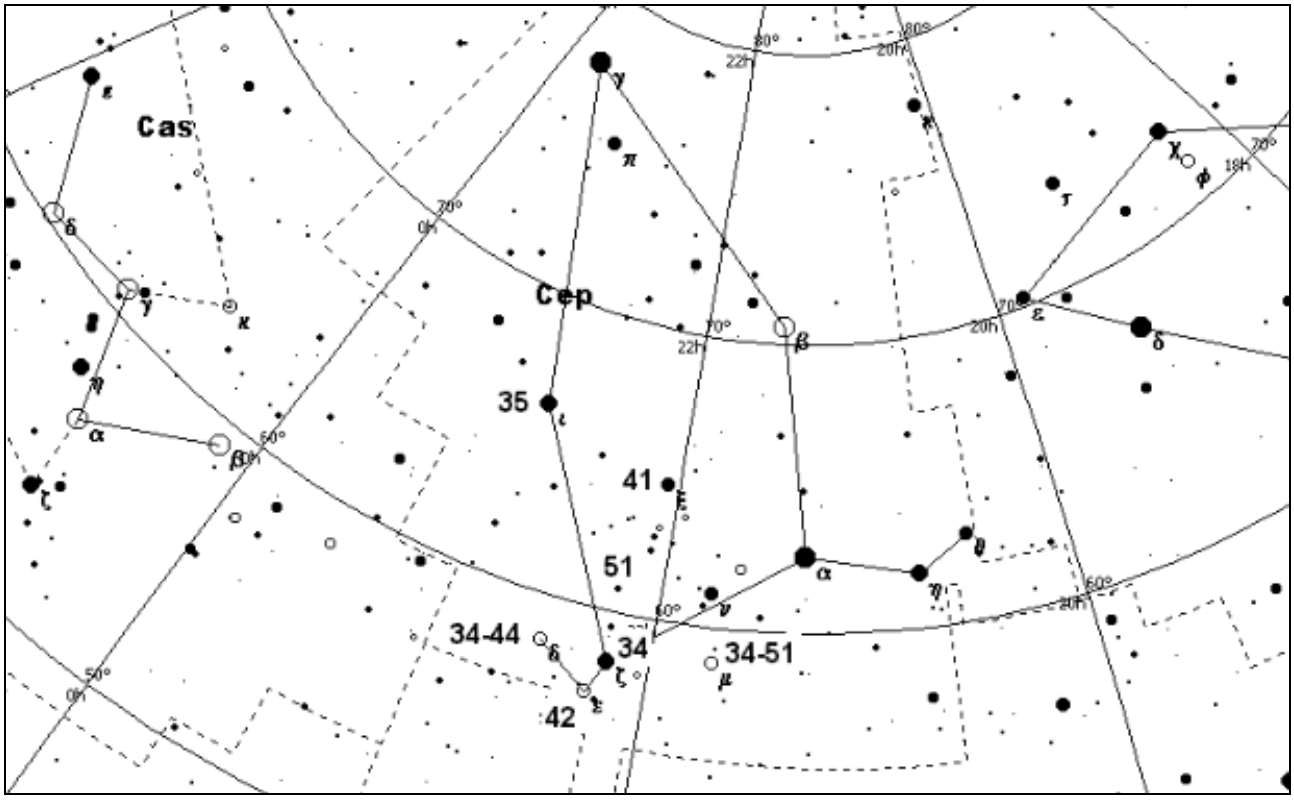
Obr. 1. Hertzsprungův-Russellův diagram

# 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

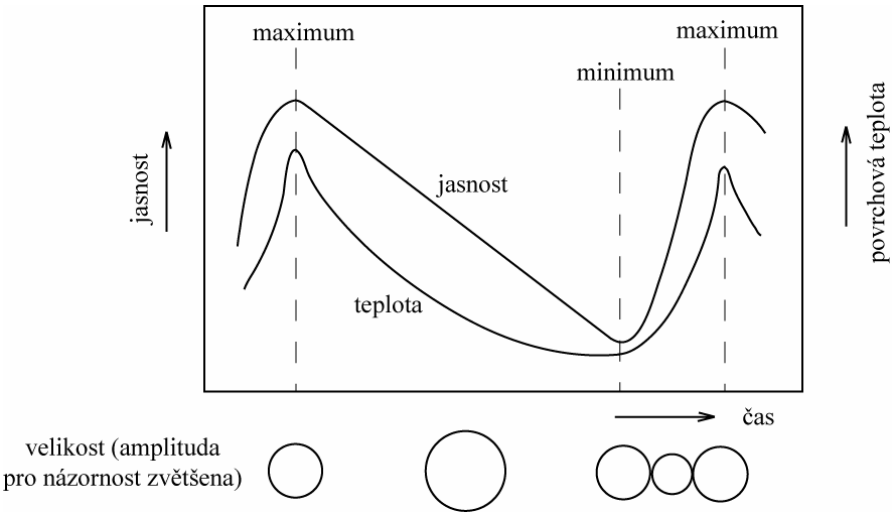
V roce 1784 objevil John Goodricke [1]) (1764–1786), že hvězda δ Cephei je proměnná: s periodou více než pěti dní pravidelně mění svou hvězdnou velikost v rozmezí jedné magnitudy. Stala se prototypem celé skupiny proměnných hvězd, nazývaných *cefeidy*.




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*.

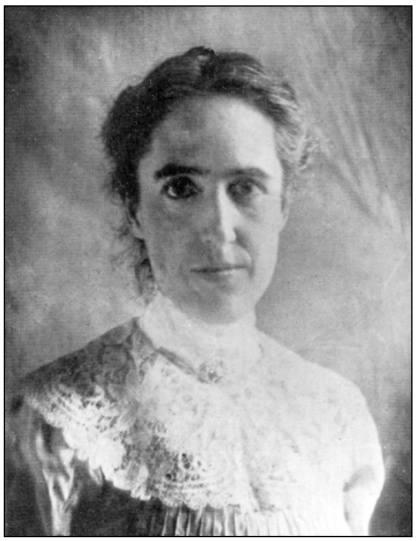
Cefeidy jsou veleobři spektrálních tříd F a G, jinak ale též pulsující proměnné hvězdy, u nichž dochází k periodickému rozpínání a smršťování atmosfér. Maximální jasnost odpovídá nejrychlejšímu rozpínání, minimální pak nejrychlejšímu smršťování. Relativní změny poloměru nejsou ale nijak velké, dosahují asi 10 procent. S periodou světelných změn se poněkud mění také povrchová teplota a tedy i spektrální třída.




Změna některých veličin u cefeid.

**Objev Henrietty Leavittové**

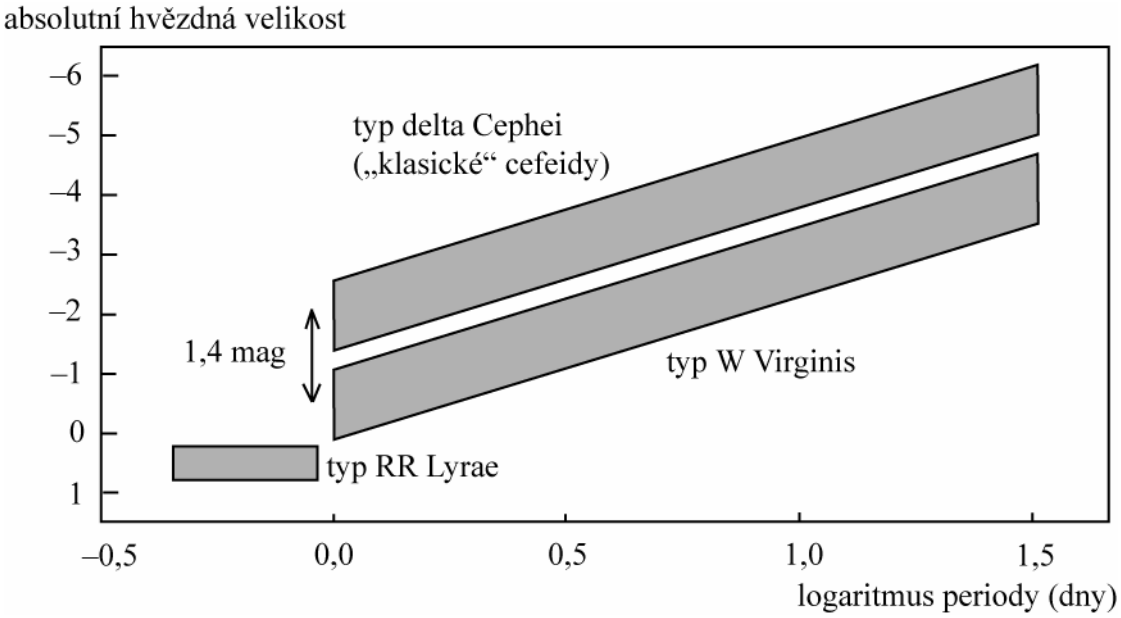
Henrietta Leavittová [2]), astronomka z Harvardovy observatoře, si v roce 1912 povšimla, že mezi střední absolutní jasností cefeid (tedy středním zářivým výkonem) a periodou jejich světelných změn existuje výrazná závislost: čím je *delší* perioda, tím *vyšší* je pozorovaná jasnost a tomu tudíž odpovídá 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.*




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).

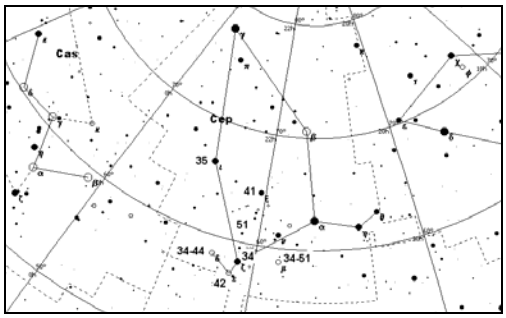
Závislost „zářivý výkon – perioda světelných změn cefeid“ má značný praktický význam pro určování vzdáleností ve vesmíru. Stačí znát periodu změn jasnosti cefeidy, abychom zjistili její absolutní hvězdnou velikost.

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 pulsující 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 *virdžínis*) – 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.

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 bádal, sestavoval roztodivné tabulky a diagramy, až najednou odhalil něco neobvyklého. Vybrané hvězdy byly v průměru tím červenější, čím se na obloze jevily 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.“

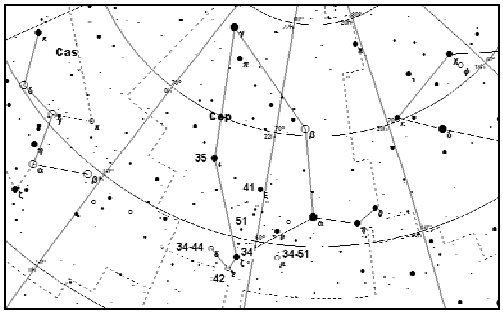
Náš doktorand byl v koncích. Sklesle se vypravil za profesorem a s obavami, že ho vyplísní, jak nedbale pozoroval, ho požádal o radu. Ten ale, když vše vyslechl, se od srdce zasmál a pravil: „Milý příteli, měřil jste opravdu dostatečně přesně. Vysvětlení toho, co jste zjistil, je docela prostinké. Vždyť 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

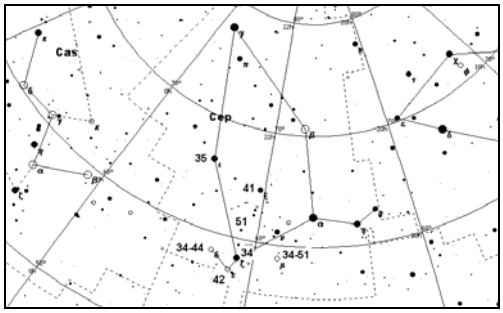
**Otázka 5.6.1.** Proč jsou „klasické“ cefeidy vhodnější pro určování vzdáleností než hvězdy typu RR Lyrae? a) U hvězd typu RR Lyrae není výrazná závislost periody světelných změn na absolutní hvězdné velikosti. b) Cefeidy oproti hvězdám typu RR Lyrae mají větší zářivý výkon, takže je zahlédneme ve vzdálenějších 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?




praktikum

# Vzdálenost cefeid

Cefeidy – pulsující proměnné hvězdy – slouží k určování vzdáleností ve vesmíru, jsou svého druhu „majáky“ rozesetými 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) vyneste 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 odečtěte příslušné periody a hvězdné velikosti; $m_{\text{stř}}$ je střední hodnota maximální a minimální hodnoty hvězdné velikosti: $m_{\text{stř}} = (m_{\max} + m_{\min})/2$. Hvězdné velikosti odečítejte s přesností na desetinu magnitudy. Výsledky zapisujte do tabulky 3 a vyneste do grafu (obr. 2); tyto čtyři body označte odlišně od ostatních (prázdným kroužkem, křížkem apod.).

3. Vynesenými body na obr. 2 proložte přímku. 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 přímky vynesenými body. Stupnici $M$ vynášejte na pravou svislou osu, měřítko musí zůstat stejné! Výhodné je volit posuv o celistvý počet magnitud.

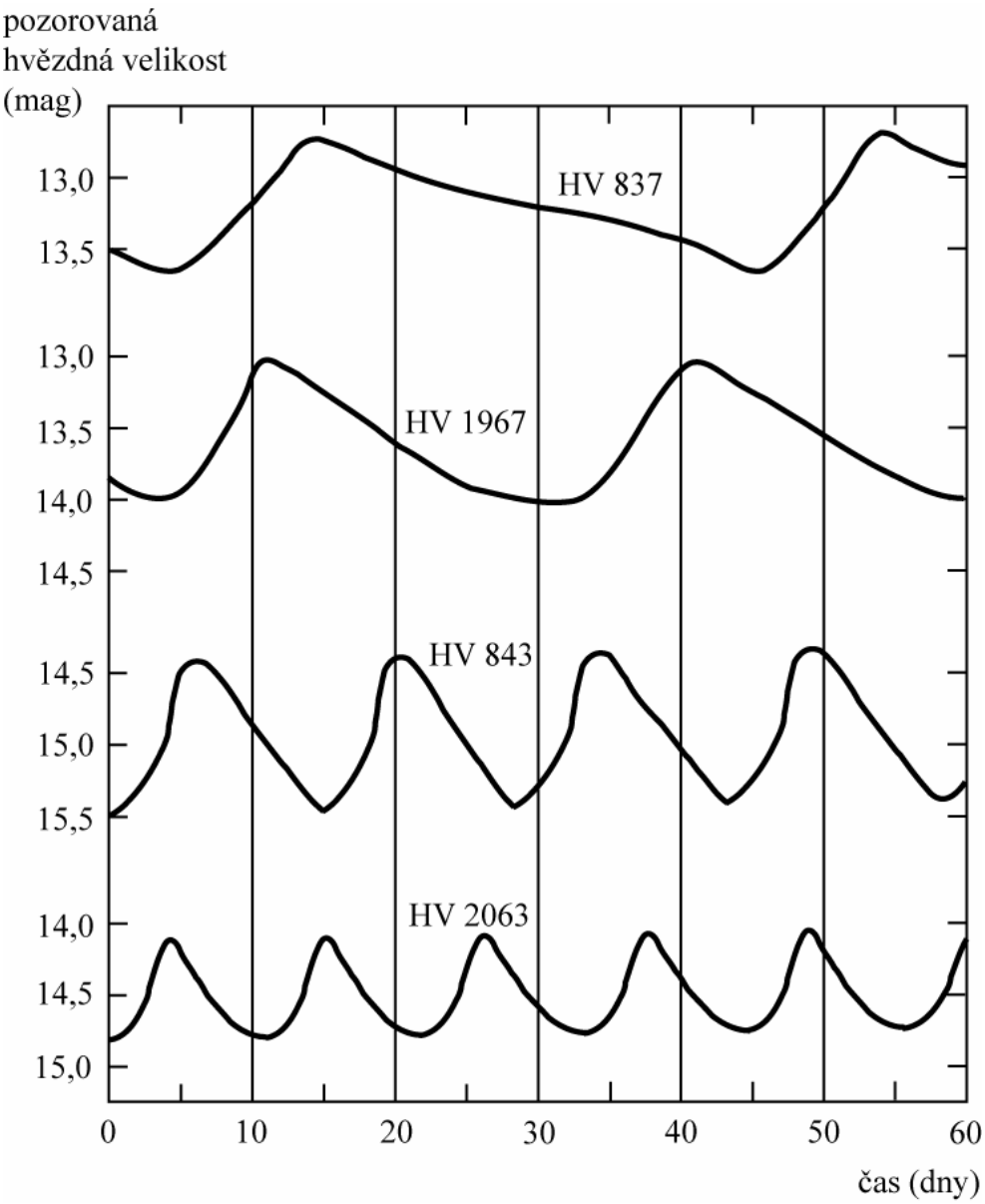
Nově vynesenými body proložte přímku.

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

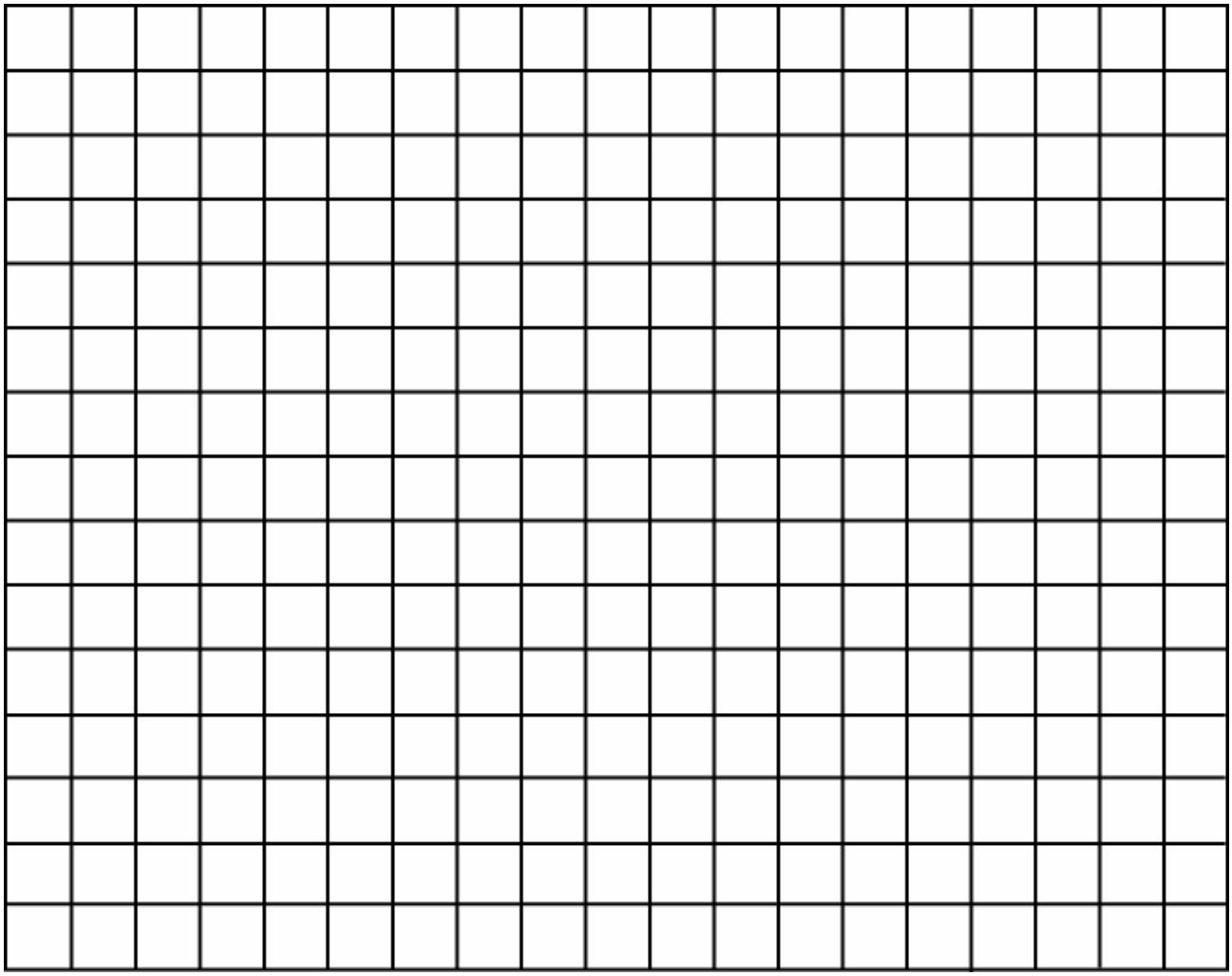
$$m - M = 5 \log r - 5.$$

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.



Obr. 2.

**Tabulka 1**

| *Hvězda* | *m* (mag) | *P* (dny) | log *P* |
|---|---|---|---|
| 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**

| *Hvězda* | log *P* | *M* (mag) | *Hvězda* | log *P* | *M* (mag) |
|---|---|---|---|---|---|
| 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 |

**Tabulka 3**

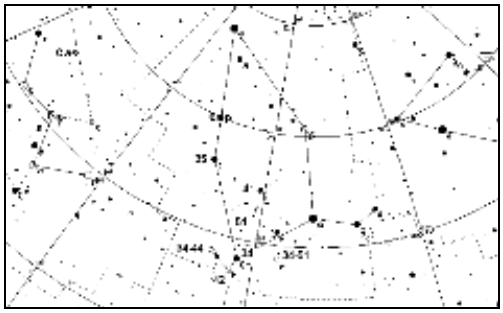
| *Hvězda* | $m_{max}$ | $m_{min}$ | $m_{stř}$ | $P$ (dny) | log $P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| HV 837 | | | | | |
| HV 1967 | | | | | |
| HV 843 | | | | | |
| HV 2063 | | | | | |

rozdíl škál $m$ a $M$: _____

průměrná vzdálenost obou přímek v obr. 2: _____

modul vzdálenosti ($m - M$) = _____

vzdálenost $r$ = _____



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.

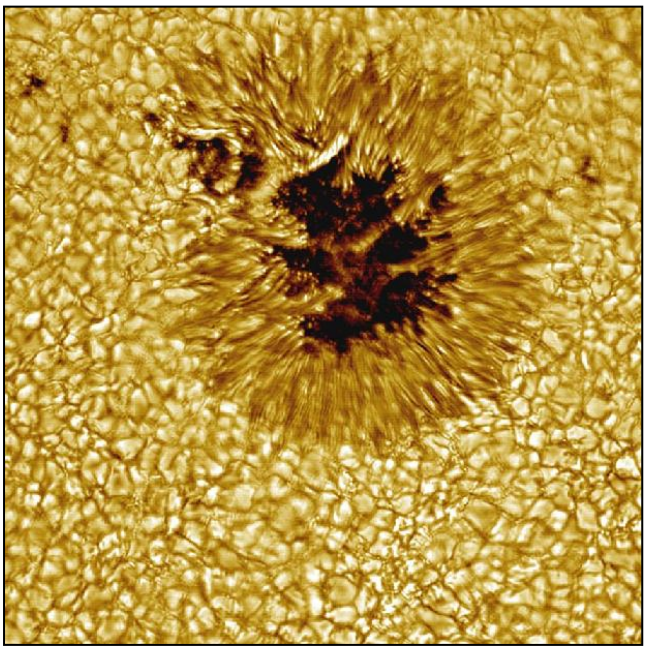
(Podle Sky and Telescope, June 1981, 541)

# 6.1. Anatomie hvězdy

Hvězdy jsou gravitačně vázané objekty, složené z vysokoteplotního plazmatu. Už z toho je zřejmé, že se s pojmem *plazma* musíme seznámit důkladněji [1]). Tímto slovem označujeme zcela nebo částečně *ionizovaný plyn*, ve kterém se však kladný a záporný náboj v průměru navzájem vyruší (když uvažujeme větší celky plazmatu). Ačkoli plazma obsahuje volné elektrony a ionty (a často též neutrální atomy), *jako celek je elektricky neutrální*.

Rozdíl mezi plynem a plazmatem spočívá v tom, že u plynu atomy a molekuly navzájem interagují až při velmi těsném přiblížení, prakticky v okamžiku srážky (protože síla, kterou částice plynu na sebe působí, je úměrná $1/r^6$, kde $r$ je vzdálenost mezi částicemi). Mezi nabitými částicemi plazmatu působí coulombovská síla, úměrná $1/r^2$. Proto interakce mezi částicemi probíhá prakticky stále a ovlivňuje jejich pohyb.

Pokud je plazma natolik *řídké*, že coulombovská interakce mezi částicemi je mnohem menší než vliv vnějších elektrických a (v astronomii zejména) magnetických polí, můžeme plazma považovat za soubor jednotlivých nabitých částic, jejichž pohyb je dán vnějšími poli (příklad: plazma v mezihvězdném prostředí). Je-li naopak plazma natolik *husté*, že v něm často dochází ke vzájemným srážkám částic, chová se plazma jako kapalina nebo plyn (příklad: plazma uvnitř hvězd).

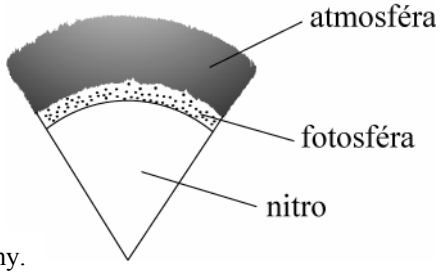


Malá část sluneční fotosféry se skvrnou na snímku, který byl pořízen vakuovým věžovým teleskopem observatoře Sacramento Peak (foto: T. Rimmele, M. Hanna/AURA/NOAO/NSF).

[1]) Několik informací k původu slova *plazma*: pochází z řečtiny, kde plasma je tvoření, výtvor, sochařské dílo, něco uhněteného (z hlíny). V češtině může jít o pojem z fyziky nebo biologie. Jde-li o fyzikální pojem, je plazma rodu středního (2. pád tedy zní: plazmatu).

### Stavba hvězdy

Ty části hvězdy, které nikdy nemůžeme přímo pozorovat, označujeme jako *nitro* hvězdy. Žádný foton přímo z nitra hvězdy se k nám nedostane. Sledovat můžeme jen fotony, jež vznikají v hraniční vrstvě mezi nitrem a atmosférou hvězdy – ve *fotosféře* (a ovšem i fotony, vzniklé nad fotosférou, tedy v *atmosféře*).




Stavba hvězdy – základní pojmy.

Informace o atmosféře hvězdy získáváme rozborem jejího záření, zejména rozborem jejího spektra. Vzhled spektra, jak jej známe ze spektrální klasifikace, je určen stavbou fotosféry. Ve fotosféře vzniká optické spektrum hvězdy. Spojité pozadí pochází z poměrně hustých a teplých spodních vrstev fotosféry. Absorpční čáry vznikají výš – v chladnějších a řidších oblastech fotosféry, které jsou mimo spektrální čáry prakticky průhledné. Emisní čáry – pokud je vůbec pozorujeme (nejčastěji jde o čáry vodíku) – svědčí o přítomnosti buď rozsáhlé atmosféry nebo teplotního zvratu v ní (teplota s výškou neklesá, ale roste).

Fotosféry u různých typů hvězd mají rozdílnou tloušťku a hustotu:

| | *tloušťka:* | *hustota:* |
|---|---|---|
| Slunce | 200 km | $3 \cdot 10^{-4}$ kg·m$^{-3}$ *) |
| bílí trpaslíci | řádově metry | 100 kg·m$^{-3}$ |
| obři a veleobři | řádově poloměry Slunce | neobyčejně nízká |

*) Srovnatelná s hustotou zemské atmosféry ve výšce 60 km.

### Chemické složení Slunce

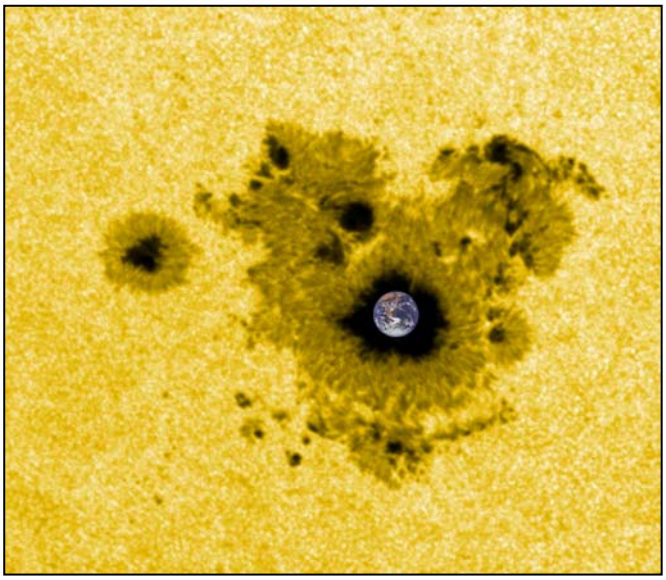
Chemické složení Slunce můžeme považovat na typické pro naprostou většinu hvězd. Zde uvádíme, kolik atomů příslušného prvku připadá na jeden milion atomů vodíku. Toto chemické složení je charakteristické pro téměř celou hvězdu s výjimkou nevelké oblasti kolem středu, která je dotčena probíhajícími jadernými reakcemi.

| *Prvek:* | *Množství:* |
|---|---|
| vodík | 1 000 000 |
| helium | 85 000 |
| kyslík | 660 |
| uhlík | 330 |
| dusík | 91 |
| neon | 83 |
| železo | 40 |
| křemík | 33 |

**Anatomie Slunce**

***Skvrny pouhýma očima***

Běžnými dalekohledy, vybavenými filtry, projekčním zařízením nebo speciálním okulárem uvidíme na slunečním kotouči řadu detailů. Na nažloutlém viditelném povrchu – tzv. *fotosféře* – spatříme tmavé *sluneční skvrny*. Ty jsou bezesporu nejznámějším jevem na Slunci. Některé sluneční skvrny bývají natolik velké, že je zahlédneme i pouhým zrakem. Oči si samozřejmě musíme chránit vhodnými filtry, a nebo vyčkáme, až nám takové pozorování umožní sama příroda: při silném zákalu ovzduší (a nejlépe brzy po východu Slunce nebo těsně před jeho západem) se můžeme bez obav o své oči zahledět na kotouč naší hvězdy.



Rozměry slunečních skvrn často převyšují rozměry planety Země, jak je vidět z této fotomontáže.

***Neposkvrněné, božské Slunce***

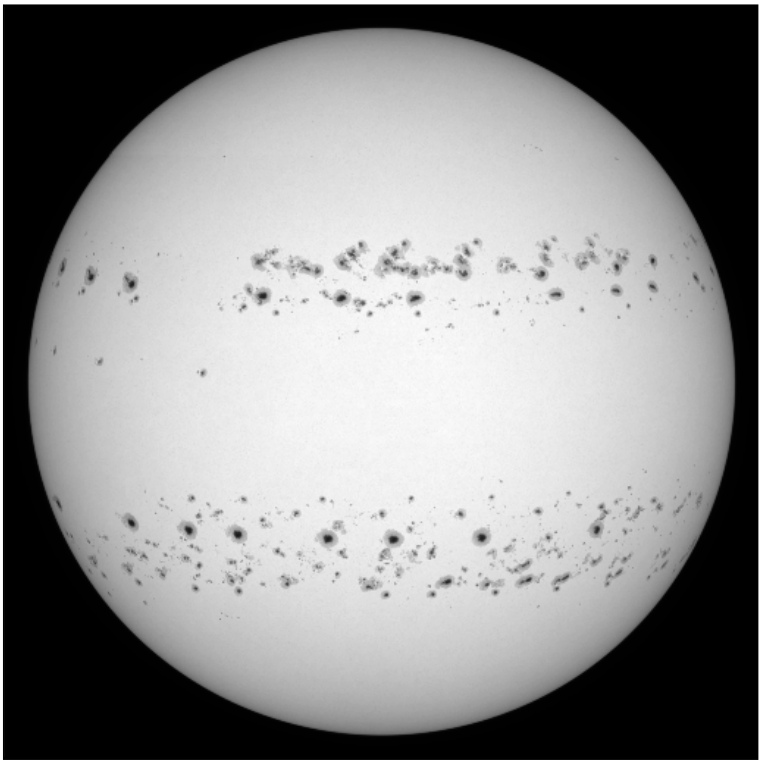
V mnoha náboženstvích starověku představovalo Slunce nejvyššího boha. Byl to symbol života, síly a dokonalosti. Není možné, aby takto pojatý symbol vykazoval vady, a tmavé sluneční skvrny by takovými vadami bezpochyby byly. Víme však, že sluneční skvrny můžeme spatřit i bez dalekohledu. Cožpak si jich v dobách před vynálezem dalekohledu nikdo nepovšiml? Inu – skvrny na Slunci pozornosti učenců neušly. První pozorování tohoto druhu se připisuje řeckému filozofu Anaxagorovi z Klazomen (to bylo roku 466 př. n. l.). Zajímavý je též katalog 45 pozorování z let 301 až 1205, jehož autorem je Číňan Ma Tuan-sien.

***Anatomie skvrny***

Sluneční skvrny jsou nejnápadnějším projevem sluneční činnosti. Tato tmavá místa ve fotosféře mívají kruhovitý i nepravidelný tvar, jsou to jakési mírně rozpité kaňky na žlutavé sluneční kouli. Podíváme-li se na strukturu skvrny podrobněji, zjistíme, že většina skvrn má tmavší středovou část, tzv. *umbru* (neboli stín), a světlejší *penumbru* (polostín), která ji obklopuje. V penumbře bývají vidět vlákna, která se táhnou od středu k okraji. Životnost skvrn bývá rozmanitá: některé existují jen pár hodin, jiné – zejména velké – vydrží až řadu měsíců. Během této doby se mění jejich tvar i velikost, skvrna se proměňuje.

***A přece se točí!***

Vypůjčili jsme si legendární Galileiho výrok (který s největší pravděpodobností nikdy veřejně nevyslovil), nicméně tentokrát půjde o Slunce: i to se vůči nám otáčí. Poznáme to při pravidelném sledování slunečních skvrn. Už během několika dní zjistíme, že se natočení Slunce vůči Zemi mění. Je zajímavé, že tento fakt byl odhalen až po vynálezu dalekohledu, i když velké skvrny jsou vidět pouhýma očima, a právě z pozorování takových velkých skvrn lze rotaci Slunce snadno zjistit. Další zvláštností je skutečnost, že Slunce nerotuje jako tuhé těleso, ale různou úhlovou rychlostí v různých vzdálenostech od rovníku. Na rovníku je rotace nejrychlejší a směrem k pólům klesá. Tak například v šířce 17 stupňů činí asi 27 a jednu třetinu dne; toto číslo se obvykle udává v tabulkách jako doba rotace Slunce vzhledem k Zemi.



Složený snímek Slunce, jak jej pořídila specializovaná sluneční družice SOHO v srpnu 1999, názorně ukazuje sluneční rotaci (trvá přibližně 27 dní).

***I počet skvrn se mění***

Slunce plné skvrn uvidíme jen někdy. Bývají údobí, kdy počet skvrn na slunečním kotouči je velmi malý. Že se počet skvrn na Slunci mění, a to dokonce periodicky, jako první rozpoznal německý astronom-amatér Heinrich Samuel Schwabe (původním povoláním lékárník). V roce 1844 uveřejnil v časopise *Astronomische Nachrichten* sdělení, že výskyt skvrn na Slunci je periodický, a periodu odhadl na 10 let. Z pozorování, která měl tehdy k dispozici, tato perioda skutečně vyplývá; my dnes víme, že v průměru je o něco delší (asi 11,3 roku). Naposledy bylo nejvíce skvrn na Slunci v roce 2001, příští maximum očekávají astronomové v letech 2010–2012.

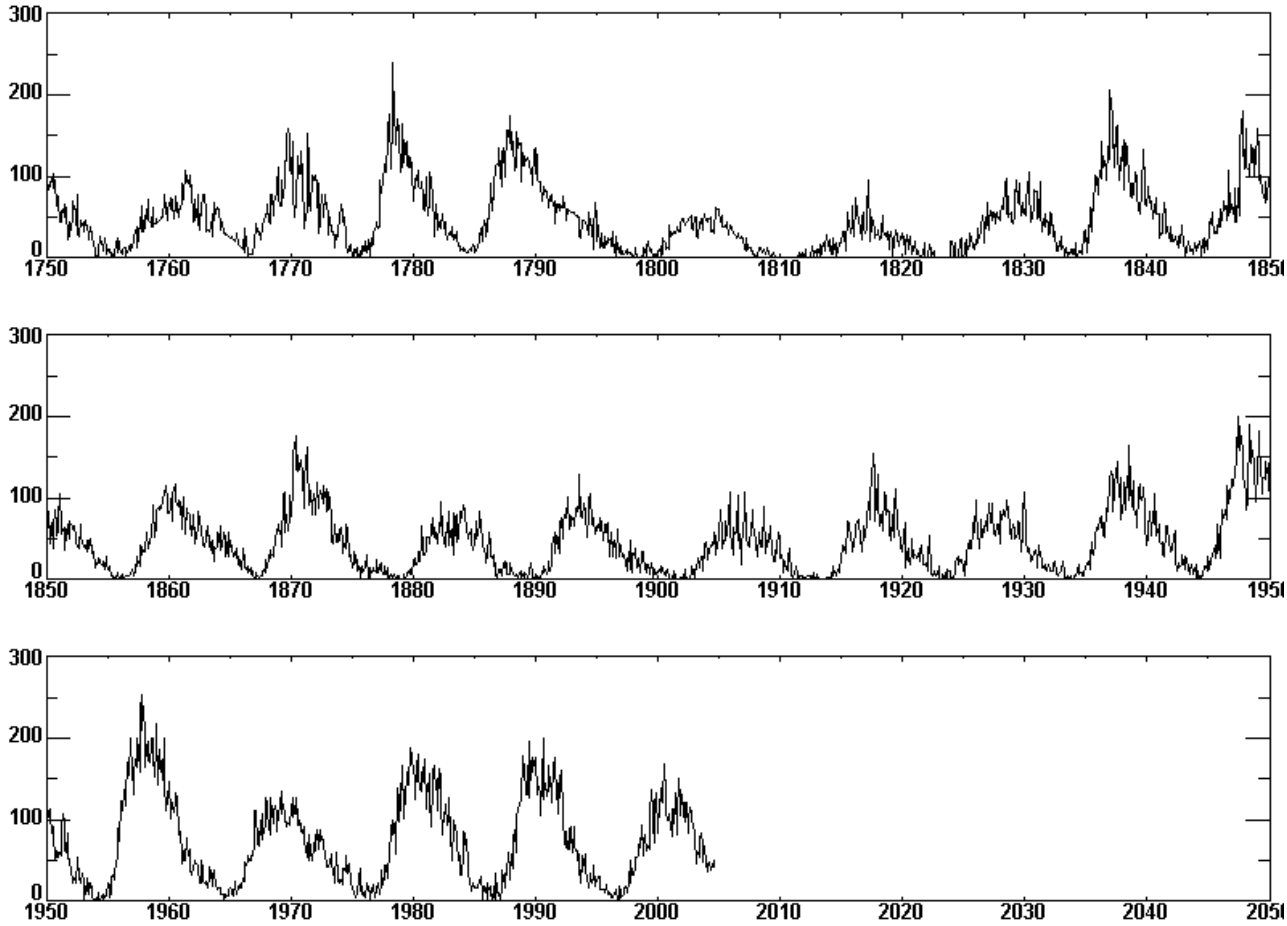
***Slunce beze skvrn***

Případy, kdy na Slunci nespatříme ani jedinou skvrnu, jsou poměrně vzácné i v dobách, kdy skvrn na Slunci bývá poskrovnu. Nicméně na konci 19. století upozornili německý astronom Gustav Spörer a anglický sluneční fyzik Edward Maunder, že do roku 1700 se vyskytla údobí trvající desetiletí, kdy v literatuře nebylo žádných zmínek o pozorování slunečních skvrn. Opravdu, v letech 1645 až 1715 a také mezi roky 1450 a 1550 vymizel pravidelný jedenáctiletý chod výskytu skvrn a skvrny na Slunci se objevovaly jen zřídka. Dnes víme, že v uplynulých několika tisíci letech se to přihodilo ještě několikrát.

***Co je relativní číslo?***

Množství skvrn na Slunci vyjadřuje tzv. *relativní číslo*. Zavedl je okolo roku 1850 švýcarský astronom Rudolf Wolf a jeho stanovení není nijak obtížné: přičteme-li k desetinásobku *počtu skupin* slunečních skvrn (na celém viditelném disku) celkový *počet jednotlivých skvrn* (bez ohledu na to, zda

se vyskytují samostatně nebo ve skupinách), dostaneme právě ono relativní číslo. Čím je vyšší, tím je pochopitelně na Slunci více skvrn, tím je sluneční činnost vyšší. Není-li na disku ani jediná skvrna, relativní číslo se rovná nule, zato ve dnech mimořádné sluneční aktivity může toto číslo i přesahovat hodnotu 300.




Takto se měnilo relativní číslo od doby prvních spolehlivých pozorování Slunce až do současnosti.

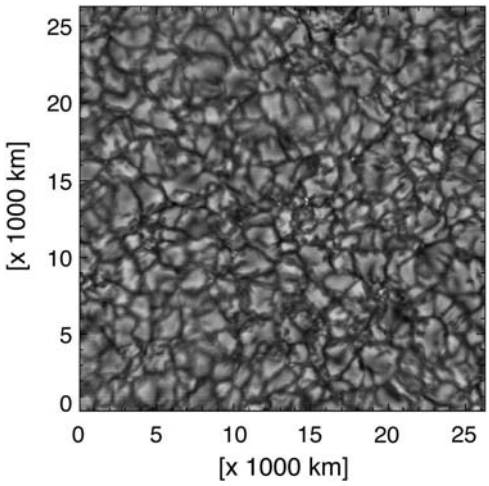
***Ztemnělé okraje***

O okrajovém ztemnění hvězd jsme se zmínili již v kapitole 4.2. Zde si tento jev znovu připomeňme – je nápadný, takže už při letmém pohledu do dalekohledu a na každém snímku Slunce si ho jistě povšimnete. Sluneční disk je na okrajích ztemnělý proto, že se na okrajích díváme do menší hloubky než ve středu kotoučku. Vzhledem k tomu, že se teplota s rostoucí hloubkou zvyšuje, a se zvyšující teplotou roste množství vyzařované energie, musí střed slunečního kotoučku zářit více než jeho okraje.

***Zrnité Slunce***

Při bedlivém pohledu do dalekohledu brzy zjistíte, že sluneční disk je zrnitý. Zrnitost vynikne zejména uprostřed kotoučku. Tomuto jevu říkáme *granulace*. Jednotlivé granule jsou vrcholky vzestupných proudů plazmatu, které se sem přesouvají z vnitřních oblastí Slunce. Zastavují se ve fotosféře a vyzařují svou zásobu energie. Po odevzdání energie padají ochlazené proudy plazmatu zpět

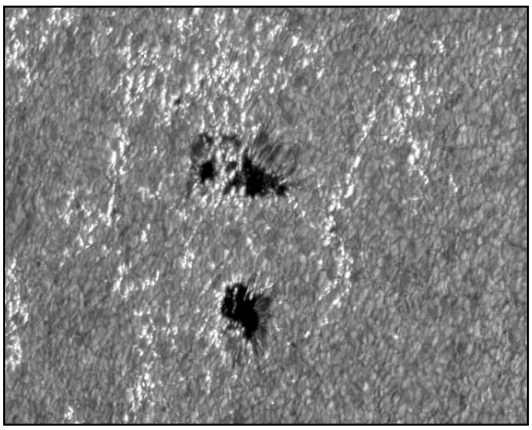
směrem k nitru Slunce. Sluneční fotosféra se tedy neustále proměňuje, životnost takové jedné granule bývá 6 až 8 minut.



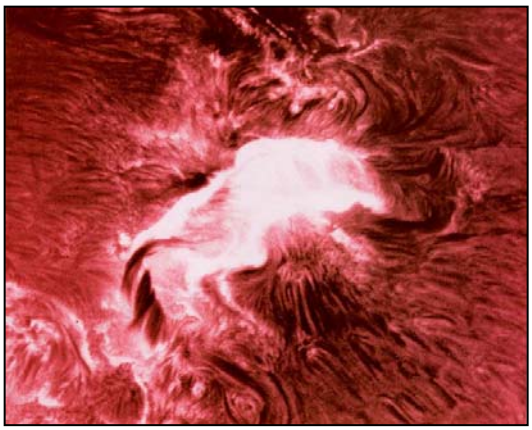

Sluneční granulace i s uvedením měřítka. Foto: T. Rimmele (NSO/AURA/NSF).

***Pochodně***

I ty na Slunci najdete, kvalitním dalekohledem je uvidíte docela snadno. Tvoří *světlé* skvrnky, které jsou nejnápadnější na okraji slunečního kotouče. Astronomové je nazývají *fakule*. Často je naleznete v sousedství tmavých slunečních skvrn, bývají však i v místech, kde skvrny chybí. Fakule představují místa s poněkud vyšší teplotou než má okolní fotosféra. Nakonec snad jen vysvětlení našeho nadpisu: latinsky *facula* je pochodeň.



Fakule ve fotosféře.



Erupce v chromosféře.

***Sluneční atmosféra***

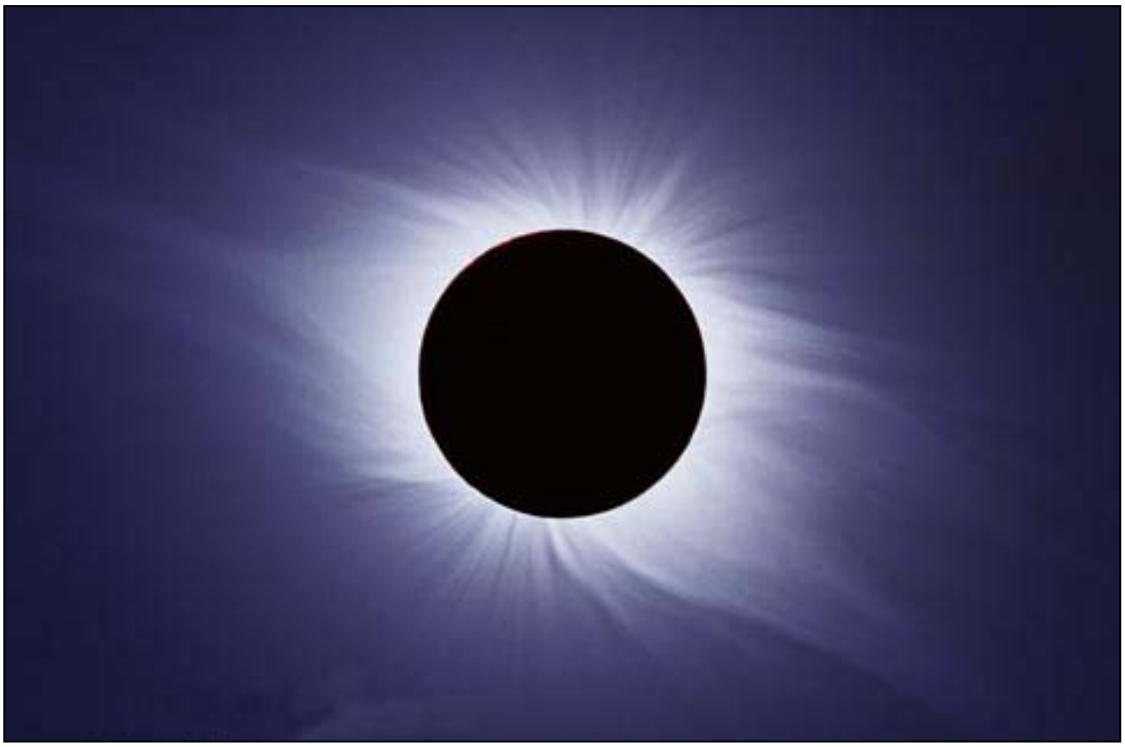
I u plynného tělesa, jako je Slunce, má pojem „atmosféra“ svůj přesný význam. Jsou to ty části Slunce, které se rozkládají *nad* fotosférou (naopak *pod* fotosférou leží sluneční *nitro*, jež není přímo pozorovatelné). Ke sledování atmosférických vrstev nad fotosférou jsou zapotřebí speciální přístroje. V *chromosféře* – vrstvě ležící nad fotosférou – se odehrávají *erupce*. Tak nazýváme náhlá, pouze několik desítek minut trvající zjasnění chromosféry, doprovázená silným vyzařováním na různých frekvencích a výronem nabitých částic do meziplanetárního prostoru. Erupce vznikají v místech sil-

ných magnetických polí. Chovají se, jako kdyby magnetickým polem ve svém okolí pořádně zamíchaly.

Z chromosféry ještě výš vystupují *protuberance*. Jsou to shluky plazmatu, které vyletují desítky tisíc kilometrů vysoko a pak padají zpět k povrchu Slunce.

***Stříbřitá aureola***

Nyní budeme hovořit o vnější části sluneční atmosféry, o *koróně*. Je to velmi řídký plyn, obklopující Slunce. V plné své kráse spatříme korónu jen v dobách úplných zatmění Slunce, kdy je oslnivě jasný sluneční kotouč zakryt Měsícem. Jen tehdy můžeme bez potíží uvidět korónu, jež září zhruba milionkrát méně než fotosféra. Koróna nemá jasně vymezenou vnější hranici, sluneční atmosféra přechází plynule do meziplanetárního prostoru. Koróna se totiž rozpíná, ze Slunce neustále vyletují částice látky a putují k okrajům sluneční soustavy. Tak vzniká *sluneční vítr*.



***Aktivní Slunce***

Odborníky mnoha vědních oborů dnes zajímají především tzv. *aktivní procesy* na Slunci. Jsou to vlastně všechny pozorované jevy – skvrny, erupce, protuberance, procesy v koróně, jež jsou zdrojem záření a částic často obrovských intenzit a energií. Vysílané záření a proudy částic, obvykle úzce směrované, mohou vyvolat nebo aspoň ovlivnit řadu dalších procesů na Slunci, v meziplanetárním prostoru i na planetách, Zemi nevyjímaje. Bylo to vlastně působení aktivních slunečních procesů na naši planetu, které vedlo k rozmachu sluneční astrofyziky. My jsme tak nuceni si stále připomínat, že Země není izolovaná od slunečních vlivů. Položme ještě jednu otázku: ovlivňují aktivní děje na Slunci také biosféru, člověka? To je velmi „horká otázka“.

### Co je to model?

Toto slovo přírodovědci používají velmi často, a vůbec tím nemyslí něco jako plastikovou zmenšeninu letadla či auta. Je to idealizovaná představa nějakého tělesa či soustavy těles, nebo nějakého přírodního jevu. Například astrofyzikové často modelují hvězdy a jejich vývoj.

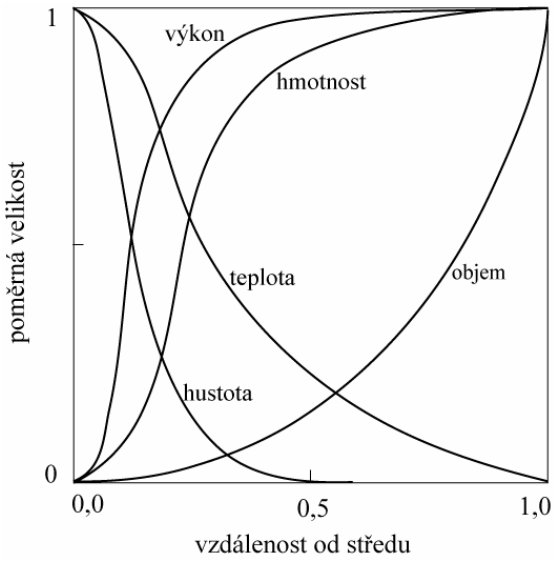
Je jasné, že skutečná tělesa a skutečné přírodní procesy bývají komplikované. Autor modelu proto situaci zjednoduší, do modelu zahrne jen to, co považuje za potřebné (nebo co vůbec dokáže nějak popsat a spočítat). Když porovná vlastnosti modelu a skutečnosti, hned vidí, zda a v jakých případech model platí. Modelování tedy není fantazírování, protože *model se vždy porovná se skutečností*. V tom okamžiku se odhalí, nakolik je model věrný.

A k čemu je takové modelování dobré? Model může naznačit jevy, vlastnosti i souvislosti, které přímo z pozorování neplynou. To jistě ovlivní další strategii výzkumu; uvědomme si však, že ve všech případech nakonec rozhodující slovo mají *fakta*, odvozená z pozorování nebo experimentu.

### Proč se hvězdy nezhroutí?

Jednotlivé částice tvořící hvězdu na sebe působí gravitační silou. *Gravitace* vytváří z hvězdy jednolitý celek, je to rozhodující síla v ní. Kdyby však ve hvězdě působila jenom gravitace, hvězda by se rychle zhroutila – například Slunce asi za půl hodiny. To ale nepozorujeme; proti gravitaci působí jiná síla, která je s gravitační silou ve velmi dokonalé rovnováze.

Co tedy způsobuje, že se hvězda nezhroutí? Odpověď je poměrně jednoduchá: jsou to vzájemné srážky částic, z nichž je hvězda utvořena. Hustota, tlak i teplota vzrůstají směrem ke středu hvězdy. Vzhledem k růstu tlaku působí na každý malý objem uvnitř hvězdy zespodu větší tlak než shora, takže látka ve hvězdě zůstává na místě, i když se ji gravitační síla snaží vtáhnout ke středu hvězdy. Hvězda se nachází v *hydrostatické rovnováze*, gravitační síla je velmi přesně vyrovnána silou *vztlakovou* [2]).




*Model Slunce*. Povšimněte si, že koncentrace látky ke středu hvězdy je značná. Přes své značné rozměry proto můžeme hvězdy považovat za „hmotné body“ (vysoká koncentrace látky je zejména u obrů a veleobrů).

*Maximální hodnoty:*

hmotnost: $2{,}0 \cdot 10^{30}$ kg
hustota: $1{,}5 \cdot 10^{5}$ kg·m$^{-3}$
teplota: $1{,}5 \cdot 10^{7}$ K
výkon: $3{,}8 \cdot 10^{26}$ W

[2]) Obvyklá školácká chyba: hvězdy se nezhroutí proto, že proti gravitační síle působí *tlak* (plynu). Hloupost! Nejde o tlak, ale o rozdíl (gradient) tlaků, *vztlakovou sílu*! Gravitační sílu (vektorovou fyzikální veličinu) přece nemůže kompenzovat tlak (což je skalární veličina).

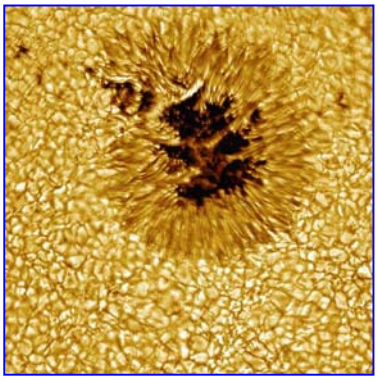
**Průhledy do nitra hvězdy**

V jakém stavu je látka uvnitř hvězd? Z modelových výpočtů plyne, že centrální teplota dosahuje milionu až miliardy kelvinů, hustota látky činí řádově desetitisíce až miliardu kilogramů na krychlový metr. V celém hvězdném nitru je prakticky zcela ionizován vodík a helium, těžší prvky jsou ionizovány velmi silně. Důležitou složkou je i záření o vlnových délkách tisíckrát kratších než má viditelné světlo. Vysoká hustota a teplota vede k častým a prudkým srážkám částic, tvořících hvězdný materiál. Látka v nitru většiny hvězd se chová podobně jako *ideální plyn*.

Dodejme, že v některých fázích vývoje hvězd se hustota látky zvětší natolik, že částice spolu začnou významně interagovat i v době mezi vzájemnými srážkami významně se přitom uplatní efekty plynoucí z fyziky subnukleárních částic. Říkáme, že taková látka *degeneruje* [3]). Elektronově degenerovaný plyn svými mechanickými, tepelnými a elektrickými vlastnostmi připomíná pozemské kovy: látka má vysokou hustotu, je obtížně stlačitelná a stává se dokonalým vodičem elektřiny a tepla. Právě v tomto stavu je látka v nitrech bílých trpaslíků, v centrálních částech hvězd v pokročilejším stupni vývoje či ve svrchních vrstvách neutronových hvězd.

[3]) Latinsky *degenerare* značí upadat, zvrtnout se, pozbývat dobrých vlastností.

# 6. Ze života hvězd



*Nejde o to, znát mnoho, ale o to, znát ze všeho, co je možno znát, to nejpotřebnější.*

Lev Nikolajevič Tolstoj, spisovatel (1828 – 1910)

## otázky a příklady

**Otázka 6.1.1.** Rozumíte-li dobře tomu, co představuje plazma, pak snadno určíte, která z následujících definic plazmatu je *chybná*: a) ionizovaný plyn, navenek elektricky neutrální; b) látka rozbitá působením elektromagnetických sil na elementární částice; c) látka skládající se z kladných iontů a elektronů, kde celkový kladný náboj je roven celkovému zápornému náboji.

**Otázka 6.1.2.** V astronomii nemusíte znát nazpaměť mnoho přesných čísel, ale je třeba stále rozvíjet tzv. „cit pro čísla“ (tedy kvalifikovaný odhad). Zde se určitě projeví: Jeden z následujících údajů *není* typický pro hvězdu: a) hmotnost $10^{35}$ kg; b) centrální teplota $10^{7}$ K; c) průměrná hustota látky 1000 kg·m$^{-3}$.

**Otázka 6.1.3.** Ověřte si tvrzení, že kdyby na Slunci působila pouze gravitace, velice rychle by se naše hvězda zhroutila do nepatrného objemu (za pouhou půlhodinu).

**Otázka 6.1.4.** Změny hustoty, teploty, hmotnosti a dalších fyzikálních veličin v nitru Slunce nemůžeme pochopitelně měřit přímo, lze je však odvodit z modelů stavby Slunce. Z grafického vyjádření průběhu těchto veličin, které je zde uvedeno, zjistěte: a) jak daleko od středu Slunce poklesne hustota látky asi na polovinu? b) v jakém objemu je soustředěna polovina hmotnosti Slunce?

**Otázka 6.1.5.** Jak se bude měnit gravitační zrychlení, budeme-li sestupovat pod povrch hvězdy a blížit se k jejímu středu?

**Otázka 6.1.6.** Hydrostatická rovnováha nastane, jestliže: a) se vyrovnají gravitační síla a tlak; b) výslednice všech sil působících na libovolný vybraný objem je nulová; c) ve hvězdě je v rovnováze kapalina a plyn.

**Otázka 6.1.7.** Látka ve slunečním nitru se chová jako ideální plyn, protože: a) při prudkých srážkách částic se ionty nemají čas uspořádat do struktury pevné látky; b) vodík, z něhož je Slunce převážně složeno, má vždy vlastnosti ideálního plynu; c) probíhají zde intenzivní jaderné reakce.

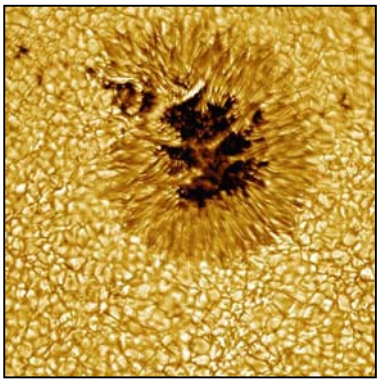
**Otázka 6.1.8.** Kdybychom na základě pozorování zjistili, že okraje Slunce jsou jasnější než střed slunečního kotouče (a ne naopak, jak pozorujeme), o čem by to svědčilo?

**Otázka 6.1.9.** Teplota v centru Slunce se odhaduje na $1{,}5 \cdot 10^7$ K. Předpokládejme, že klesá lineárně směrem k fotosféře. Jaký je spád (rozdíl) teploty na vzdálenosti jednoho metru?

**Otázka 6.1.10.** Výraz na pravé straně rovnice hydrostatické rovnováhy má záporné znaménko. Znamená to, že výraz na pravé straně je *vždy* záporný?

**Otázka 6.1.11.** Velikost tlaku se v závislosti na poloměru hvězdy mění: monotónně (roste × klesá) s (rostoucím × klesajícím) poloměrem. V centru hvězdy je tedy tlak _____ .

**Otázka 6.1.12.** Při pohledu ze Země mají sluneční granule úhlový „průměr“ (či velikost, jsou to mírně nepravidelné struktury) okolo 1,3″. Odhadněte skutečnou velikost granule ve sluneční fotosféře.

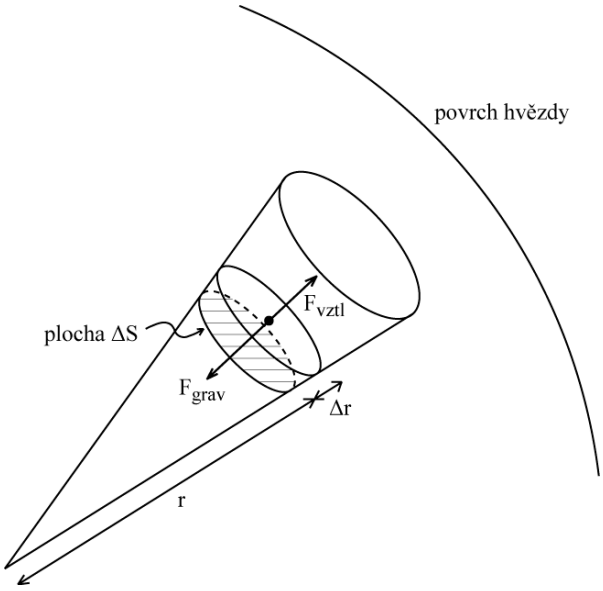


doplněk

# Rovnice hydrostatické rovnováhy

*Hydrostatická rovnováha* je obecný fyzikální pojem, vztahující se na všechna tělesa v gravitačním poli. Například nalijeme-li do válce (který je v gravitačním poli Země) vodu, bude na jeho dolní podstavu či spodní části stěn působit větší tlak než na horní, voda ve válci bude nadlehčována vztlakovou silou rovnou rozdílu obou tlaků. Ve stavu hydrostatické rovnováhy bude velikost vztlakové síly rovna velikosti tíhové (gravitační) síly. Tyto síly jsou opačného směru, takže výsledná síla působící na vodu je nulová.

Víme již, že ve hvězdách je s vysokou přesností splněna rovnováha mezi gravitační silou a silou vyvolanou vzrůstem tlaku směrem ke středu hvězdy – vztlakovou silou. Panuje zde hydrostatická rovnováha. Nyní si odvodíme její rovnici. Představme si malý váleček v nitru hvězdy, jehož vzdálenost od středu hvězdy činí $r$, má podstavu o obsahu $\Delta S$ a malou výšku $\Delta r$ (viz připojený obrázek). Hustota plazmatu je $\rho(r)$ [1]), takže hmotnost činí $\rho(r)\,\Delta S\,\Delta r$.




*Gravitační síla*, která působí na malý váleček, má velikost

$$\kappa\, M(r)\, \rho(r)\, \Delta S\, \Delta r / r^2 ,$$

kde $M(r)$ je hmotnost koule o poloměru $r$, $\kappa$ gravitační konstanta. Lze dokázat, že gravitační síly jednotlivých částí vrstev vyšších než $r$ se navzájem *ruší* (to platí pro každý kulově symetrický případ, nejen pro případ homogenní koule). Tlak na horní podstavě válečku je roven $p$, na spodní podstavě pak $p + \Delta p$ (tlakové síly působící na plášť válečku se vzájemně vyruší). Rozdíl tlaků – tedy *vztlaková síla* – je tak rovna

$$(p + \Delta p - p)\, \Delta S .$$

Gravitační síla, která způsobuje zvýšení tlaku na spodní podstavu o $\Delta p$, se tedy rovná

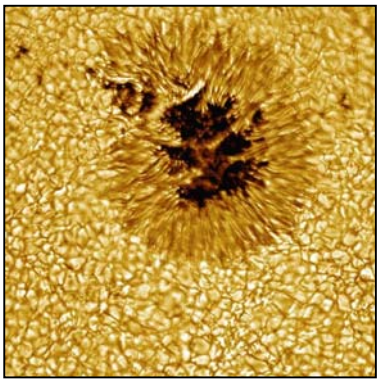
$$\kappa\, M(r)\, \rho(r)\, \Delta S\, \Delta r / r^2 = -\, \Delta p\, \Delta S$$

[1]) Tímto zápisem naznačujeme, že hustota $\rho$ je funkcí vzdálenosti $r$, tedy mění se v závislosti na velikosti $r$.

(znaménko minus je v této rovnici proto, že gravitační a vztlakové síly mají opačnou orientaci). Po úpravě tohoto vztahu dostaneme již rovnici hydrostatické rovnováhy ve tvaru

$$\Delta p/\Delta r = -\kappa\, M(r)\, \rho(r)/\, r^2 \,.$$

*Poznámka:* na vztlakové síle se podílí hlavně *tlak plynu*, teprve při teplotách panujících v nitrech velmi hmotných hvězd se uplatní také *tlak záření* (ten si lze představit jako tlak fotonového plynu). U Slunce tlak záření představuje v nejlepším případě pouhé promile celkového tlaku.

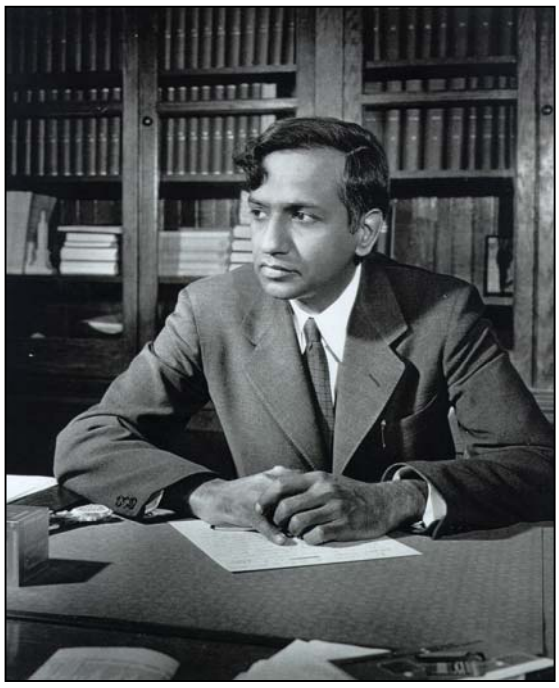


medailon

# Subrahmanyan Chandrasekhar [1])

### (19. 10. 1910 – 21. 8. 1995)

Vážení přátelé, dovolte mi, abych vás pozval na námořní plavbu. Ne, nudit se určitě nebudete, mezi našimi spolucestujícími bude spousta zajímavých osobností. Právě teď jedna z nich vstupuje na loď. Že je vám ta tvář nějak povědomá? Ach ano, obrázek tohoto pána později uvidíte v mnoha knihách o astrofyzice. Je to dvacetiletý indický fyzik Subrahmanyan Chandrasekhar, budoucí významná postava světové teoretické fyziky. Nyní se vydává na osmnáctidenní plavbu z indického Madrasu do britského Southhamptonu. Je čtvrtek 31. července roku 1930.



Musíme si ho představit trochu víc: Subrahmanyan Chandrasekhar šel ve šlépějích svého strýce Chandrasekhara Venkata Ramana, laureáta Nobelovy ceny za fyziku z roku 1930. Cesta vedla na Presidency College kde roku 1930 získal titul bakaláře fyziky. Už v těchto letech ho zajímal vývoj hvězd a jejich vnitřní stavba, a to byl také důvod, proč nasedl na naši loď. Vydal se do Cambridge za věhlasným astrofyzikem té doby – Arthurem Eddingtonem; Sir Arthur se tímto problémem intenzivně zabýval již řadu let.

Během plavby si kromě přemítání, co ho v Cambridge čeká, krátil dlouhou chvíli výpočty, jak může vypadat hvězdný materiál, když je hvězda „v důchodu“. Tvrdí se, že když v Southhamptonu vystupoval z lodi, měl problém již vyřešený.

V Cambridge nastoupil k Eddingtonovi a začal pečlivě studovat jeho knihu *Vnitřní stavba hvězd*. Kniha ho však nikterak nenadchla. Eddingtnovy argumenty týkající se konečného stadia hvězd nezahrnovaly výsledky speciální teorie relativity a kvantové mechaniky (v té době se překotně rozvíjející).

[1]) Čti: *čandrasek(h)ar*.

Chandrasekhar nemohl souhlasit s jeho závěrem, že *každá* hvězda končí jako bílý trpaslík. Poukazoval na své výpočty, jež zohlednily poznatky nově se formulujících teorií, a dávaly poněkud jiný scénář vývoje hvězd: pouze hvězdy méně hmotné než 1,44 hmotnosti Slunce nakonec skončí jako bílí trpaslíci.

Rozdílný postoj k danému problému postupně vytvořil mezi oběma fyziky propast. Spor vyvrcholil při zasedání Královské astronomické společnosti: o tom, na čem mladý Ind pracuje, věděl každý; jaké však bylo překvapení všech, když se zjistilo, že Eddington zahajující zasedání má referát na stejné téma! Eddington podrobil Chandrasekharovu teorii ostré kritice. Toto příkoří se hrdého Inda velmi dotklo. Netrvalo dlouho a v roce 1937 Chandrasekhar přesídlil do Spojených států na universitu v Chicagu, kde působil až do své smrti.

Tady začíná další kapitola jeho života: po přepadení Pearl Harbouru a vstupu USA do války se jako řada dalších významných fyziků účastnil práce na přísně tajném projektu Manhattan – projektu atomové bomby. V Los Alamos v Novém Mexiku spolupracoval s osobnostmi, se kterými by se asi jinak nesetkal. Byli tu Enrico Fermi, Richard Feynman, Albert Einstein a mnozí další. Během těchto válečných let získal titul profesora astrofyziky.

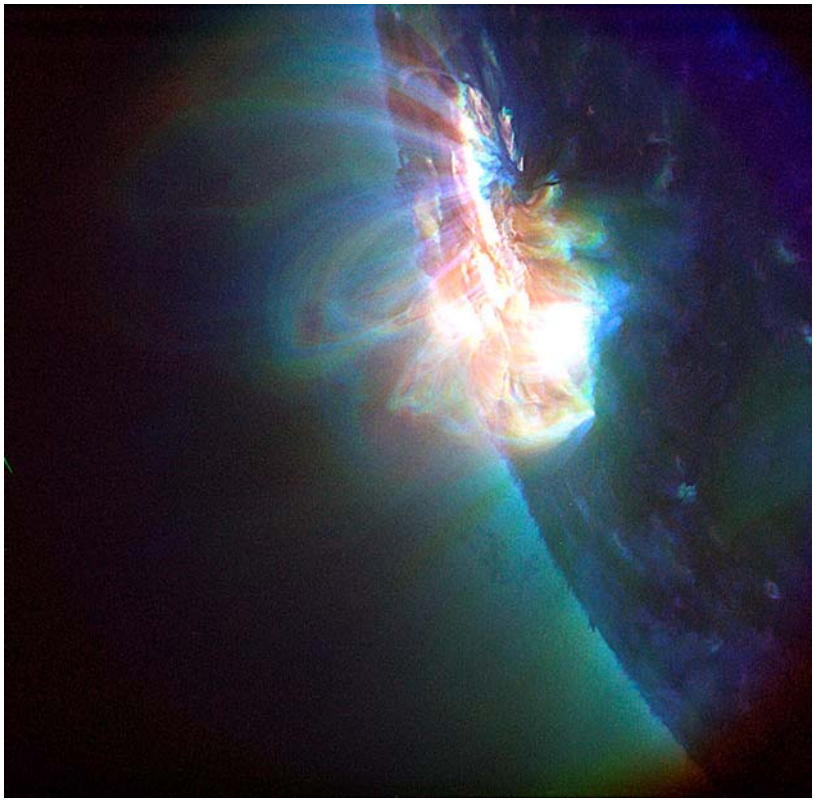
Chandrasekhar během své dlouhé a plodné vědecké kariéry několikrát opustil svůj původní obor, aby se mohl věnovat i jiným oblastem astronomie. Svědčí o tom monografie, které stále slouží jako základní učebnice v oboru: o přenosu energie v nitrech hvězd, o dynamice uvnitř hvězdokup (pohyb hvězd uvnitř hvězdokup připodobnil k Brownovu pohybu), o vlivu magnetického pole na tvar galaxií. Ke konci svého života se vrátil ke svému původnímu oboru – studiu závěrečných stadií hvězd – a sepsal monumentální monografii o matematické teorii černých děr. V roce 1983 se také dočkal zaslouženého ocenění v podobě Nobelovy ceny za fyziku.

A jsme na konci naší plavby. V Anglii šťastný Chandrasekhar vystupuje z lodi a v zápisníku již má poznačeny své výpočty. Netuší, že v této zemi potká své největší štěstí – budoucí ženu Lalithu Doriswamy, ale dočká se i největšího ústrku od věhlasného a poněkud zaslepeného Sira Arthura Eddingtona. Stěží by si už tenkrát mladý Subrahmanyan dovedl představit, jak bohatý a rozmanitý bude jeho další život.

Autorem medailonu je Štěpán Ledvinka.

# 6.2. Proč hvězdy září?

Hvězdy září proto, že jejich fotosféry jsou zahřáty na poměrně vysokou teplotu tisíců až desetitisíců kelvinů. Z pozorování víme, že teplota fotosfér se s časem výrazně nemění. Proto z nitra hvězd musí proudit do fotosféry ustálený tok tepla, který fotosféru ochlazovanou vyzařováním udržuje na stálé teplotě. (Stav, který jsme si popsali, se nazývá *stav energetické rovnováhy*: v ustáleném stavu musí projít povrchem koule opsané kolem středu hvězdy v každém okamžiku právě tolik tepla, kolik ho uvnitř této koule vznikne.) Aby teplo přecházelo z nitra hvězdy směrem k viditelnému povrchu, je zapotřebí, aby se ve hvězdě ustavil *teplotní spád*: teplota směrem k centru musí narůstat. Tento teplotní spád je udržován činností vnitřních zdrojů tepla, které vyrobí v každém okamžiku právě tolik energie, kolik jí hvězda z fotosféry vyzáří.

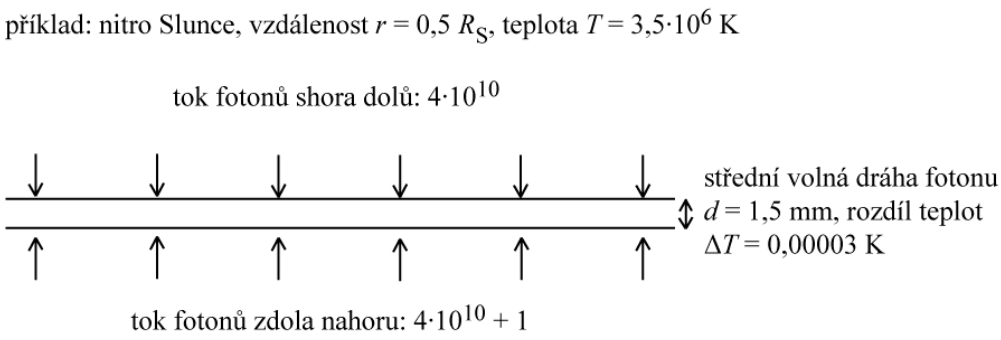


Poté, co se fotony dostanou do fotosféry, jsou vyzářeny a pak už se víceméně volně pohybují směrem od Slunce (na snímku je aktivní oblast na Slunci 25. 4. 1998, družice TRACE, Alan Title).

### Když fotony přenášejí teplo

Teplo se může přenášet třemi způsoby: zářením, prouděním (konvekcí) a vedením.

První způsob – přenos tepla *zářením*, kdy se teplo přenáší fotony, je stoprocentně účinný pouze v prázdném prostoru. V nitru hvězdy však látka brání průletu fotonů, střední volná dráha fotonu (mezi jeho vznikem a zánikem) činí v centru Slunce pouhé milimetry až centimetry. Zachytávání fotonů ve hvězdném nitru způsobují především nečetné atomy těžších prvků, které si navzdory vysoké teplotě ještě uchovaly zbytky elektronových obalů. Záchytem fotonu se některý ze zbylých elektronů uvolní a atom opustí (existuje samozřejmě i opačný proces).




Přenos tepla zářením.

Fotony jsou tedy nesčíslněkrát pohlceny a jiné opět vyzářeny. Jejich počet i energie závisí na místní teplotě. Čím *vyšší* je teplota hvězdného materiálu, tím *více* je v něm fotonů a tím *větší* mají energii. Proto z teplejších míst od středu hvězdy přichází víc fotonů než z chladnějších oblastí, jež jsou dál od centra. Přespočetné fotony z teplejších míst zabezpečují přenos tepla zářením.

Přenos tepla z nitra hvězdy směrem ven se děje velmi pomalu, mnohonásobným pohlcováním a opětným vyzařováním fotonů. Proces přenosu tepla je natolik pomalý, že kdyby nyní došlo k náhlé změně ve výrobě energie v nitru hvězdy, projevilo by se to navenek až za několik milionů roků.

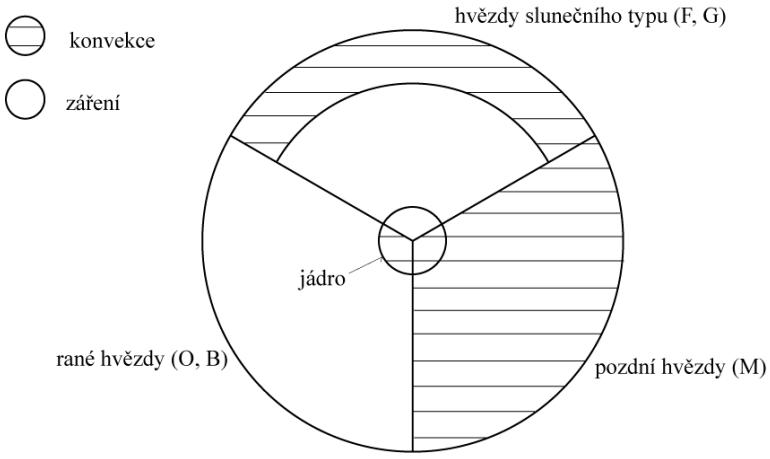
### Když se hvězda zamíchá

Jestliže je hvězdný materiál příliš neprůhledný, nebo jsou-li zdroje energie silně koncentrované (tedy v samém centru hvězdy existuje prudký spád teploty), není možné přenést všechno teplo zářením. Nastupuje proto účinnější přenos tepla *konvekcí* čili *prouděním*: rozsáhlé proudy teplé látky stoupají vzhůru a po ochlazení vyzářením opět klesají dolů. U hvězd jako je Slunce se vytváří pod fotosférou *konvektivní vrstva*. Výstupné proudy této vrstvy můžeme přímo pozorovat – je to tzv. *granulace* [1]).

Důsledkem existence konvektivní vrstvy je i vyhřátí atmosféry (její velmi řídké vnější části – koróny). Vyhřátí je způsobeno vlnami, které vznikají pravděpodobně při rozpadu magnetických polí (mechanismus ohřevu je komplikovaný a zatím ne zcela objasněný). Při silném ohřevu atmosféry (např. spodní koróna je vyhřáta až na řádově $10^6$ K) není koróna schopna odevzdávat přijaté teplo jinak než tím, že se rozpíná (vzniká tzv. *hvězdný vítr*, u Slunce *sluneční vítr*). Hvězdný vítr představuje jeden ze způsobů, jak se hvězda může zbavit *části* své látky.

[1]) K původu slova *konvekce*: latinské *convehere* znamená dovážet, svážet, *convectio* pak přívod. A slovo *granulace*? Pochází z latinského *granum* – zrno (zdrobnělina *granulum* – zrnko).

Upřesněme si, kdy nastává konvekce ve hvězdách: u hvězd s hmotností menší než 1,5 hmotnosti Slunce se vytvářejí konvektivní vrstvy pod fotosférou a jsou tím hlubší, čím je hvězda méně hmotná (u Slunce je asi 70 procent objemu v konvekci). U hvězd hmotnějších než jedenapůlnásobek hmotnosti Slunce je oblast s jadernými reakcemi tak silně koncentrovaná ke středu hvězdy, že teplo zde vzniklé není možné přenést zářením. Dochází proto ke *konvekci v jádru*, která kromě přenosu tepla zajišťuje také dodávku čerstvého materiálu do centra, kde jsou jaderné reakce nejúčinnější.

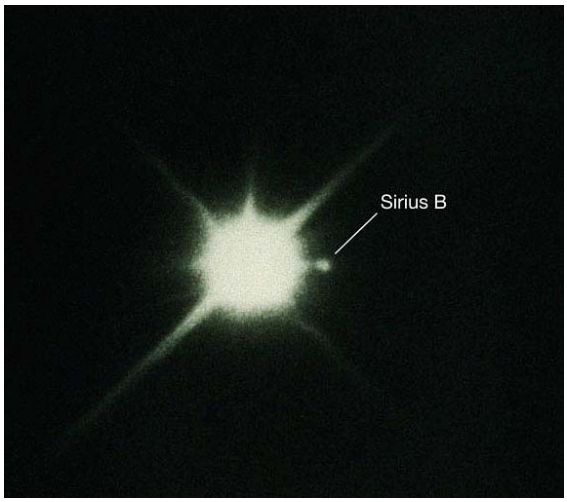



Tepelná výměna ve hvězdách.

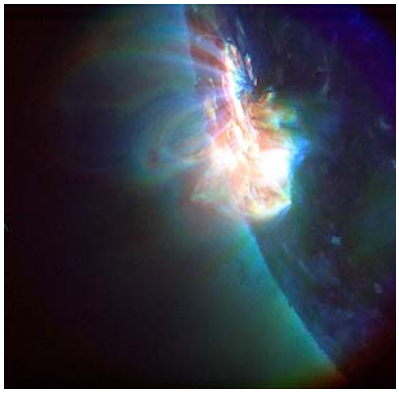
**Proč září bílí trpaslíci?**

Bílí trpaslíci září proto, že jejich povrch je vyhřát na vysokou teplotu mnoha tisíců kelvinů. Toto pravidlo platí i zde. Otázkou je, kde se bere energie nutná k zahřátí povrchu; víme totiž, že termonukleární reakce v těchto hvězdách již neprobíhají, a smršťovat se bílí trpaslíci také nemohou – tomu brání stav látky, z níž jsou složeny.

Nicméně odpověď je jednoduchá: bílí trpaslíci žijí z podstaty – ze svých zásob vnitřní energie, kterou nashromáždili během předchozího vývoje. Látka v nitru těchto hvězd má vlastnosti podobné *kovům*, teplo se zde přenáší volnými elektrony. Bílí trpaslíci jsou tak jedinou skupinou hvězd, kde se přenos energie děje tzv. *vedením tepla*.




Nicméně i bílí trpaslíci postupně chladnou. Je to proces trvající opravdu dlouho, desítky miliard roků – vždyť povrch bílého trpaslíka, kterým uniká teplo ven – je relativně velice malý.



čítanka

# Vladimír Balek: Fotony v neobvyklé roli

Stěny žárovky se zahřívají infračervenými paprsky, které vysílá rozžhavené vlákno uprostřed žárovky, předměty ve vyhřáté místnosti získávají teplo pohlcováním infračervených paprsků, které vysílá horký povrch radiátoru. V žárovce se teplo přenáší vakuem; v místnosti se teplo sice šíří vzduchem, ale záření se mezi vysláním a přijetím prakticky nepohlcuje – teplo se tedy přenáší podobně jako ve vakuu.

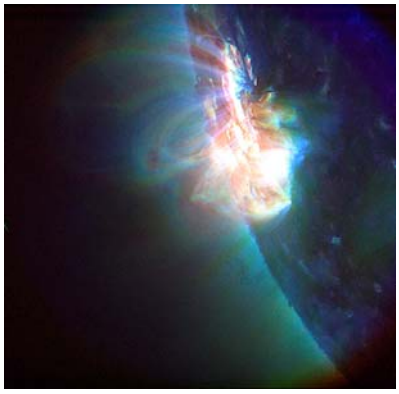
Situace se změní, je-li látka, ve které se šíří teplo, dostatečně hustá a horká. Taková látka silně pohlcuje záření, takže každý foton se mnohokrát pohltí a znovu vyzáří, než se dostane z oblasti s vysokou teplotou do míst s teplotou nízkou. V látce probíhá tzv. *zářivý přenos energie*, při němž se přebytek energie rychlých částic šíří od jedné vrstvy ke druhé podobně jako při vedení tepla, jenže částice si ho nepředávají při srážkách, ale prostřednictvím fotonů.

Představte si stavbu s podavači cihel, seřazenými podle výkonu; čím dál v řadě podavač stojí, tím méně cihel je schopný podat svému sousedovi za jednotku času. Nechť každý podavač háže polovinu cihel sousedovi vpravo a polovinu sousedovi vlevo. Tento způsob podávání je sice značně neefektivní, ale cihly se u nikoho nehromadí a postupují, byť velmi pomalu, od začátku řady na její konec. Řekněme, že první podavač podá za minutu 30 cihel tomu druhému a 30 cihel odhodí na druhou stranu, druhý vrátí 29 cihel prvnímu a podá 29 cihel třetímu, třetí vrátí 28 druhému a podá 28 čtvrtému atd. Ve svém výsledku každý podavač dostane za minutu jednu cihlu od souseda na jedné straně a odevzdá jednu cihlu sousedovi na straně druhé.

Zářivý přenos energie probíhá podobně. Vrstvy látky postavené kolmo na směr, ve kterém klesá teplota látky, si vyměňují fotony podobně jako podavači cihly, přičemž každá z nich přijímá z jedné strany záření s poněkud vyšší intenzitou než z druhé. Rozdíl obou intenzit určuje výkon, přenesený jednotkovou plochou ve směru poklesu teploty.

Z knihy *Prečo svietia hviezdy?* (Alfa, Bratislava 1986). Překlad Zdeněk Pokorný.

# 6. Ze života hvězd



*Obvykle nikoli ti, již vědí mnoho, ale ti, kteří toho znají málo, tím přesvědčeněji tvrdí, že ten či jiný problém věda nikdy nevyřeší.*

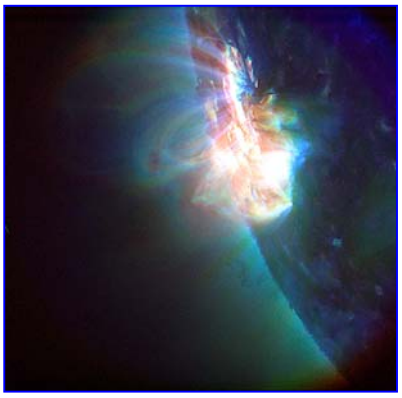
Charles Robert Darwin, přírodovědec (1809 – 1882)

## otázky a příklady

**Otázka 6.2.1.** Ve slunečním nitru, kde panují teploty řádově $10^7$ K, vznikají fotony s vlnovou délkou 0,3 nm. Jsou to fotony záření _____. Kolikrát je jejich energie větší než energie fotonů o vlnové délce asi 300 nm, které vystupují z fotosféry?

**Otázka 6.2.2.** Jedna z uvedených trojic pojmů spolu bezprostředně souvisí. Jistě ji najdete. Dokážete také vysvětlit, *proč* tyto pojmy spolu úzce souvisejí? a) konvektivní zóna pod fotosférou, granulace, sluneční vítr; b) termonukleární reakce, fotosféra, střední volná dráha fotonu; c) elektromagnetické záření, vedení tepla, hvězdný vítr.

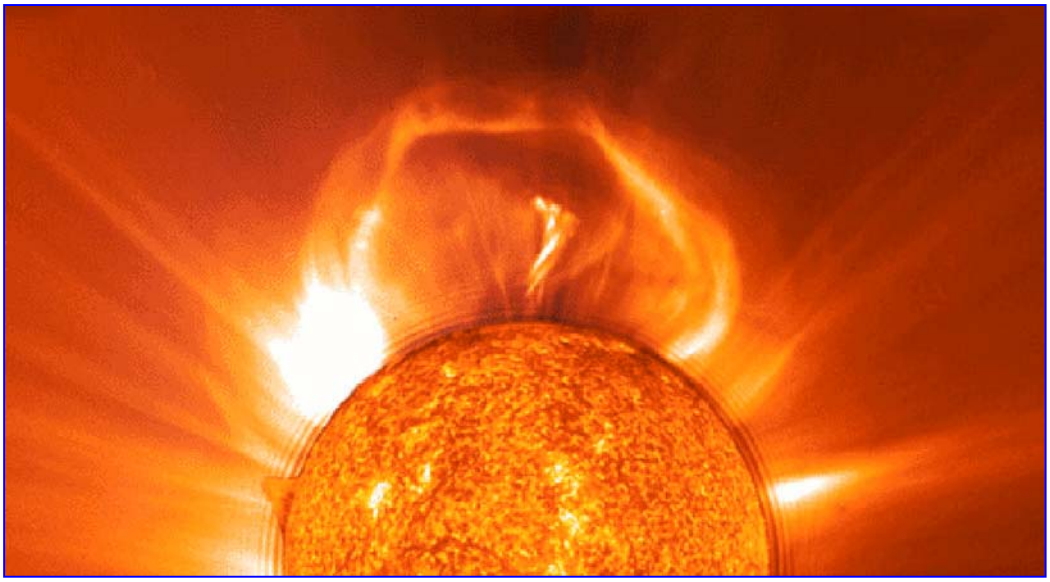
**Otázka 6.2.3.** Pokuste se shrnout do několika krátkých vět, jaké jsou rozdíly mezi slunečním „větrem“ a normálním větrem v zemské atmosféře.



úloha k zamyšlení

## Sluneční vítr

Sluneční vítr, který neustále proudí od naší hvězdy všemi směry, určitě zmenšuje hmotnost Slunce. Vypočítejte tento úbytek hmotnosti, který způsobuje sluneční vítr. Zde jsou některá data, potřebná k výpočtu: ve vzdálenosti, kde obíhá Země kolem Slunce, registrujeme 8 protonů slunečního původu v objemu 1 $cm^3$. Protony se pohybují střední rychlostí 320 km/s. Porovnejte úbytek hmotnosti se současnou hmotností Slunce; jistě bude zajímavé vědět, zda v současné době dochází působením slunečního větru k výraznému zmenšování hmotnosti Slunce či nikoli.



# 6.3. Zdroje energie ve hvězdách

Každé zářící těleso má nějaký zdroj, z něhož čerpá energii. Takový zdroj musí tedy existovat také u hvězd. Již v 19. století uvažoval Julius Mayer (1814–1878), povoláním lékař, o tom, že zdrojem energie Slunce by mohlo být padání meteorických částic na naši hvězdu. Hermann Helmholtz (1821–1894) a William Thomson (lord Kelvin) (1824–1907) zase považovali za zdroj energie gravitační smršťování Slunce.

Oba způsoby však ani zdaleka nedostačují ke krytí ztrát energie během celého vývoje Slunce. Teprve ve 30. letech 20. století bylo jasné, že uvnitř hvězd dochází k jaderným reakcím; ty jsou tedy tím dlouho hledaným zdrojem, z něhož hvězdy čerpají svou energii.

### Termonukleární reaktor, řetězce a cykly reakcí

Podmínkou vzniku jaderné reakce je vysoká teplota: jádra prvků se pohybují navzájem velkými rychlostmi a prudce do sebe narážejí. Po srážce se jádra mohou spojit a vytvořit nové, stabilnější jádro; jde tedy o *jadernou syntézu*. Vysoká teplota je pro spojení jader zcela nezbytná; při nízké k němu nedojde, protože jádra se elektrostaticky odpuzují. Proto také jaderné reakce probíhají jen v bezprostředním okolí středu hvězdy – tam je nejvyšší teplota. „Jaderný reaktor“ zaujímá sotva jedno procento celkového objemu hvězdy.

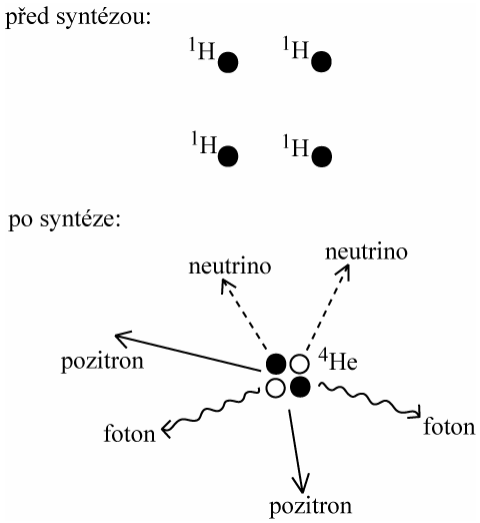
Hvězdy nemají ve svém centru ukrytu nebezpečnou jadernou nálož, spíše v tomto ohledu připomínají skvěle seřízený termonukleární reaktor, v němž se po miliardy let udržují podmínky blízké úplnému vyhasnutí reakcí.

Termonukleární reakce ve hvězdách jsou jiného typu než v našich současných jaderných reaktorech: ve hvězdách dochází k syntéze jader atomů – lehčí atomová jádra se spojují v těžší, zatímco v reaktorech našich jaderných elektráren se těžší atomová jádra štěpí na lehčí. Kdyby se v pozemských podmínkách podařilo uskutečnit řízenou termonukleární reakci stejného typu jako ve hvězdách, mělo by lidstvo co se týká zabezpečení dostatku energie nadlouho vystaráno. Zatím je ale největší technickou překážkou udržení horkého plazmatu v malém objemu, aby tam mohla probíhat *řízená* reakce. Nemáme k dispozici to, co každá hvězda – tlusté vrstvy materiálu, které obalují nitro hvězdy a brání jeho rychlému vychladnutí.

Jaderné „hoření“ ve hvězdách nemá explozivní charakter, jak by se na první pohled zdálo. Jde spíše o jaderné „doutnání“. Hvězdy nemají ve svém centru ukrytu nebezpečnou jadernou nálož, spíše v tomto ohledu připomínají skvěle seřízený termonukleární reaktor, v němž se po miliardy let udržují podmínky blízké úplnému vyhasnutí reakcí. Když se jeho výkon byť jen nepatrně zvýší, centrální oblast se ihned poněkud rozepne a ochladí. Při nižší teplotě ale výkon okamžitě poklesne, nitro se smršťí a rychlost reakcí se uvede zase zpět do správných mezí. Tak se udržuje teplota uvnitř hvězd s přesností na tisíciny stupně(!). Když uvážíme, že se vše děje při teplotách kolem 10 milionů kelvinů, pak nitro funguje jako ten nejdokonalejší termostat, jaký si jen umíme představit.

Poučné je ještě jedno srovnání: snadno si spočítáte, že *měrný výkon* (tj. výkon vztažený na jednotku hmotnosti) Slunce a běžných elektrických kamínek se liší až o 6 řádů – tedy milionkrát – ve prospěch kamínek!

U Slunce (a podobně u většiny hvězd) probíhají jaderné reakce, označované jako *proton-protonový řetězec* (p-p řetězec). Stručně řečeno, 4 protony (jádra atomu vodíku) se několika reakcemi postupně promění na 2 protony a 2 neutrony (tedy jedno jádro helia), přičemž se ještě uvolní energie ve formě fotonů, pozitronu a neutrin [1]). Tento řetězec reakcí je nejúčinnější při teplotách do 20 milionů kelvinů.




Syntéza helia z vodíku.

Při teplotách vyšších převládne *cyklus CNO*: je to sled reakcí, při nichž se opět přeměňují 4 protony na jedno jádro helia, ale do reakcí navíc vstupují jádra atomů uhlíku, dusíku a kyslíku (tedy C,

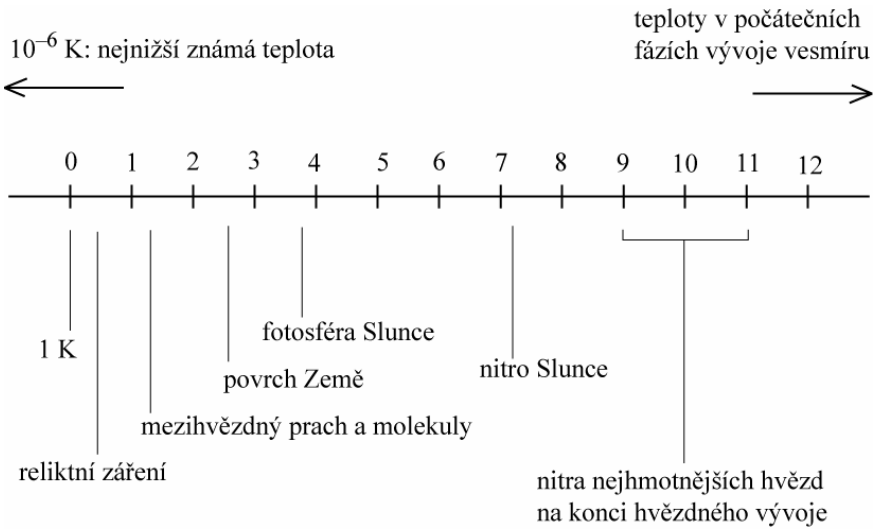
[1]) K přeměně vodíku na helium nedochází naráz jedinou reakcí, ale *postupně* sledem několika reakcí, které probíhají různě rychle – s rozdílnou pravděpodobností setkávání částic vstupujících do reakce.

N, O) jako „katalyzátory“. Cyklus CNO se u Slunce neuplatňuje, naplno se projeví až u žhavých hvězd (u hvězd spektrální třídy F jsou obě řady reakcí přibližně stejně produktivní).

Při teplotách řádově stovky milionů kelvinů probíhají *reakce tří alfa částic*: tři jádra helia – částice alfa – se jadernou reakcí promění na uhlík. Tyto reakce jsou nejúčinnější v závěrečných fázích vývoje hvězd.

**Teplota rozhoduje**

Počet jaderných reakcí prudce roste s teplotou. Je tomu tak proto, že s vyšší teplotou narůstá počet částic s větší energií, které mají větší pravděpodobnost průchodu Coulombovou bariérou. I malé zvýšení teploty vede k podstatnému zvýšení tempa termonukleárních reakcí. U proton-protonového řetězce, který se nejvíce uplatňuje u našeho Slunce, produkce energie závisí na 5. až 6. mocnině teploty. Rozeběhne-li se však cyklus CNO, tato mocnina se zvýší na 15. až 16. U reakcí tří částic alfa produkce energie závisí dokonce na 30. mocnině teploty!




Teploty objektů ve vesmíru.

čítanka

# Richard P. Feynman: Astronomie a fyzika

Astronomie je starší než fyzika. Ve skutečnosti ona dala podnět ke vzniku fyziky tím, že ukázala nádhernou jednoduchost pohybu hvězd a planet. Pochopení tohoto pohybu bylo začátkem fyziky. Nejpozoruhodnějším objevem celé astronomie je však skutečnost, že hvězdy se skládají ze stejných atomů, jaké se nacházejí na Zemi [1]).

Jak se na to přišlo? Atomy vyzařují světlo, jež má určité frekvence, podobně jako barva tónu hudebního nástroje, který má přesnou výšku (frekvenci zvuku). Když uslyšíme směs rozličných tónů, můžeme v ní rozpoznat jednotlivé tóny. Když však hledíme na směs barev, nerozeznáme jednotlivé její složky, neboť naše oko nemá takovou schopnost rozlišení jako ucho. Frekvence světelných vln však můžeme analyzovat pomocí spektroskopu, a tím poznáme všechny „tóny“ atomů nacházejících se na rozličných hvězdách. A tak dokonce dva chemické prvky byly objeveny na hvězdách dříve než na Zemi. Hélium bylo zjištěno na Slunci – odtud pochází i jeho jméno, a technécium bylo objevené na jistých chladných hvězdách.

Poznání, že hvězdy se skládají ze stejných prvků jako Země, to je velký pokrok v jejich studiu. Nyní o atomech víme již tolik, zejména o jejich chování za vysokých teplot a nevelkých hustot, že pomocí statistické mechaniky můžeme analyzovat chování látky tvořící hvězdy. I když na Zemi nedokážeme napodobit podmínky panující ve hvězdách, pomocí základních fyzikálních zákonů víme často velmi přesně – nebo téměř přesně – co se stane. Tak fyzika pomáhá astronomii. Může to připadat podivné, ale opravdu lépe chápeme chování látky v nitru Slunce než uvnitř Země. O tom, co se děje uvnitř hvězdy, víme víc, než by se dalo zjistit z jediného pohledu dalekohledem na malou světelnou skvrnku, neboť dokážeme spočítat, jak se chovají atomy v rozličných podmínkách.

[1]) Jak tu spěchám! Jak mnoho je skryto v každé větě tohoto stručného výkladu: „hvězdy se skládají ze stejných atomů, jaké se nacházejí na Zemi“. Vždyť to je námět na samostatnou přednášku! Básníci tvrdí, že věda odňala hvězdám jejich nádheru – zůstaly jen odpornými plynnými koulemi z atomů. Jenže nic není tak „jednoduché“. I já vidím hvězdy v noci nad pouští a vnímám je. Vidím více nebo méně než básník? Rozlehlost nebes napíná mou představivost – vždyť při pohledu na tuto klenbu zachytávají moje oči světlo staré miliony let. Je to obrovský obraz, jsem jeho součástí, a látka, z níž je mé tělo, snad už jednou vyvřela z nějaké zapomenuté hvězdy, z takové, které i dnes vybuchují kdesi v dálce. Vidím tyto hvězdy okem Palomarského dalekohledu, jak se vzdalují od společného bodu, z něhož snad kdysi vzešly. Co je to za obraz, jaký má smysl, a proč to všechno? Ta trocha poznání tajemství neublíží. Vždyť pravda je nádhernější než kterákoli z představ umělce minulosti. Proč o ní básníci dneška nehovoří? Jací jsou to lidé – básníci, kteří dokáží hovořit o Jupiterovi jako o muži, ale zmlknou, když se jedná o obrovskou rotující kouli z vodíku, metanu a čpavku?

# 6. Ze života hvězd

Foto: Sebastien Giguere.

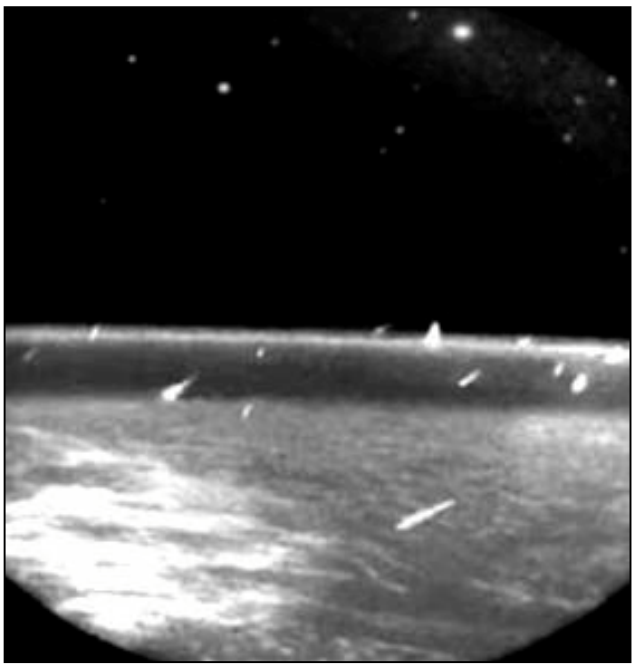
Mezi nejpůsobivější astronomické objevy patří i vysvětlení původu energie hvězd, která jim umožňuje zářit tak dlouho. Jeden z těch, kteří se o tento objev zasloužili, byl se svou přítelkyní večer na procházce krátce poté, co pochopil, že hvězdy září proto, že v nich probíhají jaderné reakce. Na zvolání své přítelkyně unesené nádherou hvězdnatého večera: „Pohleď, jak ty hvězdy krásně svítí!“ odpověděl: „Vidím to, a v této chvíli jsem asi jediným člověkem na světě, který také ví, *proč* svítí.“ Jen se na něj usmála. Vůbec ji nedojalo, že se osobně zná s mužem, který v tom čase jako jediný znal rozluštění hádanky hvězdného světla. Nu což, je smutné, když člověka nechápou, ale tak už to přece na světě chodí.

Z knihy R. P. Feynmana, R. B. Leightona a M. Sandse *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley Publishing Comp., 1966; slovenský překlad J. Foltina a D. Krupy (Alfa, Bratislava 1980) upravil Zdeněk Pokorný.

úloha k zamyšlení

## Slunce zahřívají meteorická tělíska

V polovině 19. století německý lékař Julius Robert von Mayer vyslovil názor, že povrch Slunce zahřívají nárazy meteorických tělísek, které na něj nepřetržitě dopadají. Pak by ovšem neustále narůstala hmotnost Slunce a například v důsledku toho by se zkracovala oběžná doba Země. Mayer, aby tomuto důsledku předešel (koneckonců žádné zkracování oběžné doby nepozorujeme), vyslovil domněnku, že Slunce ztrácí hmotnost vyzařováním. Určete, kolikrát větší hmotnost by musely mít meteorické částice (kdyby jejich dopady opravdu byly zdrojem sluneční energie) než fotony, jež Slunce ztrácí vyzařováním.

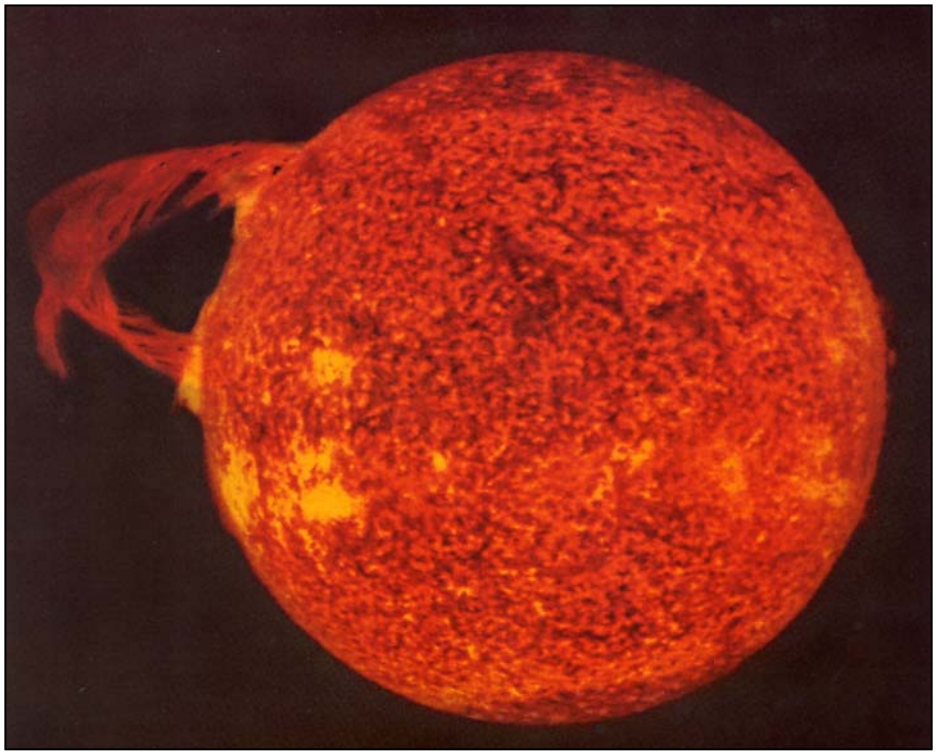


Toto je jen ilustrativní obrázek: družice MSX zachytila v listopadu 1997 za pouhých 48 minut celkem 29 meteorů meteorického roje Leonid, jak vlétají do zemské atmosféry.

úloha k zamyšlení

## Jaderné reakce ve hvězdách

Sluneční „konstanta“ *k* je rovna přibližně 1,4 kW/m$^2$. Můžeme ji zjistit na základě pozorování. Z teorie stavby hvězd zase víme, že v nitru Slunce probíhají termonukleární reakce, při nichž se čtyři atomy vodíku postupně spojují v jeden atom hélia. Kolik kilogramů vodíku „shoří“ na Slunci za jednu sekundu? (Ztráty způsobené unikajícími neutriny zanedbejte.) Je to mnoho či málo ve srovnání s celkovou hmotností Slunce?



Snímek Slunce v extrémní ultrafialové oblasti, v čáře ionizovaného helia o vlnové délce 30,4 nm (záběr byl pořízen z paluby orbitální stanice Skylab v roce 1973).

čítanka

# Zdeněk Pokorný: Problémy s termonukleárními reakcemi

V roce 1919 se fyzikovi Ernestu Rutherfordovi, jenž pracoval v Cavendishově laboratoři v Cambridgi, podařilo uskutečnit první umělou přeměnu atomu. Šlo o štěpnou jadernou reakci: při ozařování dusíku heliovými jádry (částicemi alfa) vznikl izotop kyslíku a rychlé protony. „Co je možné v Cavendishově laboratoři, nemůže být vůbec žádným problémem ani pro Slunce," prohlásil tehdy anglický astronom Arthur Eddington. V oné době probíhaly vzrušené spory o povaze zdrojů energie ve hvězdách. Eddington vsadil na jaderné reakce a – nemýlil se. Ostatně Eddington se vědecky mýlil jen velice zřídka.

Ve 30. letech dvacátého století už bylo jasné, že uvnitř hvězd nastává jaderná syntéza za vysokých teplot. Odtud také pochází označení *termonukleární reakce*. Hans Bethe a Carl von Weizsäcker popsali cykly a řetězce reakcí, jež probíhají v nitru Slunce i ve hvězdách hmotnějších než Slunce.

K jaderným reakcím však dochází jen v bezprostředním okolí středu hvězdy. Jaderný reaktor zaujímá méně než jedno procento objemu hvězdy. Proč? Lakonická, ale zcela správná odpověď zní: je tam nejvyšší teplota. Podívejme se však na problém podrobněji.

Při slučování atomových jader musíme přiblížit jedno atomové jádro těsně k druhému, jen tak může dojít k jejich syntéze. Atomová jádra jsou kladně nabita a elektrostaticky se odpuzují. Kolem každého z nich vzniká jakási bariéra, která jinému jádru brání ve volném přístupu k jádru. Této bariéře se říká Coulombova, neboť vzájemné elektrostatické působení částic popisuje Coulombův zákon.

Aby jiné jádro mohlo Coulombovu bariéru překonat, musí mít dostatečně velkou kinetickou energii (a tu má tím vyšší, čím teplejší je plazma, v němž se jádro nachází). Kuriózní však je fakt, že energie potřebná k překonání Coulombovy bariéry je pro protony (tj. vodíková jádra) asi tisíckrát vyšší než střední energie částic zahřátých na teplotu 10 milionů stupňů Celsia (to je typická teplota uvnitř hvězd). I když víme, že mnohé částice mají energii vyšší než ona střední, Coulombova bariéra kolem protonů je natolik vysoká, že by ji žádná z částic nacházejících se uvnitř hvězdy neměla překonat. Bez dostatečného přiblížení jader ovšem k žádným reakcím nedojde! Znamená to snad, že v nitru hvězd neprobíhají?!

Naše dosavadní úvahy byly tzv. klasické – opíraly se o jevy světa kolem nás a o naši každodenní zkušenost. Jenže ve světě elementárních částic platí jiné zákonitosti, platí zde tzv. *kvantová mechanika*. Podle ní mohou částice pronikat i do oblastí, do nichž podle mechaniky klasické by nikdy vstoupit neměly. Jádro se může dostat za Coulombovu bariéru i tehdy, je-li jeho kinetická energie menší než energie nezbytná k překonání bariéry. Jde tu o tzv. *tunelový jev*. Jeho název dost výstižně popisuje, co se vlastně děje: částice sice nemá na to, aby zdolala kopec, ale může se vydat na druhou stranu tunelem. Tunel ale není otevřen pokaždé,

nicméně vždy jím nějaká částice za překážku pronikne. Průchodnost tunelu velmi silně vzrůstá se zvyšující se energií částice.

Co se tedy odehrává v nitru hvězd? Horké plazma je dějištěm neustálých srážek atomových jader. Některé srážky končí tím, že se dvě jádra octnou blízko u sebe (díky tunelovému jevu) a s jistou pravděpodobností pak dojde k jaderné reakci.

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

čítanka

# Zdeněk Mikulášek: Proč hmotnější hvězdy více září?

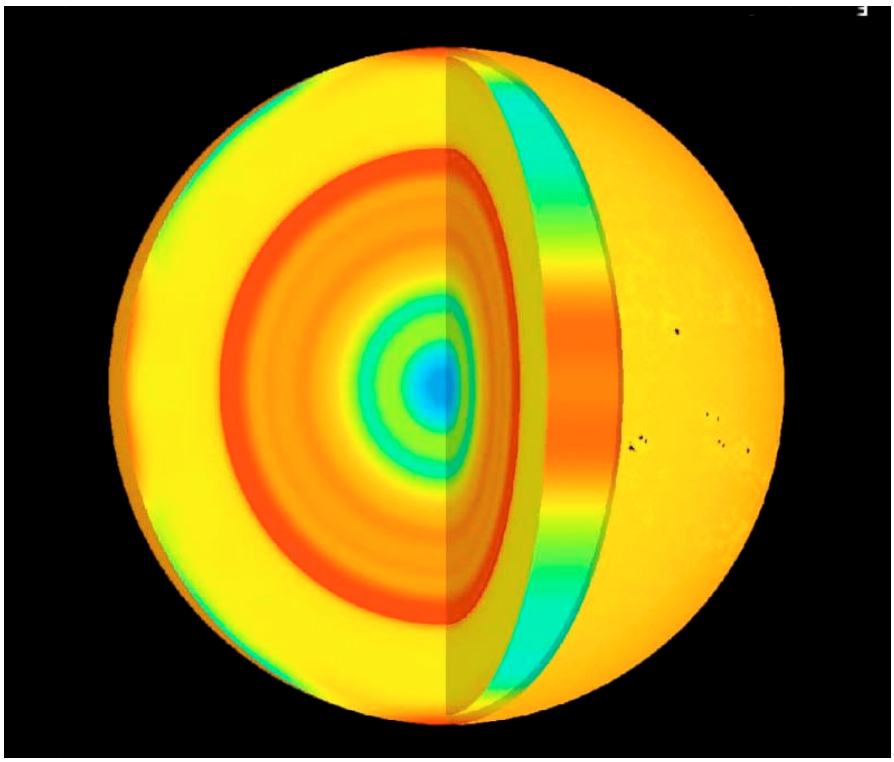
Vyneseme-li si do grafu závislost zářivého výkonu hvězdy na její hmotnosti, zjistíme, že naprostá většina bodů odpovídajících jednotlivým hvězdám se kupí podél jedné hladké rostoucí křivky. Závislost hlásá zcela jednoznačně: čím je hvězda hmotnější, tím více září. Hvězda čtyřikrát hmotnější vysílá do prostoru 280krát více energie než Slunce, zářivý výkon hvězdy s hmotností 15 Sluncí je 30 000krát větší než výkon sluneční. Naproti tomu hvězda se čtvrtinou sluneční hmotnosti září 140krát méně než naše hvězda.

Kde hledat příčinu oné závislosti? Nejspíš hluboko ve hvězdě, tam, kde je uložen termonukleární reaktor, v němž spořádaně probíhají jaderné reakce. Je-li hvězda v energetické rovnováze, pak výkon reaktoru přesně odpovídá zářivému výkonu hvězdy. Na čem asi výkon takového reaktoru závisí? Nepochybně na jeho velikosti. Dá se očekávat, že čím hmotnější bude hvězda, tím hmotnější bude i oblast, v níž k reakcím dochází. Výkon by pak měl být přímo úměrný hmotnosti dané hvězdy. To však nesouhlasí. Hvězda patnáctkrát hmotnější než Slunce nezáří patnáctkrát, ale 30 000krát více. Dobrá, budeme pátrat dále.

Výkon hvězdného reaktoru bude záležet též na rychlosti, s níž se v něm reakce uskutečňují. A tempo termonukleárních reakcí, jak známo, velice silně závisí na pracovní teplotě reaktoru. Teď už se zdá, že jsme na správné stopě. Ukazuje se totiž, že v nitru hmotných hvězd panuje vyšší teplota než ve hvězdách s menší hmotností. Uprostřed Slunce naměříme teplotu asi 15 milionů stupňů Celsia, ve hvězdě s 15 hmotnostmi Slunce 35 milionů stupňů Celsia, zatímco ve hvězdě čtyřikrát lehčí než Slunce nikde nenajdeme místo teplejší než 12 milionů stupňů Celsia. Jsme tedy hotovi – hmotné hvězdy září více především proto, že jsou uvnitř teplejší a reakce v nich probíhají rychleji než ve hvězdách s menší hmotností.

Vysvětlení je to elegantní a logické, bohužel nesprávné! Zaměňuje totiž příčinu a následek; výkon hvězdy není určen výkonem reaktoru, ale naopak. Hvězda sama reguluje jeho výkon tak, aby právě pokryl zářivý výkon hvězdy. Přišli byste na to sami, kdybyste si položili otázku: a proč je v nitru hmotnějších hvězd vyšší teplota? Správná odpověď: v nitru hvězdy se ustaví právě taková teplota, aby množství energie uvolňované termonukleárními reakcemi odpovídalo množství energie, které v každém okamžiku hvězdu opouští.

Čím je však zářivý výkon hvězdy určen? Už v roce 1924 ukázal geniální anglický astrofyzik Arthur Eddington, že hlavní roli tu hraje obal hvězdy. Energie vzniklá v centrálních oblastech hvězdy se postupně prodírá obalem, aby nakonec vystoupila na povrch a unikla do prostoru. Obal hvězdy tak představuje mocnou vrstvu tepelné izolace, která chrání žhavé nitro před vychladnutím. Čím je tato izolace kvalitnější, tím méně tepla uniká, tím menší je pak i zářivý výkon hvězdy.



Eddington teoreticky dokázal, že velikost úniku tepla obalem závisí především na jeho hmotnosti. Izolace horkého nitra hmotných hvězd je nedokonalá, záření obalem snadno prostupuje, naproti tomu chladné a husté obaly málo hmotných hvězd brání chladnutí vnitřku velice účinně. Přitom je zajímavé, že odvod tepla ani příliš nezáleží na rozměrech hvězdy. Centrální teplota hvězdy dané hmotnosti je však nepřímo úměrná poloměru. A právě tato teplota určuje tempo termonukleárních reakcí, a tedy i výkon celého termonukleárního reaktoru. Tím si lze vysvětlit i náhlý zvrat v raném vývoji hvězdy – přechod ze stadia smršťování do údobí prosperity, kdy se výkon ani rozměry hvězd po mnoho milionů i miliard let takřka nemění.

Pokud je hvězda ještě velmi rozměrná, její teplota v centru je nízká. Výkon jaderného hoření v centru je malý a nedostačuje k uhrazení tepelných ztrát, jež jsou určeny hmotností hvězdy. V zájmu vyrovnání záporné energetické bilance sahá hvězda k jinému dostupnému rezervoáru energie, k energii potenciální. Ta se uvolňuje smršťováním hvězdy. Souběžně s tím se zvyšuje teplota hvězdného nitra, výkon termonukleárního reaktoru vzrůstá. Smršťování se jako nepotřebné zastaví ve chvíli, kdy výkon hvězdy a výkon reaktoru budou v rovnováze.

Pak nastává velmi dlouhé období v životě hvězdy, kdy se veškeré ztráty způsobené únikem tepla hradí teplem uvolněným při reakcích. Vzhledem k tomu, že termonukleární reakce jsou mimořádně vydatným zdrojem energie, trvá takový stav velmi dlouho. Není proto divu, že většinu hvězd v okolí Slunce přistihneme právě v tomto údobí jejich vývoje. Vždyť ani Slunce není v tomto směru výjimkou!

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

# 6. Ze života hvězd

*Sova je proto symbolem moudrosti, protože i hlupák vidí za světla, ale moudrý člověk vidí i ve tmě.*

Nikita Ivanovič Panin, státník (1718 – 1783)

## otázky a příklady

**Otázka 6.3.1.** Ověřte si výpočtem zpaměti, že řádový měrný výkon Slunce je opravdu tak nízký, jak uvádíme!

**Otázka 6.3.2.** Proč není zdrojem energie ve hvězdách štěpení jader uranu, které probíhá např. v našich atomových elektrárnách?

**Otázka 6.3.3.** Uvnitř hvězdy dochází ke slučování jader atomů. Proč je k tomu zapotřebí vysoké teploty? a) Dvě jádra se musí dostat k sobě až na dosah jaderných sil (je třeba překonat odpudivou sílu nábojů jader), k čemuž je zapotřebí značné kinetické energie. b) Vysokou teplotou se látka rozdělí na kladně a záporně nabité částice, ty pak vyvolají jadernou reakci. c) Čím je vyšší teplota, tím je látka hustší a snadněji dojde k jaderné reakci.

**Otázka 6.3.4.** Mimořádně výraznou závislost měrného výkonu termonukleárních reakcí (tj. energie uvolněné za jednotku času v látce s jednotkovou hmotností) na teplotě si stěží představíme bez nějakého číselného příkladu. Tak tedy: kolikrát by vzrostl měrný výkon Slunce, kdyby se zvýšila současná teplota v centru Slunce na dvojnásobek? Kolikrát by vzrostl výkon hvězdy, v jejímž nitru probíhá cyklus CNO? A co v případě reakcí 3 alfa částic?

**Otázka 6.3.5.** V centru Slunce musí proton čekat na úspěšnou nepružnou srážku s jiným protonem v průměru $10^{10}$ let, tedy asi dvojnásobek současného stáří Slunce. Odhadněte, kolik vodíku v jádru se již proměnilo při nepružné srážce na helium, jestliže se za tuto dobu podstatně nezměnila rychlost jaderných reakcí.

**Otázka 6.3.6.** Proč jsou jaderné reakce nejúčinnější v samém středu hvězdy? a) Je tu nejvíce vodíku, takže může proběhnout nejvíce elementárních jaderných reakcí. b) Je zde nejvyšší teplota, a na ní účinnost jaderných reakcí velmi silně závisí. c) Je zde nejvyšší koncentrace stopových příměsí, které působí jako katalyzátory jaderných reakcí.

**Otázka 6.3.7**. Proč trvá tak dlouho, než se kvantum energie vzniklé ve středových částech Slunce dostane ke slunečnímu povrchu, kde je konečně vyzářeno do prostoru?

**Otázka 6.3.8.** Proč je při slučování prvků těžších než vodík zapotřebí vyšší teploty než při vodíkových termonukleárních reakcích?

**Otázka 6.3.9.** Na základě čeho usuzujeme, že štěpné jaderné reakce (např. rozpad uranu $U^{235}$) *nejsou* zdrojem sluneční energie? a) tyto reakce nejsou dostatečně energeticky vydatné; b) štěpením atomů by narůstala hmotnost Slunce, což nepozorujeme; c) ve Slunci není dostatek štěpného materiálu.

**Otázka 6.3.10.** V nitru našeho Slunce je v současné době nejúčinnější termonukleární reakcí: a) proton-protonový řetězec; b) cyklus CNO; c) reakce tří $\alpha$-částic.

**Otázka 6.3.11.** Nejstabilnějšími prvky ve vesmíru (tj. prvky s maximální vazebnou energií na jeden nukleon) jsou: a) vodík a helium; b) lithium; c) prvky skupiny železa.

**Otázka 6.3.12.** Poznali bychom na základě nějakého experimentu nebo své zkušenosti, kdyby právě nyní v nitru Slunce náhle ustaly z nějaké příčiny termonukleární reakce?

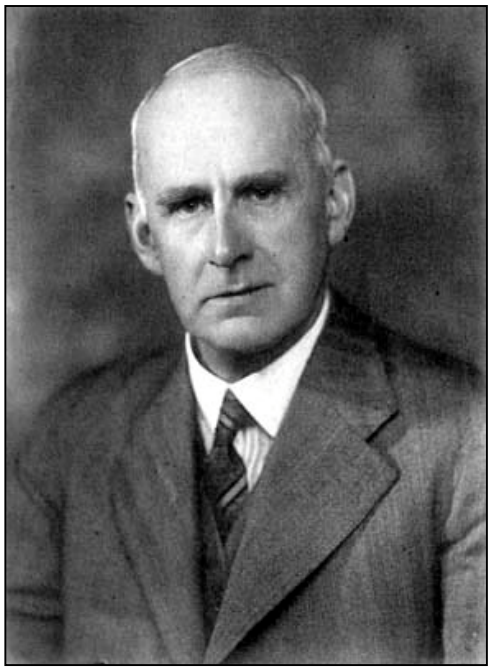
**Otázka 6.3.13.** Při vzniku jednoho jádra helia v nitru Slunce vylétnou dvě neutrina a uvolní se jaderná energie $4{,}2\cdot10^{-12}$ J. Vypočítejte tok slunečních neutrin (počet neutrin procházejících čtverečním metrem za sekundu) ve vzdálenosti 1 AU od Slunce.

medailon

# Arthur Eddington

### (28. 12. 1882 – 22. 11. 1944)

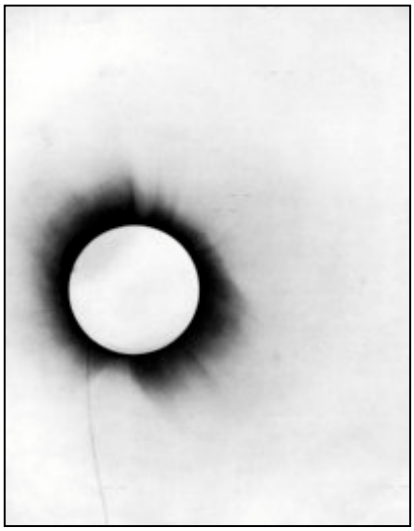
Anglický badatel Sir Arthur Eddington patřil v první polovině našeho století k průkopníkům nové vědní disciplíny – astrofyziky. Měl vynikající teoretickou průpravu ve fyzice a téměř neomylný instinkt při porovnání modelových výpočtů s astronomickými pozorováními v době, kdy většina fyziků ještě nechápala, že pozorování mohou obohatit výzkum zejména tam, kde možnosti laboratorních pokusů naprosto nestačí, tj. v oblastech vysokých teplot, tlaků, hustot, hmotností, magnetických polí a rychlostí pohybu kosmické látky.



Eddingtonovým stěžejním dílem bylo vybudování teorie vnitřní stavby hvězd v době, kdy ještě nikdo neměl tušení o termonukleárních reakcích jaderného slučování. Předjal tak celou řadu výsledků, jež se později objevily v jaderné fyzice. Eddingtonův znamenitý pokračovatel Sir Fred Hoyle o něm napsal: „Je to podivná ironie osudu, že hlavní příčinou, proč se britští fyzikové [ve dvacátých letech tohoto století] nedali přimět k tomu, aby uznali astronomii za solidní součást fyziky, je právě rozsah posměchu, jemuž byl vystaven Eddington v Cavendishově laboratoři [v Cambridge]. Podstatným důvodem přitom byla Eddingtonova domněnka, že energie ve Slunci i ve hvězdách se získává přeměnou vodíku na helium. Možná si vzpomínáte, jak mu namítali, že pro tuto přeměnu nejsou hvězdy dost horké a kterak je Eddington jednou v rozčilení poslal do pekla, že tam je horko dost.“

Eddington se na veřejnosti poprvé proslavil v roce 1919, kdy vedl jednu ze dvou britských výprav za úplným zatměním Slunce s cílem ověřit předpověď Einsteinovy obecné teorie relativity o gravitační odchylce poloh hvězd v blízkosti slunečního kotouče. Eddingtonova účast na výpravě byla poněkud překvapující zejména proto, že Eddington proslul především jako teoretik. Během první světové války mu však jako odpírači vojenské služby (patřil k náboženské společnosti kvakerů) hrozilo vězení, takže byl pro jistotu z vojenské služby vyreklamován jako nepostradatelný pozorovatel!

Eddington se znamenitě zhostil svého úkolu, který vyvrcholil fakticky až po skončení světové války sledováním úplného zatmění Slunce dne 29. května 1919 na Princově ostrově v Guinejském zálivu u břehů západní Afriky. Přes nepřízeň počasí pořídil se svým spolupracovníkem E. Cottinghamem dobré snímky hvězd v blízkosti zatmělého Slunce. Po návratu do vlasti (druhá expedice směřovala do Sobralu v severní Brazílii) vedl i celé zpracování měření z obou britských výprav. Výsledky průkopnických měření přednesl na společné schůzi Britské královské společnosti a Královské astronomické společnosti dne 6. listopadu 1919. Na této slavnostní schůzi oznámil, že při zatměních byly hvězdy na okraji slunečního kotouče odchýleny o úhel (1,6"±0,3"), ve velmi dobré shodě s Einsteinovou předpovědí (1,75").



Zpráva měla rozhodující vliv na všeobecné přijetí Einsteinovy teorie; sám Eddington poslal před Vánoci 1919 Einsteinovi telegram: „Celá Anglie mluví o Vaší teorii.“ Tak se Eddington poprvé zasloužil o přijetí obecné teorie relativity nejvýznamnějšími světovými badateli. Podruhé k tomu došlo, když v roce 1933 publikoval monografii *Rozpínající se vesmír*, v níž vystihl význam Hubblova vztahu závislosti červeného posuvu galaxií na jejich vzdálenosti od nás pro potvrzení faktu, že vesmír se ve shodě s teorií relativity vskutku rozpíná.

Jasnozřivost, s níž Eddington (o tři roky mladší než Einstein) pochopil a obhajoval Einsteinovu převratnou teorii, nepřímo vystihuje anekdota, podle níž se na večírku kdosi Eddingtona zeptal, zda je pravda, že na světě jsou jen tři lidé, kteří chápou Einsteinovu teorii. Eddington chvíli neodpovídal a na další naléhání tazatele odpověděl: „Přemýšlím, kdo by mohl být ten třetí.“

Nicméně ani předvídavý Eddington se neubránil kardinálním omylům. V roce 1930 přijel do britské Cambridge, kde byl Eddington profesorem, nadaný indický student Subrahmanyan Chandrasekhar s relativistickou teorií stavby zhroucených hvězd, jimž říkáme bílí trpaslíci. Eddington Chandrasekharovy myšlenky odmítl a jejich autora znechutil tak, že ten po několika letech marného zápolení přesídlil do Chicaga, kde se stal světově proslulým astrofyzikem. V roce 1983 obdržel Chandrasekhar Nobelovu cenu přesně za ty výzkumy bílých trpaslíků, jimž se Eddington posmíval.

Podobně když se Eddington dozvěděl, že z teorie relativity vyplývá mimo jiné neodvratné gravitační zhroucení velmi hmotných hvězd do černé díry, prohlásil: „Potřebujeme přírodní zákon, který zabrání hvězdám vyvádět takové hlouposti.“ Přání se však Eddingtonovi nesplnilo: teorie hvězdných černých děr je dnes dobře ověřována astronomickými pozorováními rentgenových dvojhvězd.

Obě epizody dokazují, že ani největší veleduchové mezi přírodovědci nejsou neomylní. Nicméně Eddingtonovy zásluhy o rozvoj hvězdné astrofyziky výrazně převyšují jeho pochybení. Pohyboval se s matematicky podloženou virtuozitou v terénu téměř neprozkoumaném a jeho dílo patří k pilířům soudobé astrofyziky. Eddington byl rovněž významným popularizátorem přírodních věd a jeho knihy pro širší veřejnost nacházely vděčné čtenáře pro barvitý jazyk a vtipná i dramatická přirovnání.

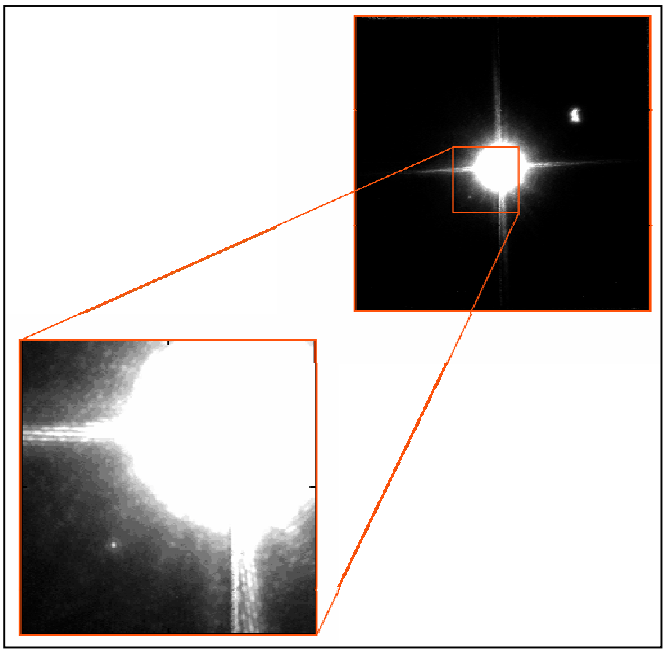
Eddingtonovým koníčkem byla cykloturistika; v jeho pracovně visela silniční mapa Anglie, na níž barevně vyznačoval trasy, jež projel na kole. Vymyslel si svérázný cyklistický index N, což je celé číslo, udávající počet dnů, kdy ujel na kole alespoň N mil za den. Pokud jste cyklisty a děláte si záznamy o svých vyjížďkách, zkuste si svůj cyklistický index spočítat - uvidíte, že to není nijak snadná úloha, jak lze ostatně od teoretika světového významu očekávat. Eddington sám dosáhl indexu N = 75, tj. v 75 dnech ujel alespoň 121 km za den, a to na obyčejném cestovním kole!

Autorem medailonu je Jiří Grygar.

čítanka

# Arthur Eddington: Příběh Siriova průvodce

Titulek tohoto detektivního příběhu by mohl být „Nesmyslná zpráva“. Sirius je nejjasnější hvězdou na nebi. Pochopitelně byl odpradávna často sledován, astronomové ho spolu s dalšími jasnými hvězdami používali k určování času. Byla to časová hvězda, jak říkáme. Ukázalo se však, že Sirius není nijak dobrý měřič času: jednou se po několik let předbíhá, pak zas pozdí. V roce 1844 nalezl Bessel příčinu této nepravidelnosti: Sirius opisuje na hvězdné obloze eliptickou dráhu. Obvykle musí existovat něco, co nutí hvězdu takto se pohybovat; astronomové usoudili, že onen pohyb způsobuje tmavá hvězda, kterou ještě nikdo neviděl. Kdo ví, zda vůbec někdo věřil, že by ji mohl spatřit. Průvodce Siria byl zřejmě první neviditelnou hvězdou, která byla řádně zjištěna. Nemáme právo nazývat ji hypotetickou. Okolnost, že se hmota gravitačně projevuje, je důležitější pro posouzení její existence než to, že ji momentálně nevidíme. Stejně tak nenazveme čirou okenní tabuli „hypotetickou“.



Nicméně po osmnácti letech Siriova průvodce poprvé spatřil Alvan Clark. Objev to byl svým způsobem zvláštní. Clark sledoval Siria nikoli proto, že by se o něj zajímal, ale z toho důvodu, že Sirius představuje skvělý bodový zdroj světla pro testování optické kvality nových velkých objektivů, které zhotovovala jeho firma. Troufám si tvrdit, že když Clark spatřil u Siria malý světelný bod, byl roztrpčen představou, že bude muset znovu objektiv opravovat. Ve skutečnosti šlo o přímý důkaz existence dosud nepozorovaného Siriova průvodce.

Velké moderní dalekohledy tuto hvězdu ukáží docela snadno, takže romantika objevu je ta tam. Znalosti o hvězdě rostou; víme už, že je to hvězda jen o něco méně hmotná než Slunce. Má 4/5 sluneční hmotnosti, ale vydává jen 1/360 slunečního světla. To, že je nevýrazná, nás nemusí překvapovat – existují přece rozma-

nité hvězdy od jasných a horkých bílého zabarvení až po chladnější červenavé, které září docela málo. Usoudilo se tedy, že průvodce je jednou z nenápadných červených hvězd.

V roce 1914 však profesor Adams z observatoře na Mount Wilsonu zjistil, že Siriův průvodce není červenou hvězdou. Je bílý – horký a bílý. Proč však nezáří dostatečně výrazně? Na to je jen jediná odpověď: *musí to být velmi malá hvězda*. Z charakteru a zabarvení světla lze usoudit, že by jednotková část povrchu měla zářit víc než stejně velká část povrchu slunečního. Jestliže ale Siriův průvodce září 360krát méně než Slunce, je jeho povrch alespoň 360krát menší než sluneční. Odtud plyne, že jeho poloměr je nanejvýš 1/19 slunečního, což ho rozměrem řadí spíš mezi tělesa planetární než hvězdná. Podrobnějším výpočtem zjistíme, že průvodce Siria je co do velikosti mezi Zemí a další větší planetou Uranem.

Jestliže však vtěsnáme látku o hmotnosti nepříliš menší než má Slunce do koule jen o něco větší než je zeměkoule, bude tu silně namačkána. Její hustota bude 60 000krát převyšovat hustotu vody – i docela malá, několikacentimetrová kostka z této látky bude vážit tunu!

O hvězdách se dovídáme nové poznatky tím, že zaznamenáváme a vysvětlujeme zprávy, které nám přináší jejich světlo. Zpráva od Siriova průvodce, když byla dekódována, zněla: „Jsem složen z látky, která je 3000krát hustší než cokoli, s čím jste se dosud setkali. Tuna mého materiálu se vejde do krabičky od zápalek.“ Jak lze na tuto zprávu odpovědět? V roce 1914 by na ni většina z nás reagovala slovy: „Přestaňte žvanit, vždyť je to přece nesmysl!“

Jenže v roce 1924 byla vytvořena teorie, podle níž materiál ve hvězdách může mít hustotu mnohokrát převyšující hodnoty obvyklé v pozemských podmínkách. Pozornost se znovu obrátila k podivné zprávě Siriova průvodce. Už na ni nemusíme hledět jako na nesmyslnou. To samozřejmě neznamená, že je zcela určitě pravdivá, ale od nynějška ji budeme zvažovat a testovat, už to není čirá hloupost.

Je třeba poznamenat, že originální zprávu bylo možné zpochybnit jen velmi obtížně. O správnosti určení hmotnosti na 4/5 sluneční nemůže být vůbec žádného sporu, je to jedna z nejlépe určených hmotností hvězd. Je docela přirozené, že je tak velká, jestliže je schopna rozkývat Siria při jeho pohybu vesmírem. Určení poloměru je sice méně přímé, ale bylo provedeno metodou, jež slavila úspěchy i u jiných hvězd. Mimoto případ průvodce Siria už nebyl ojedinělý, přinejmenším dvě další hvězdy k nám vyslaly zprávu, že jsou neuvěřitelně husté. I když naše možnosti vyhledání těchto zvláštních hvězd jsou dost omezené, není pochyb o tom, že „bílí trpaslíci“, jak se ony hvězdy počaly nazývat, mohou být ve vesmíru relativně četné.

Výňatek z knihy *Stars and Atoms* (Oxford University Press, 1927; přeložil Zdeněk Pokorný).

# 6.4. Jak hvězdy vznikají?

Až na výjimky je vývoj jednotlivých hvězd natolik dlouhým procesem, že jej celý nemůžeme přímo sledovat. Naštěstí však existuje mnoho hvězd, které pozorujeme v různých stadiích vývoje. Namísto časově dlouhého vývoje *jedné* hvězdy sledujeme tedy okamžitý stav (jakési momentky) *mnoha* hvězd a z těchto informací pak usuzujeme na celý hvězdný vývoj. Musíme mít ale stále na paměti, že výběrové efekty nám mohou znepříjemnit život: například hvězdy často pozorované nemusí být ani zdaleka těmi, jichž je v Galaxii nejvíc.

Na začátku hvězdného vývoje je neforemný oblak – hvězdy vznikají z náhodného zhuštění mezihvězdné látky. I nyní pozorujeme mlhoviny, v nichž jsou hvězdy vzniklé před necelým milionem roků (a to je z astronomického hlediska téměř současnost). Oblak mezihvězdné látky je z nějakého vnějšího popudu stlačen; zvýší se jeho hustota, vodík se spojí do molekul a ochladí se až na 10 kelvinů. Takto vzniklá *molekulová oblaka* ale nejsou gravitačně stabilní a rozpadají se na řadu menších kousků.

Tmavý prachový oblak (globule) v oblasti označované NGC 281, asi 10 000 ly od nás vzdálené. Foto: Hubblův kosmický dalekohled.

Místa, kde vznikají zárodečné mlhoviny budoucích hvězd, můžeme pozorovat jako *globule* [1]): jeví se jako temné oválné útvary na svítícím pozadí. Jsou to již poněkud hustší oblasti mezihvězdného plynu a prachu, ve kterých se při dalším stlačování tvoří kulové zárodky nových hvězd – tzv. *protohvězdy*.

**Ejhle hvězda!**

Gravitační smršťování protohvězd je zpočátku velmi rychlé – hvězdný zárodek se hroutí prakticky volným pádem. Pak ale rychlé smršťování přejde v pomalé, ve hvězdě se ustavuje téměř dokonalá hydrostatická rovnováha. V tomto období hvězda září na účet potenciální energie.

Tepelná výměna probíhá výhradně konvekcí, což ve svém důsledku znamená, že se důkladně promísí celý objem hvězdného materiálu. Každá hvězda je na začátku svého vývoje *chemicky stejnorodá*. Smršťováním rostou v jejím nitru tlak a teplota. Jakmile tyto veličiny dosáhnou hodnot, za nichž je možná termonukleární přeměna vodíku na helium, smršťování hvězdy skončí a rychle se ustaví rovnovážný stav. V nitru hvězdy se zapálí jaderné reakce, které jsou od tohoto okamžiku hlavním zdrojem její energie.

Uvedli jsme, že na počátku svého vývoje je hvězda chemicky stejnorodá. Připomeňme si tedy, z čeho se skládá: 60 až 90 procent tvoří vodík, 5 až 35 procent helium, zbytek pak připadá na těžší prvky.

Jeden z mediálně nejznámějších snímků, které pořídil Hubblův kosmický dalekohled: část mlhoviny M 16, přezdívané Orlí. Zejména v horní části tmavého sloupce jsou dobře vidět jednotlivé globule, které uvnitř skrývají právě vznikající hvězdy.

[1]) Latinsky *globulus* je kulička.

čítanka

# Miroslav Plavec: Plynutí času

Jedním směrem plyne náš čas, od zrodu k zániku. To je snad nejvážnější životní skutečnost pro každého z nás. Jsme si dávno vědomi toho, že podléháme témuž neúprosnému přírodnímu zákonu jako celá ostatní pozemská příroda, zákonu neustálého vznikání a zanikání. Ale neživá příroda? Nebe nad námi?

*Je nebe věčné. Kéž dá věčnosti půl zemi!*
*Jak dlouho těšit se ze světa, vína je mi?*
*Sto let – to málo je, sto let je příliš moc:*
*za každým životem přec zívá hrobu noc.*
*O – hé! ... O – hé!*
Li Po v parafrázi B. Mathesia

Tak smýšlelo v podstatě celé lidstvo. Jen v geniálních myšlenkách řeckých filozofů prosvitly názory, že Země i vesmír jsou podrobeny týmž zákonům vzniku, vývoje, zanikání a věčné přeměny. *Panta rhei*, vše plyne, bylo heslem Herakleitovým.

Znovuzrození vědy znamenalo návrat k některým antickým představám o pohybu světů, ale o nějakém jejich vývoji neuvažoval nikdo. Poznalo se, že planety krouží kolem Slunce, a hlavní roli tu má gravitační síla. Gravitace se nikdy nevyčerpává: tedy tyto světy – jednou uvedeny do pohybu – neměnně krouží po všechny časy.

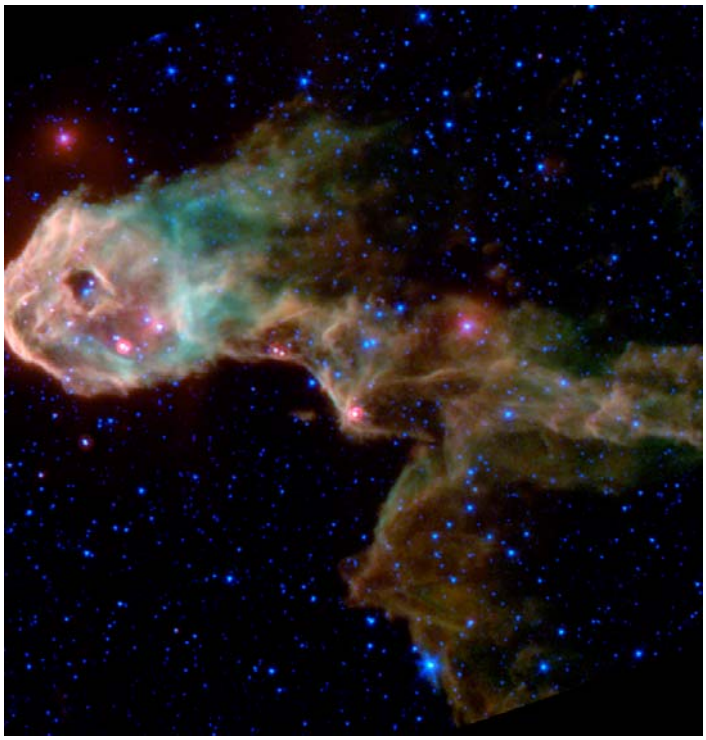
Bylo proto novou revolucí v astronomii, když roku 1755 filozof Immanuel Kant přišel s názorem, že Slunce a planety vznikly z neuspořádané mlhoviny a postupně se vyvíjely, až dospěly do dnešního stavu. Astronomie byla opět první vědou, která rozbořila staré strnulé představy: teprve dlouho po Kantovi vyvozuje přírodověda celkem samozřejmý závěr, že i všechno živé na Zemi jednou vzniklo a vyvíjelo se. Sto let po Kantovi přišel Darwin...

Pomalu se i mezi astronomy probojovávala představa o vzniku a vývoji planet. Když pak byla objevena povaha hvězd, šlo všechno mnohem rychleji: velice záhy začínají úvahy o tom, jak se vyvíjejí hvězdy. Proč u hvězd astronomové daleko snáze připustili vývoj než ve sluneční soustavě? Předně: věda byla v 19. století mnohem dále než ve století osmnáctém. A potom u hvězd je věc jasnější. Jakmile si uvědomíme, že hvězda

musí energii vyrábět a že zářivá energie vzniká jen přeměnou energie jiné, je nám jasno, že sebevětší hvězda musí mít konečné zásoby energie: její trvání je tedy také časově omezeno.

Hvězdy žijí velice dlouho, ale ne věčně: Slunce jednou pohasne, a proto také jednou svítit začalo. Ač je to velmi odvážné, máme plné právo uvažovat o vzniku, vývoji a zániku hvězd.

Výňatek z knihy *Člověk a hvězdy* (Orbis, Praha 1960).



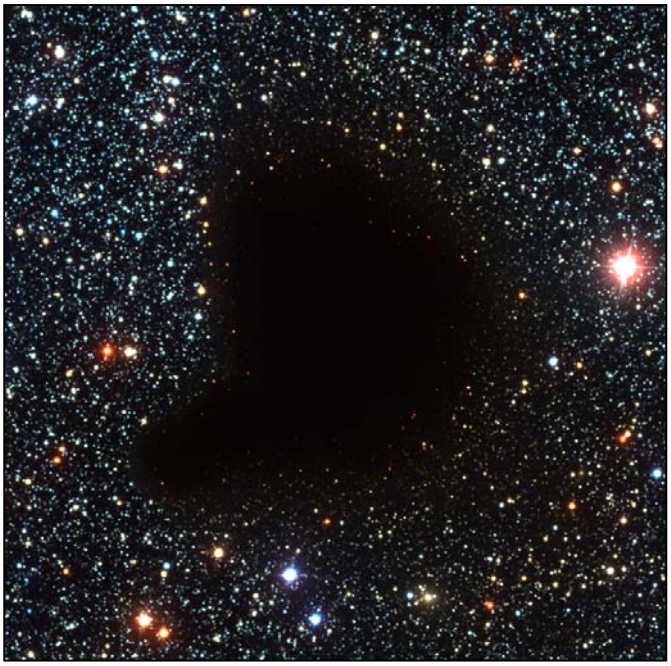
V infračerveném oboru vyhlíží jinak tmavá globule docela prapodivně: toto je pohled na globuli v emisní mlhovině IC 1396 v souhvězdí Cephea, jak jej zprostředkoval Spitzerův kosmický dalekohled v prosinci 2003.

čítanka

# Gareth Wynn-Williams: Kdybychom žili v molekulovém mračnu

Nejhmotnějšími objekty v Galaxii jsou obří molekulová oblaka, ohromná nakupení molekul vodíku a dalších komplikovanějších chemických sloučenin. Jak by vypadal náš život, kdyby se Slunce nacházelo uvnitř takového molekulového mraku, nikoli v těch místech Galaxie, kde je nyní? Co by se změnilo?

V molekulovém oblaku je tolik mezihvězdného prachu, že bychom neviděli nic z toho, co se nachází za hranicemi naší sluneční soustavy. Ačkoli Slunce, planety a jejich družice by vyhlížely asi stejně jako nyní, neexistovalo by pozadí z hvězd, ani dalekohledem bychom nemohli spatřit žádnou galaxii nebo mlhovinu. Jedinou náhradou za to by byla možnost sledovat více komet, ale i tak bychom za některých bezměsíčných nocí neviděli na obloze vůbec nic. Pro ty z nás, kteří se zajímáme o astronomii, by ztráta informací byla doslova katastrofální. Vše, co víme o vesmíru a co je založeno na pozorování ve viditelném, ultrafialovém a rentgenovém oboru spektra, by bylo ztraceno. Pouze kdybychom měli infračervené a rádiové dalekohledy, mohli bychom je použít, abychom přece jen prokoukli mračnem ven.



Globule Barnard 68. Foto: Very Large Telescope, ESO.

Ale nejen astronomové a romantici by trpěli za ztrátu hvězdnatých nocí. Také dějiny našich posledních několika staletí by vypadaly asi jinak. Bez hvězd na obloze, bez pevných navigačních bodů by se opozdil rozvoj mořeplavby o několik set či snad až tisíce roků. Způsob osídlování jiných kontinentů by byl zcela odlišný v případě, že by námořníci neměli možnost se plavit daleko od známých pobřeží.

# 6. Ze života hvězd

Je též velmi sporné, zda by se vůbec rozvinula naše technologická civilizace, kdyby na obloze nebylo vidět vůbec žádné hvězdy. Převratnou událostí v historii vědy byl objev Johannese Keplera, že planety se pohybují po eliptických trajektoriích. Z tohoto objevu přímo vycházel Isaac Newton, když formuloval gravitační zákon a zákony pohybu těles. Tyto poznatky zcela zásadně proměnily vědu, vyvolaly revoluci ve vědě, která probíhá dodnes. Kepler by zcela jistě nepřišel s teorií eliptických trajektorií, kdyby hvězdy nebyly pozorovatelné. „Nehybné“ vzdálené hvězdy mu sloužily jako pevné referenční body, k nimž vztahoval pohyb planet. Bez nich by řešil mnohem obtížnější problém, musel by neustále brát v úvahu pohyb planet způsobený rotací Země.

Neexistence světla hvězd by ovlivnila dějiny života na Zemi dokonce předtím, než by přišly myslící bytosti. Mnozí savci jsou noční tvorové; jejich schopnost nalézt potravu a tedy i vyvíjet se by za bezměsíčných nocí byla nepochybně ztížena. Asi by se u nich vyvinuly oči citlivé na infračervené záření, jako je tomu u některých hadů. Jak víme, stěhovaví ptáci používají jako jeden ze svých navigačních prostředků hvězdy. Na peří a v žaludcích ptáků se rozsévají po světě semena různých plodin. Kdyby hvězdy nebyly, stěhování ptáků na velké vzdálenosti by se vyvinulo jinak, a tak by se změnilo i rozložení flóry a fauny na celém světě.

Výňatek z knihy *The Fullness of Space*, otištěný v časopise Mercury, 22, 1993, s. 6-7. Přeložil Zdeněk Pokorný.

# 6. Ze života hvězd

*Existuje pouze jediný naprosto spolehlivý způsob, jak se vyhnout chybám měření:* ***neměřit****.*

Stanislav Komenda, matematik (1936 – )

## otázky a příklady

**Otázka 6.4.1.** Proč je rádiové a infračervené záření vhodnější pro výzkum obřích molekulových oblak než záření viditelné?

**Otázka 6.4.2.** Z nějakého důvodu část molekulového oblaku začne kolabovat – vytváří se protohvězda. Co tento kolaps protohvězdy zastaví?

**Otázka 6.4.3.** Hvězdy vznikají většinou ve skupinách. Vysvětlete, proč pozorujeme také značný počet osamocených hvězd?

**Otázka 6.4.4.** Jedna z uvedených vlastností *není* typická pro hvězdu před zapálením vodíkových termonukleárních reakcí v jejím nitru. Která to je? a) Hvězda je chemicky různorodá. b) Gravitační energie je hlavním zdrojem energie hvězdy. c) Zářivý tok hvězdy je s časem silně proměnný.

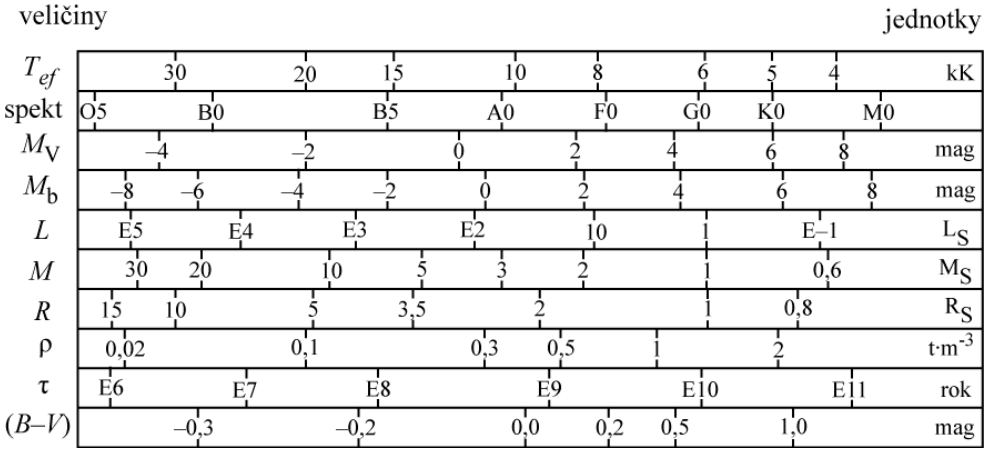
# 6.5. Hvězdy v nejlepších letech

Jaderným hořením vodíku v jádru hvězdy nastává nejdelší období jejího vývoje bez pronikavých změn, jsou to doslova poklidné hvězdné časy. Tato fáze trvá řádově miliony roků až desítky miliard roků, v závislosti na hmotnosti hvězdy. Obecně platí, že čím má hvězda *větší* hmotnost, tím *rychleji* se vyvíjí.

| *Hmotnost hvězdy *):* | *Doba hoření vodíku v jádru (roky):* |
|---|---|
| 25 | $7 \cdot 10^6$ |
| 15 | $1 \cdot 10^7$ |
| 9 | $2 \cdot 10^7$ |
| 5 | $6 \cdot 10^7$ |
| 3 | $2 \cdot 10^8$ |
| 1 | $1 \cdot 10^{10}$ |

*) V jednotkách současné hmotnosti Slunce.

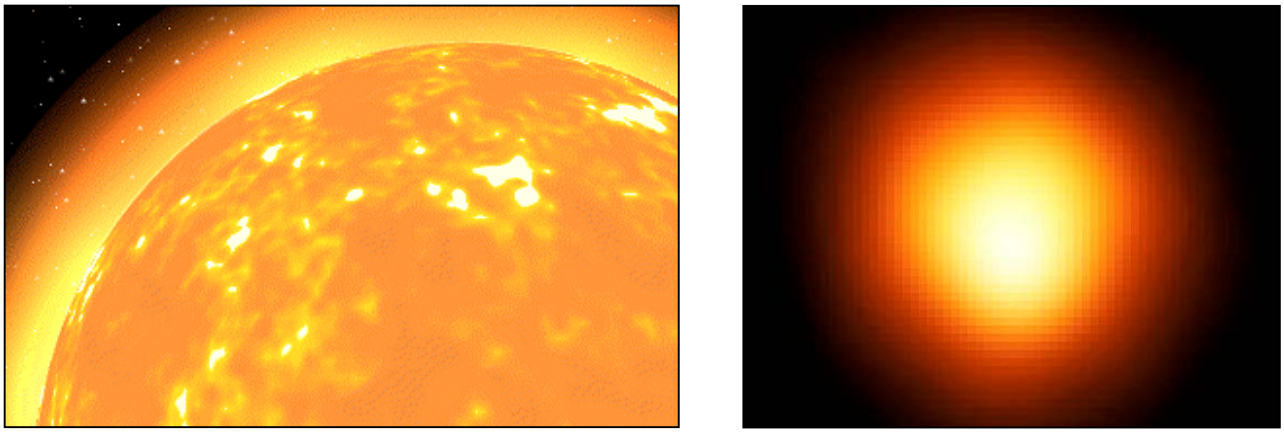
V tu dobu se hvězda nachází na hlavní posloupnosti Hertzsprungova-Russellova diagramu. Její průměr hvězdy i zářivý výkon se mění jen málo – obojí pozvolna narůstá. V samém středu hvězdy, kde jaderné reakce probíhají nejúčinněji, se těmito reakcemi mění i chemické složení hvězdného materiálu: ubývá vodíku a přibývá „popelu“ vodíkových reakcí – helia.




*Hvězdy hlavní posloupnosti*. Fyzikální veličiny, které jsou v obrázku vzájemně porovnávány: efektivní teplota hvězdy $T_{ef}$, spektrální třída, absolutní vizuální hvězdná velikost $M_V$, absolutní bolometrická hvězdná velikost $M_b$, zářivý výkon $L$, hmotnost $M$, poloměr $R$, střední hustota ρ, doba setrvání na hlavní posloupnosti τ a barevný index $(B–V)$.

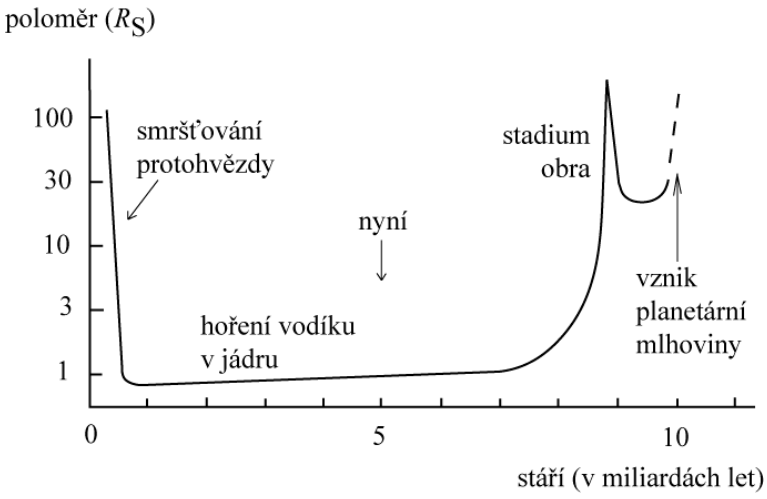
### Je čas k proměně

Když ve středu hvězdy a jeho těsném okolí zbývá už jen asi pět procent vodíku, prudce se sníží produkce energie hvězdy. Ta na to reaguje smršťováním jádra. Tím se zahřívá nejen jádro, ale i látka v okolí, kde je vodíku poněkud více. Jaderné reakce nyní probíhají ve vrstvě vodíku, která obaluje již neaktivní heliové jádro. Hovoříme o *slupkovém hoření vodíku*.



Červený obr Betelgeuse ze souhvězdí Orionu v představě kreslíře a na záběru Hubblovým kosmickým dalekohledem.

Následky tohoto hoření jsou zajímavé: jádro hvězdy pod slupkou se nadále smršťuje a zahřívá, čímž nutí vodíkovou slupku ke stále větší produkci energie, třebaže se slupka hořícího vodíku neustále ztenčuje. Zatímco vnitřek hvězdy se smršťuje a zahřívá, její obálka se rozpíná a chladne. Hvězda se stává *červeným obrem* nebo *veleobrem*. (Hranice, kdy se hvězda stane obrem a kdy veleobrem, není nijak ostrá. Pro jednoduchost ale předpokládejme, že při hmotnostech do 5 hmotností Slunce je hvězda obrem, nad tuto hranici veleobrem.)

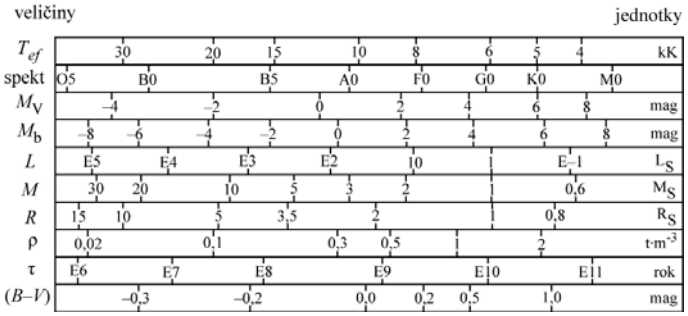



Změny velikosti Slunce v průběhu vývoje.

### Hvězdní obři a veleobři

Stane-li se hvězda obrem nebo veleobrem, její vývoj se prudce zrychlí. Průměr hvězdy vzroste až stokrát, povrchová teplota naopak poklesne. Zatímco vnitřek hvězdy se dále smršťuje, vnější oblasti se rozpínají.

Dosáhne-li teplota v jádru hodnot řádově stamilionů kelvinů, zapalují se jaderné reakce, přeměňující helium na uhlík (tzv. reakce 3 alfa částic). Horní vrstvy jsou v neustálé a silné konvekci, hvězda je nestabilní; v důsledku silného *hvězdného větru* rychle ztrácí svou látku. Na konci hvězdného vývoje tak přejde zpět do mezihvězdného prostředí 30 až 85 procent látky hvězdy.




praktikum

# Stáří otevřených hvězdokup

Otevřené hvězdokupy patří mezi poměrně mladé objekty v Galaxii. Každou tvoří několik desítek až několik tisíc hvězd. Všechny hvězdy ve hvězdokupě jsou prakticky v téže vzdálenosti od nás. Sestrojíme-li si pro hvězdokupu Hertzsprungův-Russellův diagram (HR diagram), můžeme určit její vzdálenost tak, že vhodně srovnáme její HR diagram s HR diagramem jiné hvězdokupy, jejíž vzdálenost známe. Můžeme též studovat vývojové efekty a určit přibližné stáří otevřené hvězdokupy. To bude též naším úkolem v tomto praktiku.

**Pracovní postup:**

1. Na obr. 1 jsou uvedeny barevné diagramy pro dvě otevřené hvězdokupy (na vodorovné ose je vynesen barevný index ($B - V$), na svislé ose vizuální hvězdná velikost $V$). Pro třetí hvězdokupu – M 45 (Plejády) – jsou tato data (pro 44 vybraných hvězd) uvedena v tabulce 1. Vyneste hodnoty $V$ a ($B - V$) pro hvězdy z Plejád do diagramu ke zbývajícím dvěma hvězdokupám (vynášené body pro hvězdy z Plejád graficky odlište od bodů, jež jsou již na obr. 1 zakresleny, např. použijte malých křížků).

2. Vzdálenost hvězdokupy Plejády je známa z měření vlastních pohybů a radiálních rychlostí hvězd – jde o jednu z blízkých pohybových hvězdokup. Podle měření družice Hipparcos (a následné interpretace těchto měření) činí vzdálenost $r$ hvězd, tvořících hvězdokupu, 117 až 133 pc. Na základě těchto měření určete modul vzdálenosti ($m - M$) hvězdokupy.

3. Znalost modulu vzdálenosti ($m - M$) umožňuje vynést do obr. 1 stupnici absolutních hvězdných velikostí $M$. Vyznačte tuto stupnici např. na pravém okraji obrázku 1.

4. V barevném diagramu (obr. 1) jsou pro každou hvězdokupu zakresleny hvězdy hlavní posloupnosti i ty hvězdy (nejhmotnější ze všech ve hvězdokupě), které se již následkem hvězdného vývoje vzdálily od hlavní posloupnosti. Nyní je podstatná poloha hvězd hlavní posloupnosti. Hvězdy jedné hvězdokupy jsou vůči hvězdám druhé hvězdokupy *ve svislém směru* posunuty, neboť jsou od nás různě daleko (mají různý modul vzdálenosti). Ze vzájemných posuvů hlavních posloupností určete moduly vzdáleností ($m - M$) a vzdálenosti $r$ pro hvězdokupy M 44 a NGC 752 (navázáním na modul vzdálenosti pro Plejády, který již znáte). Výsledky zapište do tabulky 2.

5. Pro určení přibližného stáří hvězdokup je třeba určit, od které části hlavní posloupnosti se oddělily hvězdy při svém vývoji směrem k oblasti obrů. Pro snazší určení tohoto místa jsou v tabulce 3 uvedeny souřadnice *hlavní posloupnosti nulového stáří*. Dokreslete je do obr. 1 a spojte plynulou čarou. Takto získanou

hlavní posloupnost nulového stáří přeneste na průsvitný papír, abyste posunutím průsvitného papíru ve svislém směru mohli ztotožnit hlavní posloupnost nulového stáří se *spodním okrajem* hlavní posloupnosti hvězdokupy.

6. Nejjasnější hvězdy, které mají též největší hmotnost, opouštějí hlavní posloupnost jako první. Zakřivení vrchního konce hlavní posloupnosti pro hvězdokupu nás tedy informuje kvalitativně o stáří celé skupiny hvězd. Čím *níže* je toto zakřivení na hlavní posloupnosti, tím je studovaná skupina hvězd *starší*.

Z barevného diagramu (obr. 1) určete místo zakřivení hlavní posloupnosti a z údajů v tabulce 4 odhadněte stáří jednotlivých hvězdokup. Výsledky zapište do tabulky 2 a diskutujte.

Praktikum bylo připraveno s použitím kapitoly B33 knihy M. G. J. Minnaerta: *Practical Work in Elementary Astronomy* (D. Reidel, Dordrecht 1969).

### *Vstupní data, výsledky:*

**Tabulka 1. Hvězdné velikosti a barevné indexy pro hvězdokupu M 45 (Plejády).**

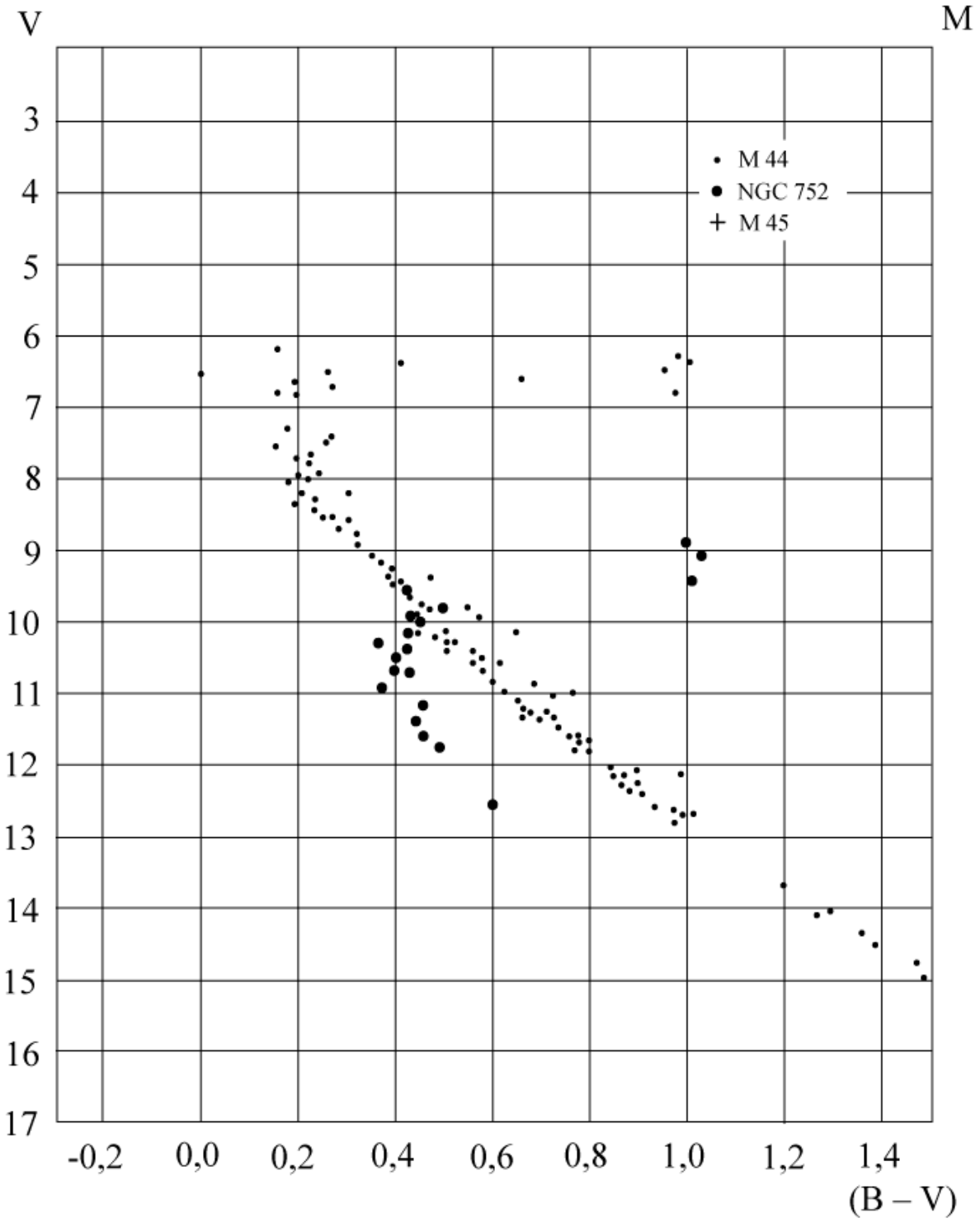
| $V$ | $(B–V)$ | $V$ | $(B–V)$ | $V$ | $(B–V)$ | $V$ | $(B–V)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8,24 | 0,24 | 9,70 | 0,55 | 6,80 | 0,03 | 10,34 | 0,61 |
| 8,16 | 0,27 | 3,86 | –0,07 | 6,98 | 0,03 | 8,36 | 0,28 |
| 5,45 | –0,05 | 7,84 | 0,19 | 7,24 | 0,04 | 3,62 | –0,09 |
| 3,69 | –0,11 | 5,75 | –0,04 | 7,76 | 0,15 | 5,08 | –0,08 |
| 10,37 | 0,63 | 6,41 | –0,03 | 6,80 | 0,06 | 7,51 | 0,10 |
| 5,64 | –0,08 | 4,16 | –0,06 | 2,86 | –0,09 | 6,59 | –0,03 |
| 4,29 | –0,11 | 10,42 | 0,64 | 9,86 | 0,54 | 7,96 | 0,18 |
| 8,98 | 0,44 | 7,34 | 0,10 | 9,12 | 0,47 | 9,08 | 0,43 |
| 8,58 | 0,35 | 10,20 | 0,72 | 10,09 | 0,56 | 6,16 | –0,05 |
| 10,12 | 0,60 | 9,28 | 0,46 | 5,44 | –0,07 | 7,53 | 0,08 |
| 7,16 | 0,16 | 10,52 | 0,64 | 6,94 | 0,13 | 6,92 | 0,09 |

Modul vzdálenosti Plejád činí

$m – M = 5 \log r – 5 =$ _____ .

**Tabulka 2.**

| *Hvězdokupa* | $(m – M)$ (mag) | $r$ (pc) | *stáří* (roky) |
|---|---|---|---|
| M 45 (Plejády) | | 117 až 133 | |
| M 44 (Praesepe) | | | |
| NGC 752 | | | |



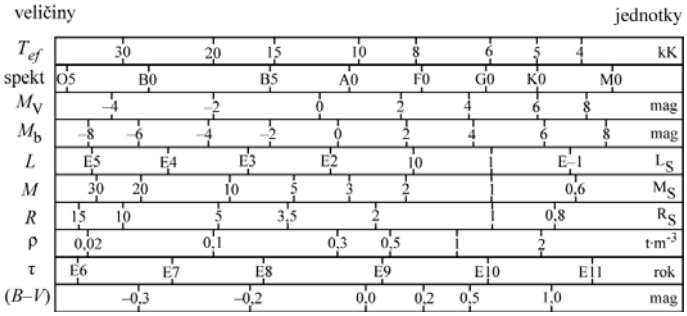

Obr. 1. HR diagram pro hvězdokupy M 45 (Plejády), NGC 752 a M 44 (Praesepe). Údaje převzaty z publikací: *Astrophysical Journal* 117, 1953, str. 356 (NGC 752); *Hvězdářská ročenka* 1975, str. 261-262 (M 45), str. 266-267 (M 44).

**Tabulka 3. Hlavní posloupnost nulového stáří.**

| $(B-V)$ | $M$ | $(B-V)$ | $M$ |
|---|---|---|---|
| –0,3 | –3,3 | 0,4 | 3,7 |
| –0,2 | –1,0 | 0,5 | 4,3 |
| –0,1 | 0,5 | 0,6 | 4,7 |
| 0,0 | 1,5 | 0,7 | 5,3 |
| 0,1 | 2,1 | 0,8 | 5,8 |
| 0,2 | 2,6 | 0,9 | 6,3 |
| 0,3 | 3,2 | 1,0 | 6,7 |

**Tabulka 4.**

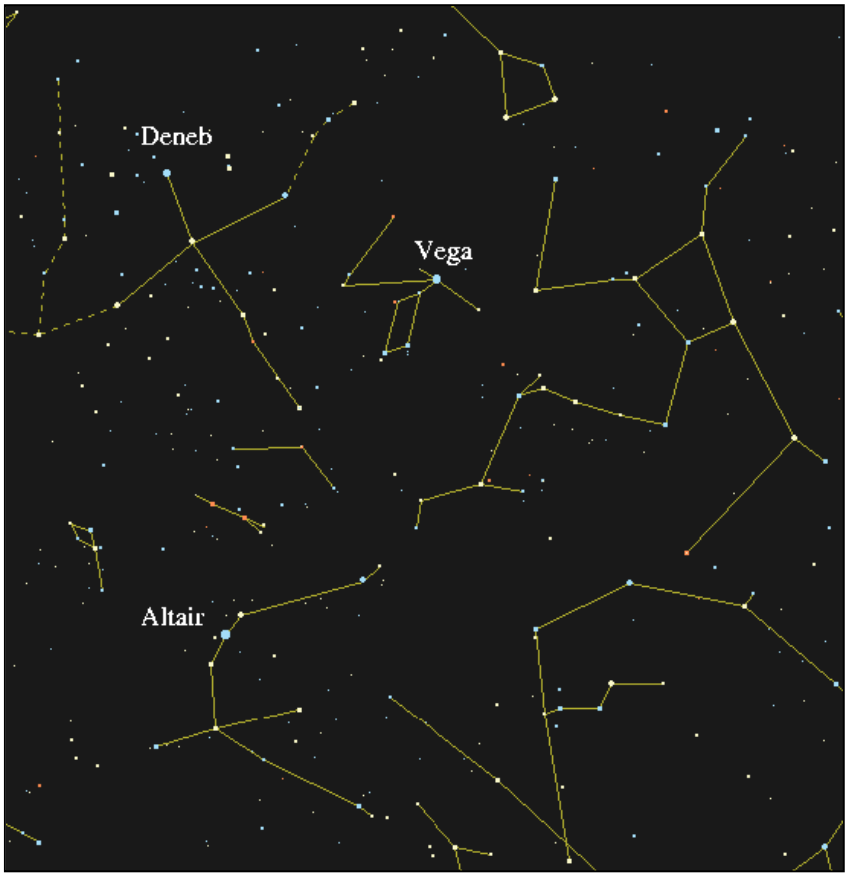
| *Spektrální typ* | $(B-V)$ (mag) | *stáří* (roky) |
|---|---|---|
| O 5 | –0,35 | $5\cdot10^5$ |
| B 0 | –0,31 | $5\cdot10^6$ |
| B 5 | –0,16 | $5\cdot10^7$ |
| A 0 | 0,00 | $3\cdot10^8$ |
| A 5 | 0,13 | $1\cdot10^9$ |
| F 0 | 0,27 | $3\cdot10^9$ |
| F 5 | 0,42 | $5\cdot10^9$ |
| G 0 | 0,58 | $7\cdot10^9$ |
| G 5 | 0,70 | $1\cdot10^{10}$ |



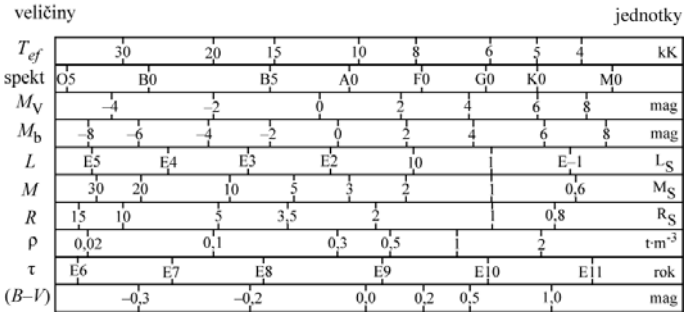

úloha k zamyšlení

# Proč se změní jasnost Vegy?

Celá naše sluneční soustava se přibližuje k jasné hvězdě α Lyrae (Vega) rychlostí $v$ = 14 km/s. Za jak dlouho se pozorovaná hvězdná velikost Vegy změní o 0,1 mag? Nebude tento časový úsek natolik dlouhý, že se během něj také nějak projeví změny jasnosti, k nimž dojde v důsledku vývoje hvězdy Vegy? (Dodejme ještě paralaxu Vegy π = 0,129".)



# 6. Ze života hvězd




*Učili jsme se ledabyle,*
*stačili málo poznati:*
*tak lze nám bez přílišné píle*
*svým vzděláním se blýskati.*
*. . .*
*Na haldě knih se uvelebil*
*a četl – moudřejší však nebyl.*
*Tu nuda, tam zas klam a tlach,*
*či pustý nesmysl až strach.*
*. . .*
*... na každé stránce nákres mnohý*
*a každý list tu počmárán.*
*Tu čáry máry; mezi nimi*
*text s myšlenkami rozumnými, ...*

(z románu Evžen Oněgin)

Alexandr Sergejevič Puškin, spisovatel (1799 – 1837)

## otázky a příklady

**Otázka 6.5.1.** Pro hvězdy hlavní posloupnosti HR diagramu bylo zjištěno, že zářivý výkon $L$ je úměrný třetí mocnině hmotnosti $M$, tedy $L \sim M^3$. Co z této skutečnosti můžeme usoudit ohledně „doby života“ hvězd s malou a velkou hmotností?

**Otázka 6.5.2.** Čím to, že hmotnější hvězdy vyrábějí více energie než hvězdy méně hmotné? (Vzpomeňte na závislost mezi hmotností a zářivým výkonem hvězd.) Není to tím, že hmotné hvězdy mají více jaderného paliva – vodíku – než hvězdy méně hmotné?

**Otázka 6.5.3.** Proč má látka na povrchu hvězdy stále stejné chemické složení jako mezihvězdná látka, z níž hvězda kdysi vznikla, i když se termonukleárními reakcemi chemické složení hvězdy mění? Nebo jinak: proč z chemického složení slunečního větru můžeme usuzovat na složení zárodečné mlhoviny, z níž vzniklo Slunce a planety?

**Otázka 6.5.4.** Co mají společného všechny hvězdy hlavní posloupnosti?

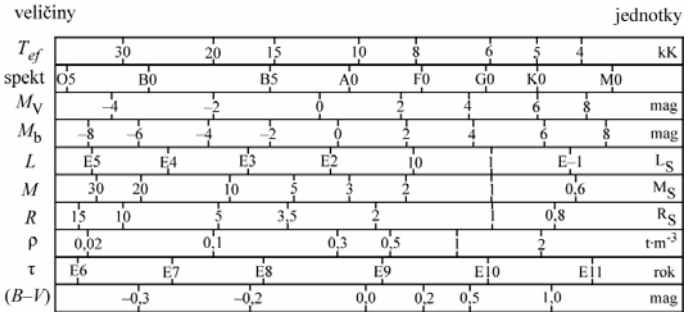
**Otázka 6.5.5.** Ve dvou různých částech molekulového oblaku se přibližně ve stejnou dobu utvořily dvě osamělé hvězdy. Mají shodou okolností stejnou hmotnost, také chemické složení je obdobné (vždyť jsou z jednoho obřího oblaku). Jiné jejich parametry zatím neznáme. Můžeme už nyní posoudit jejich další vývoj? Bude se v něčem lišit? A když ano, v čem a proč?

**Otázka 6.5.6.** Hvězdy v jedné otevřené hvězdokupě určitě *nemají*: a) totéž stáří; b) přibližně stejnou vzdálenost od Slunce; c) téměř totožné chemické složení; d) zhruba tutéž hmotnost.

**Otázka 6.5.7.** Otevřená hvězdokupy **X** má větší podíl hvězd hlavní posloupnosti než hvězdokupa **Y**. Která z nich je pravděpodobně starší?

**Otázka 6.5.8.** Mohla hvězda o hmotnosti 0,2 sluneční hmotnosti již opustit hlavní posloupnost, i když vznikla jako jedna z prvních hvězd v naší Galaxii? a) Ano, platí to dokonce pro většinu takových hvězd. b) Ne, jejich doba pobytu na hlavní posloupnosti je delší než současné stáří vesmíru, tj. řekněme 14 miliard roků. c) Záleží také na chemickém složení hvězd: některé takové hvězdy již hlavní posloupnost opustily, jiné doposud ne.

**Otázka 6.5.9.** V době jaderného hoření vodíku v jádru hvězdy (když se hvězda zdržuje v HR diagramu na hlavní posloupnosti), se její zářivý výkon s časem: a) zvyšuje; b) snižuje; c) nelze jednoznačně rozhodnout, závisí to na hmotnosti hvězdy.

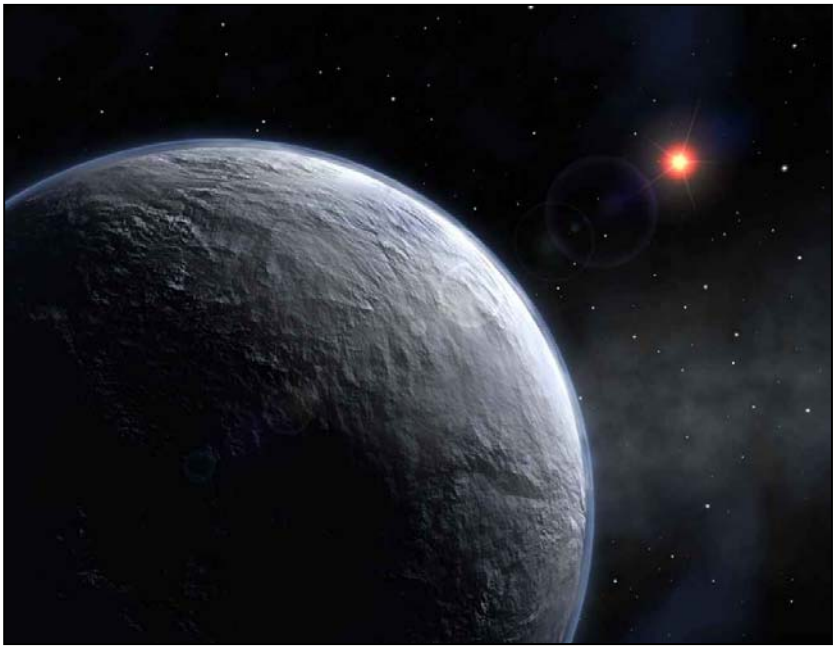



čítanka

# Miroslav Plavec: Červený trpaslík vám vydrží

Svoji hvězdu můžete mít za pouhých 35 dolarů. Prodá vám ji jedna společnost v Texasu nebo jiná v Kanadě. Hvězda bude označena na mapě oblohy vaším jménem a zápis o tom bude uložen v knihovně Kongresu ve Washingtonu. Astronomové sice prohlašují, že to jméno budou ignorovat, ale dobře vedená televizní kampaň zmůže i je. Ostatně, nebylo by jméno Felix Krupička nebo Napoleon Rybníček zábavnější než HD 147382?

Nebo můžete koupit hvězdu bohaté tetičce. Ona vám pak z vděčnosti odkáže nějaký miliónek. A to vše za pouhých 35 dolarů. Už jsem však nějaký čas o těch firmách neslyšel. Jestli zkrachovaly, dobře jim tak, byly diletantské, prodávaly hvězdy kus od kusu. Bez ohledu na jasnost, barvu, rozměry a stáří! Jako kdybyste prodávali za stejnou cenu moderní vilu i polorozpadlou barabiznu. To já bych šel na to jinak.



Ledová planeta o pětinásobné hmotnosti Země, obíhající kolem červeného trpaslíka (kresba: ESO).

Nejlacinější by byli červení trpaslíci. Těch jsou kolem spousty. Jsou všichni chladnější, menší a méně zářiví než naše Slunce. Zdůrazňoval bych naprostou trvanlivost. Náš hvězdný systém je nějakých 12 miliard let starý a červení trpaslíci, kteří se utvořili v první generaci hvězd, jsou s námi pořád a ani nezestárli. Prodával bych je pod heslem: „Červený trpaslík vám vydrží. Plná záruka trvanlivosti na deset miliard let, jinak vám peníze vrátíme."

Hvězdy podobné Slunci, celkem taky tak trochu trpaslíci, ale ne ta nejmenší láce, barvou trochu nažloutlí, by byly o něco dražší. Větší výkon, vynikající teplota a je jich přece jen menší zásoba, i když stále hojná. Chcete Slunce jako naše? Záruka trvanlivosti na pět miliard let pro zánovní slunce, osm miliard let pro zbrusu nový kus. Navíc můžete trefit na exemplář, který má kolem sebe planety. Ty může mít mnoho jiných typů hvězd, ale jen sluneční hvězdy skýtají příjemnou teplotu na straně jedné a dostatečně dlouhou dobu k pokojnému vývoji života.

Větší a teplejší hvězdy, od bílých po namodralé, vynikají množstvím zářivé energie, kterou vysílají do vesmíru, ale také pro ně platí, že rozmařilost a plýtvání nakonec vyčerpá i velké zásoby. Protože moje hvězdy by si mohly kupovat i právnické osoby, usuzuji, že tento typ by nepřilákal spořitelny. Těm bych naopak doporučoval bílé trpaslíky, velmi šetrné hvězdné penzisty. Divoká léta rozhazovačného mládí mají dávno za sebou a nyní šetří a vydávají energii poskrovnu, aby jim dlouho vydržela.

Za přiměřenou cenu si můžete koupit hvězdného obra nebo veleobra. Máme je také v červeném, čehož se dociluje nižší povrchovou teplotou, jen něco přes tři tisíce stupňů Celsia, a daleko většími rozměry. Červené veleobry by bylo záhodno prodávat podle objemu. Představte si, že bychom zmenšili naše Slunce do velikosti tenisového míčku. Pak by takový červený veleobr Betelgeuze v Orionu měl rozměry velkého plynojemu. Celkový její objem činí 100 milionů Sluncí. Ale, jak už postřehl Jan Neruda, tyhle obrovské hvězdy nejsou z jadrného fládru, ale jen z plynových hadrů; a kdyby aspoň to! U rudých obrů a veleobrů odpadá jakákoli záruka trvanlivosti. Obr jednoho krásného tisíciletí odfoukne svoji rozsáhlou atmosféru a zbude maličký degenerovaný trpaslík.

S rudými veleobry je to ještě horší. To abyste se každý večer chodili koukat, jestli ho tam ještě máte. On se totiž v nejbližších 100 tisíci letech rozprskne jako supernova. Může to být i dnes v noci. Sice přijdete o hvězdu, ale zase ta sláva!

S koupí hvězdy si to můžete dobře uvážit. Je jich na skladě dost. Jen v naší Galaxii na 200 miliard. Na každého se dostane. Ovšem, chcete-li něco lepšího...

Výňatky ze stejnojmenného článku, který byl uveřejněn v *Nedělních Lidových novinách* 3. dubna 1993.

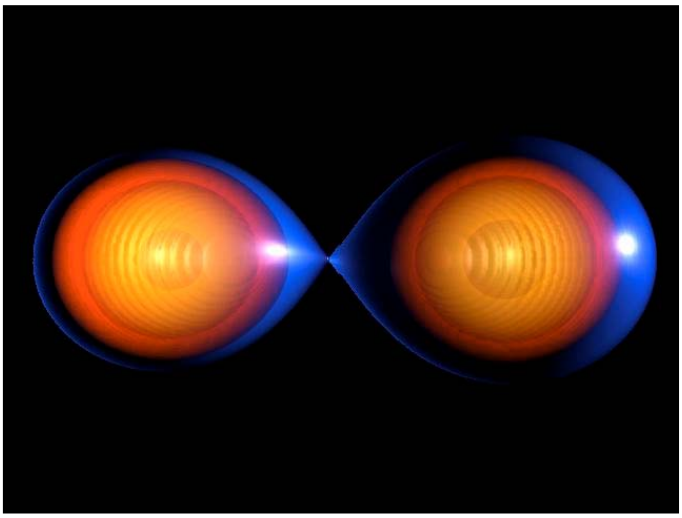
# 6.6. Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd

Algol je hvězdou, která zaujala astronomy několikrát. Naposledy v polovině 20. století, kdy se naplno začalo hovořit o *vývojovém paradoxu Algolu*. Algol je totiž těsnou dvojhvězdou, zákrytovou dvojhvězdou, a vzájemné zákryty jednotlivých složek můžeme docela snadno pozorovat [1]). Známe tedy rozměry a hmotnosti složek dvojhvězdy. Víme, že jednou složkou je žhavá hvězda hlavní posloupnosti o hmotnosti pěti Sluncí, druhou chladná obří hvězda s hmotností pětkrát menší(!). Jenže tvoří-li dvojhvězdu, vznikly obě složky určitě zaráz, a je-li *méně* hmotná hvězda ve svém vývoji *dál* než hvězda hmotnější, je něco v nepořádku.

**Když pes požírá psa**

Pod tímto názvem je mezi astronomy známa hypotéza Johna Crawforda a Freda Hoyla [2]), která řeší vývojový paradox Algolu. Scénář vývoje je docela jednoduchý: po společném vzniku se obě hvězdy v páru vyvíjejí tak, jak předepisuje teorie hvězdného vývoje pro osamocené hvězdy.

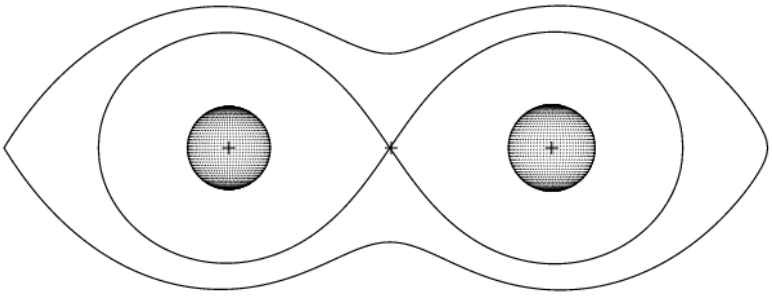
Hmotnější hvězda žije ovšem rychleji a po čase se začne rozpínat a měnit v rozměrného obra. Nemůže ale zaujmout libovolně velký prostor jako hvězda zcela osamocená, ale jen jakousi kapku, zvanou Rocheův lalok [3]) (podle francouzského astronoma Édouarda Rocheho, který se v polovině 19. století zabýval slapovými jevy). Tento lalok je vlivem oběhu kolem hmotného středu dvojhvězdy i vlivem přitažlivosti druhé hvězdy deformován do podoby obří, poněkud zploštělé kapky, jejíž špička je obrácena ke druhé hvězdě.



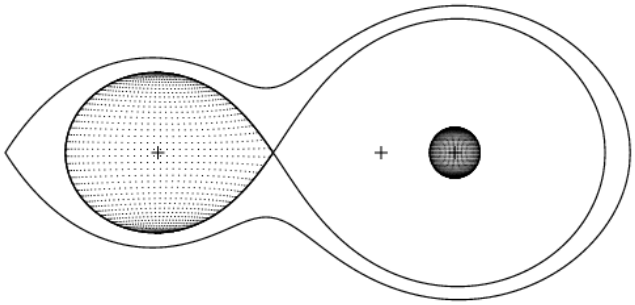
[1]) Použili jsme termín *těsná dvojhvězda* – upřesněme ho: je to dvojhvězda, kde složky jsou natolik blízko u sebe, že mají gravitací deformovaný tvar, a jak uvidíme z dalšího, mohou si dokonce navzájem vyměňovat látku.
[2]) Čti: *džona króforda* a *freda hojla.*
[3]) Čti: *rošeův*.

Jakmile hmotnější složka vyplní Rocheův lalok, začne její hvězdný materiál prýštit směrem ke druhé, vývojově opožděné složce. Přetékání látky je intenzivní a rychlé – na druhou složku přeteče až 80 procent její hmoty. V tu dobu se druhá složka, byť je teprve hvězdou hlavní posloupnosti, stává složkou hmotnější. A právě v tomto stadiu jsme zastihli soustavu Algolu.

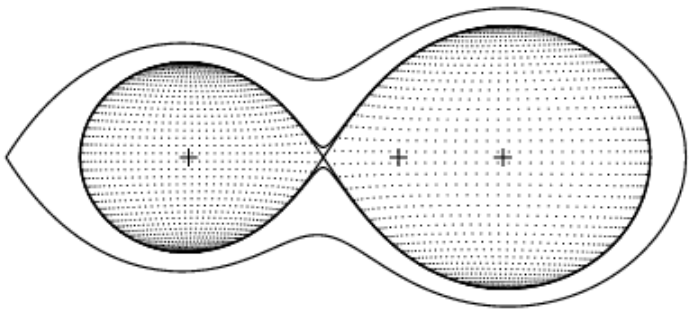
Dodejme, že příběh má pokračování, a to zcela ve stylu přísloví „lehce nabyl, lehce pozbyl“: když původně méně hmotná hvězda dostane velký příděl materiálu od své družky, urychlí se její vývoj a za čas i ona se začne rozpínat. Jakmile vyplní svůj Rocheův lalok, část hvězdné látky se opět začne navracet k původnímu majiteli.



Model proměnné hvězdy KP Aql, která tvoří tzv. *oddělenou soustavu*: obě hvězdy se nacházejí uvnitř Rocheova laloku. →



Model proměnné hvězdy AD Her, která tvoří tzv. *polodotykovou soustavu*: jedna hvězda zcela vyplňuje Rocheův lalok, druhá nikoli. Takto vypadá kupř. Algol. ←



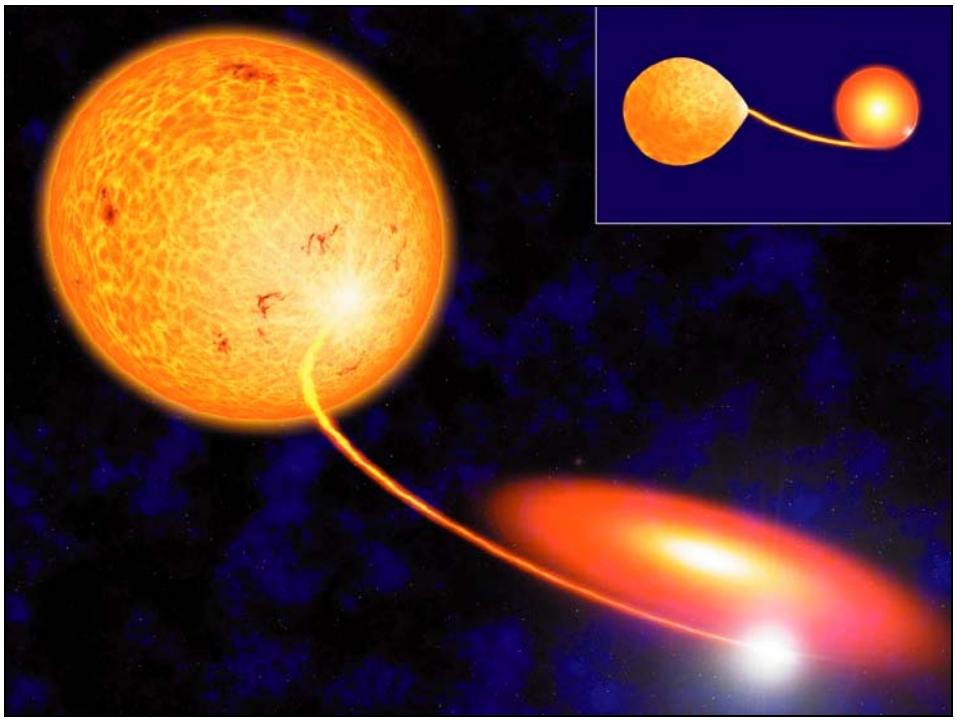
Model proměnné hvězdy BX And, která tvoří tzv. *dotykovou soustavu*: obě hvězdy zcela vyplňují své Rocheovy laloky. →

**Za vším hledej dvojhvězdu**

Domněnka o výměně látky mezi složkami těsných dvojhvězd, která zprvu příliš mnoho zastánců mezi astronomy nenalezla, se potvrdila a původně odmítavý postoj řady astronomů se rychle změnil. Ukázalo se, že s přetékáním látky souvisí neobyčejně mnoho rozmanitých jevů.

Zajímavý je už samotný přenos materiálu. Plynná látka proudí z jedné hvězdy na druhou poměrně malou oblastí ve tvaru úzkého svazku, který se poněkud zakřivuje a buď dopadá přímo na povrch hvězdy-příjemce, nebo ji obtáčí a vytváří rotující zploštělý plynný disk. Obíhající plyn postupně zaplňuje rozsáhlé oblasti podél rovníku hvězdy-příjemce, a teprve pomalé brzdění plynných částic vířivými pohyby, srážkami nebo magnetickým polem umožní, aby část tohoto plynného materiálu usedla na povrch hvězdy.

Veliký diskovitý útvar, který se vytvořil kolem hvězdy, nazývají astronomové *akrečním diskem*. V něm jsou zajímavá především ta místa, kde do akrečního disku naráží proud čerstvého materiálu z hvězdy-dárce; materiál se zde vlivem srážek silně ohřívá, vzniká *horká skvrna* [4]).



Modelová představa těsné dvojhvězdy, kde jedna složka již zcela vyplňuje Rocheův lalok a látky z ní přetéká do akrečního disku, který se vytvořil kolem druhé složky dvojhvězdy. V něm sledujeme také horkou skvrnu (na obrázku je pohled v perspektivě, nahoře vpravo pak pohled shora).

### Těsnými dvojhvězdami jsou i novy

*Novami* nazýváme hvězdy, které náhle (během několika dní) zvětší svou jasnost o 10 magnitud i více, a pak pozvolna (typicky během 40 dní) jejich jasnost klesá k původní hodnotě.

V roce 1963 americký astronom Robert Kraft zjistil, že novy jsou zvláštním typem těsných dvojhvězd, kde kompaktní, zhroucenou složku tvoří bílý trpaslík. Na bílého trpaslíka přetéká vodík z druhé hvězdy a ukládá se tam pomalým tempem. Tak se za pár desítek tisíc let vytvoří tlustá slupka, která přiléhá k původnímu bílému trpaslíku. Ve vodíkovém plynu vzrůstá tlak i teplota, až v jis-

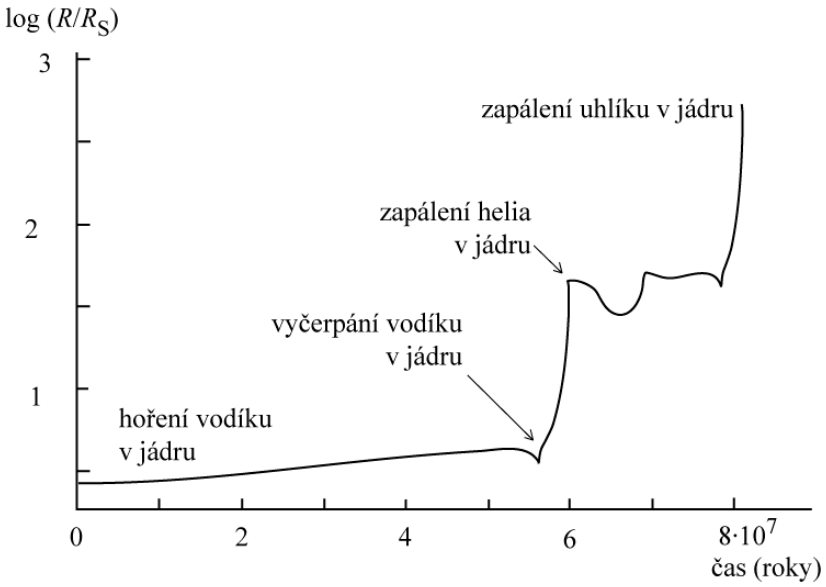
[4]) Americký astronom českého původu Mirek Plavec, jeden z těch, kteří jako první v 60. letech dvacátého století přijali a rozvíjeli Crawfordovu myšlenku „požírajících se psů“, si poněkud upravil slavné francouzské přísloví „cherchez la femme“ (za vším hledej ženu). Když radí studentům, jak by mohli vysvětlit chování nějakého pozoruhodného hvězdného objektu, jednoduše říká: „Za vším hledejte dvojhvězdu.“

tém okamžiku prudce vzplane termonukleární reakce. Dochází k výbuchu, celá slupka se rozmetá do okolního prostoru – a my pozorujeme novu.

Vlastní těleso bílého trpaslíka se však touto explozí nijak nepoškodí a po odeznění celé epizody se znovu začne na jeho povrchu ukládat vodík, který sem neustále dodává sousední hvězda. Vše se tak po čase zopakuje…

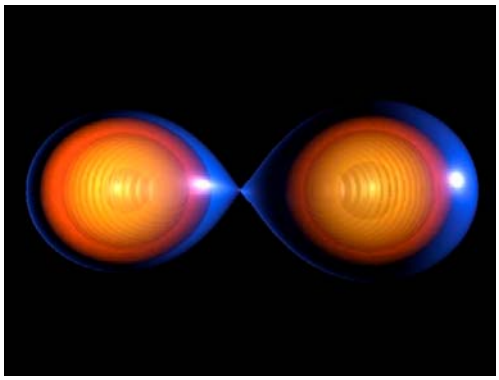
V některých případech není ani nutné, aby bílý trpaslík získával vodíkový plášť přímým přetokem hmoty. Když je totiž jeho průvodcem obří červená hvězda, ztrácí podstatně víc látky hvězdným větrem. Část tohoto větru je lapena gravitací bílého trpaslíka a dopadá na něj. To vede k mnoha bouřlivým dějům, jež jsou vděčným námětem pro pozorování. Astronomové tyto neobvyklé objekty souhrnně nazývají *symbiotickými proměnnými hvězdami.*

Do seznamu objektů, které jsou těsnými dvojhvězdami a kde mezi hvězdami dochází k výměně látky, patří také mnohé další objekty. Crawfordova myšlenka se ukázala jako velmi podnětná.




Změny velikosti hvězdy o hmotnosti 5 hmotností Slunce: během hvězdného vývoje dochází několikrát k pomalému, ale i rychlému nárůstu velikosti hvězdy. Právě v těchto fázích může hvězda, je-li součástí těsné dvojhvězdy, zcela vyplnit svůj Rocheův lalok a její materiál počne přetékat na sousední hvězdu.

# 6. Ze života hvězd



*Kvalita práce se měří velikostí překvapení.*

Lewis Thomas, lékař a esejista (1913 – 1993)

## otázky a příklady

**Otázka 6.6.1.** Je možné, aby u dvou izolovaných hvězd se zcela stejnými hmotnostmi a chemickým složením trvalo období hoření vodíku v jádru podstatně různou dobu? a) ano – záleží přece též na jejich rotaci; b) ne – hmotnost jako rozhodující parametr je stejná; c) ano – záleží též na tom, ve které části Galaxie hvězdy vznikly.

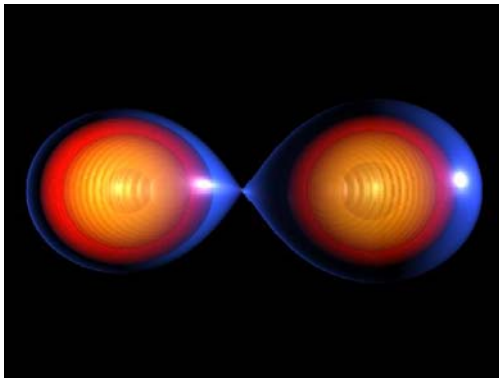
**Otázka 6.6.2.** U těsné dvojhvězdy došlo v důsledku přenosu látky z jedné složky na druhou k přiblížení složek, přičemž moment hybnosti systému zůstal zachován. Projevilo se to: a) zkrácením doby oběhu složek kolem středu hmotnosti; b) zčervenáním světla dvojhvězdy; c) zpomalením vývoje obou složek; d) prudkým zapálením helia.

**Otázka 6.6.3.** Zvýší-li se jasnost novy o 15 magnitud (i takové případy byly pozorovány), odpovídá to zvýšení zářivého výkonu a) milionkrát; b) tisíckrát; c) 15krát.

**Otázka 6.6.4.** Které z uvedených hodnot fyzikálních veličin jsou pro bílého trpaslíka typické? a) střední hustota látky 1000 kg $m^{-3}$; b) povrchová teplota 15 000 K; c) průměr řádově $10^4$ km; d) hmotnost 5krát větší než sluneční.

**Otázka 6.6.5.** Zopakujme si, v čem spočívá vývojový paradox u těsných dvojhvězd. Jistě bez problémů vyberete správnou odpověď. a) Složky těsné dvojhvězdy nejsou stejně staré. b) Složky dvojhvězdy se vyvíjejí zcela nezávisle na svých hmotnostech; c) Méně hmotná složka dvojhvězdy je vývojově dále než složka hmotnější.

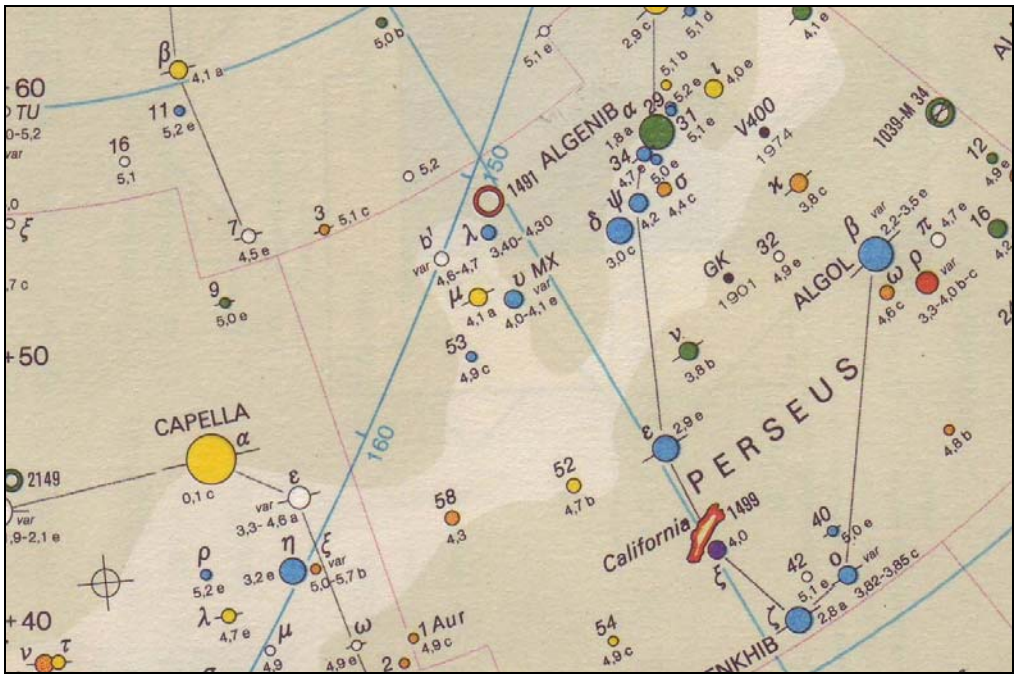
**Otázka 6.6.6.** Výměna látky v těsných dvojhvězdách může mít za následek (uveďte *všechny* možnosti, které přicházejí v úvahu): a) výbuch novy, je-li jednou složkou dvojhvězdy bílý trpaslík; b) rentgenové záření z akrečního disku; c) změny vývojových stadií jednotlivých složek dvojhvězdy.



čítanka

# John Goodricke: Výklad proměnnosti Algolu

Nedávná pozorování poukazují na pravidelné a periodické změny v jasnosti hvězdy Algol, neboli β Persei, což je jev, soudím, až do dneška nezaznamenaný. Poprvé jsem spatřil, jak se mění 12. listopadu 1782 mezi 8. a 9. hodinou noční, kdy se Algol jevil jako hvězda 4. velikosti. Následující noc však byl 2. velikosti, což je jeho obvyklá jasnost. Dne 28. prosince jsem si povšimnul, že se opět mění; o půl páté večer byl asi 4. velikosti, jako tehdy 12. listopadu, ale v půl osmé jsem byl překvapen, když rychle zvyšoval jasnost až ke 2. velikosti.




(Výřez z mapy atlasu O. Hlad a kol.: *Hvězdná obloha 2000.0*, 1988)

Ze všech jednotlivých pozorování vyplývá zaprvé, že tato hvězda se mění ze 2. do 4. velikosti během tří a půl hodiny, a potom za stejný čas se zjasní na hvězdu 2. velikosti. Zadruhé – tyto změny se pravděpodobně opakují každé 2 dny a 21 hodin.

Zdalipak je tento úkaz stále stejný, nebo se projevuje jen po několik málo roků a pak zcela přestane? Zdali se opakuje ve stejné periodě či jinak? Je to nepochybně podivný objekt, který může být prozkoumán zajisté jen četným pozorováním, mnoho let trvajícím. Kdyby nebylo příliš předčasné dohadovat se o příčinách těchto změn jasnosti, myslel bych, že je stěží lze vysvětlit jinak než periodickým zakrýváním Algolu tmavým tělesem, jež kolem něho obíhá. Nebo nějakým vlastním pohybem, při němž část jeho povrchu, pokrytá skvrnami nebo něčím podobným, se periodicky přivrací k Zemi.

Z časopisu *Philosophical Transactions*, 1783 (kráceno). Přeložil Zdeněk Pokorný.

# 6.7. Konečný osud hvězd

O tom, jak proběhne závěrečná fáze hvězdného vývoje, rozhoduje do značné míry hmotnost hvězdy v době, kdy je obrem nebo veleobrem. Hvězdy s nevelkou hmotností (asi do 5 až 8 hmotností Slunce, tato mez ale není nijak ostře definovaná) ztratí hvězdným větrem celý svůj řídký obal a odhalí své hutné jádro, tvořené převážně uhlíkem a kyslíkem. Obálka se rozpíná rychlostí řádově kilometry za sekundu. Je velmi řídká – mnohem řidší než vzduch. Na astronomicky krátkou dobu (10 000 až 50 000 let) se z ní vytvoří *planetární mlhovina* [1]).

Žhavá hvězda uprostřed není hmotnější než 1,4 hmotnosti Slunce. Postupně chladne, jaderné reakce v ní už neprobíhají. Je to *bílý trpaslík*, který se za mnoho miliard let promění v trpaslíka černého, již nezářícího. Takto skončí největší počet hvězd.

Jedna z nejmladších planetárních mlhovin, označená Hen 1357. Planetární mlhoviny mají často velice zvláštní tvary.

[1]) Prapodivný název *planetární mlhovina* zasluhuje vysvětlení. Je to – jak jinak – historický omyl, tentokrát Williama Herschela. Když v březnu 1781 objevil planetu Uran, jevila se mu v dalekohledu jako modrozelený kotouček. Záhy poté našel další podobné objekty; ty se však na hvězdné obloze nepohybovaly. Herschel správně usoudil, že nemůže jít o planety, ale o zvláštní třídu mlhovin, a přisoudil jim dnes tak zavádějící název planetární mlhoviny.

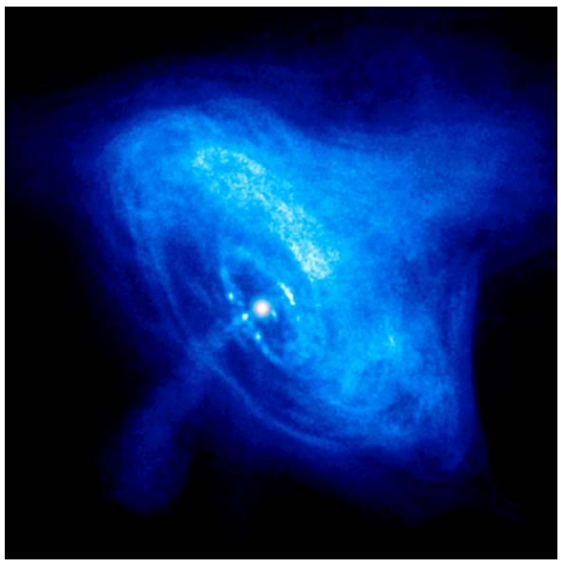
### Hvězdný ohňostroj

Hvězdy, jejichž počáteční hmotnosti převyšovaly 8 slunečních hmotností, čeká na konci jejich vývoje dramatický osud: v průběhu sekund vzplanou, přičemž na čas zvýší svůj zářivý výkon natolik, že jej můžeme docela názorně porovnat s výkonem celé Galaxie. Hvězda se stane *supernovou*.

Zbytek po výbuchu supernovy v souhvězdí Labutě před asi 15 000 lety.

Vzplanutí supernovy bezprostředně předchází překotný jaderný vývoj v nitru hvězdy. Jeho následkem jádro ztratí mechanickou stabilitu a začne se prudce stlačovat. Centrální oblasti hvězdy se zhroutí v miniaturní *neutronovou hvězdu.* Přitom se uvolní obrovská energie, která rozmetá zbytek hvězdy. Při některých výbuších supernovy se může vybuchující hvězda zcela rozplynout do okolního prostoru.

Do mezihvězdného prostoru se rozletí značné množství materiálu, obohaceného jadernými reakcemi ve hvězdě o těžší prvky. Navíc proudy energetických částic (např. neutronů), které doprovázejí tento výbuch, promění část původního hvězdného materiálu tak, že vzniknou i prvky těžší než železo, které při jaderných reakcích ve hvězdách vzniknout nemohou.



Neutronová hvězda (pulsar) v Krabí mlhovině, která je pozůstatkem po výbuchu supernovy v roce 1054. Foto: HST a družice Chandra.

Jakmile se hvězdný obal rozptýlí, můžeme poprvé zaregistrovat neutronovou hvězdu. Ta se obvykle projeví jako *pulsar* – zdroj záření zejména v rádiovém oboru spektra, který se vyznačuje krátkými, ale přísně periodickými impulsy.

Neutronové hvězdy jsou opravdu pozoruhodnými objekty ve vesmíru: i když jde o tělesa o poloměru pouhých 10 kilometrů, dosahují až dvou hmotností slunečních. Je proto jasné, že hustoty v těchto tělesech jsou fantasticky vysoké: $10^{17}$ až $10^{19}$ kg $m^{-3}$. Za takových hustot jsou elektrony vtlačeny do atomových jader, protony se s elektrony spojují a vytvářejí plyn z neutronů.

**Historické supernovy**

Jasných supernov, které by byly vidět pouhým zrakem, mnoho není. Za poslední dvě tisíciletí jich napočítáme jen šest. V roce 383 vzplála supernova ve Štíru. Vůbec nejjasnější byla supernova z roku 1006 ze souhvězdí Vlka. Pak následovala slavná supernova z roku 1054, po níž zbyla Krabí mlhovina s pulsarem uprostřed. Nakonec se v rychlém sledu zjevily na nebi dvě supernovy: v roce 1572 tzv. Tychonova supernova v souhvězdí Kasiopeje, a konečně roku 1604 Keplerova supernova v Hadonoši.

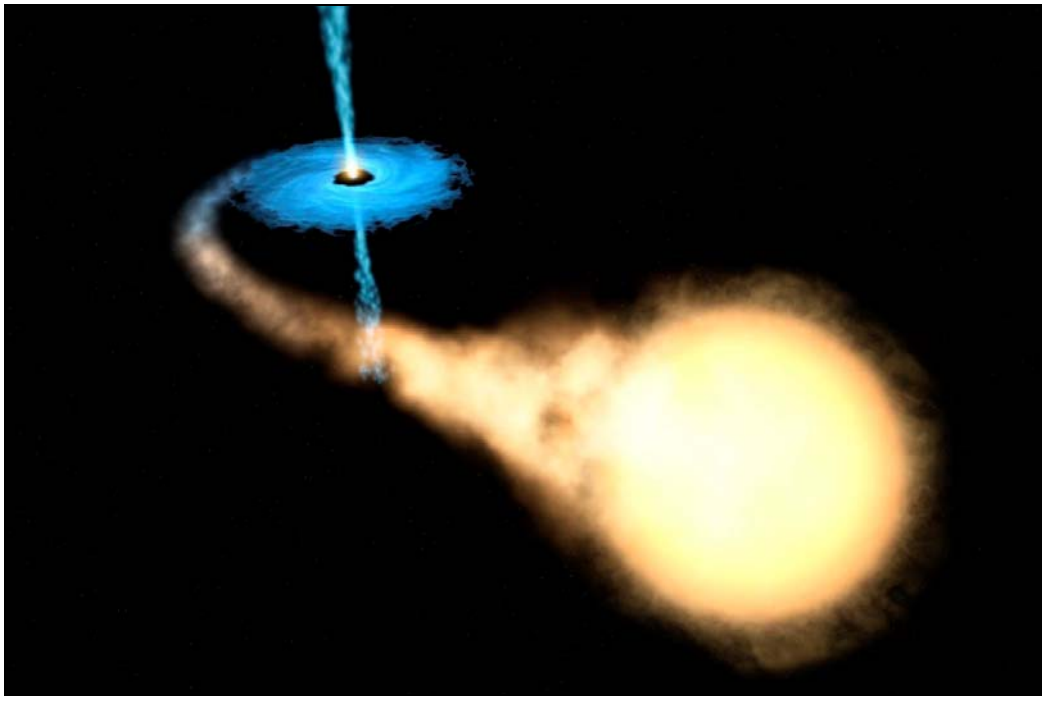
Dne 24. února 1987 vzplála ve Velkém Magellanově oblaku supernova, která v maximu své jasnosti dosáhla čtvrté velikosti. Po 383 letech tu opět byla příležitost vidět supernovu pouhýma očima, i když nešlo o výbuch supernovy přímo v naší Galaxii.

Supernova z února 1987, která vzplála ve Velkém Magellanově oblaku (vpravo je snímek téže oblasti před výbuchem). Foto: Anglo-Australian Observatory.

Zbývá jen odpovědět na všetečnou otázku: kdy vybuchne další supernova, kterou uvidíme pouhýma očima? Podle všech statistik již nyní čekáme déle, než činí střední doba mezi dvěma takovými úkazy. Tak se tedy zvědavě rozhlížejme po nočním nebi: není vidět nějaká jasná hvězda, která tam včera ještě nebyla?

### Konec v černé díře

Hmotnost neutronových hvězd nemůže převýšit jistou hraniční mez, rovnající se dvoj- až trojnásobku hmotnosti Slunce. Pokud hroutící se hvězda bude mít hmotnost vyšší (a neznáme důvody, proč by nemohla mít), nedospěje se stlačováním do rovnovážného stavu. Hvězda se zhroutí až do jediného bodu. Její neomezené hroucení nazýváme *gravitačním kolapsem* a objekt, který při něm vznikne, je *černou dírou*. Gravitační síla na povrchu černé díry a uvnitř ní je natolik velká, že nedovolí žádnému hmotnému tělesu – tedy ani fotonům – uniknout směrem od hvězdy.



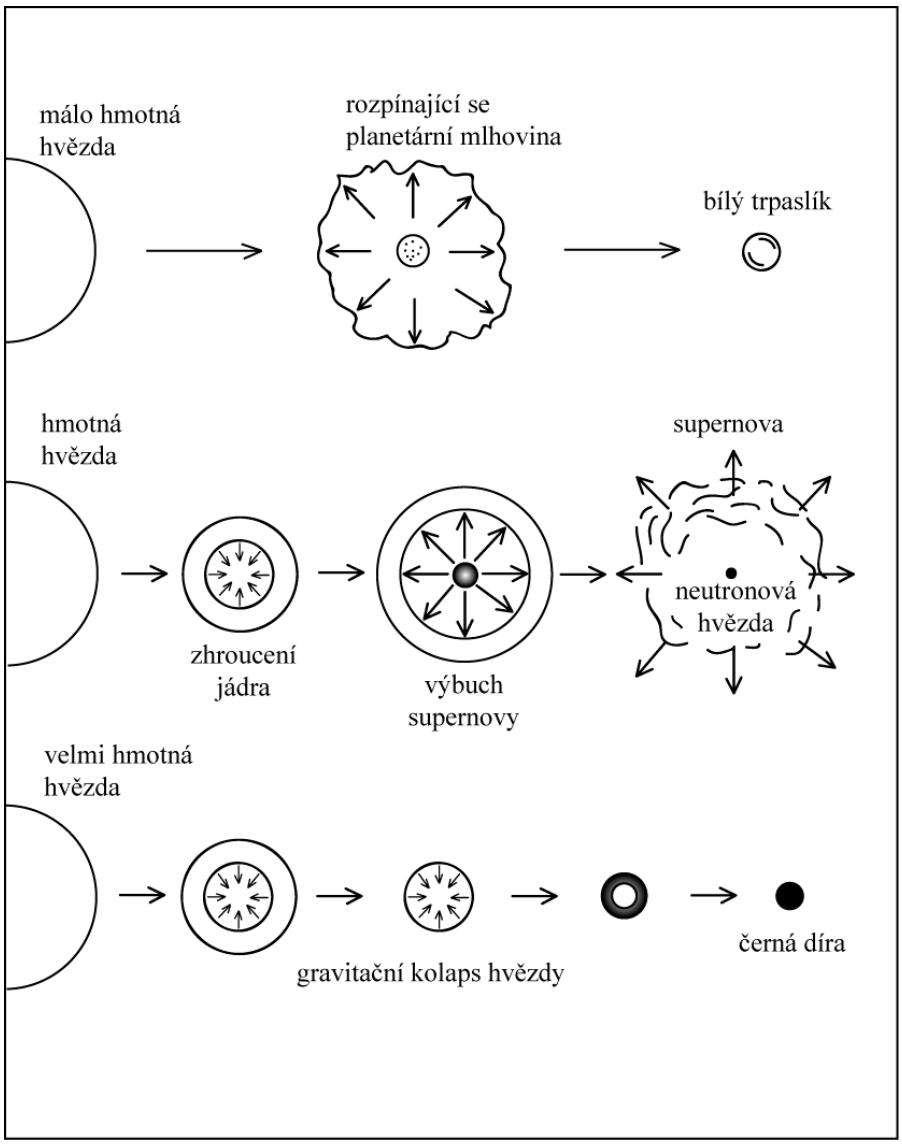
Protože z černé díry nemůže uniknout žádný foton ani jiné částice, je znázornění černé díry obtížné. Vezměte za vděk touto představou těsné dvojhvězdy, kde kolem zhroucené hvězdy, jež se stává černou dírou, se vytvořil akreční disk. Část látky z disku je namísto pádu do černé díry vyvržena ze soustavy.

### Je načase rekapitulovat

Pokusme se shrnout do několika vět, co plyne ze studia vývoje hvězd. Především – je to děj *nevratný*. Ze zhroucených zbytků hvězd se již nové hvězdy nezrodí. Tím ale není řečeno, že by i dost podstatná *část* látky, náležející v minulosti nějaké hvězdě, nemohla být stavebním materiálem pro některou jinou, nově vznikající hvězdu – vždyť existuje hvězdný vítr, vybuchují supernovy...

Vývoj hvězd, které si nevyměňují látku se svým okolím, je určen změnami jejich chemického složení, k nimž dochází v důsledku jaderných reakcí. Ty jsou tedy hlavním zdrojem energie hvězdy, ale i příčinou jejího vývoje.

Zajímavý a důležitý detail: tvrdíme-li, že termonukleární reakce jsou hlavní příčinou vývoje hvězdy, pak si ještě jednou uvědomme důležitou skutečnost: kde tyto reakce probíhají? V samém nitru hvězdy. Proto *stav jádra* určuje nejen zářivý výkon hvězdy, ale také její celkovou stavbu a vývoj.




Jak končí hvězdy – jako bílí trpaslíci, neutronové hvězdy nebo černé díry.

čítanka

# Zdeněk Horský: O Keplerově supernově

Jedenáctého října (čili podle starého počtu 1. října) 1604 ráno přiběhl ke Keplerovi do pražské univerzitní koleje, kde Kepler přebýval i se svou rodinou, Jan Brunovský s novým velkým objevem, jenž se mu podařil v předchozí noci. O tomto českém učenci Brunovském toho víme velmi málo – vlastně všecko, co známe, pochází právě od Keplera. Brunovský byl zaměstnán u císařského vicekancléře Korraducia jako „meteoroscopus“, jako pozorovatel jevů v povětří. Kromě toho nemusel dělat nic jiného, ale jak poznamenává Kepler, svou funkci zastával velmi poctivě a pečlivě. Dobře znal souhvězdí. V tom umění se prý vycvičil jednak u námořníků na Středozemním moři, jednak vlastním studiem knih.

Keplerovi tehdy 11. října oznámil, že předešlé noci spatřil v souhvězdí Hadonoše novou a zcela nezvyklou hvězdu. Avšak v řadě následujících dní ji s Keplerem nemohli pozorovat pro trvale zatažené nebe. Skoro celý týden byli bez úspěchu. Kepler ji poprvé spatřil až v noci z 16. na 17. říjen. Při pozorování mu asistovali Brunovský a tehdejší Keplerův pomocník Schüler.

Tato nova vešla do dějin astronomie jako nova Keplerova, podobně jako předchozí, v astronomii ještě slavnější nova (či podle dnešní astronomické terminologie supernova) v souhvězdí Kasiopeje z roku 1572 je známa pod jménem Tychonovým. (Stejně i nova v Hadonoši z roku 1604 byla supernova.) Kdyby platily dnešní zvyklosti a stejně, jako je tomu u komet, by nová hvězda byla nazvána jménem objevitele, musela by nova v Hadonoši nést jméno Jana Brunovského, jehož prvenství Kepler sám dokázal srovnáním s údaji ostatních evropských astronomů.

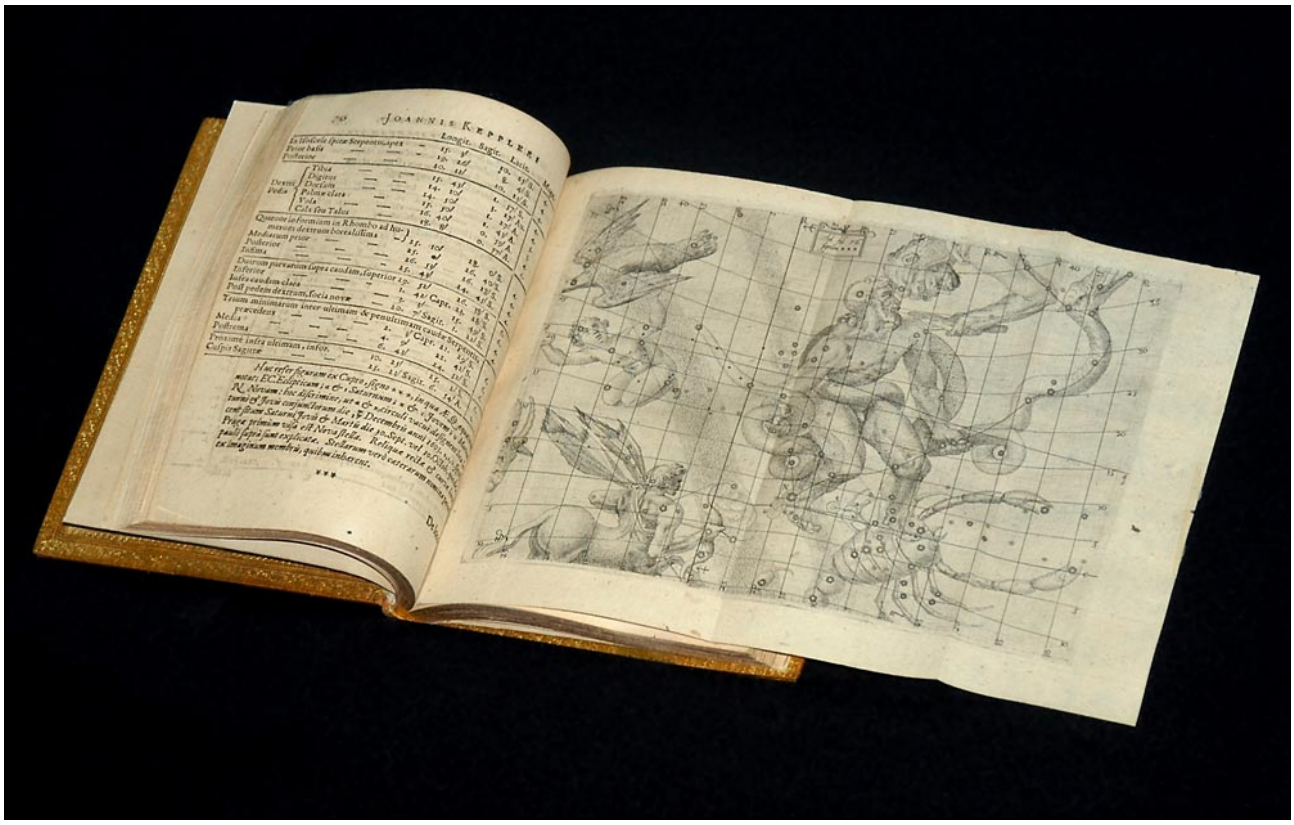
I přes to, že nebyla tak mimořádně nápadná jako supernova v Kasiopeji, si nové hvězdy v Hadonoši povšimlo dost hvězdářů. Zejména proto, že se rozzářila zcela blízko toho místa oblohy, kde právě několik měsíců předtím došlo ke konjunkci Saturnu s Jupiterem a nyní mezi obě už od sebe poněkud vzdálené planety vstoupil Mars. Proto se sem obracela pozornost mnohých.

Každopádně byla příroda k astronomům mimořádně štědrá, když tak vzácně jevy, jako jsou pouhým okem nápadně pozorovatelné supernovy, prozíravě zařadila právě do doby, která horlivě přetřásala základní otázky o stavbě vesmíru. Příroda tehdy řekla své slovo v této diskusi právě včas. Po supernově v Kasiopeji nastala mezi nejlepšími astronomy téměř jakási malá honička na nové hvězdy. V důsledku toho si David Fabricius v roce 1596 povšiml i hvězdy třetí velikosti v souhvězdí Velryby, kterou o dva měsíce později už nenalezl. Roku 1609 náhodou pozoroval tutéž oblast podrobněji – a hvězda byla na svém místě! Tak byla

v Evropě objevena první proměnná hvězda, která dostala přiléhavý název Mira – „Podivuhodná“. I Kepler sám už v roce 1600 nalezl „falešnou“ novu v souhvězdí Labutě, která dnes pod označením P Cygni dala v astronomii jméno celé kategorii zvláštních hvězd, některými vlastnostmi značně podobnými novám. Spisek o domnělé nové hvězdě v Labuti sepsal Kepler roku 1602, ale vydal jej spolu s pojednáním o nově v Hadonoši, které vyšlo v Praze až roku 1606.

Kepler zřejmě vyčkal, až získá od ostatních hvězdářů další přesná pozorování, aby mohl udělat shrnující závěr. O hvězdě v Hadonoši potvrdil to, k čemu se dopracovalo deset nejlepších evropských astronomů při supernově v Kasiopeji: nová hvězda je ve větší vzdálenosti od Země než Měsíc a podle celkového charakteru je třeba ji počítat mezi „stálice“. Z hlediska Aristotelových představ o vesmíru patří do takzvané supralunární sféry, tam, kde podle Aristotela měl být věčně neproměnný éter, v němž je vyloučeno všechno vznikání a zanikání. Protože nová hvězda nepopiratelně dokazuje vznikání a zanikání, je aristotelská představa vyvrácena.

Výňatek z knihy *Kepler v Praze* (Mladá fronta, Praha 1980).



# 6. Ze života hvězd

*Existují věci mezi nebem a zemí, které nejsou schopni poznat nejen naši filozofové, ale ani nejprostší hlupák.*

Heinrich Heine, básník (1797 – 1856)

## otázky a příklady

**Otázka 6.7.1.** Planetárních mlhovin známe v současné době něco přes tisíc, ale odhaduje se, že v Galaxii jsou jich řádově desítky tisíc. Nicméně: proč je jich tak málo, když většina hvězd projde touto vývojovou fází?

**Otázka 6.7.2.** Bílých trpaslíků známe řádově tisíce. Tušíme, že tak malý počet je zřejmě výběrovým efektem, ale osvětleme si to trochu. Bílí trpaslíci mají v průměru o 4 řády menší zářivý výkon než hvězdy hlavní posloupnosti se stejnou povrchovou teplotou. Odhadněte, kolikrát více vidíme bílých hvězd hlavní posloupnosti než bílých trpaslíků, jestliže předpokládáme, že *skutečný* počet obou druhů hvězd je řádově stejný.

**Otázka 6.7.3.** Při výběru následující odpovědi se nespoléhejte jen na svůj „cit pro čísla“ (tedy odhad), ale snažte se podložit svůj výběr jednoduchým výpočtem. Tedy: představte si, že ve vzdálenosti 100 pc od Země vybuchla supernova, jejíž absolutní hvězdnou velikost odhadujeme na –18 mag. Supernova by na naší obloze byla: a) jasnější než Slunce; b) asi stejně jasná jako Vega; c) poněkud jasnější než Měsíc v úplňku.

**Otázka 6.7.4.** Jedno z tvrzení, které nyní uvedeme, *není* správné. Jistě snadno poznáte, které to je. a) Hmotné hvězdy musely vzniknout teprve nedávno. b) Čím je hmotnost hvězdy větší, tím kratší dobu setrvá na hlavní posloupnosti. c) Zářivý výkon většiny hvězd roste přímo úměrně s její hmotností.

**Otázka 6.7.5.** Která z následujících skupin pojmů je napsána tak, že současně představuje vývojovou posloupnost? a) hvězda hlavní posloupnosti, bílý trpaslík, obr; b) hvězda hlavní posloupnosti, veleobr, supernova; c) bílý trpaslík, supernova, černá díra.

**Otázka 6.7.6.** Ve kterém vývojovém stadiu je hvězda podobná Slunci, jež nepatří do žádné hvězdné soustavy (jde tedy o izolovanou hvězdu), *nejméně* hmotná? a) v době, kdy se utváří z mezihvězdného oblaku; b) když je na hlavní posloupnosti; c) ve stadiu červeného obra; d) v období existence jako bílý trpaslík.

**Otázka 6.7.7.** Jaké by bylo chemické složení vesmíru, kdyby prvky vznikaly pouze při termonukleárních reakcích v nitrech hvězd, a ne např. též při výbuších supernov?

**Otázka 6.7.8.** Hvězda hlavní posloupnosti o hmotnosti přibližně 5 hmotností Slunce se pravděpodobně promění v bílého trpaslíka o hmotnosti, jakou má nyní Slunce. Co se stane s látkou 4 hmotností Slunce? Nebo tato hvězda vybuchne jako supernova a bílým trpaslíkem se vůbec nestane?

**Otázka 6.7.9.** Proč se rychlost, jíž je vyvržen hvězdný materiál ze supernovy, s časem postupně snižuje, když exploze probíhá prakticky ve vzduchoprázdnu? (Tento jev lze na základě Dopplerova jevu poměrně přesně sledovat.)

**Otázka 6.7.10.** Mění se s časem perioda rotace pulsarů, a když ano, jak?

**Otázka 6.7.11.** Kterou z následujících vlastností neutronové hvězdy *nemají*? a) pomalu rotují; b) jsou jen řádově kilometry velké; c) mají silné magnetické pole; d) některé jsou pozorovatelné jako pulsary.

**Otázka 6.7.12.** Co by se stalo s oběhem Země kolem Slunce, kdyby se náhle Slunce zaměnilo za černou díru o hmotnosti stejné, jako má nyní naše Slunce? a) rozměr zemské trajektorie by rychle vzrostl; b) Země by se po spirále zřítila na černou díru; c) Země by skokem přešla na menší trajektorii; d) nestalo by se nic – zemská trajektorie by zůstala stejná.

**Otázka 6.7.13.** Explozivní hoření vodíku na povrchu bílého trpaslíka vyvolává úkaz nazvaný: a) nova; b) pulsar; c) supernova.

**Otázka 6.7.14.** Novy, supernovy – jsou to slova podobně znějící, ale označují různé kosmické objekty. Jaké jsou základní rozdíly mezi novami a supernovami, příp. co je činí podobnými?

**Otázka 6.7.15.** Rádiové impulsy pulsarů se svým tvarem navzájem značně liší, takže jejich intenzita není v pravém slova smyslu periodickou funkcí času. Přesto však astronomové měří periody pulsarů s velmi vysokou přesností. Jak to dělají, je to vůbec reálné?

**Otázka 6.7.16.** Pro posouzení, jak rychle se bude hvězda vyvíjet, je nejdůležitějším údajem: a) chemické složení hvězdy; b) úhlová rychlost rotace hvězdy; c) hmotnost hvězdy.

**Otázka 6.7.17.** Které z těchto tvrzení je pravdivé? a) U hvězd na konci vývoje se nejvíce těžších prvků soustřeďuje do vrstvy těsně pod fotosférou. b) Všechny hvězdy na konci svého vývoje jsou tvořeny převážně železem. c) Chemické složení vrstvy u povrchu hvězdy není jadernými reakcemi nijak dotčeno.

**Otázka 6.7.18.** Proč jsou prvky těžší než železo ve vesmíru tak vzácné ve srovnání s prvky, které jsou lehčí než železo?

**Otázka 6.7.19.** Při zmínce o supernovách si připomeňme některé z těch, které byly pozorovatelné pouhýma očima. Jedna z nich vzplanula v roce 1885 v galaxii v Andromedě. Galaxie je od nás 600 000 pc daleko, tedy přibližně stokrát dál než jiná supernova – pověstná Keplerova z roku 1604. Předpokládejme, že zářivé výkony obou supernov byly stejné. Jak jasná byla supernova z roku 1604, jestliže ta z roku 1885 byla na hranici viditelnosti pouhým zrakem? (Poznamenáváme, že veškeré potřebné výpočty lze provést zpaměti.)

**Otázka 6.7.20.** Hlavní posloupnost v HR diagramu je tvořena největším počtem všech známých hvězd. Nyní nám půjde o vysvětlení, proč je tato posloupnost hvězd tak početná. Je tomu tak proto, že: a) hlavní posloupnost představuje vývojovou cestu většiny hvězd (tedy hvězdy se přesouvají *podél* hlavní posloupnosti); b) hlavní posloupnost je geometrické místo bodů, ve kterých naprostá většina hvězd setrvává po většinu doby své existence. Která z naznačených možností je správná?

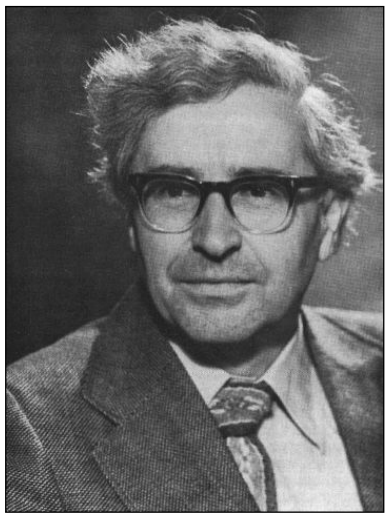
**Otázka 6.7.21.** Jak ve vesmíru vzniká zlato?

čítanka

# Zdeněk Pokorný: Objev na Nobelovu cenu

Radioteleskop v Cambridge – to představovalo 16 řad po 128 dipólových anténách. Dipóly byly zavěšeny na více než tisíci třímetrových dřevěných tyčí. Vše bylo propleteno téměř 200 kilometry drátů, kabelů a stíněných spojů. Bylo tam i 200 transformátorů, 350 konektorů a 24 tisíc izolátorů. To vše sloužilo k tomu, aby se u kvasarů (což jsou téměř bodové rádiové zdroje) prozkoumaly rychlé změny signálu, který astronomové nazývají scintilací. Takové mihotání – tedy scintilace – se projeví například při pozorování jasné hvězdy velmi nízko nad obzorem. Hvězdy blikají, někdy dokonce mění i své zabarvení, zatímco planety za stejných podmínek září docela klidným světlem. Jsou totiž malými kotoučky, a chvění vzduchu, které mihotání způsobuje, se v tomto případě tolik neprojevuje.

U hvězd je za scintilaci světla odpovědná zemská atmosféra, u rádiových zdrojů sluneční vítr. Nabité částice vyletující ze Slunce často vytvářejí velké shluky, šíří se tu rychleji, tu pomaleji, a tyto nehomogenity ovlivňují rádiové signály, přicházející k nám ze vzdálenějšího vesmíru.



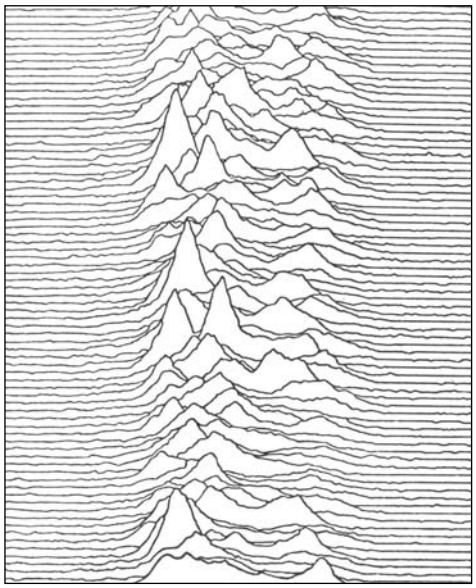
Pracovníci Mullardovy radioastronomické observatoře se v polovině roku 1967 připravovali na sledování kolísání signálu vzdálených bodových zdrojů. Pracovní tým observatoře vedl profesor Anthony Hewish 1). Soustředil kolem sebe několik mladých lidí, většinou čerstvých absolventů univerzity. Patřila mezi ně i tehdy čtyřiadvacetiletá Irka Jocelyn Bellová.

Zpočátku pomáhala se stavbou neobvyklého radioteleskopu, a pak – když bylo zařízení v červenci 1967 uvedeno do chodu – neúnavně zakládala do registračních přístrojů papírové pásky, popisovala je a prohlížela. Každý den 30 metrů záznamů…

Když Bellová vyhodnotila přes pět kilometrů papírových pásek, povšimla si té zvláštnosti: jeden ze zdrojů se projevoval naprosto pravidelnými impulsy, i když signál v každém pulsu měl různou úroveň. To už byl listopad 1967. Nejdříve bylo samozřejmě nutné vyloučit všechny možné pozemské příčiny: vysílačky, zapalování automobilového moto-

[1]) Čti: *hjúiš.*

ru, zapínání velkých spotřebičů… Zakrátko však bylo jasné, že jde o zdroj kosmický. Nalézá se v souhvězdí Lištičky (tehdy se mu říkalo „hvězda Bellové“, dnes je ale označován podle souřadnic CP 1919).



Překvapovalo však, že impulsy rádiového záření jsou vysílány s pravidelností, odpovídající přesnosti špičkových atomových hodin! Impuls za impulsem každou jednu celou, tři desetiny sekundy – zcela přesně: 1,3373011512 sekundy.

Anthony Hewish byl od počátku krajně opatrný. Především se o tom nikomu a nikde nezmiňujte, kladl všem účastníkům projektu na srdce. Mohla by to být obrovská blamáž. A skutečně – navenek neproniklo vůbec nic, ani mezi nejbližší spolupracovníky observatoře, ani do kongresových kuloárů. Ostatně, členové Hewishova týmu si několikaměsíční pozdržení publikace objevu klidně mohli dovolit – jejich zvláštní radioteleskop byl totiž v té době jediným přístrojem na světě, kterým bylo možné tyto signály zachytit.

Mezi členy týmu se počalo žertovat: jsou to přece *little green men* – mimozemšťánci, kteří k nám vysílají svá sdělení. To by byla úžasná potrava pro média, kdyby se zpráva pustila ven! Hewish se svými kolegy ovšem usilovně hledali zdroj těchto signálů. Hvězdy? Galaxie? Kde leží tento zdroj a jak je velký? A hlavně – co zaručuje tak fantastickou přesnost příchodů jednotlivých impulsů?

V únoru 1968, čtvrt roku po objevu prvního zdroje v souhvězdí Lištičky, byly známy tři další pulsující zdroje. Každý měl jinou periodu, ale jinak bylo jejich chování naprosto stejné.

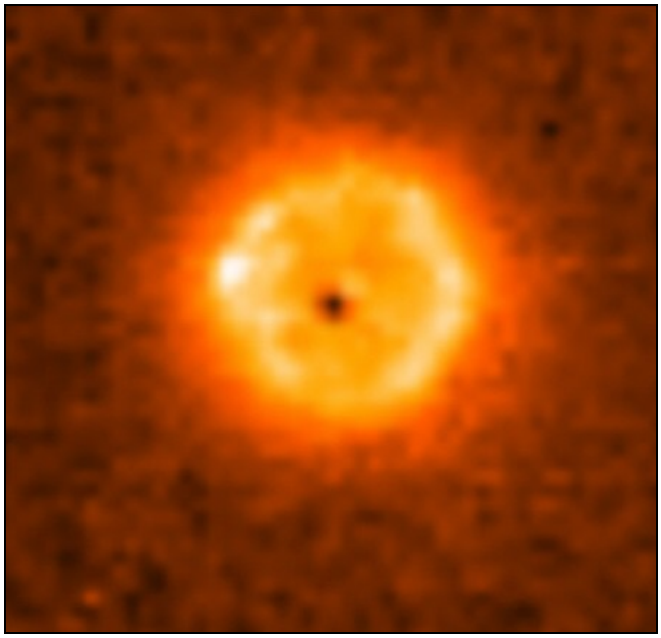
Koncem února, přesněji: dvacátého čtvrtého, vyšlo ve vědeckém časopisu *Nature* první sdělení Anthony Hewishe o těchto neobvyklých rádiových zdrojích. O čtyři dny dříve Hewish oznámil objev na pracovním semináři ve starých Cavendishových laboratořích v centru Cambridge. Tak se tedy odborníci i široká veřejnost dověděli o objevu pulsarů.

Z připravované knihy *Zlaté století astronomie* (Aventinum, Praha).

úloha k zamyšlení

# Rozpínající se obálka

V roce 1918 vzplanula v souhvězdí Orla jasná nova (když dosáhla své největší jasnosti, jen hvězdy Sirius a Canopus byly ještě jasnější). Ze snímků, pořízených v několika následujících letech, bylo zřejmé, že se úhlový průměr plynné obálky kolem Novy Aquilae 1918 (dnes označované jako proměnná hvězda V 603 Aql) zvětšoval o 2" ročně. Ze spektroskopických měření – na základě Dopplerova jevu – bylo zjištěno, že se obálka rozpíná rychlostí $v$ = 1700 km/s. Jak je od nás tato nova daleko?

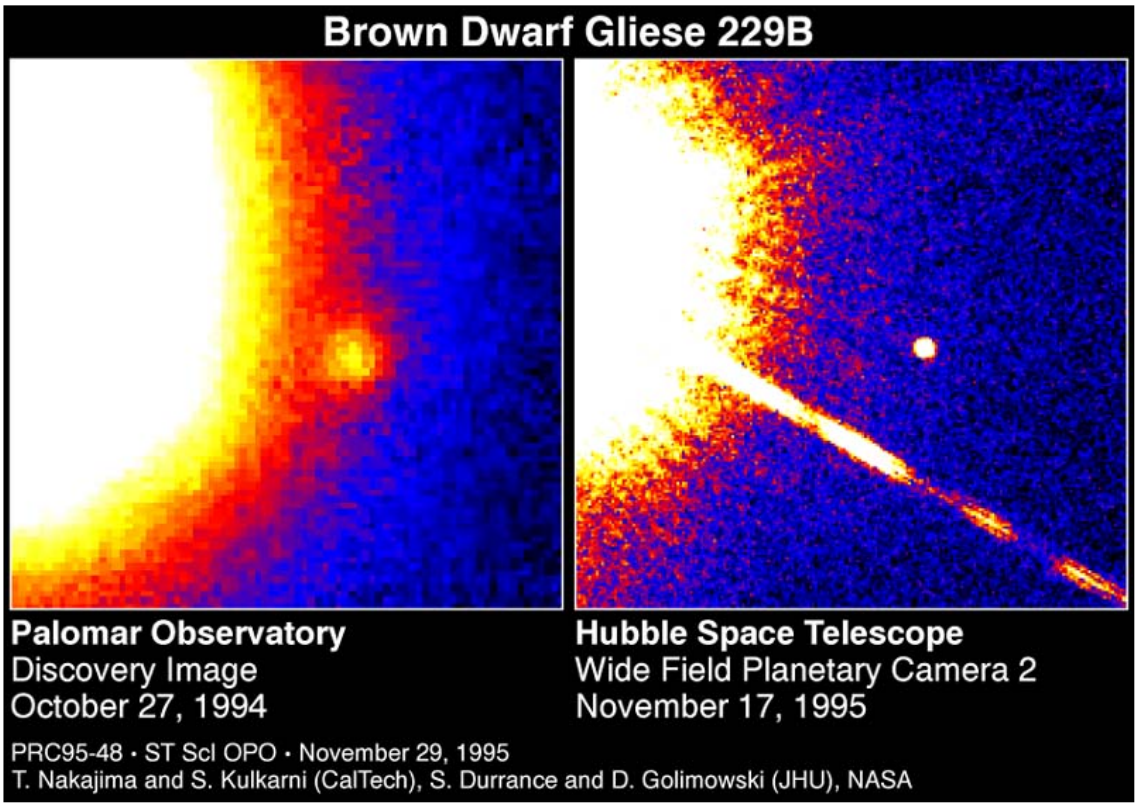


Obálka kolem novy QU Vul (foto: STScI).

čítanka

# Zdeněk Pokorný: Na scénu přichází hnědý trpaslík

Po těchto hvězdách se pátralo již dlouho – řeč bude o hnědých trpaslících. Připomeňme, že trpasličí hvězdy patří mezi běžný hvězdný inventář: existují bílí trpaslíci, červení, ti vychladlí se stanou trpaslíky černými. A co hnědí? Takto byla nazvána nová skupina hvězd, které jsou docela zvláštní. Mají nevelkou hmotnost – a vše další z toho vyplývá. Pokud jsou hvězdné zárodky, které se právě zformovaly z mezihvězd-



ného oblaku, hmotné přinejmenším jako 13 Jupiterů (mají tedy asi jednu setinu hmotnosti Slunce), ale na druhé straně nepobraly více látky než asi osm procent sluneční, probíhá jejich hvězdný vývoj poněkud „nestandardně“. Především – nejsou to už planety. Smršťují se, zahřívají a houstnou, a pak se v jejich nitru zapálí první termonukleární reakce; to u poněkud menších planet nikdy nenastává. Při těchto jaderných reakcích není ovšem palivem vodík, ale prvky s nižší „zápalnou“ teplotou, jako je lehké helium, lithium, berylium a bór.

Když se zásoby těchto prvků vypotřebují (a netrvá to dlouho, mnoho jich totiž není), nenastane to, co u běžných hvězd: vodík se už nezapálí, protože teplota v nitru na zažehnutí vodíkových reakcí nestačí, hvězda je málo hmotná a tudíž „chladná“ (uvozovky jsou tu namístě – teplota nepřesáhne pěti milionů stupňů Celsia, ale to je opravdu málo ve srovnání s běžnými hvězdami). Hvězda tak končí svůj vývoj, sotva jej začala, a pomalu chladne.

Takové hvězdy – říkejme jim už rovnou hnědí trpaslíci – jsou vpravdě nenápadní: mají nevelké rozměry, povrchová teplota určitě nepřevyšuje 2000 stupňů Celsia, září pramálo. Ale může jich být hodně. Jenže – kde jsou? Existují vůbec?

Dnes už můžeme dát kladnou odpověď, protože 27. října 1994 se podařilo prvního hnědého trpaslíka zaregistrovat. Pomocí jedenapůlmetrového reflektoru na Mount Palomaru v Kalifornii, který byl vybaven adaptivní optikou kompenzující chvění vzduchu, se podařilo zachytit průvodce hvězdy označené Gliese 229. Kolem této červené hvězdy v souhvězdí Zajíce, vzdálené 19 světelných let, obíhá průvodce Gliese 229B, který se ukázal být hnědým trpaslíkem. Jeho hmotnost leží v intervalu od 20 do 50 hmotností Jupiteru a povrchová teplota dosahuje 800 stupňů Celsia. Planetou tedy určitě není.

Následná pozorování Hubblova kosmického dalekohledu objev potvrdila, a zanedlouho do seznamu hnědých trpaslíků rychle přibývaly další záznamy. Hnědých trpaslíků je sice hodně, ale ne tolik, aby v sobě ukrývaly významnější část hmoty vesmíru.

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

čítanka

# Jiří Grygar, Vladimír Železný: Hvězdy dělají hlouposti

Černé díry byly oblíbeným astronomickým hitem šedesátých a sedmdesátých let 20. století. Ale nemyslete, nápad to není nijak zvlášť nový. Můžeme jej sledovat i několik staletí do historie. Pravda, bez toho dokonalého matematického a astrofyzikálního hávu, jaký má dnes.

Kde začít? Třeba v Praze někdy kolem roku 1900, kdy bychom mohli v šachové kavárně Continental na Příkopech potkat nedávno zkrachovalého bankéře Gustava Meyera. Muže břitké mysli, vzdělaného, talentovaného, zaníceného alchymistu a vyznavače věd esoterických a také začínajícího spisovatele. Právě na kavárenském stolku dopsal povídku zvanou Černá koule.

V povídce dva indičtí mágové a experimentátoři předvádějí senzacechtivé evropské smetánce pokusy se soustředěním energie do malého prostoru banky a se zviditelněním představ a snů. Pokus se zdánlivě nedaří. Zkusme nahlédnout nezpůsobně přes rameno a čtěme...

„...v bance se volně vznášela sametově černá koule velikosti jablka... Užaslý bráhman vzal baňku – v tom hle! Jak jí pohnul, dotkla se koule, vznášející se uvnitř, skleněné stěny. V témže okamžiku se sklo rozletělo na střepy, které jako přitaženy magnetem vletěly do koule a zmizely v ní beze stopy.

Sametově černé, kulaté těleso se nehybně vznášelo ve volném prostoru. Vlastně ta věc ani nevypadala jako koule: působila spíše dojmem zející *díry*. Bylo to cosi absolutního: matematické ‚nic'. Co se dálo potom, bylo jen nutným důsledkem ‚ničeho'. Všechno, co se ocitlo v blízkosti toho ‚ničeho', z přírodní nutnosti do něho padalo a okamžitě se v něm proměnilo rovněž v ‚nic', tedy zmizelo beze stopy.

A skutečně se najednou zvedl mocný proud vzduchu, který stále mohutněl, neboť vzduch v sále byl vsáván do koule. Malé ústřižky papíru, rukavice, dámské závoje – to všechno

strhával s sebou. Dokonce, když jeden oficír vrazil do té příšerné díry šavli, zmizela čepel, jako by byla utavena.“

Bohatá obrazotvornost, nápaditá fantazie, že? Však se pan Meyer, publikující své povídky a později i romány pod pseudonymem Gustav Meyrink, řadí k nejslavnějším autorům fantastického žánru. Fantazie, jak se ukazuje, umí být jasnozřivá. Zahlédne občas s neuvěřitelnou přesností jevy, které věda objeví, prozkoumá a také pojmenuje až mnohem později. Umělecká intuice tu předbíhá exaktní poznání.

Černé díry vyrábí ve vesmíru zcela spontánně gravitace, ta nejvšestrannější síla našeho kosmu. Vyrábí je všude, kde se setká dostatečné množství hmoty pohromadě a kde tato hmota přestane být zevnitř podpírána zářením, tepelným pohybem částic nebo jiným mechanismem. Dejte na hromadu hmotu více než dvou našich Sluncí, hmotu dostatečně chladnou a dostatečně málo zářící, a gravitace vám z ní úslužně a velmi rychle uplácá černou díru.

Jen připomínáme, je-li hvězda hmotná asi jako naše Slunce, gravitace jí po vyčerpání paliva moc neublíží. Jen ji slisuje do podoby bílého trpaslíka. Vyhaslé hvězdy o hustotě 1000 kilogramů na centimetr krychlový. Tlak uvnitř hvězdy je obrovský, avšak atomová jádra ho ještě vydrží, i když se zaťatými nukleony...

Úryvek z knihy *Okna vesmíru dokořán* (Naše vojsko, Praha 1989).

praktikum

# Pulsary

Pulsary jsou kosmické objekty, jež se projevují krátkými rádiovými záblesky (impulsy) s periodou 0,001 s až 4 s. Jak známo, byly objeveny v roce 1967 na radioastronomické observatoři univerzity v Cambridge (Velká Británie).

Perioda pulsarů se udržuje konstantní s přesností, kterou dosahují naše nejlepší atomové hodiny. Pulsary jsou rychle rotující neutronové hvězdy se silným magnetickým polem. V okolí magnetických pólů, které nesouhlasí s rotačními, jsou urychlovány nabité částice do vysokých energií – vzniká zde kužel záření namířený do prostoru. Zasáhne-li nás během otáčení pulsaru svazek tohoto záření, zaznamenáme impuls.

Pro toto praktikum použijeme záznamy registrací záření tří pulsarů na několika frekvencích (obr. 1).

### Úloha A – periody pulsarů

Z modelu rotující neutronové hvězdy plyne, že perioda pulsaru *nezávisí* na frekvenci. Proto periodu určíme ze záznamů na všech frekvencích a výsledek zprůměrujeme. Na obr. 1 pomocí milimetrového měřítka určete vzdálenost mezi impulsy, kterou převeďte z délkové do časové škály (měřítko je dole i nahoře u každého záznamu a je pro všechny tři pulsary stejné. Přitom:

– měřte s přesností na desetiny milimetru a výsledek uveďte s přesností nejvýše na 3 až 4 platná místa;

– pokud možno *ne*měřte sousední impulsy, ale impulsy od sebe vzdálenější (měřenou vzdálenost dělte počtem period mezi impulsy);

– u pulsaru PSR 0809+74 odlišujte pravé impulsy (označené na obr. 1 písmenem P) od pozemního rušení (I – *Interference*).

Výsledky měření zapisujte do tabulky 1.

### Úloha B – disperze impulsů

Na obr. 1 vidíme, že impulsy se sice *opakují* se stejnou periodou na různých frekvencích, ale přicházejí k nám se zpožděním závisejícím na frekvenci (pro nižší frekvence je zpoždění větší). Příčinou zpoždění je

skutečnost, že rádiové vlny se v prostředí s nabitými částicemi pohybují pomaleji než světlo ve vakuu. Rozdíl rychlostí závisí na koncentraci volných elektronů i na frekvenci [1]).

Zpoždění $\Delta t$ (s) mezi dvěma frekvencemi $\nu_1$, $\nu_2$ (MHz) je dáno vztahem

(1) $$\Delta t = 4{,}15 \cdot 10^9 \, n \, r \, (1/\nu_1^2 - 1/\nu_2^2),$$

kde $n$ je střední koncentrace elektronů podél trajektorie paprsku ($m^{-3}$), $r$ je vzdálenost pulsaru (pc). Součin $nr$ se nazývá ***disperzní míra***.

Na obr. 1 změřte zpoždění $\Delta t$ v milimetrech, převeďte na sekundy a pomocí vztahu (1) vypočítejte disperzní míru $nr$; výsledky zapisujte do tabulky 2.

*Upozornění:* disperzní míra pro daný pulsar by měla být pro všechny kombinace frekvencí stejná (až na chyby měření, ovšemže). Proto dávejte pozor, abyste u pulsaru PSR 0329+54 vybrali ke třem impulsům na prvních třech frekvencích odpovídající čtvrtý na frekvenci 1420 MHz. Není to určitě „ten první vlevo" – zde asi budete muset postupovat metodou „zkoušek a omylů" a počítat součin $nr$ pro různý výběr impulsů na frekvenci 1420 MHz..

**Úloha C – vzdálenosti pulsarů**

Známe-li disperzní míru $nr$, můžeme za předpokladu, že průměrná koncentrace elektronů v mezihvězdném prostředí činí $3 \cdot 10^{-8}$ $m^{-3}$ určit vzdálenost $r$ pulsaru. Na druhé straně, určíme-li vzdálenost $r$ jinou metodou, můžeme z disperzní míry zjistit elektronovou hustotu v mezihvězdném prostoru. Vypočítejte vzdálenosti všech tří pulsarů za našeho předpokladu a uvažte, zda jsou získané výsledky věrohodné. Výsledky zapište do tabulky 3.

Vzhledem k tomu, že v označení pulsaru je zakódována jeho přibližná poloha na hvězdné obloze, můžete pomocí mapy hvězdné oblohy zjistit souhvězdí a případně výraznější hvězdu, poblíž které se pulsar nachází (po zkratce PSR následuje rektascenze vyjádřená v hodinách a minutách, dále pak deklinace objektu ve stupních). Výsledky poznačte do tabulky 4.

Praktikum bylo připraveno s použitím článku K. J. Gordona: *Laboratory Exercises in Astronomy – Pulsars* (Sky and Telescope 53, 1977, č. 3, 178-180).

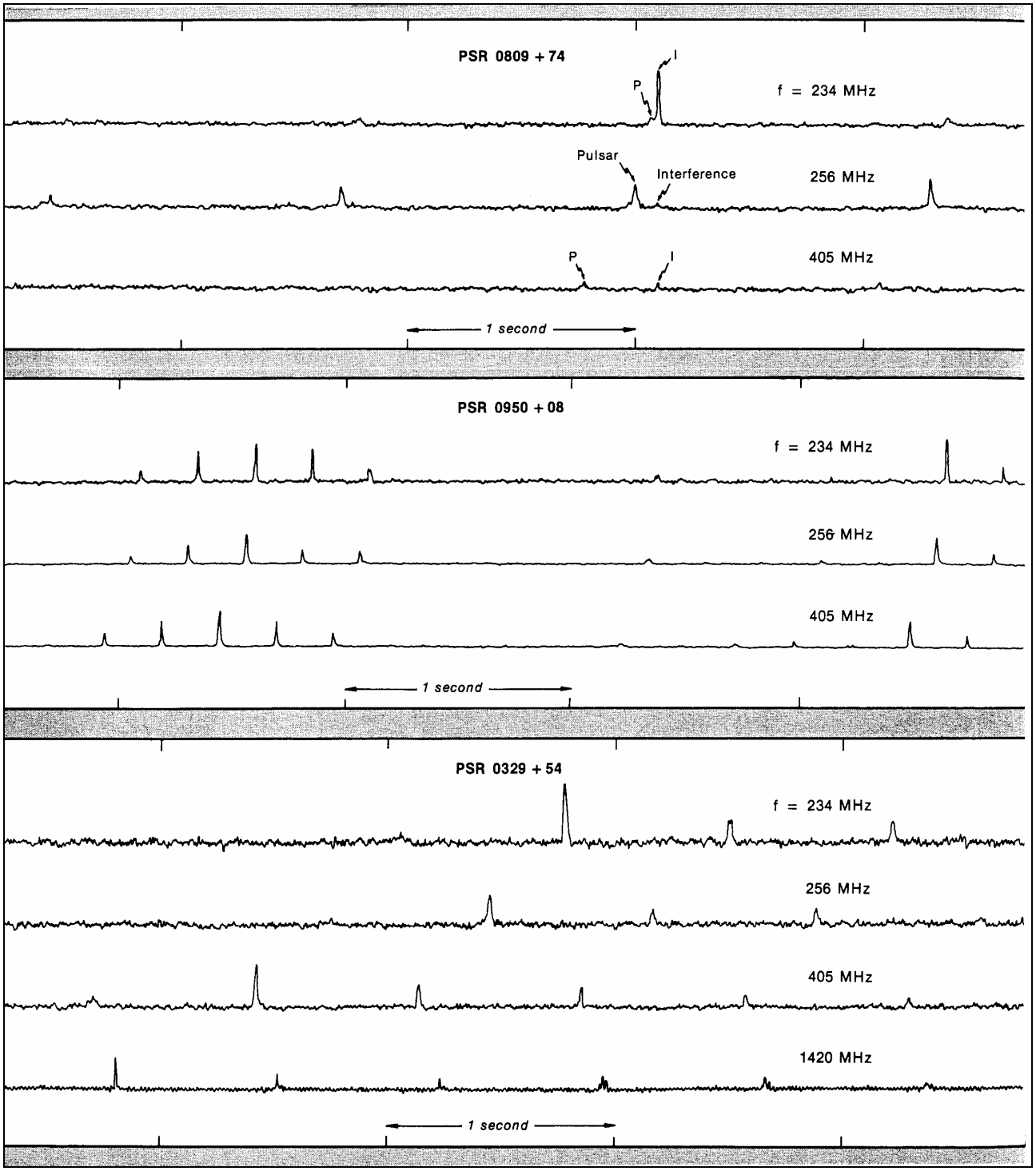
***Vstupní data, výsledky:***

**Tabulka 1**

| *Pulsar* | *Perioda pro frekvenci* | | | | *Perioda (průměr ze všech frekvencí)* |
|---|---|---|---|---|---|
| | 234 MHz | 256 MHz | 405 MHz | 1420 MHz | |
| 0809+74 | | | | – | |
| 0950+08 | | | | – | |
| 0329+54 | | | | | |

Měřítko: 1 s odpovídá ____ mm.

[1]) Disperze signálů z pulsaru nám umožňuje snadno odlišit impulsy pulsaru od pozemního rušení, které samozřejmě žádné zpoždění nevykazuje.




Obr. 1. Registrace záření tří pulsarů (National Radio Astronomy Observatory, Green Bank, USA).

**Tabulka 2**

| *Frekvence* (MHz) | | *Zpoždění* $\Delta t$ *a míra disperze nr pro pulsary* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0809+74 | | 0950+08 | | 0329+54 | |
| $\nu_1$ | $\nu_2$ | $\Delta t$ | *nr* | $\Delta t$ | *nr* | $\Delta t$ | *nr* |
| 234 | 256 | | | | | | |
| 234 | 405 | | | | | | |
| 234 | 1420 | – | – | – | – | | |
| 256 | 405 | | | | | | |
| 256 | 1420 | – | – | – | – | | |
| 405 | 1420 | – | – | – | – | | |
| průměry: | | – | | – | | – | |

**Tabulka 3**

| *Pulsar* | *Vzdálenost r* (pc) |
|---|---|
| 0809+74 | |
| 0950+08 | |
| 0329+54 | |

**Tabulka 4**

| *Pulsar* | *Přibližná poloha na hvězdné obloze* |
|---|---|
| 0809+74 | |
| 0950+08 | |
| 0329+54 | |

čítanka

# Rudolf Kippenhahn: Supernova uprostřed mlhoviny v Andromedě

Ernst Hartwig, 34letý pozorovatel hvězdárny v Dorpatu (dnešní Tartu v Estonsku), vysvětloval večer 20. srpna 1885 několika návštěvníkům, jak podle představy Kanta a Laplacea vznikla naše sluneční soustava. Podle ní se uprostřed rotující mlhoviny utvořilo centrální těleso, později Slunce, zatímco ve vnějších částech kondenzovaly planety. Pro ilustraci chtěl poté svým hostům ukázat mlhovinu v Andromedě v novém devítipalcovém refraktoru, neboť eliptický obláček vypadá podobně jako rotující mlhovina. Tento večer však pro to nebyl vhodný. Srpnový soumrak na 58. stupni severní šířky trvá dosti dlouho, kromě toho byl na obloze přibývající Měsíc. Nedalo se čekat, že by se na ozářeném nebi dal zřetelně rozpoznat obláček mlhoviny.

Jakmile však Hartwig pohlédl do dalekohledu, překvapeně zvolal: „V mlhovině vidím centrální slunce!“ Tato hvězda tam nepatřila! Hartwig pozoroval mlhovinu v menším dalekohledu před devíti dny s jedním ze svých hostů, profesorem filozofie, a nic podezřelého tenkrát nezpozoroval. A teď se uprostřed mlhoviny nacházela hvězda, která byla tak jasná, že by ji snad bylo možné spatřit pouhýma očima! Je-li tento jev reálný, pak jde o senzaci, o které by se měl co nejrychleji dovědět celý astronomický svět.

Tehdy již fungovala služba astronomických telegramů, která podávala hvězdárnám na celém světě zprávy o nových objevech na obloze, jako jsou třeba náhle se objevivší komety. Centrála této služby se nacházela v Kielu. Ředitel dorpatské hvězdárny byl však opatrný muž. Dříve než svolil svému mladému spolupracovníkovi telegrafovat zprávu do Kielu, chtěl si být jist, že se nejedná o klam způsobený měsíčním světlem. Hartwig měl vyčkat, až se úkaz potvrdí pozorováním za bezměsíčné noci.

Po celý týden špatné počasí znemožnilo jakékoli potvrzení objevu. 25. srpna byl úplněk. O dva dny později se nečekaně vyjasnilo a Hartwig mohl sledovat mlhovinu v malém dalekohledu. Hvězda byla opět tam, kde se jindy žádná jiná hvězda nenacházela, ale mezitím zřetelně zeslábla. Dříve než mohl Hartwig nastavit objekt do velkého refraktoru, obloha se znovu zatáhla.

Konečně 31. srpna vycházel Měsíc dostatečně pozdě, takže bylo možné pozorovat mlhovinu na tmavé noční obloze. Hvězda byla ve velkém refraktoru zřetelně vidět. Nyní Hartwiga už nic nezdrželo v úmyslu odeslat do Kielu telegram. Bohužel přepážky na poště již byly uzavřeny. Hartwig však měl štěstí u nádražního telegrafu, kde se mu přece jen pomocí „peněz a dobrého slova“ (jak později napsal) podařilo odeslat telegram. Hartwigova krátká věta pak byla z Kielu telegrafována do celého světa: „Nanejvýš pozoruhodná změna ve velké mlhovině v Andromedě, stálice v jádře sedmé velikosti.“

Této a následující noci se Hartwig věnoval nově objevivší se hvězdě, určoval její přesnou polohu na obloze vzhledem k okolním hvězdám a postřehl, že její jasnost rychle klesá. Všechna svá pozorování si řádně zapisoval. Zprávu o nich odeslal poštou do Kielu ráno 2. září – zásilka však nikdy nedošla na místo určení. Teprve později se Hartwig dověděl, že dopis, který byl přepravován lodí přes Čudské jezero a pak vlakem do Kielu, padl za oběť zloději, který pravidelně vykrádal poštovní schránku na lodi, odlepoval dosud neorazítkované poštovní známky a ty pak prodával...

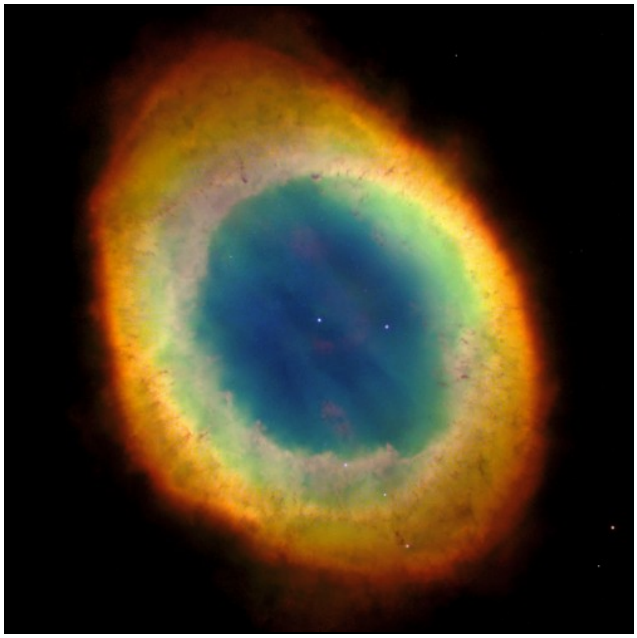
Mezitím však byl celý svět upozorněn na tento úkaz, především díky Hartwigovu telegramu.

Výňatek z článku *Supernova v mlhovině Andromedy* (Sterne und Weltraum, 1985, s. 432). Přeložil Zdeněk Pokorný.

úloha k zamyšlení

## Prstencová mlhovina

Prstencovou mlhovinu v souhvězdí Lyry, označovanou M 57, jste v dalekohledu jistě viděli. Jeví se jako světlá eliptická ploška, jejíž delší osa má úhlový průměr asi 150". Mlhovina je od nás asi 600 pc daleko. Jaký je její průměr v astronomických jednotkách a v parsecích? Srovnejte tuto hodnotu se vzdálenostmi nejbližších hvězd od nás.



„luštěniny“

# Vyhledejte správné pojmy!

V křížovce je skryto *osm pojmů*, které úzce souvisejí s pojmem „hvězda“. Samozřejmě jsou tam i další astronomické pojmy, které však s hvězdami nemají přímou souvislost, a pak jsou pro doplnění (a oklamání) doplněny různými písmeny. Nicméně váš úkol je jednoduchý: projděte tabulku nejdříve po řádcích a pak po sloupcích a vyhledejte tyto pojmy. Pro ulehčení je první z pojmů již vyznačen – najděte tedy sedm zbývajících.

| H | L | N | G | I | G | A | T | A | C | E | A |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| O | I | A | L | A | K | I | R | O | R | Ý | S |
| P | B | **N** | **O** | **V** | **A** | P | P | A | R | A | M |
| O | R | I | B | B | Á | U | A | D | H | E | E |
| Z | A | N | U | O | I | L | S | K | O | V | T |
| I | C | É | L | L | O | S | L | U | N | C | E |
| C | E | F | E | I | D | A | Í | N | O | É | O |
| E | O | L | O | D | F | R | K | O | B | O | R |
| A | P | V | C | O | U | L | I | B | R | A | Á |
| Á | H | F | O | T | O | S | F | É | R | A | E |
| V | I | Z | U | Á | L | N | Í | M | A | G | Ř |
| D | R | U | Ž | I | C | E | C | E | X | O | P |

speciální otázky

# Nebylo bezejmenných vědců

Pozorně si přečtěte následující věty. Popisují určitou skutečnost, vždy je tam uvedeno jméno některého význačného vědce a také letopočet, který událost datuje. V řadě případů tomu bylo opravdu tak, jak uvádíme. V některých ale jméno nebo letopočet nesouhlasí. Z okolností jistě snadno poznáte, která tvrzení jsou chybná a v čem. Dopište správná jména nebo letopočty místo těch chybných!

1. Slavné Keplerovy zákony formuloval německý astronom v prvních letech 17. století, když jako podklad pro své výpočty a úvahy vzal vynikající pozorování Marsu od dánského astronoma Tychona Brahe z konce 16. století (dva ze tří zákonů Kepler zformuloval v Praze, třetí pak v Linci).

2. Rádiové okno do vesmíru se symbolicky otevřelo roku 1931. Tehdy fyzik Karl Jansky poprvé zachytil rádiové záření, přicházející k nám z centra naší Galaxie.

3. První zrcadlové dalekohledy – reflektory – byly sestrojeny později než první dalekohledy čočkové. Popis konstrukce reflektoru pochází z roku 1663 od nikoho menšího než Tychona Brahe.

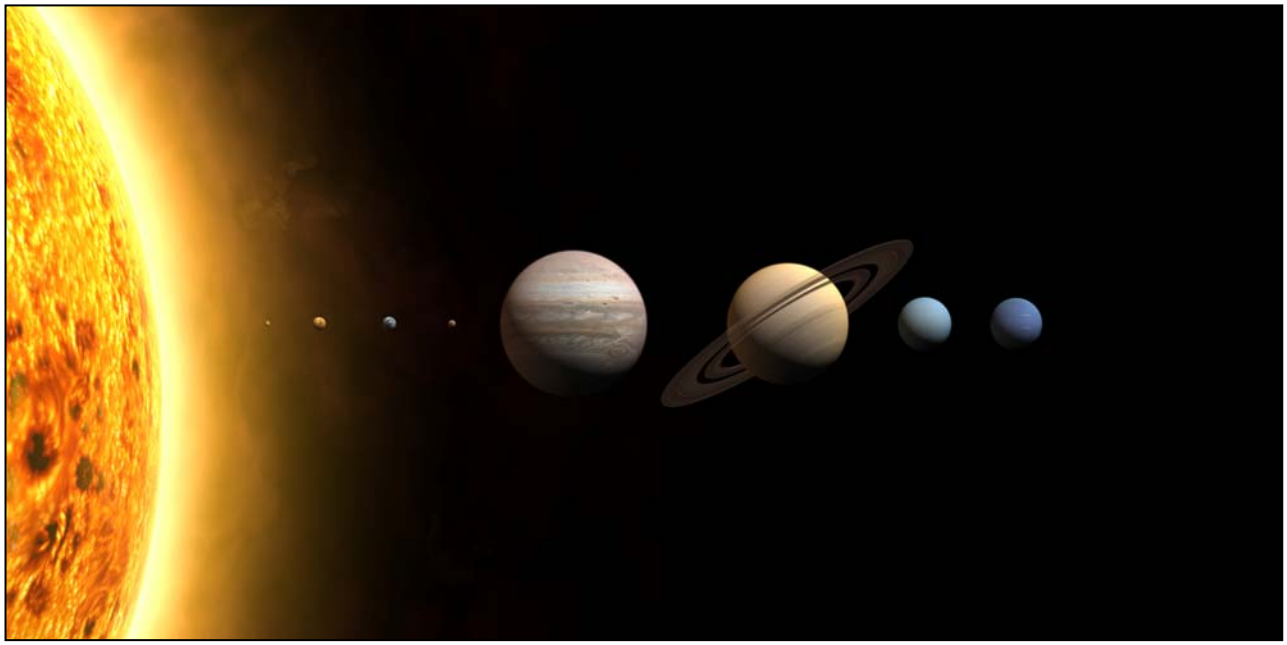
4. Roztřídění hvězd do šesti skupin podle toho, jak se nám jeví jasné, je nejstarším souborem fotometrických dat vůbec. Je zaznamenáno v díle Claudia Ptolemaia *Almagest*, poprvé vydaného v 10. století.

5. Úsilí o změření paralax hvězd kulminovalo v letech 1837–1839. 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 další dvě jména význačných astronomů – Tycho Brahe a Johannes Kepler.

# 7.1. Inventura ve sluneční soustavě

Každého cizího pozorovatele naší sluneční soustavy musí zaujmout, že dráhy všech planet jsou takřka kruhové a leží téměř v jedné rovině – v rovině ekliptiky. Také směr rotace většiny planet souhlasí se směrem jejich pohybu kolem Slunce i se směrem rotace samotného Slunce. Zvláštní je i skutečnost, že ve Slunci je soustředěno 99,87 procent veškeré hmoty sluneční soustavy, ale jen dvě procenta celkového momentu hybnosti [1]) (zbytek připadá především na planety a jejich družice).

Pozorný pozorovatel také zaznamená, že ve sluneční soustavě existuje řada velice rozmanitých těles. Nicméně lze je roztřídit přinejmenším na dvě rozdílné skupiny těles – tělesa menších rozměrů, s relativně vysokou hustotou, která najdeme blíže ke Slunci, a tělesa rozměrnější, menší hustoty, nalézající se ve vzdálenějších částech soustavy. Tam jsou ale též tělesa složená z ledu. Tyto a mnohé další vlastnosti nejsou zřejmě náhodné, ale důsledek vývojových procesů, takže každá teorie vzniku planetární soustavy, má-li být pravdivá, je musí uspokojivě vysvětlit.



[1]) Rychlost otáčení tuhého tělesa se popisuje úhlovou rychlostí, tedy úhlem, o nějž se těleso rotující kolem pevné osy otočí za jednu sekundu. **Moment hybnosti** se definuje tak, že si těleso představíme složené z malých kousků. *Hybnost* takového kousku je součin jeho hmotnosti a rychlosti; *moment hybnosti* je součin hybnosti a vzdálenosti od osa otáčení, tedy součin hmotnosti, úhlové rychlosti a druhé mocniny vzdálenosti od osy otáčení. Celkový moment hybnosti tělesa je pak součtem momentů hybnosti jednotlivých kousků. Je to důležitá fyzikální veličina, protože u izolovaného tělesa (nebo soustavy těles) má stále stejnou hodnotu.

### Planety podobné Zemi a planetární obři

Začněme u těles, jež se nejvíce podobají Zemi – proto je označme jako *planety typu Země* (či *terestrické planety*); patří mezi ně Merkur, Venuše, Mars a Měsíc [2]). Tato tělesa mají průměr od několika tisíc do 13 000 kilometrů (Země je shodou okolností z celé skupiny největší) a najdeme je ve vnitřní části sluneční soustavy. Terestrické planety tvoří látka, obsahující převážně sloučeniny a prvky železa, křemíku, hořčíku, hliníku a vápníku.

Zcela odlišné od Země jsou planety Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Liší se nejen svou velikostí (mají asi desetkrát větší průměry než terestrické planety) a svou polohou (nacházejí se vně planet typu Země), ale především svým složením a stavbou. Tvoří je převážně vodík a helium, u Uranu a Neptunu se k těmto prvkům ještě přidávají v nevelkém (ale již nezanedbatelném) množství uhlík, dusík a kyslík.

Přímému pozorování jsou dostupné pouze svrchní vrstvy husté plynné atmosféry, jež směrem do nitra planety pozvolna přechází v kapalinu a pak i v pevnou látku. Souhrnně této skupině planet říkáme *planety typu Jupiteru*. Někdy vzhledem k menším rozdílům v chemickém složení a stavbě rozlišujeme planety *obří* (Jupiter a Saturn) od planet *velkých* (Uran a Neptun).

### Led jako stavební hmota

Ve vnějších částech sluneční soustavy najdeme ještě jeden druh velice zajímavých těles. Souhrnně je můžeme označit jako *ledová tělesa*, protože vodní led je jejich významnou součástí. Patří sem tři ze čtyř velkých Jupiterových družic (tzv. galileovské [3]) ), družice Saturnovy, Uranovy a Neptunovy, Pluto i mnohá další drobná tělesa, jež se nalézají v prostoru mezi nejvzdálenějšími planetami a ještě dál za nimi.

### Základní informace o planetách

#### *Merkur*

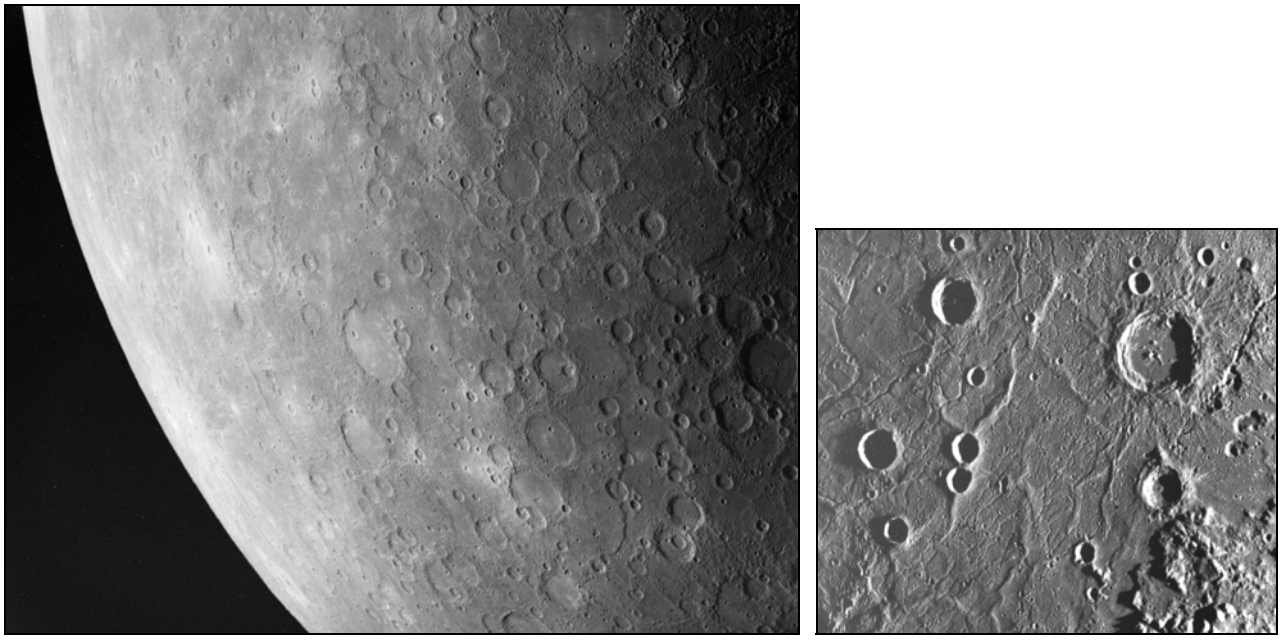
Při třech blízkých přiblíženích sondy Mariner 10 k Merkuru (to bylo v letech 1974 a 1975) se podařilo prozkoumat 45 procent povrchu planety. Merkurův povrch silně připomíná měsíční, chybí tu jen obdoba měsíčních moří. Většina kráterů je impaktních, vznikla tedy nárazem menších těles na planetární povrch. Pro Merkur jsou charakteristické **obloukovité zlomy**. Jsou to relativně strmé příkopy, táhnoucí se často napříč krátery v délce desítek až stovek kilometrů. Zatímco povrch Merkuru je od měsíčního takřka k nerozeznání, nitra jsou zcela jiná. Slabé Merkurovo **magnetické pole** (asi jedno procento zemského) svědčí o přítomnosti rozsáhlejšího jádra z kovů.

Na Merkuru je nejzajímavější pánev *Caloris* (v překladu Pánev horka). Obklopuje ji šest prstencových valů, z nichž nejvýraznější má průměr 1340 km. Dno pánve je unikátní: najdeme tu spoustu prasklin a horských hřbetů, které buď vybíhají ze středu, nebo tvoří soustředné prstence.

---

[2]) Ve výčtu planet zemského typu je kupodivu i Měsíc. Podle zažitých školských představ je to pouhá „družice“. Když se však důkladněji rozhlížíme po sluneční soustavě a pátráme po shodách a rozdílech mezi jednotlivými tělesy, často musíme své předchozí představy poopravit, aby lépe odpovídaly skutečnosti.

[3]) Čtyři největší Jupiterovy družice (Ió, Europa, Ganymed a Kallistó) se nazývají galileovské na počest svého slavného objevitele. Není sice jisté, zda Galileo Galilei (1564–1642) na začátku roku 1610 sledoval tyto družice právě vynalezeným dalekohledem jako úplně první, jisté však je, že o svých pozorováních obsáhle referoval ve spise „Hvězdný posel“ (*Nuncius Sidereus*).



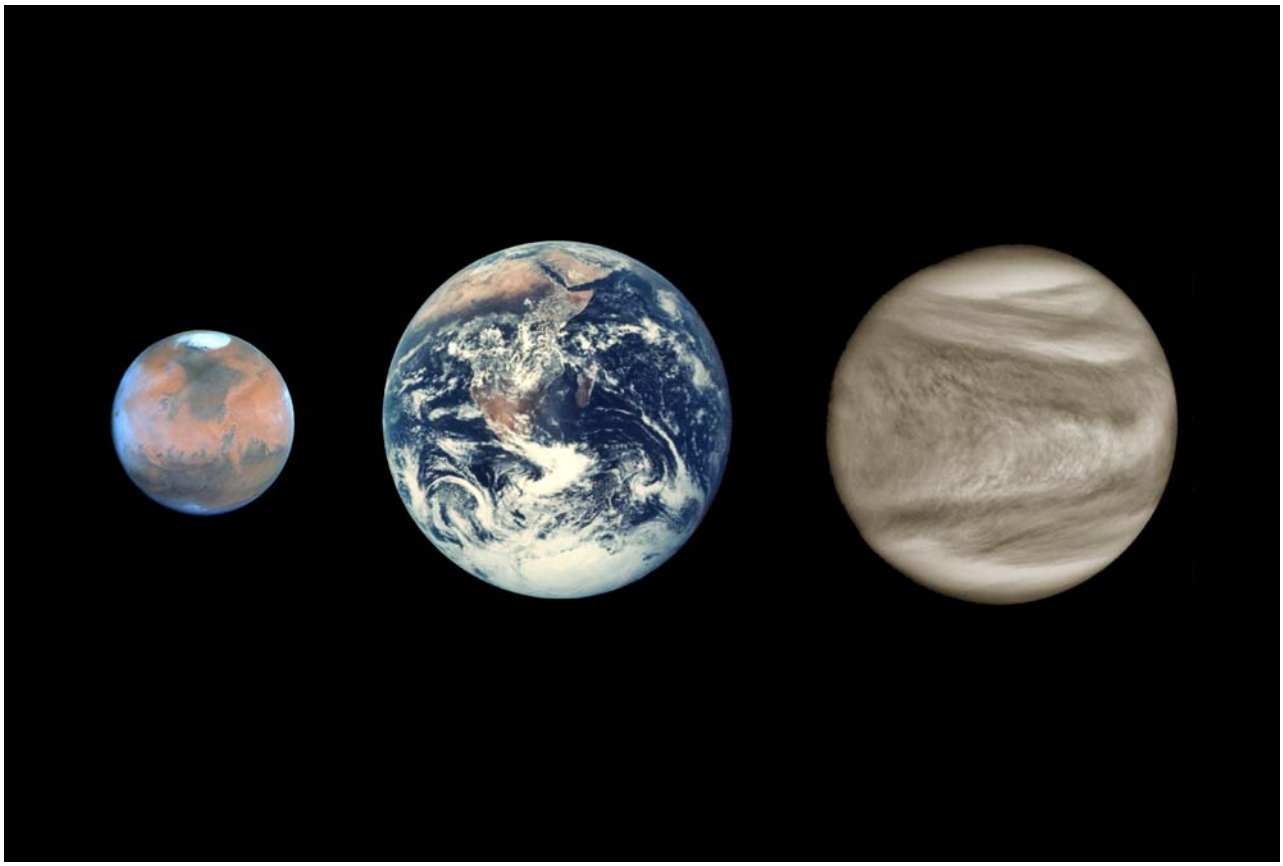
Merkurův povrch pohledem sondy Mariner 10 (vpravo detail dna velké pánve Caloris).

Rotační osa Merkuru je téměř kolmá k oběžné rovině a **doba rotace** planety je přesně 2/3 oběžné periody. Tedy za dva oběhy kolem Slunce se planeta vůči němu třikrát otočí. To znamená, že když je planeta například v přísluní, míří ke Slunci právě jeden ze dvou poledníků, lišících se navzájem o 180 stupňů. Dráha Merkuru je poněkud výstředná, takže na těchto polednících, natočených ke Slunci v době přísluní, je podstatně tepleji než na jiných. Shodou okolností na jednom z horkých poledníků se rozkládá pánev *Caloris*. Pánev „horka" je tedy naprosto příhodný název.

***Venuše***

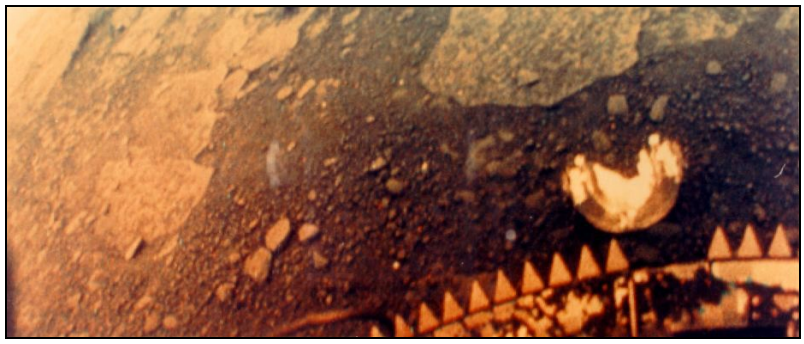
Ačkoli je Venuše téměř stejně velká jako Země, liší se od naší planety v mnoha ohledech. Pohled na Venuši dalekohledem bývá pro mnohé zklamáním. Není vidět víc než neúplný kotouček, snad občas nevýrazné ztemnění u okraje. Sledujeme totiž horní vrstvy husté atmosféry, která pouze v ultrafialovém světle ukáže několik temnějších oblak. Srovnáme-li atmosféru Země s Venušinou, mají jen málo společného. Na Venuši jsou oblaka 45 až 60 km vysoko a bezezbytku zahalují celý planetární povrch. Venušina atmosféra rotuje rychleji než pevný povrch. Je tvořena téměř výhradně oxidem uhličitým.

V atmosféře Venuše se uplatňuje silný **skleníkový jev** (viz doplněk v této kapitole). V důsledku tohoto jevu dosahuje teplota na povrchu 490 °C, tlak na povrchu převyšuje pozemský asi 90násobně. Samotný povrch Venuše můžeme studovat jen velmi obtížně. Hustá atmosféra nám nedovoluje uvidět ze Země anebo i z těsné blízkosti na něm nějaké podrobnosti. Je sice možné proniknout se sondou až k povrchu, přistát a rozhlédnout se kolem, jenže tak uvidíme jen kousek krajiny. Naštěstí existuje i jiný způsob mapování: tvářnost povrchu můžeme zjišťovat pomocí *radaru*, zejména, když je umístěn na sondě obíhající kolem planety. Pro rádiové záření radaru je atmosféra průhledná. Úzký svazek záření v podobě krátkých záblesků naráží na povrch, část záření se vrací nazpátek. Například z doby mezi vysláním a opětným příjmem signálu lze určit přesnou vzdálenost mezi radarem a povrchem.

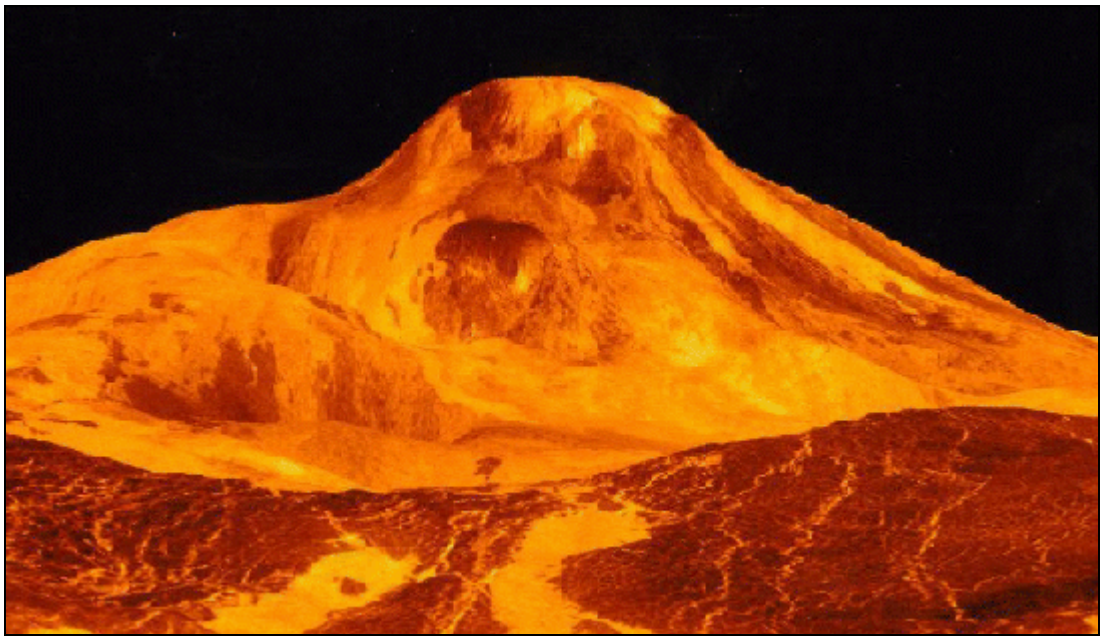


Srovnání velikostí Marsu, Země a Venuše (snímek Venuše byl pořízen v ultrafialovém světle, jsou na něm vidět oblaka rychle rotující ve výškách kolem 60 km).

Radarový „snímek“ vzniká postupným skládáním z jednotlivých měření (bodů) do mozaiky. Nikde v radaru není zařízení, na kterém bychom mohli přímo vidět nějaký obrázek. Radarový snímek je výsledkem počítačového zpracování. Radarový obraz povrchu, vytvořený počítačem, je ovšem třeba správně přečíst. Nejjednodušší pravidlo zní: *světlejší* plochy na snímku odpovídají *drsnému* povrchu, *tmavší* povrchu *hladšímu*. Vše je ale komplikováno konkrétním sklonem odrážející plošky vzhledem k radaru, velikostí a soudržností částic, z nichž je povrch tvořen, a ještě dalšími okolnostmi. Opravdu není vždy jednoduché si správně vyložit, co je na radarovém snímku planety zachyceno.



Záběr Venušina povrchu (sonda Veněra 13).



Maat Mons na Venuši (rekonstruovaný obraz na základě radarových pozorování; výškové měřítko bylo zvětšeno).

Na Venuši najdeme **štítové sopky**, jaké na Zemi tvoří například Havajské ostrovy. Rozměry však mají obrovské: sopky *Theia Mons* a *Rhea Mons*, které leží v oblasti označované *Beta Regio*, jsou nejobjemnějšími známými vulkány – základna každého z nich má průměr 1000 km a vrcholy ční 5 km nad okolní povrch. Přinejmenším 85 procent Venušina povrchu je sopečného původu. Ano, Venuše je planetou sopek. Ty mají často prapodivné tvary, připomínají nám pavouky, klíšťata či jakési placky. Zatím ovšem není jasné, jak silná je sopečná činnost v současnosti.

Je to planeta, kde život zcela určitě neexistuje.

***Mars***

Tato planeta je neobyčejně zajímavá, bezesporu se Zemi podobá nejvíce. Dny, noci i roční období zde plynou v podobném tempu jako u nás. Na povrchu nalézáme sopky shodné s pozemskými, nejčastěji mají podobu rozlehlých plochých kuželů. Jsou to tzv. **štítové sopky**. Na Marsu je většina z nich v oblasti zvané *Tharsis*. Nachází se tu i jedna z největších sopek ve sluneční soustavě – Olympus Mons. Základna vulkánu má průměr 540 km, vrchol vystupuje 26 km nad okolní terén.

Kosmické sondy objevily na Marsu řadu dlouhých **údolí** s množstvím zákrutů i vedlejších koryt, která se již na první pohled podobají pozemským říčním tokům. Převládá názor, že jde skutečně o vyschlá ko-

ryta řek, kterými v minulosti, alespoň načas, proudila ohromná množství vody. Dnes je vody na povrchu Marsu málo, především je přítomna v polárních čepičkách. Trocha je jí v ovzduší a tvoří jinovatku, která v noci usedá na povrch a s příchodem nového dne se rychle vypařuje. Značné množství vody je však skryto pod povrchem ve formě stále zmrzlé půdy – vytváří se směs ledu a hornin, tzv. *permafrost*.

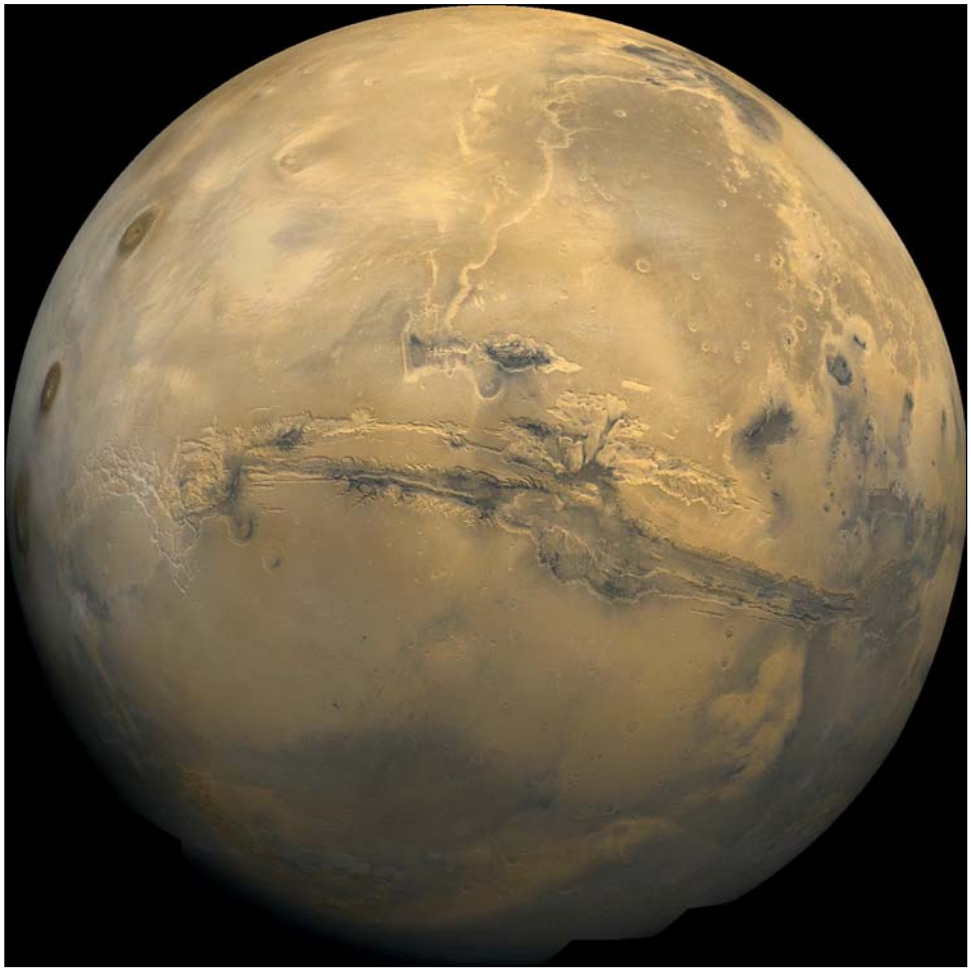
Stružky na svahu kráteru, které vznikly nedávno zřejmě výronem vody a bahna ze stěny.

Na Marsu je plno písku a jemného prachu. Když jej větry zvednou do ovzduší, atmosféra se rychle zakalí. Někdy mohou místní prachové bouře přerůst v bouři celkovou, globální, která pak zahalí do prachového obalu celou planetu. Do Marsovy atmosféry jsou z povrchu vyfoukávány spousty drobounkých prachových částeček o průměru jen několika tisícin milimetru, které vytvoří až 50 km tlustou vrstvu. Pro pozorovatele zmizí na planetě všechny detaily, jen tu a tam zahlédne přes žlutavý zákal nějakou neurčitou skvrnku. Velké bouře trvají řadu týdnů až měsíců.

Převážná část jižní polokoule Marsu je pokryta **krátery**, na severní je jich podstatně méně. Při letmém pohledu vypadají jako měsíční, ovšem při pečlivějším studiu jejich tvarů vidíme, že jsou mnohem plošší (tedy poměr hloubky k průměru je u nich menší než u měsíčních kráterů). To snadno vysvětlíme tím, že marsovské krátery jsou silně zarovnávány a vyhlazovány usazováním prachu na jejich dna či borcením svahů. Na Marsu nalezneme i několik obrovských pánví – rozsáhlých, zhruba kruhových plošin. Největší je pojmenována *Hellas*: má průměr 1600 km a hloubku šest kilometrů oproti střední úrovni planety.

Na Marsu je velké množství **prasklin** v kůře, jsou různého tvaru a rozsahu. Nejvýraznější z nich je *Valles Marineris* (Údolí Marinerů), které patří k této planetě zcela nerozlučně jako Eiffelovka k Paříži. Toto údolí se v délce mnoha set kilometrů zarývá od východu k západu do Marsova glóbu. Celý komplex je dlouhý dohromady 5000 km a široký až 240 km, místy se noří až osm kilometrů pod úroveň okolního terénu. Často se *Valles Marineris* přirovnává k velké příkopové propadlině ve východní Africe. Praskliny v povrchu najdeme také u sopek; zde jejich přítomnost nepochybně úzce souvisí s vulkanickou činností.

**Polární čepičky** spatříme už v menším dalekohledu – lemují oblasti kolem severního a jižního pólu planety. Jak se na Marsu střídají roční období (a střídají se ze stejného důvodu a ve stejném pořadí jako na Zemi), bělavé čepičky střídavě zvětšují a zmenšují své rozměry. Na okrajích má čepička podobu jen tenké jinovatkové vrstvičky, uprostřed ji může tvořit i silnější ledová vrstva. Polárních oblastech i oxid uhličitý, hlavní složka atmosféry. Oxid uhličitý tvoří horní (a těkavější) součást polární čepičky.



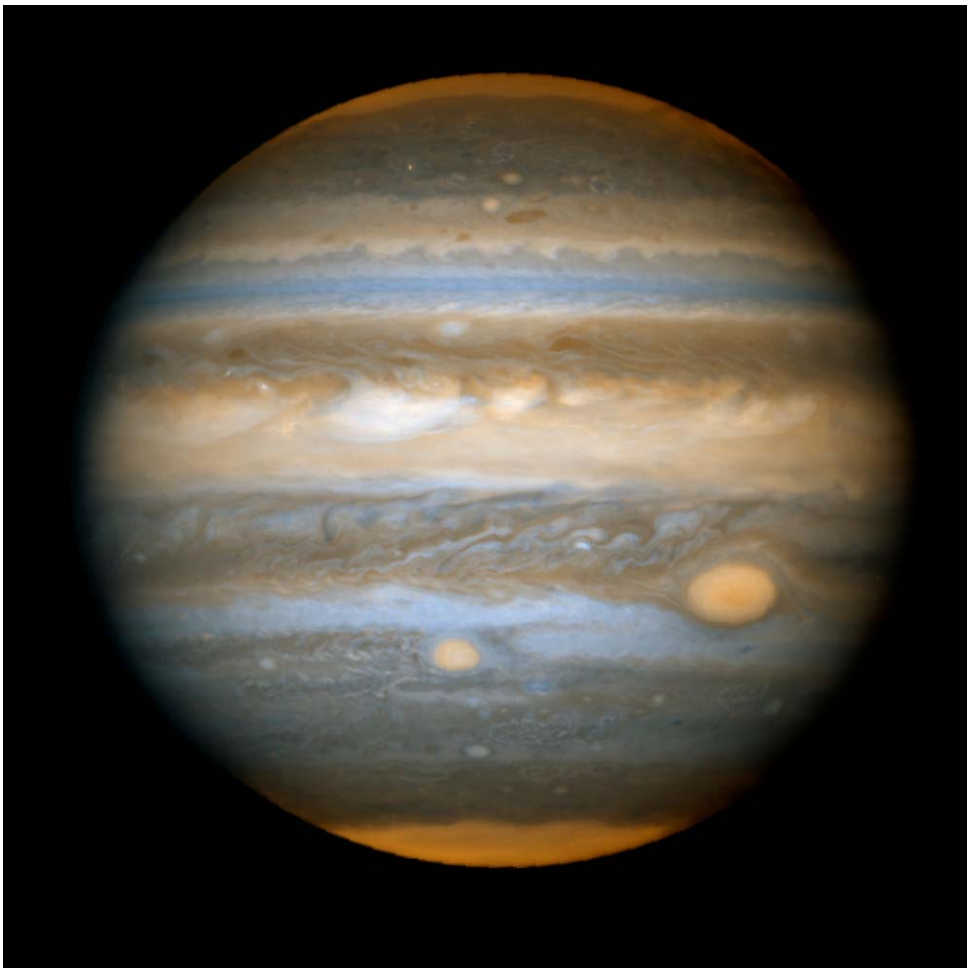
Valles Marineris.

A jak je to s **životem** na Marsu? Přímé důkazy o existenci života na této planetě zatím neexistují; je však jasné, že pokud tu živá hmota bude nalezena, půjde jen o drobné mikroorganismy.

***Jupiter***

Jupiter je typický představitel obřích planet, jde o největší planetu vůbec. Jupiter je složen převážně ze dvou nejlehčích (a ve vesmíru nejhojnějších) prvků – vodíku a helia. Prvky těžší než helium, tvořící především metan a čpavek, představují jen malou příměs. Přímému pozorování jsou dostupné pouze horní vrstvy **atmosféry**. Ta směrem do nitra houstne, plyn se *postupně* mění v jakousi vazkou tekutinu a pak ve zcela pevnou látku. Kdybychom se spouštěli níž a níž, vše kolem nás by houstlo, ale na pevný povrch, jak jej známe ze Země, nikdy nenarazíme. Něco jako pevný povrch na Jupiteru neexistuje.

Atmosféra obřího Jupiteru má pozoruhodnou vlastnost: zatímco celková struktura atmosféry (myslíme tím tmavé pásy a světlé zóny mezi nimi) se s časem mění jen velmi málo, malé detaily se proměňují velice rychle; ve světě drobných detailů to jakoby prudce vře, kypí, vzniká a zaniká. Výjimkou jsou některé velké skvrny, z nichž největší je tzv. *červená skvrna*. Ta existuje více než 300 let. Je to vlastně oblast vyššího tlaku, anticyklona (řečeno meteorologickou terminologií), která připomíná veliký vodní vír. Rotuje s periodou přibližně šest dní mezi dvěma sousedními proudy jako obrovské kuličkové ložisko.



Jupiter s červenou skvrnou (v pravém spodním kvadrantu) na záběru Hubblovým kosmickým dalekohledem.

Jupiter je planetou s nejsilnějším **magnetickým polem**. To vzniká v nitru planety, v oblastech, kde se vyskytuje vodík v tekutém stavu. Za vysokých tlaků, jež tam panují, má vlastnosti podobné běžným kovům. V tomto rozsáhlém jádru vzniká magnetické pole, které pak ovlivňuje i pohyb nabitých částic v okolí Jupiteru. Silné magnetické pole bude jistě velkou překážkou pro lety lidí k Jupiteru.

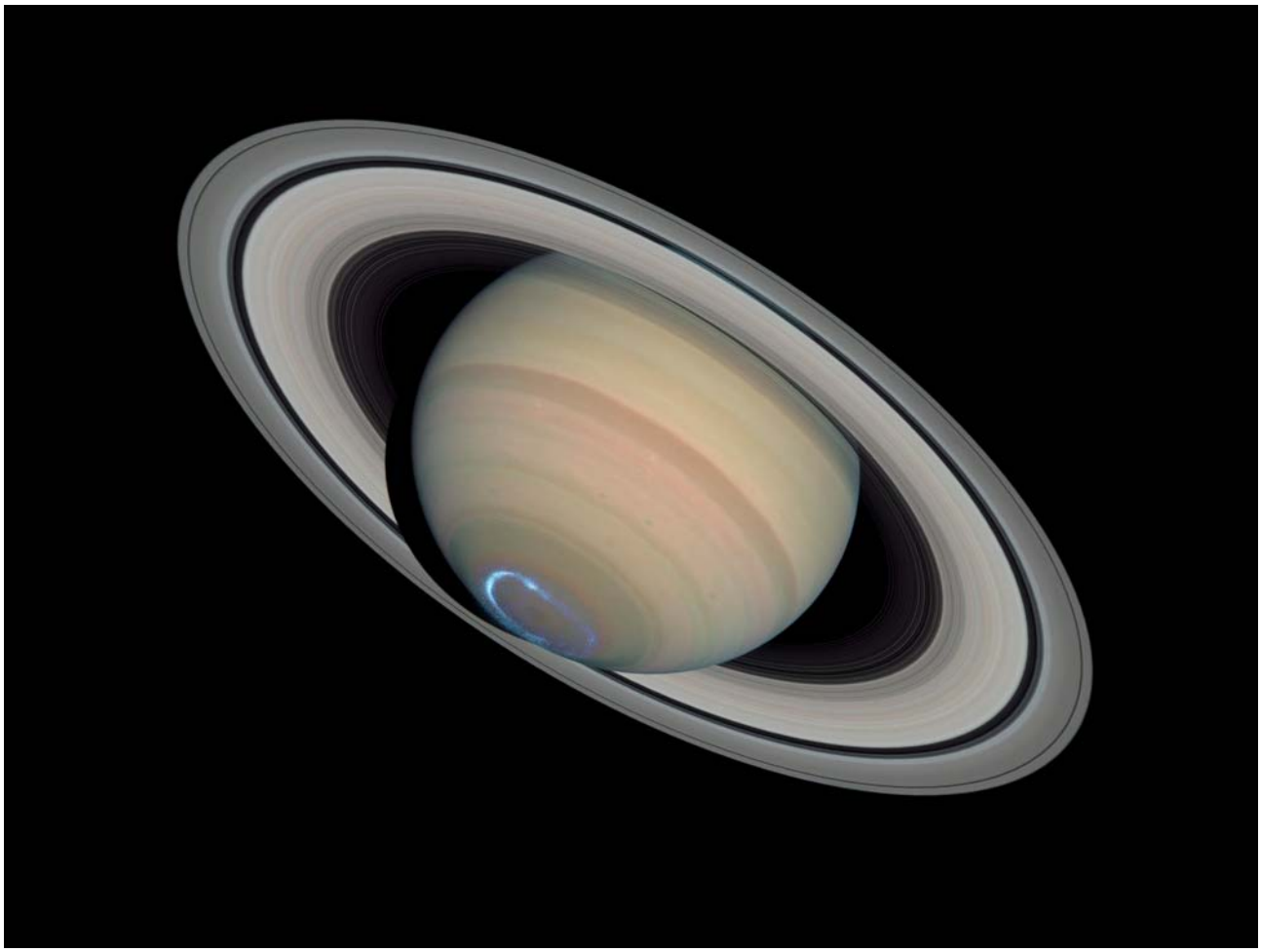
Součástí Jupiterova systému jsou i čtyři relativně velké družice (rozměry mají srovnatelné s Měsícem), desítky družic menších rozměrů a nevýrazný prstenec.

***Saturn***

Saturn se svými **prstenci** je zajisté symbolem hvězdářství. I když to není jediná planeta s prsteny, jak dnes víme, jsou její prstence určitě nejkrásnější, ačkoli pouhýma očima je nespatříme. Samotná planeta Saturn bývá často pokládána za poněkud bezbarvou kopii Jupiteru, kopii, která má všeho „trochu méně“ než její skvělejší předloha. I když se tyto planety sobě hodně podobají, jsou mezi nimi i rozdíly. V Saturnově atmosféře není tolik výrazných detailů, i když proudění plynů, zejména v rovníkové oblasti, je mnohem rychlejší než na Jupiteru (větry na Saturnu dosahují rychlosti až 500 metrů za sekundu!).

Saturnovy prstence – to je obrovský kolotoč miliard částic. Nejmenší z nich jsou mikroskopická prachová zrnka, největší pak bloky skal velké jak mnohapatrové domy. Je to složitá soustava, které

ještě do detailů nerozumíme. Zdálky vidíme jen několik jasných prstenů, oddělených temnými mezerami. Při bližším pohledu se světlé prstence rozpadají na tisíce prstýnků, úzkých a jemných jako drážky na dlouhohrající gramofonové desce. Mezery mezi prstenci jsou vše možné, jen ne zcela prázdný prostor. Asi poslední, co bychom v tomto světě pravidelně vykrojených prstenců očekávali, jsou výstředné prstence. Ale i takové existují: prstence rozvětvené do několika provázků, které se navzájem proplétají, některé jsou dokonce i s malými uzlíky!



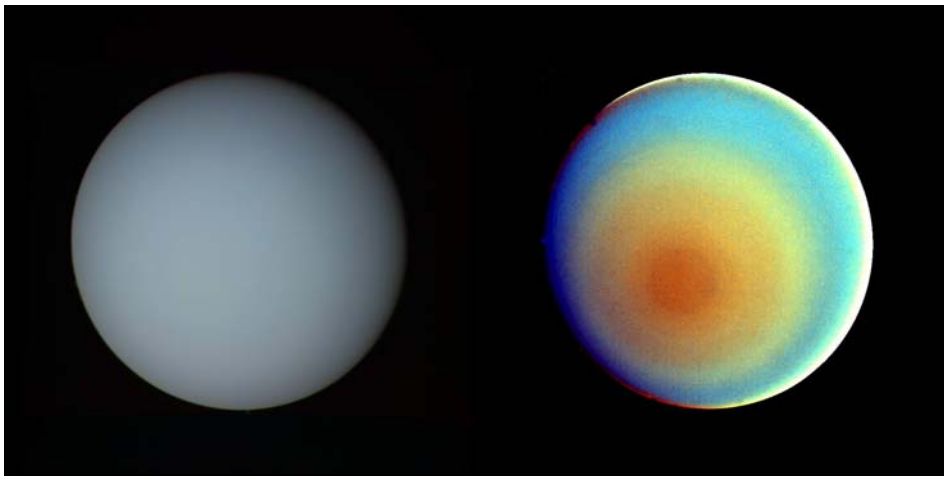
Saturn se zvýrazněným oválem polárních září u jednoho ze svých pólů (Hubblův kosmický dalekohled).

Prstence nejsou v dalekohledu vždy pozorovatelné. V některých údobích spatříme jen mírně zploštělý nažloutlý kotouč bez prstenců! Vada na Saturnově kráse je to podstatná, ale naštěstí odstranitelná, stačí jen počkat – pravda, pár let. Celý úkaz zmizení je způsoben tím, že prstence jsou velmi tenké, takže když se na ně díváme z boku, jednoduše „zmizí“. Stane se to dvakrát za dobu oběhu Saturnu kolem Slunce, která činí asi 30 let. Kuriózní je, že když prstence nevidíme, nejvíce se o nich poučíme. Například tehdy máme šanci objevit slabé družice těsně u prstenců, protože jindy jsou světlem prstenců přezářeny.

Saturn má početnou rodinu družic, mnoho desítek (většina družic ovšem nedosahuje velikosti ani několika stovek kilometrů). Největší Saturnův satelit Titan objevil v březnu 1655 Christiaan Huygens. Je to těleso s relativně hustou atmosférou (srovnatelnou s hustotou zemské).

***Uran***

Sedmá planeta sluneční soustavy není pouhou zmenšeninou Jupiteru či Saturnu, jak by se mohlo na první pohled zdát. Obsahuje mnohem více kyslíku, dusíku a uhlíku, i když vodík stále převládá. Uran se i z bezprostřední blízkosti jeví jako **jednotvárné těleso** s charakteristickým modrozeleným nádechem. To způsobuje plynný metan nad oblaky, který silně pohlcuje červené světlo. Meteorologie na Uranu je velmi zvláštní, za což je bezpochyby odpovědná neobvyklá poloha rotační osy Uranu: jeho rotační osa zcela netradičně téměř splývá s oběžnou rovinou, není jako u všech ostatních planet kolmá na tuto rovinu nebo jen mírně k ní skloněná. V případě Uranu víme, že jeho oblaka rotují rychleji než jádro planety. Rychlost rotace není ovšem všude stejná, v bouřlivém pásmu podél 60. jižní rovnoběžky dosahují uragány rychlosti až 720 kilometrů za hodinu.



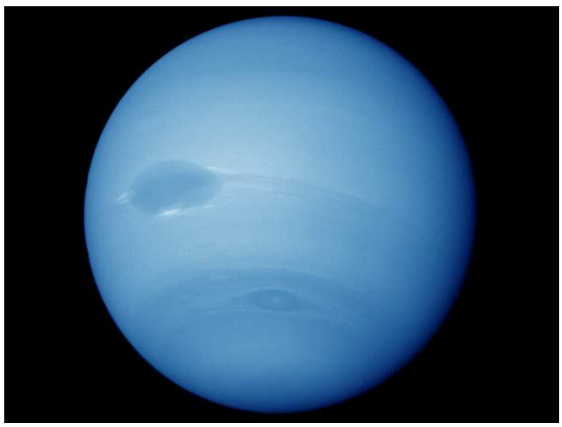
Uran ve skutečných barvách (vlevo) a se zvýrazněnými barevnými odstíny (sonda Voyager 2).

Planetu obepínají uzounké prstýnky; byly objeveny 10. března 1977 při pozorování zákrytu jedné hvězdy Uranem.

Ačkoli planeta sama příliš přitažlivě nevypadá, mnohé její družice jsou svéráznými světy. Určitě nejzajímavější z nich je satelit Miranda, objevený a pojmenovaný Gerardem Kuiperem podle postavy v Shakespearově romantickém dramatu Bouře.

***Neptun***

Země není jedinou „modrou planetou“ v naší sluneční soustavě. I Neptun je namodralý, je dokonce ještě modřejší než Země. Způsobuje to hustá atmosféra, v níž se nejvíce rozptylují modré paprsky, a naopak červené se silně pohlcují. Neptun není kopií nevýrazného Uranu, ale svět svébytný sám o sobě. V atmosféře najdeme nápadná oblaka, cyklony a anticyklony. Je tu i obdoba červené skvrny na Jupiteru (zřejmě ale není tak stabilní jako exemplář na Jupiteru).



Velice zvláštní je největší z Neptunových satelitů – Triton. Dodejme, že jedinou sondou, která prozatím prozkoumala Uran a Neptun z bezprostřední blízkosti, byl Voyager 2. O dalším přímém průzkumu těchto těles se zatím neuvažuje.

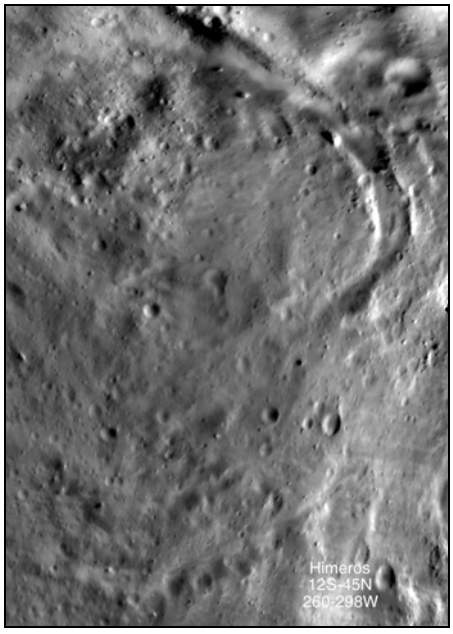
***Pluto***

Pluto byl rozhodnutím kongresu Mezinárodní astronomické unie ze srpna 2006 zbaven statutu planety a bylo mu přiřazeno označení „trpasličí planeta“ (takto by se měl označovat i Ceres a mnohá další tělesa za Plutem). Pluto skutečně svými rozměry, stavbou, trajektorií a zřejmě též vznikem patří nejspíš mezi tělesa tzv. *Kuiperova* [4]) *pásu* za Neptunem, viz další odstavec. Pro Pluto je typické, že jeho dráha kolem Slunce je výstřednější než u všech ostatních planet; proto se povrch Pluta (podobně jako kometární jádra) během jednoho oběhu periodicky zahřívá a ochlazuje. Poblíž přísluní zmrzlé plyny – dusík, oxid uhličitý, metan – sublimují a vytvářejí řídký plynný obal. Ten ovšem zmizí, jakmile se Pluto ocitne dál od Slunce.

Na Plutu je opravdu chladno: teplota tam nyní činí 43 K (–230 °C). On i jeho družice Charon jsou jen dvakrát hustší než voda, takže jejich hlavní složkou je vodní i jiný led.

**Nezapomeňme na malá tělesa**

K inventarizaci zbývá ještě početná, v souhrnu však jen nepatrně hmotná drobotina v podobě planetek a jader komet. Přesto jsou důležitou součástí sluneční soustavy, protože právě tato tělesa si podržela mnohé informace z doby, kdy se tvořil planetární systém.



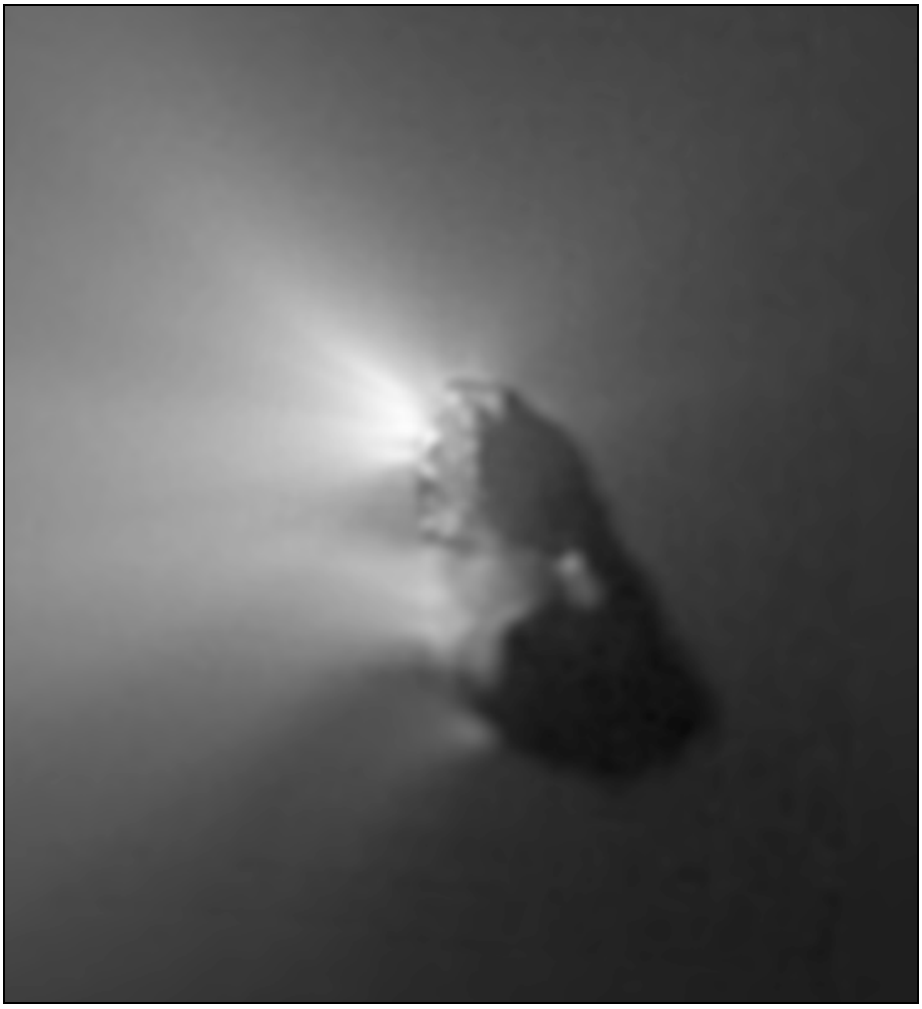
Povrch planetky Eros (vlevo) a planetka Ida se satelitem Dactyl (na pravém snímku).

K Zemi nejbližší pás planetek se nalézá v prostoru mezi drahami Marsu a Jupiteru. Za drahou Neptunu je druhá oblast s nepochybně velkým množstvím planetek [5]). Některé z nich jsou stovky kilometrů velké, tedy srovnatelné s vůbec největšími známými planetkami. Mnohé byly v době objevu klasifikovány jako „obyčejné“ planetky; pak se ale začal z jejich povrchu uvolňovat materiál a tělesa kolem sebe vytvořila plynnoprachovou obálku. Jsou to tedy *jádra komet* (je to také takřka

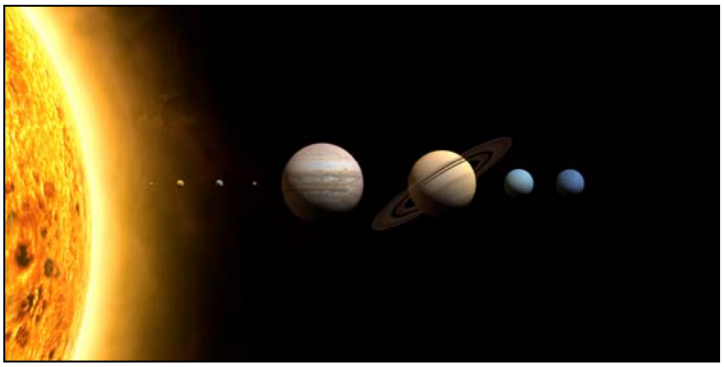
[4]) Čti: *k(h)ajprova*.

[5]) Právě tato tělesa tvoří Kuiperův pás. O existenci takových planetek uvažoval již v roce 1951 Gerard Kuiper, první těleso z tohoto pásu bylo objeveno 30. srpna 1992 Davidem Jewittem a Jane Luuovou.

učebnicový příklad faktu, že naše klasifikace těles, byť sebepečlivěji provedená, se může ukázat po čase jako chybná; zkrátka příroda je rozmanitější, než si i ve své nejbujnější fantazii dokážeme představit).



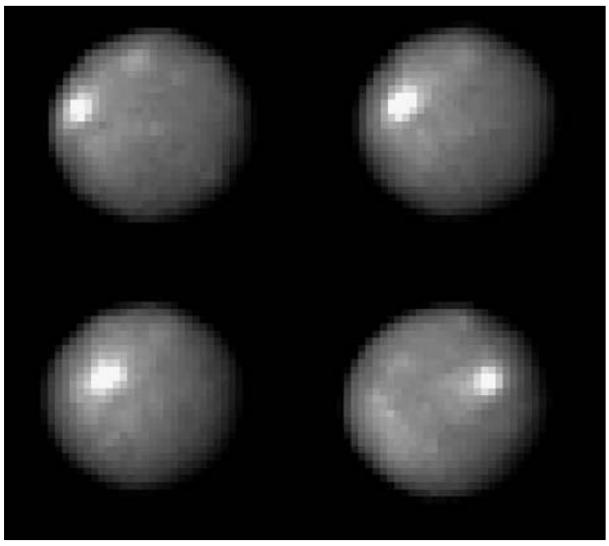
Jádro komety Halley v záběru sondy Giotto, získaném při posledním průletu komety kolem Slunce v roce 1986.



čítanka

# Zdeněk Pokorný: Chybějící planeta?

Prvního ledna 1801 zřejmě hodně lidí oslavovalo příchod nového století, ale jiní usilovně pracovali, a – jak tento příběh potvrzuje – také shodou okolností vstoupili do dějin. Italský mnich, matematik a astronom Giuseppe Piazzi, jenž v té době byl ředitelem observatoře v Palermu na Sicílii, vytrvale sestavoval nový katalog hvězd (katalog byl hotov v roce 1803 a obsahoval 6748 přesně změřených poloh hvězd). V době, kdy katalog vyšel, byl již Piazzi v astronomické komunitě známý, nikoli však pro tento precizní katalog, ale proto, že objevil „chybějící planetu".



Snímky planetky Ceres pořídil na přelomu let 2003 a 2004 Hubblův kosmický dalekohled (rozlišení na snímcích je asi 30 km). Dobře je zachycena rotace planetky.

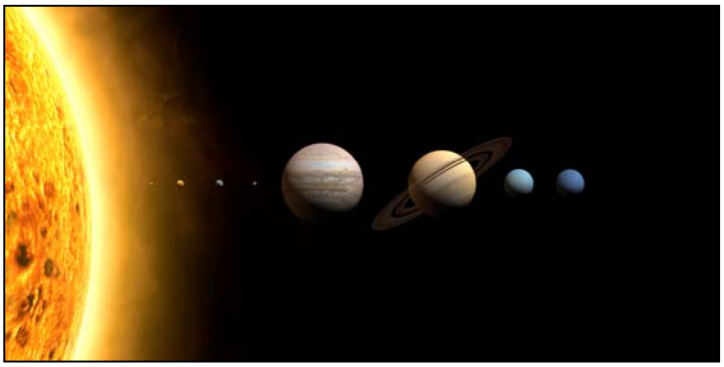
1. ledna 1801 navečer, když v souhvězdí Býka proměřoval polohu hvězdy číslo 87 z katalogu de Lacailleho, objevil neznámý objekt na hranici pozorovatelnosti pouhýma očima. V dalších nocích objekt poněkud změnil polohu vůči ostatním hvězdám, a proto jej Piazzi sledoval až do 12. února. Z pohybu objektu mezi hvězdami Piazzi zprvu jen odhadl a za řadu měsíců mladý Karl Friedrich Gauss vypočítal jeho dráhu ve sluneční soustavě. Když vyšlo, že je 2,77 astronomických jednotek daleko od Slunce a obíhá po téměř kruhové dráze, bylo jasné, že se jedná o „chybějící planetu": ta měla být mezi Marsem a Jupiterem ve vzdálenosti asi 2,8 astronomické jednotky. Dostala jméno Ceres.

Zde je třeba malého vysvětlení: už řadu let někteří astronomové (Johann Titius, Johann Bode a další) upozorňovali na fakt, že mezi Marsem a Jupiterem je poměrně velká mezera. Zdálo se, že vzdálenosti planet od Slunce podléhají jisté matematické zákonitosti; pak by ovšem tuto mezeru měla zaplnit nějaká dosud neznámá planeta. Astronomové dokonce podnikli pokus zorganizovat hledání nové planety – 21. září 1800 se v domě význačného astronoma-amatéra Johanna

Schrötera v Lilienthalu sešlo šest astronomů a diskutovali o nejlepším způsobu hledání planety. Avšak ještě dřív, než se hledací akce mohla rozběhnout, bylo očekávané těleso nalezeno.

Konec příběhu to však ani zdaleka není. V dalších sedmi letech se podařilo ve stejné oblasti sluneční soustavy zaznamenat tři nová tělesa, a objevy dalších na sebe nedaly dlouho čekat. Dnes víme, že Giuseppe Piazzi objevil první planetku, shodou okolností asi tu největší (má průměr přibližně 940 kilometrů). V současnosti registrujeme na půl milionu planetek, z nichž asi čtvrtina má spolehlivě určenou dráhu ve sluneční soustavě (a konečné číslo to ani zdaleka není). I přes tento velký počet jde jen o drobotinu – všechny planetky mezi Marsem a Jupiterem, spojené dohromady, by neměly průměr větší než 1400 kilometrů (náš Měsíc je dvaapůlkrát větší). Ne – Ceres určitě není chybějící planetou. Mezi Marsem a Jupiterem totiž žádná planeta není.

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

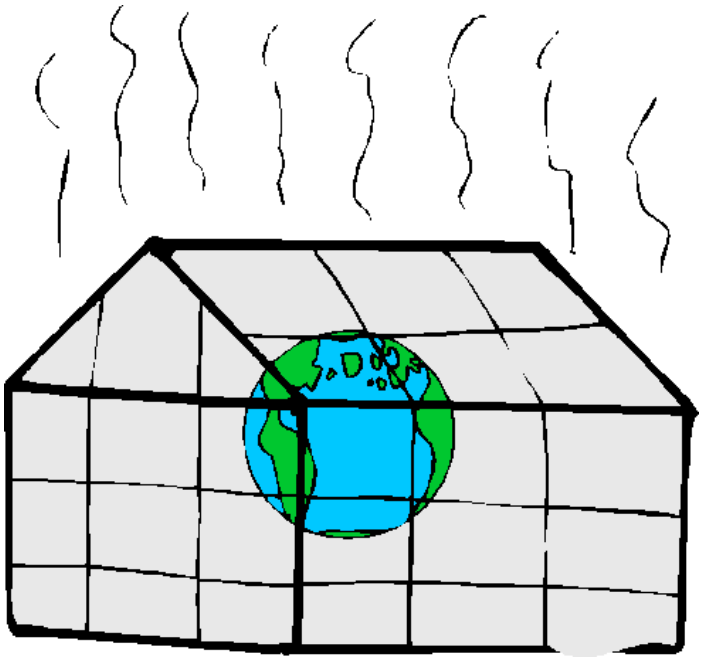


doplněk

# Skleníkový jev

Skleníkový efekt, který může působit v atmosférách planet, zahřívá povrch planety a spodní vrstvy ovzduší na teplotu, která je podstatně vyšší než efektivní teplota planety. Je to důležitý jev, který má (či měl) značný vliv na tepelný vývoj atmosfér Země, Venuše, Marsu a možná i dalších těles.

Část slunečního záření dopadajícího na planetu se ihned rozptýlí zpět do meziplanetárního prostoru a v tepelné bilanci planety se nijak neprojeví. Další část (obvykle dosti malá) se v atmosféře pohltí a zbytek atmosférou pronikne až k povrchu. Povrch toto záření zcela pohltí (většinou jen velice malá část se odráží zpět do prostoru mimo planetu), a tím se také zahřeje. Je-li zahřát, pak také sám září, ovšem vzhledem k teplotám řádově stovky kelvinů nejde o záření viditelné (kde nejvíce září Slunce), ale infračervené.



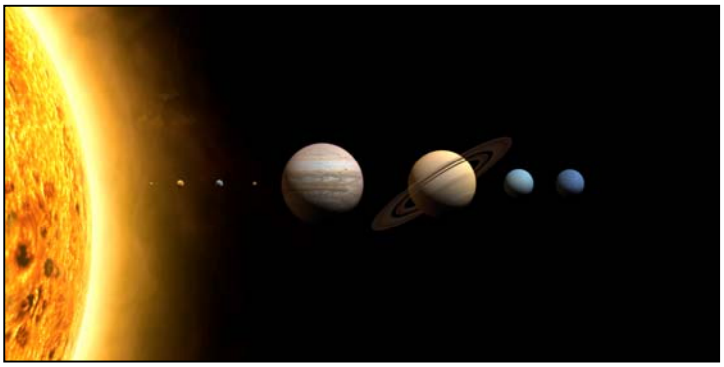
Tímto vyzařováním by se mohl povrch planety opět ochladit. Jsou-li však v atmosféře přítomny ve větším množství zejména tří- a víceatomové molekuly (oxid uhličitý, vodní pára, metan, oxid dusný, ale i chlorofluorované uhlovodíky a příbuzné látky), pak atmosféra toto infračervené záření silně pohlcuje. Tím se zahřívá a zpětně znovu otepluje povrch planety. Vzájemné zahřívání atmosféry a povrchu ovšem nepostupuje donekonečna: za jistou dobu nastane rovnováha mezi energií, přijatou od Slunce ve formě viditelného záření, a energií vyzařo-

vanou z horních vrstev atmosféry v infračerveném oboru spektra zpět do meziplanetárního prostoru. V tu chvíli je ovšem teplota povrchu a spodní atmosféry vyšší než efektivní teplota planety [1]).

Poznamenejme, že molekuly pohlcující infračervené záření mohou být hlavní součástí plynného obalu – atmosféry (to je případ planety Venuše), nebo jsou soustředěny převážně v oblacích (případ naší Země). Ostatně každý z vlastní zkušenosti dobře ví, že noci, kdy je obloha zatažená těžkými dešťovými mraky, jsou teplejší než když se vyjasní, protože atmosféra bez oblak je prostupnější pro infračervené záření, unikající do prostoru mimo Zemi (v suchých pouštích jsou noci *vždy* velmi chladné).

V souvislosti s úvahami o možném globálním oteplování Země, jež může způsobit intenzivní lidská činnost, se často zkratkovitě uvádí, že je třeba zamezit *vzniku* skleníkového jevu. Ten ovšem na naší planetě funguje nezávisle na nás: kdyby ho nebylo, byla by průměrná teplota Země o více než 30 °C nižší než je ve skutečnosti, tedy Země by byla zcela nevhodná pro život. Nebezpečím pro naši civilizaci tedy není samotný skleníkový efekt, ale jen jeho *překotné zvýšení*.

[1]) Často se soudí, že stejný efekt způsobuje zvýšení teploty ve sklenících (proto vzniklo takové pojmenování jevu). Tam by hromadění tepla mělo způsobit sklo. To je však omyl. Sami dobře víme, že teplo je i ve „skleníku“ přikrytého fólií z průsvitné umělé hmoty, která dobře propouští infračervené záření. Pravdou je, že v zahradních sklenících dochází ke zvýšení teploty především proto, že zde neexistuje konvekce, která ve volné atmosféře přenáší značnou část tepla (tedy sklo či fólie zabraňuje vyfukování ohřátého vzduchu ze skleníku).

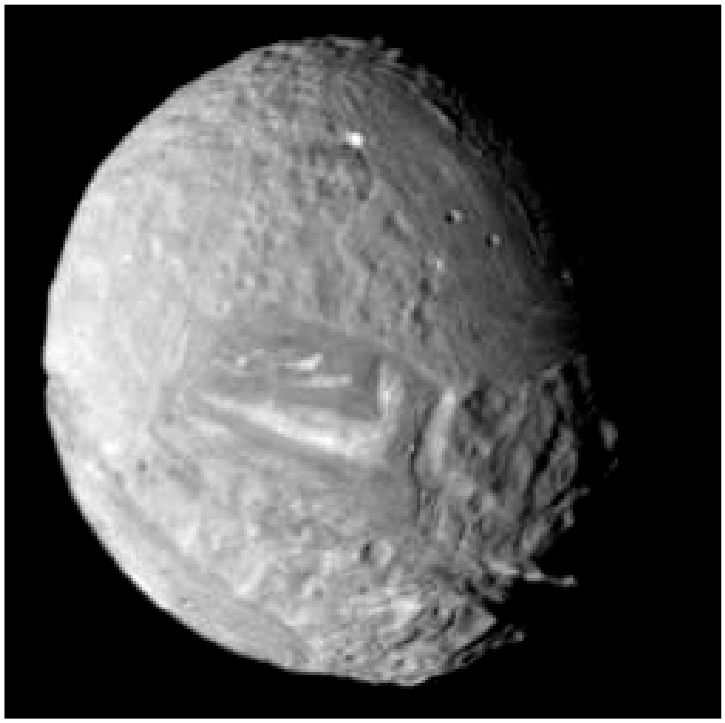


čítanka

# Zdeněk Pokorný: Miranda

Přenesme se do Laboratoře tryskového pohonu v Pasadeně na konci ledna 1986. To byla doba průletu kosmické sondy Voyager 2, jež tu před časem vznikla, kolem vzdáleného Uranu. Když se dopoledne 25. ledna začaly na monitorech objevovat první detailní snímky maličké družice Miranda, všichni mimoděk zpozorněli. Zjevovalo se totiž něco úplně jiného než na prvních roztřesených snímcích, pořízených ještě před pár dny.

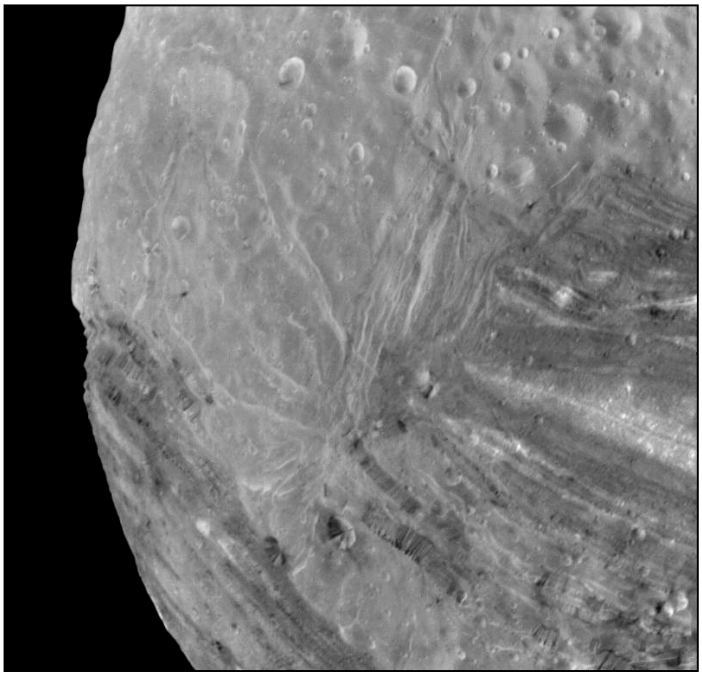
Ačkoli Miranda má jen necelých 500 kilometrů v průměru, je to zvláštní těleso. Její povrch můžeme označit jakkoli, jen ne jako jednotvárný. Hned to první, co na obrázcích vyniká, je velká obdélníková parcela tmavého odstínu, uvnitř které je cosi světlého ve tvaru písmene „V“. Necelou stovku kilometrů na každou stranu od tohoto „véčka“ se objevují dvě zvláštní oblasti, tvořené soustavou rovnoběžných údolí a hřebenů mezi nimi. Ubíhají terénem víceméně přímo a pak se v plavném oblouku zatočí jako závodní dráha na stadiónu. Je to podivuhodná krajina: jako by nějaký obr svými nemotornými prsty uhrabal kousek povrchu této drobné družice. Na zbytku povrchu, který je zvláštním způsobem zmuchlaný, jsou i menší krátery a všelijaké zlomy a praskliny. Miranda se zdá být sbírkou těch nejroztodivnějších terénních struktur, které geologové kdy poznali.



Toto je nejpodivuhodnější těleso ve sluneční soustavě, které jsme dosud poznali, shodují se všichni. Není třeba žádné telepatie, abychom četli myšlenky, které se nyní honí hlavami všech zainteresovaných.

Co představuje ono nápadné „véčko“? A ty podivně uhrabané plochy, kde mezi vrcholem hřebenu a spodkem sousedního údolí je propastný rozdíl až 20 kilometrů? Proč toto vše nacházíme právě zde, na tak maličké družici Mirandě?

Asi po dvou dnech se geologové shodli v tom, že všechny ty zvláštní povrchové útvary jsou téhož druhu, ale různého stupně vývoje. Pokřtili je názvem *circus maximus*, tak jako staří Římané označovali svůj stadión.



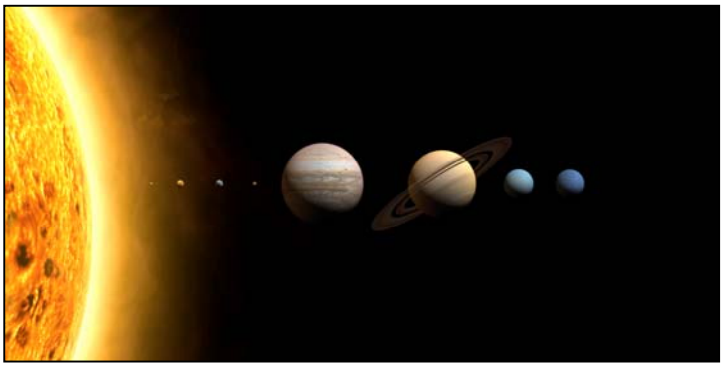
Pojmenovat věc ale nestačí. Musí přijít alespoň pokus o vysvětlení. Po hodinách diskusí vzniká první verze: někdy v raném věku byla družice Miranda rozbita srážkou s jiným tělesem. Má se za to, že původní těleso bylo tvořeno vrstvami z hornin a vrstvami z ledu; proto také některé úlomky byly jen z hornin, jiné pouze z ledu.

Zbytky se po srážce naštěstí nerozletěly nenávratně pryč, ale zůstaly poblíž sebe na oběžné dráze kolem Uranu. Zanedlouho se opět sbalily v jedno těleso, ale tentokrát se kusy ledu a kusy těžších hornin spojovaly zcela náhodně. Bloky ledu uvězněné v nitru se snažily vyplout na povrch. Naopak bloky skal se postupně propadávaly hlouběji a hlouběji pod povrch. Těmito přesuny se uvolňovala gravitační energie, která po přeměně na teplo natavila části povrchu. V kůře vznikala i četná napětí, jež vedla k popraskání kůry uvnitř a okolo oněch *circi maximi*. Možná, že se tyto komplexy puklin a srázů, pruhů ze světlého materiálu utvářejí právě nad bloky z těžších hornin, které se protlačují blíže ke středu znovuzrozeného měsíce.

Každá domněnka má svá slabá místa. U této není jasné, zda vůbec dojde k usazování těžších hornin u středu družice. Miranda je přece jen drobné těleso, její gravitační síla je nevelká. Nakonec je otázkou, zda vůbec došlo k rozbití družice. Někteří geologové namítají, že po znovuvytvoření Mirandy by určitě některý ze zbytků narazil na povrch a vytvořil dosti velký kráter, jenž však na snímcích Mirandy postrádáme. Je snad nějaký takový kráter skryt na té polovině družice, kterou sonda nesnímala?

To je zapeklitá situace. Každý si jasně uvědomuje, že výsledky, které Voyager 2 předal na Zemi, budou po dlouhá desetiletí a možná i staletí jedinými detailními údaji, které jsou k dispozici. Zkrátka až do příletu další sondy k Uranu budeme muset vystačit s tím, co zjistila tato sonda. Stačí to ale k pochopení tak složitého problému, jako je původ Mirandy?

Úryvek z knihy *Příběh nesmrtelných poutníků* (Rovnost, Brno 1995).



čítanka

# Zdeněk Pokorný: Kuiperův pás

Objevy planetek již dlouhou dobu odbornou ani laickou veřejnost nevzrušují, ledaže by se jednalo o něco mimořádného. A právě 30. srpna 1992 k takovému zvláštnímu objevu došlo: David Jewitt a Jane Luuová nalezli pomocí dalekohledu o průměru zrcadla 2,2 metru, umístěného na vrcholku havajské hory Mauna Kea, dosti slabý objekt v jihozápadní části souhvězdí Ryb. K registraci obrazu již nepoužívali klasickou fotografickou emulzi, ale čip CCD, takže si mohli bezprostředně po expozici všechny získané snímky prohlédnout na obrazovce počítače.

Čtyři záběry exponované po 15 minutách ukázaly zajímavý objekt. Pohyboval se na hvězdném pozadí jen velice pomalu, a protože byl právě opačným směrem než Slunce, bylo jasné, že musí být značně vzdálený. Právě pomalý pohyb mezi hvězdami ztěžoval přesné určení dráhy tělesa: bylo nutno vyčkat měsíc, aby se alespoň přibližně – z onoho malého kousku dráhy, který byl sledován – určila vzdálenost objektu. Vyšla 44 astronomických jednotek, což je o plných 14 astronomických jednotek víc, než činí vzdálenost poslední regulérní planety Neptun. Za 292 let těleso zkompletuje celý svůj oběh kolem Slunce.

Jeden z větších objektů Kuiperova pásu: planetka Quaoar (toto je pochopitelně pouze kresba).

Takový objekt se oba astronomové pokoušeli nalézt už pět let. Nově nalezené těleso bylo předběžně označeno jako objekt 1992 QB1, tedy stejně jako planetky. Později dostal pořadové číslo 15 760 (objevitelé kupodivu zatím nevyužili své právo na pojmenování planetky). Je to velmi tmavé a načervenalé těleso o průměru 250 až 320 kilometrů. Objev Jewitta a Luuové byl bezesporu důležitý, a určitě zaujme v historii astronomie stejnou pozici jako nalezení první planetky mezi Marsem a Jupiterem na samém počátku 19. století. Šlo totiž o objev prvního člena z Kuiperova pásu těles.

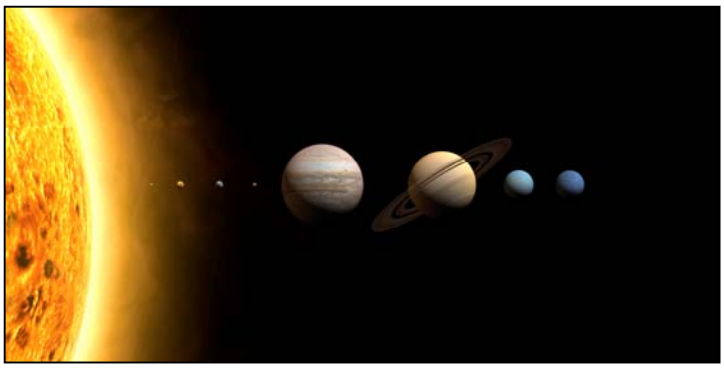
Zde je třeba drobné vysvětlení: v roce 1951 přišel nizozemsko-americký astronom Gerard Kuiper s myšlenkou, že za Neptunem, ve vzdálenostech 35 až 50 astronomických jednotek se nachází poněkud zploštělý oblak těles, která mohou být zdrojem krátkoperiodických komet. Mohly by tam být snad až miliardy takových objektů. Počet je to sice vysoký, ale uvážíme-li rozlehlost prostoru, v němž se nacházejí, jsou tělesa přesto velice daleko od sebe. Proto jen málokdy se k sobě přiblíží natolik blízko, aby se gravitačně ovlivnila. Z nich už nemohou vzniknout postupným nabalováním žádné větší objekty – další planety.

Na objev prvního tělesa za Neptunem (nepočítáme-li Pluta) bylo třeba čekat až do konce srpna 1992. Pak ale v rychlém sledu přišly další objevy. Tělesa z Kuiperova pásu, jak se nyní souhrnně nazývají, jsou pravděpodobně většinou ledové objekty. Označujeme je sice jako planetky, ale někdy spíše než planetku z pevných hornin mohou připomínat slepenec plynu a prachu, tedy kometární jádro, které čas od času trochu plynu uvolní a vytvoří náznak kometární atmosféry. A kolik takových těles vůbec je? Na tuto otázku přesná odpověď zatím neexistuje. Všeobecně se soudí, objekty na Neptunem jsou přinejmenším stejně početné jako drobné planetky mezi Marsem a Jupiterem. V současnosti známe asi tisíc takových těles, ale toto číslo se s rostoucí kvalitou dalekohledů a detektorů bude nepochybně rychle zvětšovat.

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

Srovnání velikostí (odleva) Pluta, planetky Quaoar, Měsíce a Země.

# 7. Zrozeni v chladu a ohni



*Člověk dnes může silou svého poznání pracovat i tam, kde je jeho představivost už bezmocná.*

Lev Davidovič Landau, fyzik (1908 – 1968)

## otázky a příklady

**Otázka 7.1.1.** Astronomové se přou o to, zda Pluto: a) obíhá kolem Slunce; b) má pevný povrch; c) má nějaký satelit; d) je planetou.

**Otázka 7.1.2.** Která fyzikální veličina mohla být u Pluta zjištěna s uspokojivou přesností teprve poté, co byla objevena jeho družice Charon? a) velikost; b) hmotnost; c) stáří.

**Otázka 7.1.3**. Ve srovnání s tmavšími měsíčními moři jsou zbývající světlejší oblasti, tzv. pevniny: a) silně pokryty krátery a starší; b) mladší části povrchu Měsíce; c) hladší, více zarovnaná místa povrchu.

**Otázka 7.1.4.** Jedním z hlavních vědeckých výsledků misí Apollo bylo zjištění: a) podpovrchových vrstev ledu v oblastech měsíčních pólů; b) absolutní stáří měsíčních hornin (stáří uvedené v rocích); c) vulkanické povahy většiny měsíčních kráterů; d) objev prasklin v měsíční kůře.

**Otázka 7.1.5.** Střední hustota Merkuru je vyšší než střední hustota Měsíce, ačkoli celkové rozměry a povrchové struktury na obou tělesech jsou si velmi podobné. O čem to svědčí?

**Otázka 7.1.6.** Je pro astronoma pozorujícího na zemském povrchu snazší prokázat, že v atmosférách jiných planet jsou plyny, které jsou přítomny i v atmosféře Země, nebo je naopak snazší prokazovat přítomnost plynů, které v zemském ovzduší zastoupeny nejsou nebo jen málo?

**Otázka 7.1.7.** V zemských oceánech se při zvýšení hloubky o 10 m zvětší tlak asi o 0,1 MPa. Jak hluboko je třeba se ponořit do oceánu, aby tlak odpovídal současnému atmosférickému tlaku na povrchu planety Venuše?

**Otázka 7.1.8**. Proč je povrch Venuše tak horký? a) Infračervené záření vysílané z povrchu jen nesnadno uniká do prostoru mimo planetu. b) Mohutné vulkanické erupce silně zahřívají spodní atmosféru. c) Venuše pohlcuje téměř všechno záření, které na ni dopadá od Slunce. d) Povrch zahřívají radioaktivní prvky, které se tu pozvolna rozpadají.

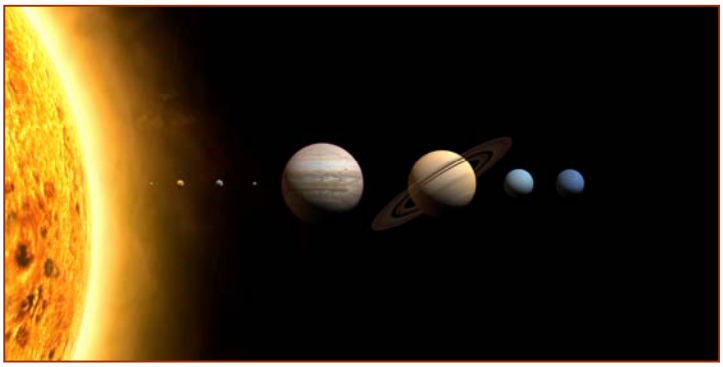
**Otázka 7.1.9.** Proč jsou denní změny teploty na Marsu větší než kdekoli na Zemi? a) Mars rotuje pomaleji než Země. b) Marsova atmosféra je řídká a na povrchu chybí oceány (na Zemi zejména velká tepelná kapacita vody vyrovnává kolísání teplot během dne). c) Mars má méně tepla uvolňovaného z nitra na povrch. d) Mars je tmavší než Země, takže pohlcuje více slunečního světla.

**Otázka 7.1.10.** Je-li na Marsu někde hodně vody, pak bude nejpravděpodobněji: a) v atmosféře (jako vodní pára); b) v polárních čepičkách (ve formě ledu); c) ve vrstvách dnes již věčně zmrzlého ledu pod povrchem; d) na povrchu ve formě sněhu a ledu.

**Otázka 7.1.11.** Proč jsou Saturnovy prstence v některých obdobích poměrně nápadné a v jiných je lze pozorovat jen stěží (nebo dokonce vůbec ne)?

**Otázka 7.1.12.** Na základě čeho usuzujeme, že Saturnovy prstence jsou tvořeny mnoha drobnými částicemi (a tudíž to není pevný jednolitý prstenec nebo několik málo prstenců do sebe vnořených)? a) Vnitřní a vnější části prstenců mají rozdílné oběžné periody ve shodě s Keplerovými zákony. b) Jednolitý prstenec by odrážel 100 % slunečního světla, které na něj dopadá. c) Na snímcích prstenců, které pořídily sondy Voyager a Cassini, jsou vidět velké jednotlivé částice.

**Otázka 7.1.13.** Které z následujících tvrzení je dobrým vyjádřením toho, co lze spatřit na snímcích Uranu z kosmické sondy Voyager 2 či Hubblova kosmického teleskopu? a) Uran je výrazně zploštělá planeta; b) Planeta Uran je obklopena širokými prstenci s úzkými mezerami mezi nimi. c) Na disku planety je řada nápadných tmavších pásů a světlejších zón. d) Na planetě nevýrazné modrozelené barvy nejsou vidět skoro žádné podrobnosti.

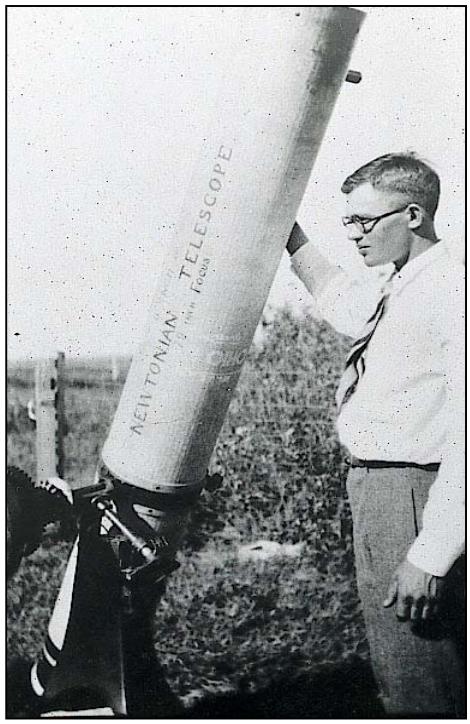


medailon

# Clyde Tombaugh [1])

### (4. 2. 1906 – 17. 1. 1997)

Do dějin astronomie vstoupí Clyde Tombaugh jako objevitel Pluta. Astronomie ho bavila už od dětství, jako dvacetiletý začal se stavbou dalekohledů a na podzim 1928 se svým devítipalcovým přístrojem pozoroval Mars a Jupiter. Kresby obou planet poslal na flagstaffskou hvězdárnu, kde tou dobou hledali pozorovatele, jenž by pracoval s novým fotografickým dalekohledem a pátral po planetě X za Plutem. Po krátké korespondenci byl Tombaugh přijat. Dnes víme, že tato volba byla mimořádně šťastná.




Clyde Tombaugh měl za úkol pořizovat fotografické snímky vybraných částí hvězdné oblohy, kde se předpokládala přítomnost nové planety, a pak po dvojicích fotografie srovnávat ve speciálním přístroji zvaném blinkmikroskop. Pomocí tohoto přístroje lze odhalit všechny objekty, které vůči stálicím mění svou polohu.

Tombaugh o své práci později napsal: „S příchodem podzimu 1929 jsem již dokonale zvládl techniku fotografování a prohlídky desek, práce se stala rutinní záležitostí. Když byly fotografické desky dobře exponovány, mohl jsem je prohlížet šest až sedm hodin denně. V Rybách a Beranu bylo na každé desce zachyceno na 50 000 hvězd, a s každou dvojicí desek jsem se zabýval tři dny. Bylo opravdovým potěšením takové desky prohledávat, vždyť tu byly vidět stovky překrásných spirálních galaxií.

Jak jsme se dostávali do Mléčné dráhy, počet hvězd postupně narůstal. Na každé desce ve východní části souhvězdí Býka a v západní části Blíženců bylo až 400 000 hvězd! Prohlížel jsem je proto po malých skupinkách, asi tucet hvězd naráz. V místech bohatých na hvězdy bylo dokonce zapotřebí použít malou pravoúhlou clonku, aby se člověk v tom labyrintu hvězd vyznal. Proto také rychlost prohlížení desek poklesla a práce s blinkmikroskopem se oproti fotografování zpožďovala.“

[1]) Čti: *klajd tombó.*

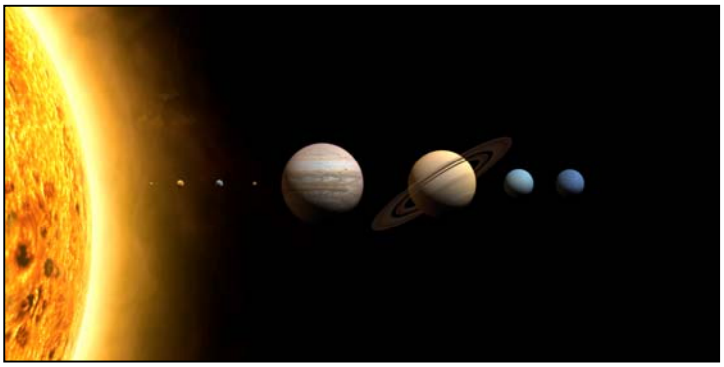
Odpoledne 18. února 1930 objevil Tombaugh na snímcích, pořízených koncem ledna, novou planetu. Po ověření objevu bylo jasné, že se jedná o předpokládanou planetu za Neptunem. Objev byl světu ohlášen 13. března 1930 a planeta byla nazvána Pluto.

Dnes s odstupem času můžeme tvrdit, že to nebyl náhodný objev. Tombaugh pečlivě dodržoval dohodnutou metodu pozorování a snímky pečlivě prohlížel. Že k objevu došlo již po roce hledání, je jistě pozoruhodné, avšak Tombaugh by Pluta určitě nalezl i později. Ostatně, po tomto počátečním úspěchu se hledání dalších těles ve vzdálených částech sluneční soustavy nezastavilo. Až do května 1943 byla systematicky fotografována celá hvězdná obloha viditelná z Flagstaffu. Na 338 párech snímků byl v blinkmikroskopu prohlédnut každý čtvereční milimetr, dohromady plocha 75 metrů čtverečních. Muselo být navzájem porovnáno 90 milionů poloh hvězd. Za 7000 hodin práce u blinkmikroskopu Tombaugh objevil nejen Pluta, ale i mnoho kup galaxií, šest otevřených a jednu kulovou hvězdokupu, jednu kometu, asi 775 planetek. Na deskách vyznačil polohy 3969 planetek, 1807 proměnných hvězd a napočítal 29 548 vzdálených galaxií. Objev Pluta byl výsledkem pečlivé a systematické práce Clyda Tombaugha.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný.

Clyde Tombaugh na Lowellově observatoři ve Flagstaffu.

# 7. Zrozeni v chladu a ohni



## „luštěniny“

Předkládáme vám dvě sady astronomických pojmů – každá sada je zapsána v jednom sloupci. Je třeba, abyste vyškrtali ty dvojice (z každé sady po jednom pojmu, které k sobě logicky *patří* (např. východ, západ). Nakonec vám zbudou dvě pětice pojmů, jejichž *třetí* písmena, vypsaná nejdříve z první a pak z druhé sady, dají jméno význačného astronoma-pozorovatele počátku novověku.

| | |
|---|---|
| ASTRONOM | POLLUX |
| PLYNNÁ MLHOVINA | HUBBLŮV VZTAH |
| KONJUNKCE | KORÓNA |
| OKULÁR | OBJEKTIV |
| CASTOR | OPOZICE |
| LACERTA | PLAZMA |
| POPELAVÝ SVIT | MĚSÍC |
| POHÁR | MIZAR |
| PULSAR | POHYBOVÁ HVĚZDOKUPA |
| PROTOHVĚZDA | NEUTRONOVÁ HVĚZDA |
| ALCOR | SPEKTRUM |

# 7.2. Exoplanety

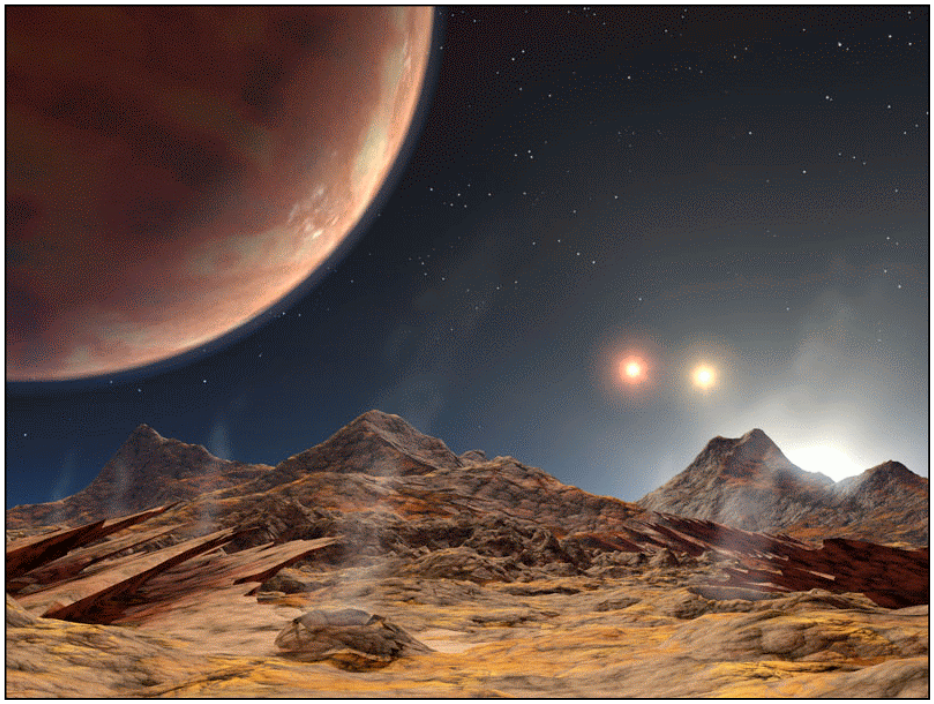
Existují planety také kolem jiných hvězd než Slunce? Tuto otázku si kladli všichni zvídaví odborníci i laici přinejmenším od doby, kdy se Země definitivně vřadila mezi planety a kdy bylo jisté, že planety (a nikoli hvězdy) jsou jediným vhodným domovem živých organismů.

Už přes půl století astronomové s velkou jistotou vědí, jak se tvoří hvězdy. Z modelových výpočtů vyplývá, že při tomto procesu vznikají i tělesa menších rozměrů a hmotností než jsou hvězdy – tedy planety. Nedivme se proto, že astronomové už léta na naši otázku odpovídali kladně: ano, planety kolem cizích hvězd (které budeme nazývat *exoplanetami*) s velkou pravděpodobností existují. Nicméně cesta k prvním objevům cizích planet byla složitá a plná omylů.

### Na stopě cizích planet

*Přímé pozorování* planet jiných hvězd není zatím možné. Sledování nevýrazných světelných zdrojů, jimiž exoplanety bezesporu jsou, v nepatrné úhlové vzdálenosti od relativně jasné hvězdy není ani v možnostech kosmického dalekohledu.

Nadějnější je *sledování pohybu* vytypované hvězdy *na hvězdné obloze:* její vlastní pohyb nebude přímočarý, ale vlnitý, neboť jej bude gravitačně ovlivňovat neviditelná, nicméně existující planeta. Jak ale víme z prvních pokusů o zachycení cizích planet, jsou taková měření krajně obtížná.

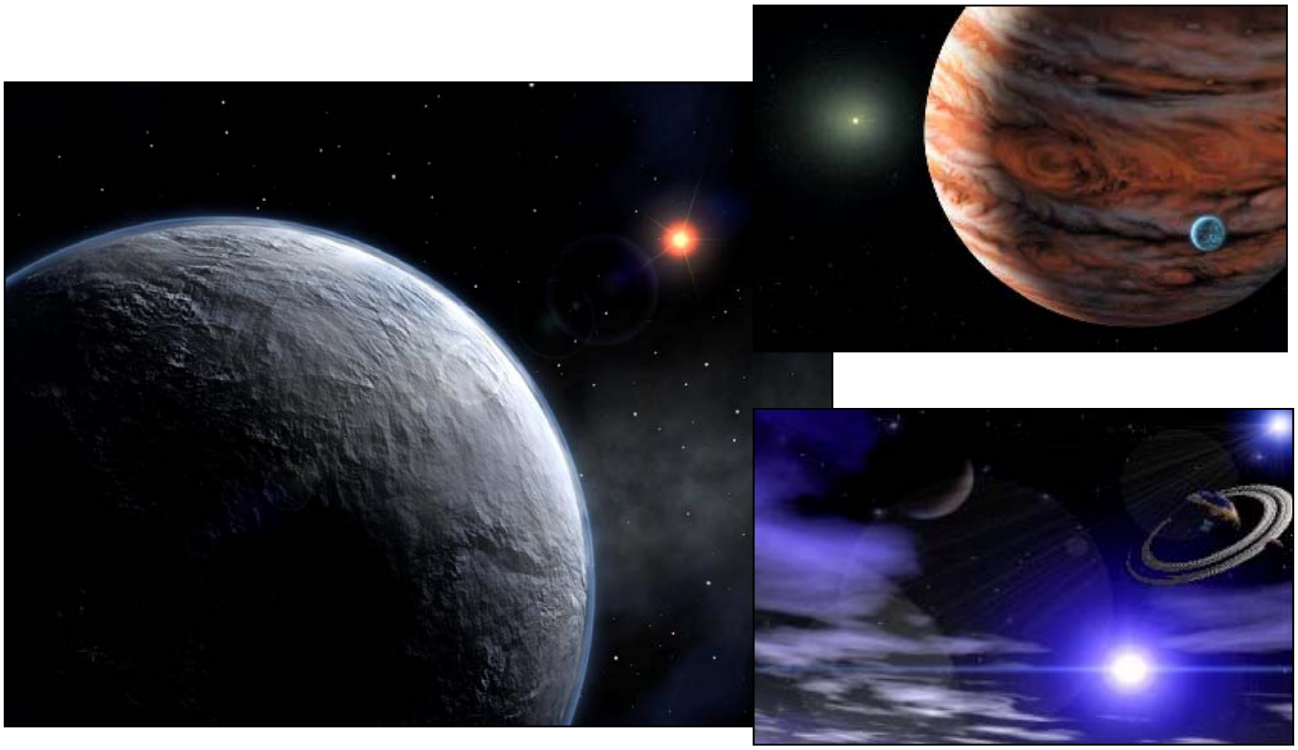


Největší naději na úspěch má *spektroskopická metoda*. Pomocí velmi citlivého spektrografu zjistíme i nevelké změny radiální rychlosti. Jsou-li změny přísně periodické, můžeme je vysvětlit přítomností dalšího tělesa, které sice přímo nevidíme, zato však sledujeme jím způsobené gravitační ovlivňování pohybu hvězdy. Z velikosti a periody změn radiální rychlosti pak už vypočítáme hmotnost tělesa i jeho vzdálenost od hvězdy.

**První objevy**

Spektroskopickému sledování vybraných hvězd slunečního typu se v 80. a počátkem 90. let dvacátého století věnovalo několik pozorovacích týmů. Měly k dispozici vysoce kvalitní spektrografy, umožňující měřit radiální rychlosti s přesností kolem 15 metrů za sekundu, špičkový přístroj na Lickově observatoři dokonce dokázal chybu snížit až na 3 m/s (to odpovídá rychlosti pomalého běhu!). Kdyby kolem těchto hvězd obíhaly planety jako je náš Jupiter, vyvolalo by to změny radiální rychlosti až 15 m/s. Čili při troše štěstí…

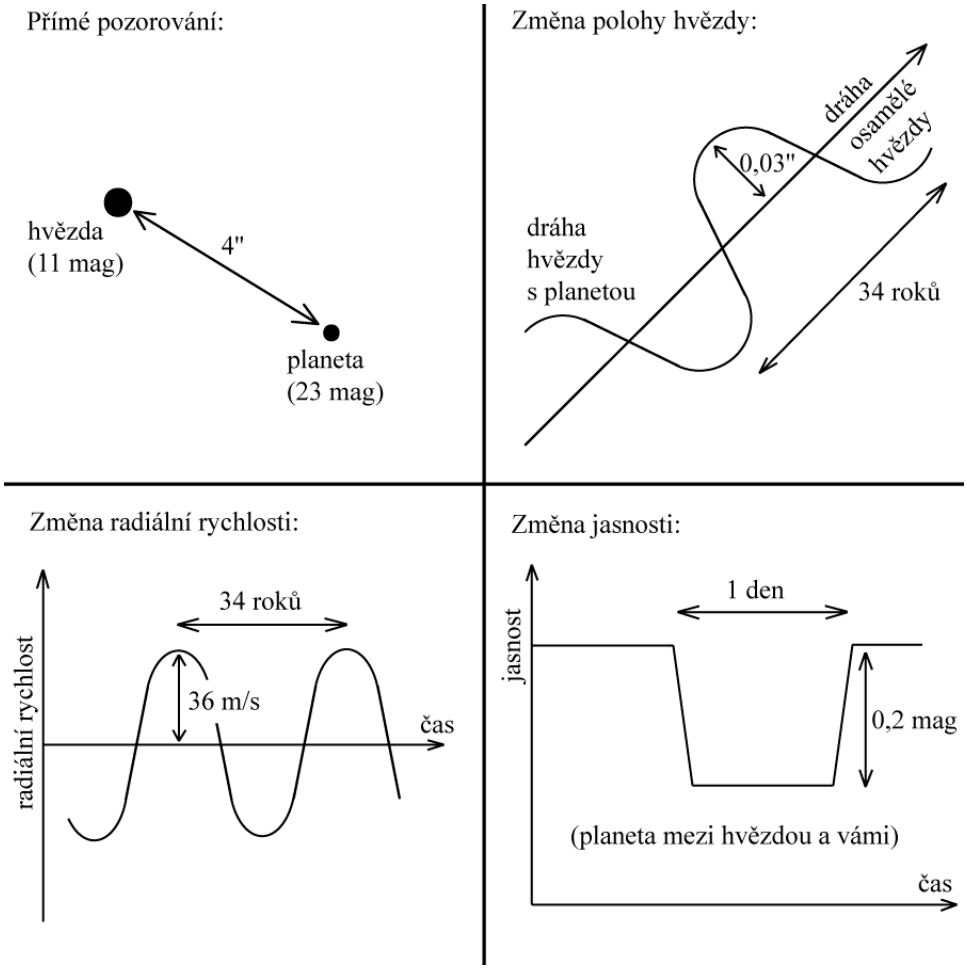
Spektroskopická metoda se opravdu ukázala jako nejnadějnější při hledání planetárních souputníků jiných hvězd. Největší šance na úspěch se dávaly týmu, který vedl Geoffrey Marcy a Paul Butler z Univerzity v San Francisku. Měli k dispozici kvalitní přístroj a do výzkumného programu zahrnuli přes stovku hvězd slunečního typu. Přesto však nakonec v této nevyhlášené soutěži o objev první exoplanety, obíhající kolem hvězdy podobné Slunci, nezvítězili. Jako první oznámil Michel Mayor z ženevské observatoře, že zaregistroval exoplanetu kolem hvězdy 51 Pegasi; ostatně celý příběh si přečtěte v čítance.



Dokud neznáme přesné parametry exoplanet, mohou jejich nákresy vypadat všelijak. Nicméně všimněte si, jak jsou kreslíři inspirováni planetami z naší sluneční soustavy.

**Rozmanité exoplanety**

Po prvním objevu rychle přišly další detekce planet u jiných hvězd. Některé z nich se možná dodatečně ukáží jako omyly, ale první důkazy přítomnosti planet u jiných hvězd než u Slunce jsou na světě. Většinou jde o nepřímé důkazy, existují však i přímá pozorování exoplanet.




Předpokládejme, že kolem hvězdy Proxima Centauri obíhá ve vzdálenosti 780 milionů kilometrů planeta hmotnosti Jupiteru. Zde jsou uvedeny možnosti, jak takovou planetu můžeme odhalit.

I když stále není stoprocentně jasné, co bychom měli ještě považovat za planetu a co již nikoli (zatím to jsou objekty s hmotností menší než 13 Jupiterů, protože v nich se nemohou zapálit termonukleární reakce), ukazuje se naprosto zřetelně, že dosud objevené exoplanety tvoří pestrou skupinu těles. Třeba již samotná exoplaneta u hvězdy 51 Pegasi: je natolik blízko u hvězdy, že se její povrch (nejspíš plynná atmosféra) musí rozehřívat na vysokou teplotu 1000 °C. To zatím plně nezapadá do našich představ o utváření planet, v naší sluneční soustavě jsou velké planety od Slunce mnohem dál.

Kromě obřích exoplanet, bezmála přilepených k mateřské hvězdě (kterým se již běžně říká „horcí jupiteři“), známe i jiné „exojupitery“: jsou to tělesa s velice protáhlou dráhou, která spíše při-

pomíná trajektorie krátkoperiodických komet. To nikdo nečekal, a popravdě řečeno, zatím ani nevíme, jak bychom měli existenci takových těles rozumně objasnit.

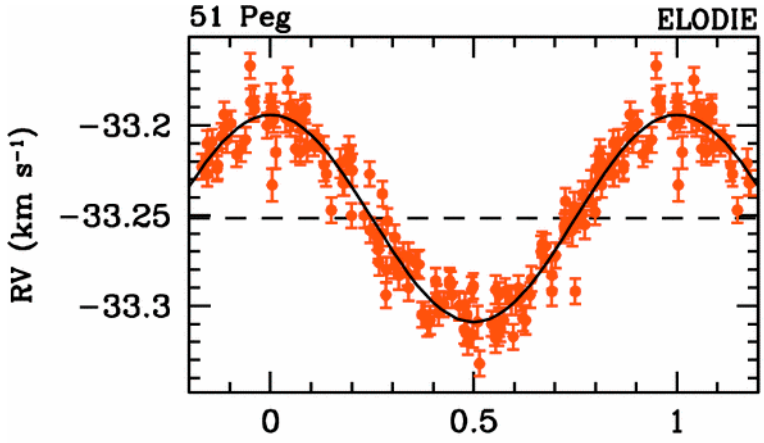
Jistě jste si povšimli, že v souvislosti s exoplanetami jsme až doposud hovořili vždy jen o tělesech srovnatelně hmotných s Jupiterem; co však planety méně hmotné, připomínající naši Zemi? Ty se zatím nepodařilo vypátrat, ale to je určitě pouze *výběrový efekt:* naše současné přístroje totiž tak málo hmotná tělesa nezaregistrují.

Není sporu o tom, že zkoumání exoplanet bude jeden z významných směrů výzkumu vesmíru na počátku 21. století. Hlavním výsledkem dosavadního bádání je poznatek, jak hluboce jsme se mýlili, když jsme soudili, že kolem hvězd slunečního typu musí být planetární soustavy taktéž slunečního typu. Nyní to ale vypadá právě naopak: co planetární soustava, to nezaměnitelný originál.

čítanka

# Zdeněk Pokorný: Závod vyhráli outsideři

Na pracovním semináři o tzv. chladných hvězdách v italské Florencii oznámil 6. října 1995 Michel Mayor z ženevské observatoře, že s kolegou Didierem Quelozem [1]), čerstvým absolventem univerzity, zjistili přítomnost planety kolem hvězdy označované 51 Pegasi. Tato nenápadná, ale pouhýma očima ještě viditelná hvězda je asi 50 světelných let daleko a velice se podobá našemu Slunci. Mayor a Queloz ji sledovali od dubna 1994. Radiální rychlost hvězdy měřili pomocí velmi citlivého spektrografu ELODIE, který byl spojen s dvoumetrovým reflektorem observatoře Haute Provence v jižní Francii. Zpracování získaných údajů pro hvězdu 51 Pegasi ukázalo, že doprovodné těleso má planetární hmotnost (odhadem polovina hmotnosti Jupiteru) a kolem hvězdy obíhá po téměř kruhové dráze o poloměru pouhých 7,5 milionu kilometrů za 4,2 dne.




Křivka radiálních rychlostí (tj. závislost radiální rychlosti na poloze hvězd vůči pozorovateli) pro hvězdu 51 Pegasi, kterou získali Mayor s Quelozem pomocí spektrografu ELODIE.

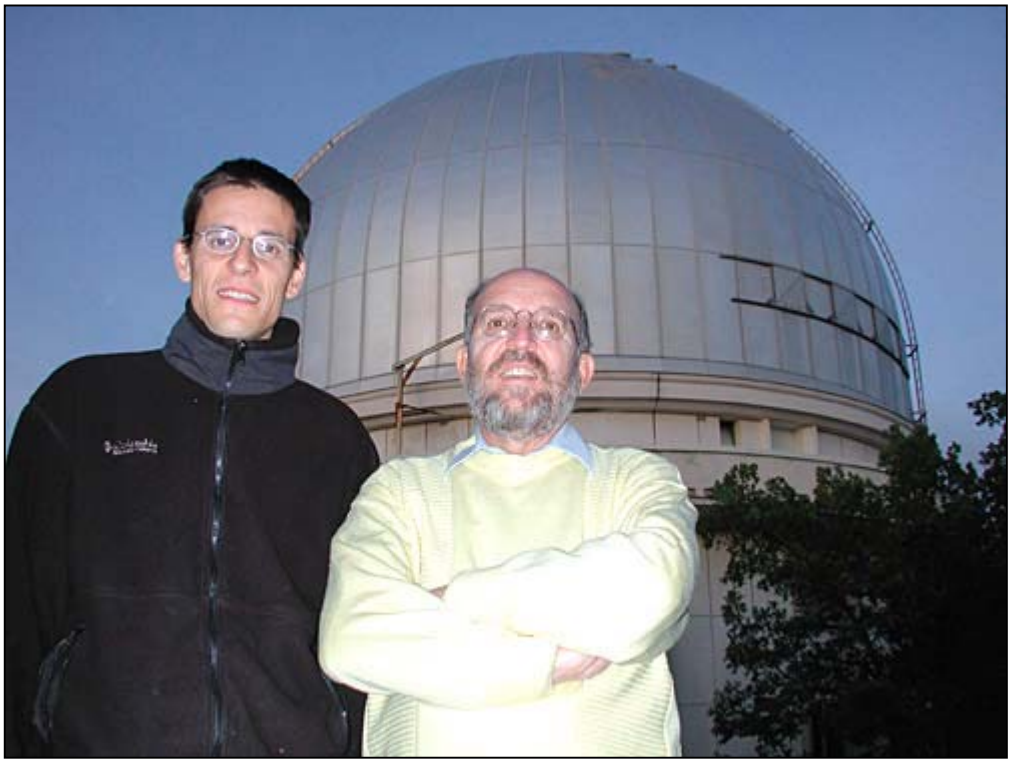
Objev vzápětí potvrdili i Marcy s Butlerem [2]). Proč ale neuspěli oni, nebo někdo jiný, kteří usilovali o objev exoplanety mnohem déle než Mayor s Quelozem? Inu – stali se obětí chyb a předsudků, jimž se dokáže bezezbytku vyhnout jen málokdo. Marcy sice měl hvězdu 51 Pegasi zanesenu do svého katalogu, ale domní-

[1]) Čti: *dydié(r)em kelozem*.
[2]) Čti: *márs*y, *batler*.

val se, že bude-li exoplaneta stejně hmotná jako Jupiter, bude též obíhat podobně daleko s periodou kolem 10 let. Bohatě musí stačit pořizovat spektra řekněme jednou za dva měsíce. Není divu, že perioda pouhých 4 dnů jim nutně musela proklouznout mezi prsty. Další skupina pozorovatelů z kanadského Vancouveru, vedená Gordonem Walkerem [3]), pak hvězdu 51 Pegasi vůbec neměla ve svém pozorovacím programu! V katalogu, odkud Walker přebíral podklady pro výběr, byla tato hvězda omylem zařazena mezi tzv. podobry, což jsou hvězdy absolutně nevhodné pro hledání exoplanet.

Kolem hvězdy 51 Pegasi ještě jednou zavládlo vzrušení, to když význačný kanadský astrofyzik David Gray zpochybnil správnost spektroskopických měření. Údajně se nemění vlnové délky spektrálních čar, ale jen jejich tvar, což způsobují jakési komplexní pulsace v atmosféře hvězdy, nikoli obíhající planeta. Naštěstí se ukázalo, že tentokrát se mýlil velký odborník – neměl k dispozici ta nejlepší pozorování. Nezávislá měření Grayovy závěry nepotvrdila a nakonec chybnou interpretaci přiznal i on sám.

Z připravované knihy *Zlaté století astronomie* (Aventinum, Praha).



Didier Queloz a Michel Mayor před kopulí s dvoumetrovým reflektorem observatoře Haute Provence.

[3]) Čti: *džó(r)dnem vólk(e)rem*.

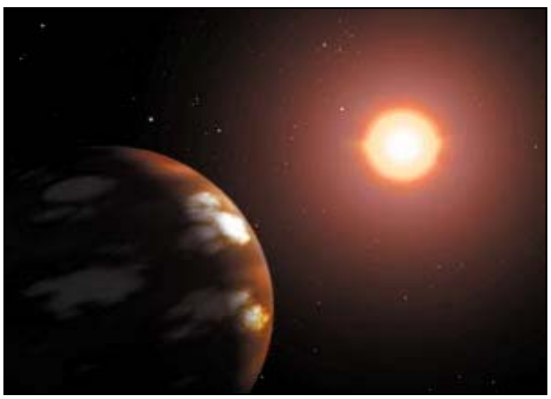
čítanka

# Zdeněk Pokorný: Jaký je rozdíl mezi hvězdou a planetou?

Jak by to bylo snadné, kdyby existovaly jednoduché a naprosto pochopitelné definice těles, jímž říkáme od nepaměti hvězdy a planety. Nechce se věřit, že k takovým definicím astronomie po tak dlouhém údobí nedošla. Nebo snad ano? Jsou dnes známa jednoznačná kritéria, oddělující hvězdy od planet? Tedy především fyzikální kritéria, která by brala do úvahy všechny prapodivné odnože oněch dvou druhů těles?

Pokusme se rozebrat problém tím, že řekneme, co takovými rozlišovacími znaky být nemůže. Nemůže to být tvar tělesa (hvězdy i planety mají tvar koule) ani chemické složení (například Slunce i Jupiter mají přibližně stejné chemické složení). Ani tvrzení, že planety jsou z látky v pevném stavu, zatímco hvězdy jsou plynné, neobstojí – Jupiter i další obří planety nejsou povětšinou v tuhém skupenství. Taktéž rozměr tělesa nerozhoduje – trpaslíčí hvězdy mají rozměry srovnatelné s velkými planetami, a to zcela pomíjíme neutronové hvězdy s průměry řádově desítky kilometrů. Zrovna tak povrchová teplota: některé hvězdy nejsou teplejší než 400 až 500 stupňů Celsia, což je teplota dobře rozpálených kamen, ale ani Venuše není o mnoho chladnější.

Zeptáte-li se na zásadní rozdíl mezi hvězdou a planetou školáka, asi vám sdělí: hvězdy svítí vlastním světlem, planety odraženým (myslí tím nepochybně rozptýlené světlo centrální hvězdy, ale to teď není podstatné). Co je to *vlastní světlo*? Září planety? Nepochybně ano, září přece každé těleso s teplotou vyšší než nula kelvinů. Dokonce Jupiter, Saturn a Neptun vyzařují do prostoru *více* energie, než kolik jí přijímají od Slunce. Tyto planety mají tedy své vlastní zdroje energie!



Jak přibývá informací o hvězdách a planetách (žel – planet známe zatím jen nemnoho), zdá se, že je čím dál obtížnější nějaký obecný rozdíl najít. Přesto však tu je a lze jej shrnout do dvou slov: *termonukleární reakce*. Tyto reakce jako významný zdroj energie probíhají jen ve hvězdách, přesněji – u hvězd se během jejich vývoje tyto reakce někdy zapálí. Jsou období, kdy ani v nitru hvězdy jaderné reakce neprobíhají a hvězda přesto září (např. na počátku svého vývoje, kdy se smršťuje z oblaku mezihvězdné látky), ovšem období, kdy jaderné reakce jsou významným zdrojem energie hvězdy, tu existuje vždy.

Platí to i pro tak exotické objekty, jakými mohou být například dosud neprokázaní hnědí trpaslíci. Naopak u planet se teplota v centru nikdy nezvýší natolik, aby se zde zažehly termonukleární reakce, a to platí i o reakcích s velmi nízkou zápalnou top zápalnou teplotou. K jaderným reakcím nedošlo a nikdy nedojde u Jupiteru, největší známé planety, o dalších planetách ani nemluvě.

Tu je tedy onen hledaný základní rozdíl. Je vlastně dán *hmotností* tělesa. Zdá se, že hranice mezi hvězdami a planetami leží u 0,01 hmotnosti Slunce (nebo jinak: 10 hmotností Jupiteru). Je-li těleso méně hmotné, jsou tlak a teplota i v samém nitru menší, než je zapotřebí k jaderné reakci. Nedojde k ní – a my pak hovoříme o planetě.

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

# 7. Zrozeni v chladu a ohni

## citát

*To jenom pohodlní napsali na mapy: zde jsou lvi – jako vysvětlení, jako omluvu či výmluvu a jako varování, že tam není radno chodit, že ona místa mají už provždy zůstat nepoznána a ponechána lvům.*

*Ale ti druzí tam jdou. Snad je láká poznat neznámé, snad mají rádi nepohodlí, útrapy a strach, a snad dokonce touží právě po jediném: vidět lvy.*

Miroslav Horníček, *Chvála pohybu.*

# 7.3. Zrod planet

Místem vzniku hvězd a planet jsou gigantické plynnoprachové mlhoviny o rozměrech desítek parseků, až milionkrát hmotnější než dnešní Slunce [1]). Jsou tvořeny převážně neutrálním vodíkem; průměrná hustota oblaku činí $10^{-20}$ kg·m$^{-3}$, teplota 50 až 100 K.

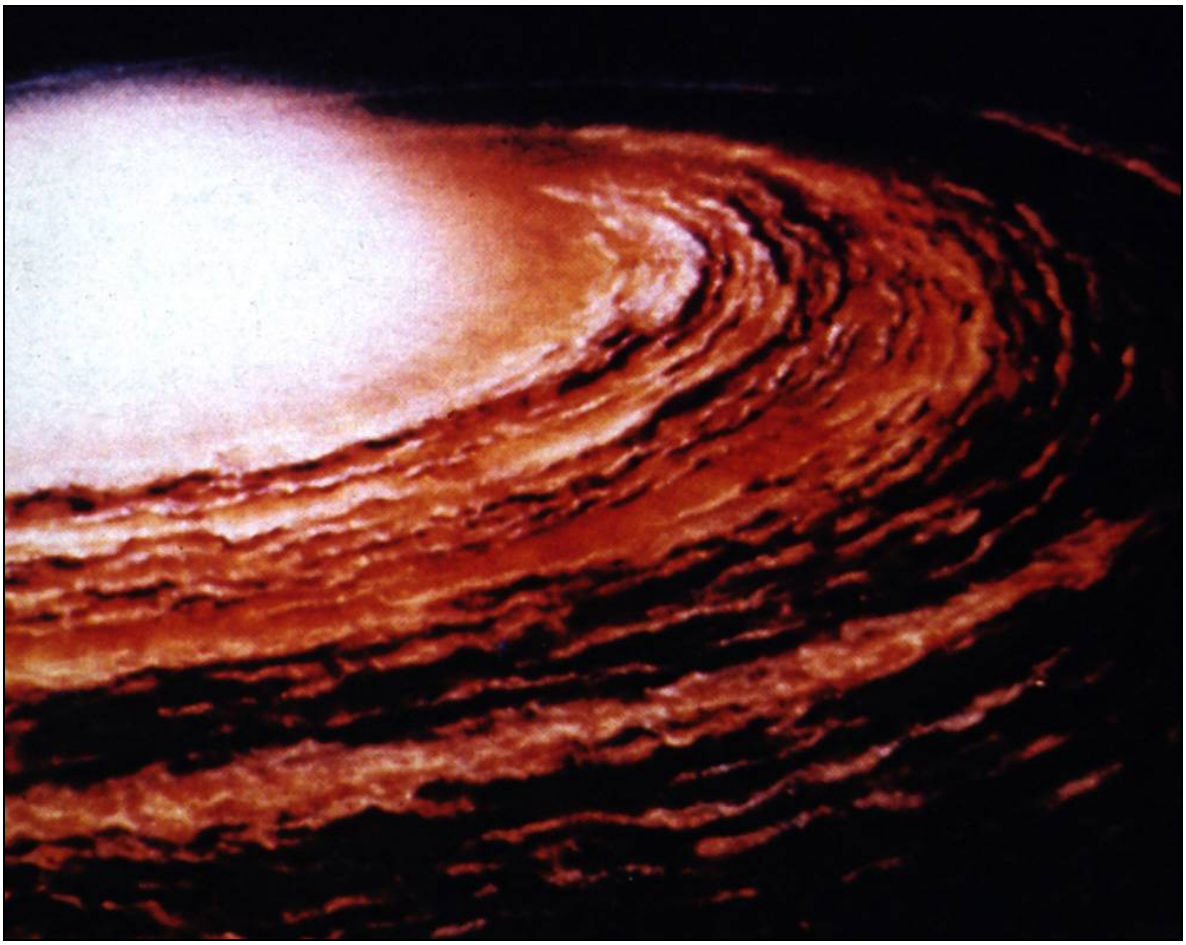
Dojde-li ke stlačení takového oblaku (např. vzájemnou srážkou dvou oblak, rázovou vlnou při výbuchu blízké supernovy...), hustota se zvýší o 2 až 4 řády (dosáhne $10^{-18}$ až $10^{-16}$ kg·m$^{-3}$). Vodík přejde převážně do *molekulové* formy a ochladí se až na 10 K. Takto vzniklá *molekulová oblaka* však nejsou gravitačně stabilní a rozpadnou se na velké množství malých kousků, každý o zhruba sluneční hmotnosti. To vše – zhroucení i rozbití – proběhne v časové škále nanejvýš $10^7$ let.

Část komplexu molekulových oblak v souhvězdí Orionu, známá jako mlhovina M 78. Foto: Daniel Verschatse.

[1]) Typickou plynnoprachovou mlhovinu tvoří převážně *plyn*, kterým je vodík. Jen asi jedno procento (podle hmotnosti) připadá na *prach* v podobě zrnek velkých jednu desetinu mikrometru až jeden mikrometr.

Část takového oblaku o hmotnosti poněkud větší než má současné Slunce se stala před pěti miliardami let naší zárodečnou mlhovinou. Smršťovala se rychle dál: za několik milionů roků se z mlhoviny utvořil tlustý disk o průměru asi 100 astronomických jednotek. Aby se zachoval celkový moment hybnosti disku, počal rotovat. Uvnitř vzrostla hustota látky o 16 řádů (až na 1 $kg \cdot m^{-3}$) a teplota z 10 K na $10^6$ K. Ano, v centru mlhoviny vznikla hvězda – Slunce. Fáze relativně rychlého smršťování zárodečné mlhoviny ustala, jakmile se mlhovina dostala do stavu přibližné hydrostatické rovnováhy.

Hustota v mlhovině se zvětšila natolik, že látka účinně pohlcovala vlastní infračervené záření. Teplota ve středových částech, nedaleko právě vzniklé hvězdy, dosahovala až 2200 kelvinů, směrem od středu klesala a na okrajích byla trvale nízká (jen desítky kelvinů). V důsledku vysokých teplot se v oblaku (přinejmenším v jeho středových částech) vypařily všechny prachové částice.



Toto je pochopitelně jen kresba, ale nějak takto mohla naše zárodečná mlhovina skutečně vypadat.

**Deset nejčetnějších prvků**

Pro rekonstrukci procesu kondenzace látky, jež nastal poté, co se mlhovina přestala smršťovat a tepelným vyzařováním navenek začala chladnout, je velmi důležité znát *chemické složení* zárodečné mlhoviny. Zde je deset prvků seřazeno podle četnosti výskytu.

| Prvek | Relativní četnost (v procentech) |
|---|---|
| vodík | 93,45 |
| helium | 6,42 |
| kyslík | 0,064 |
| uhlík | 0,035 |
| dusík | 0,011 |
| neon | 0,0099 |
| hořčík | 0,0032 |
| křemík | 0,0029 |
| železo | 0,0024 |
| síra | 0,0015 |

**Opět vzniká prach**

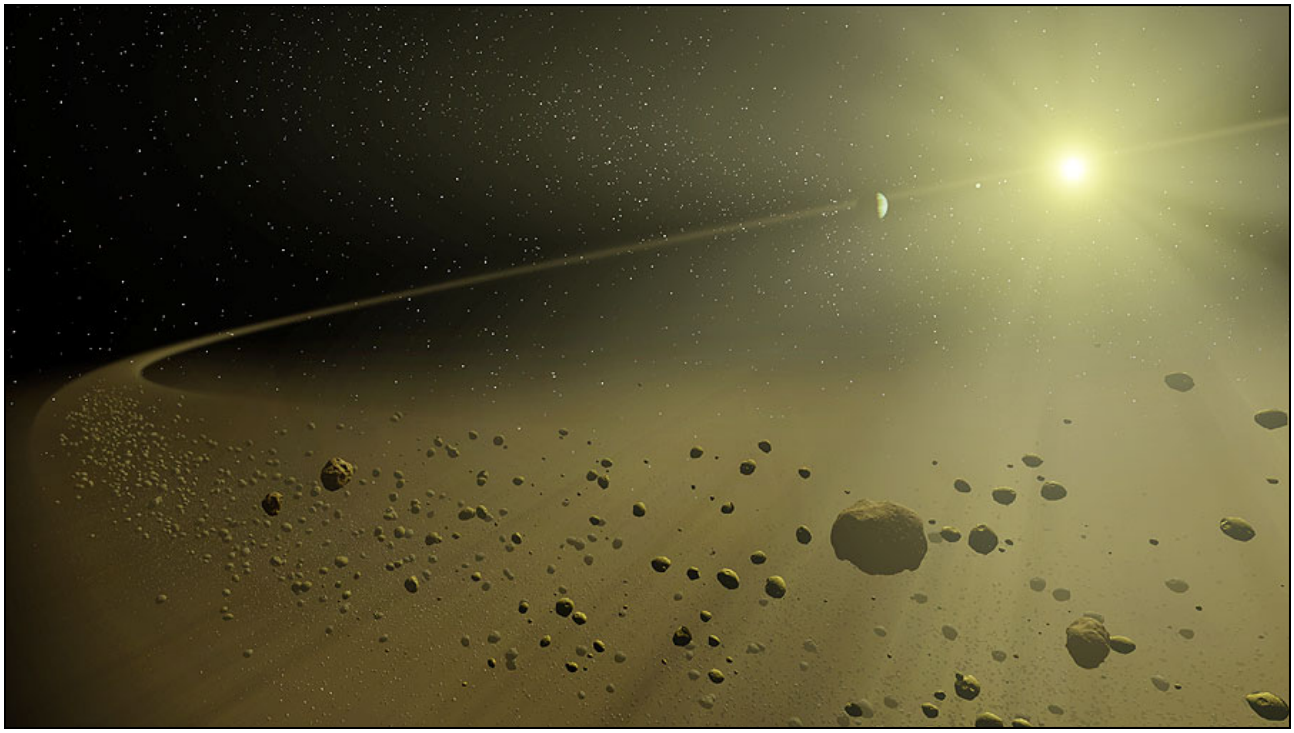
Po ustavení hydrostatické rovnováhy v zárodečné mlhovině její látka počala postupně chladnout vyzařováním navenek. Jak teplota klesala, začala se v mlhovině zase objevovat prachová zrna. Opětná *kondenzace* [2]) – přeměna chladnoucího plynu v pevnou látku – však probíhala v jednotlivých částech disku odlišně. Modelové výpočty ukázaly, že proces kondenzace silně závisí na teplotě, a ta byla v různých místech mlhoviny rozdílná. Ve středových částech, kde byla teplota určitě nejvyšší, se tak mohla tvořit jen zrnka prachu obsahující atomy a molekuly železa, křemíku, hliníku či hořčíku, dál k okraji už byly příhodné podmínky i pro vznik pevných částic z těkavějších látek – uhlíku, kyslíku, sodíku či vodíku.

**Spojování i rozbíjení**

Zárodečná mlhovina byla zpočátku tvořena plynem a prachem, ať již původním mezihvězdným nebo znovu zkondenzovaným. Tehdy ještě nedošlo k formování zárodků planet. Nejprve musela prachová zrna klesnout po spirálovitě stočených drahách do centrální roviny, kolmé k rotační ose mlhoviny (touto centrální rovinou je v naší sluneční soustavě ekliptika). Přitom docházelo k nesčíslnému množství těsných přiblížení a srážek – či spíše spojení, protože ne každá srážka nutně vede k tříštění těles. Když se totiž k sobě dvě tělesa přiblíží relativně malou rychlostí, část jejich kinetické energie se při srážce přemění na teplo a část deformuje tělesa, takže často u nich nedojde k rozbití, ale naopak ke spojení. Když však srážka a spojení nenastane, ale jedno tělísko jen prolétne těsně kolem druhého, mohou se gravitačně ovlivnit tak, že po setkání má některé z nich mnohem vyšší rychlost než předtím. Tyto rychle se pohybující střely pak už doopravdy rozbíjejí terč, pokud jej zasáhnou.

Z pohledu mikroskopického byla tedy zárodečná mlhovina dějištěm neustálých setkání i srážek, rozbíjení i shlukování (*akreci* [3]) ). Jak ukázaly modelové výpočty, spojování naštěstí převládalo nad tříštěním. Vše probíhalo dosti rychle, takže už za pár tisíc (!) let zrna narostla do centimetrových rozměrů a zaplnila centrální rovinu.

[2]) Latinsky *condensus* znamená zhuštěný, stěsnaný.
[3]) Latinské *accretio* znamená přirůstání, přibývání.



**Už vznikají zárodky planet**

Tenká prachová vrstva z centimetrových zrn se hned zase rozpadala do místních shluků, ty s časem rostly a houstly. Byly to už pravé zárodky planet nebo planetárních družic, a bylo jich mnohem více než je dnes známých planet, družic i planetek dohromady. Zárodky v několika etapách narůstaly až do kilometrových rozměrů.

Malá část těchto kilometrových těles se gravitací spojila do zárodků asi deset tisíc kilometrů velkých, což odpovídá rozměrům dnešní Země, Venuše či Marsu. Velká tělesa se utvořila i tam, kde v současnosti nacházíme planety Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Zde se na jádra nabalilo velké množství plynu.

Krátká poznámka na závěr této kapitoly: současné domněnky o vzniku planet mají ještě řadu slabých míst. Například neznáme přesně dobu, po kterou se tvořila malá zrna, větší zárodky a nakonec i celé planety. Obecně však platí, že poslední fáze akumulace látky byla nejpomalejší. Řádový odhad trvání: sto milionů roků, možná o trochu déle, ale určitě ne více než půl miliardy let. Navíc všechny procesy nemusely probíhat v celé sluneční soustavě zaráz, někde se mohly opožďovat. Neberte právě popsaný scénář vzniku planet jako definitivně platný!

# 7. Zrozeni v chladu a ohni

*Metoda je důležitější než objev, neboť správná metoda vede k novým, ještě cennějším objevům.*

Lev Davidovič Landau, fyzik (1908 – 1968)

## otázky a příklady

**Otázka 7.3.1.** Předpokládejme, že zárodečná mlhovina, z níž se utvořila naše sluneční soustava, nebyla o mnoho hmotnější než současné Slunce. To – jak známo – obsahuje řádově $10^{57}$ atomů. Jak velká musela být původně tato mlhovina (tvaru koule a stejného chemického složení jako Slunce) při průměrné hustotě 10 atomů v jednom $cm^3$?

**Otázka 7.3.2.** Z faktu, že naše sluneční soustava existuje bezmála pět miliard let, plyne jisté omezení na některou (či některé) z fyzikálních veličin, popisujících naše Slunce. Vyberte ji z tohoto seznamu a zdůvodněte, proč tomu tak je: *objem, povrchová teplota, hmotnost, chemické složení, úhlová rychlost rotace*.

**Otázka 7.3.3.** Dokážete vysvětlit, proč se z původně kulového rotujícího oblaku rozptýlené látky, jakým byla například zpočátku zárodečná mlhovina, vytvoří po čase relativně plochý rotující disk?

**Otázka 7.3.4.** Z čeho plyne, že po smrštění by mlhovina měla rotovat rychleji než před smrštěním?

**Otázka 7.3.5.** Rovina, do níž při tvorbě zárodků planet klesala po spirálovitých trajektoriích většina prachových zrn v zárodečné mlhovině, odpovídá dnešní _____.

**Otázka 7.3.6.** Odhadněte (řádově), kolik těles kilometrových rozměrů bylo zapotřebí k utvoření planety velikosti dnešní Země.

**Otázka 7.3.7.** Jsou-li naše představy o vzniku planetární soustavy správné, pak lze očekávat, že větší tělesa složená z lehčích a těkavějších látek se budou nacházet ve [vnitřních; vnějších] částech sluneční soustavy, protože v zárodečné mlhovině tu panovala [větší; menší] teplota než v oblasti ležící blíže ke středu sluneční soustavy.

**Otázka 7.3.8.** Sluneční soustava se utvořila z převážně vodíkového molekulárního oblaku, který byl [hustší; řidší] a [chladnější; teplejší] než okolní oblak atomárního vodíku.

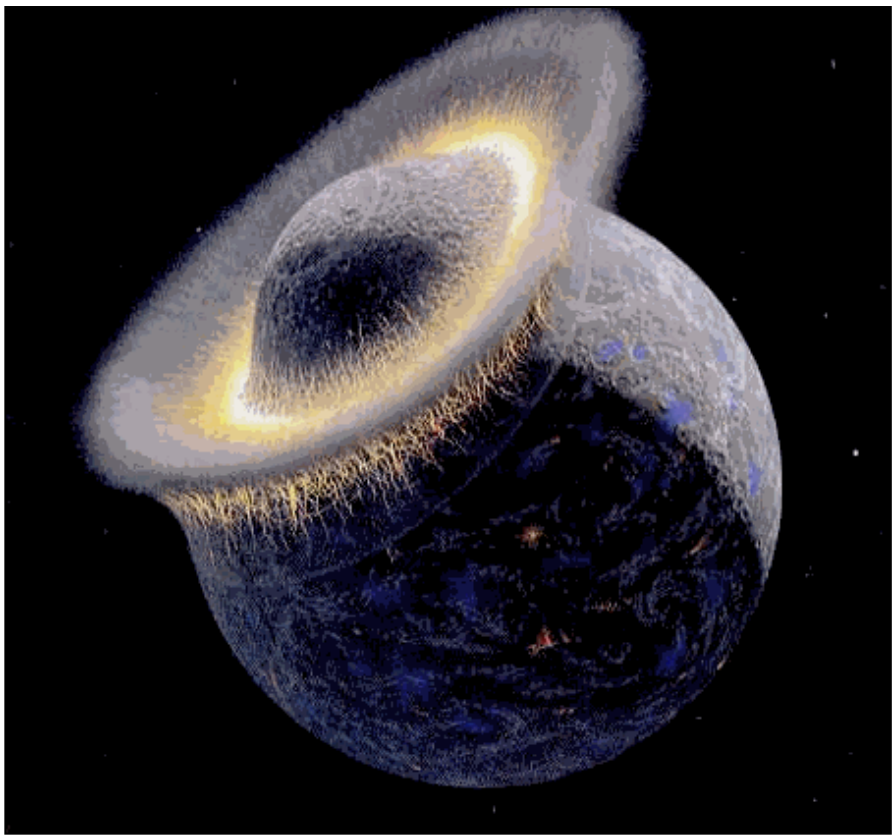
**Otázka 7.3.9.** Osvěžme si v paměti, co rozumíme pod pojmem *akrece*. Je to jen jediná ze tří nabízených možností. Tedy: akrece je: a) vznik pevných částic z původně plynné látky; b) usazení pevných částic zárodečné mlhoviny do jedné roviny (ekliptiky); c) gravitační zachytávání okolní látky větším tělesem.

# 7.4. Vznik Měsíce a dalších drobných těles

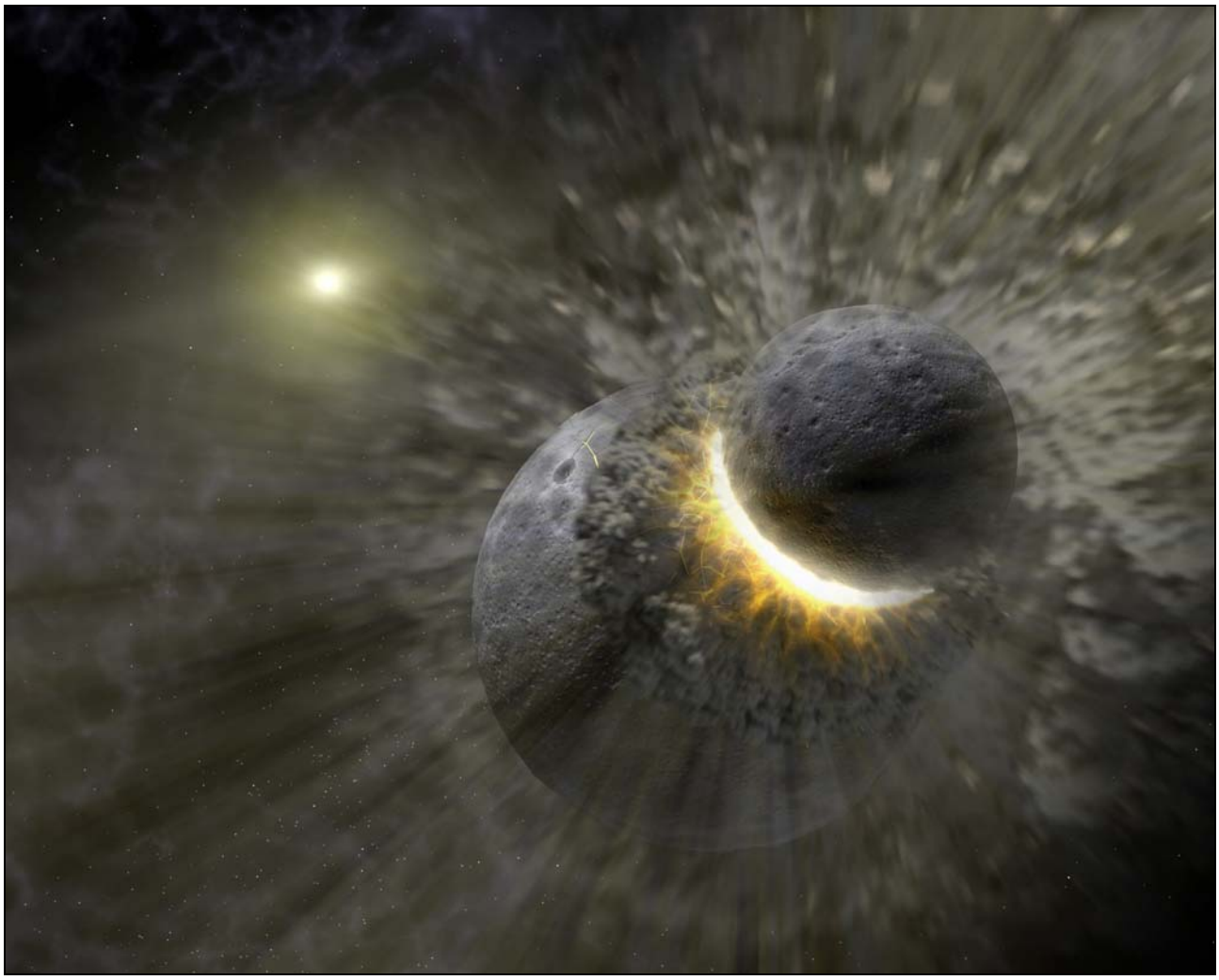
Přenesme se nějakým strojem času o téměř pět miliard roků do minulosti. V jedné části naší Galaxie se zhroutil oblak mezihvězdné látky. Uprostřed zárodečné mlhoviny vzniká nová hvězda – Slunce, a kolem ní i spousta drobných tělísek. Některá z nich dosti rychle narůstají až do velikosti dnešních planet.

**Obří srážka**

Právě těmito dvěma slovy můžeme nejvýstižněji popsat domněnku o vzniku Měsíce. Slunce existuje již asi 50 milionů roků a do současnosti zbývá bezmála 4,6 miliardy let. Planety jsou zhruba ve stejných pozicích jako dnes, také jejich velikosti se již blíží současným. Přesto bychom je poznávali s obtížemi. Tak třeba Země: pod kalnou atmosférou bohatou na sloučeniny křemíku jsou ukryty rozsáhlé oceány žhavého magmatu. Celých padesát milionů roků je naše budoucí planeta bombardována většími i menšími balvany, které v tak hojném počtu zbyly po utvoření planetárních zárodků. Na ten největší zásah však Země teprve čeká…



První náraz přišel z boku. Těleso velikosti asi tak dnešního Marsu, s desetinou hmotnosti Země, které přiletělo nevelkou rychlostí 10 kilometrů za sekundu, se o mladou planetu jen lehce otřelo. To ale již stačilo k jeho gravitačnímu zachycení. Projektil oblétl Zemi o sto osmdesát stupňů a přesně na druhé straně se definitivně zabořil do její kůry. Nastala gigantická exploze, protože se náhle uvolnilo obrovské množství energie: zemská atmosféra zmizela, celá naše planeta se prudce ohřála. Projektil a více než polovina látky, tvořící naši planetu, se proměnily v horké magma. Na oběžnou dráhu kolem Země se vymrštilo obrovské množství žhavých hornin, které ještě před chvílí tvořily kůru a plášť Země i vlastní projektil. Za několik málo hodin se kolem naší planety vytvořil prstenec z horkého materiálu, nesrovnatelně hustší a hmotnější než je dnešní Saturnův.



Obří srážku Země s poměrně velkým tělesem, k níž došlo před 4,6 miliardy roků, si můžeme znázornit jen kresbami, které se sice snaží tehdejší situaci zachytit co nejlépe, ale objektivním svědectvím být nemohou.

Disk žhavé látky, která teď obíhala kolem mladé Země, se ovšem rychle proměňoval. Značná část materiálu se snad za desítku let či dokonce ještě dřív sbalila v jediné těleso; tak se zrodil Měsíc. Těleso tehdy nebylo příliš vzdáleno od Země, od povrchu naší planety ho dělilo možná jen 20 tisíc

kilometrů. Na Měsíc přitom stále dopadaly velké kusy materiálu; tyto *impakty* [1]) ještě delší dobu udržovaly měsíční těleso ve zcela roztaveném stavu [2]).

**Na řadě jsou družice planet a planetky**

Pomineme-li Měsíc, družice větších rozměrů doprovázejí jen vzdálenější planety, Jupiterem počínaje. Vznik těchto družic byl zřejmě obdobou zrodu samotných planet: část plynu a prachových částic padajících na budoucí planetu vytvořila rotující obálku, v níž vznikaly družice.

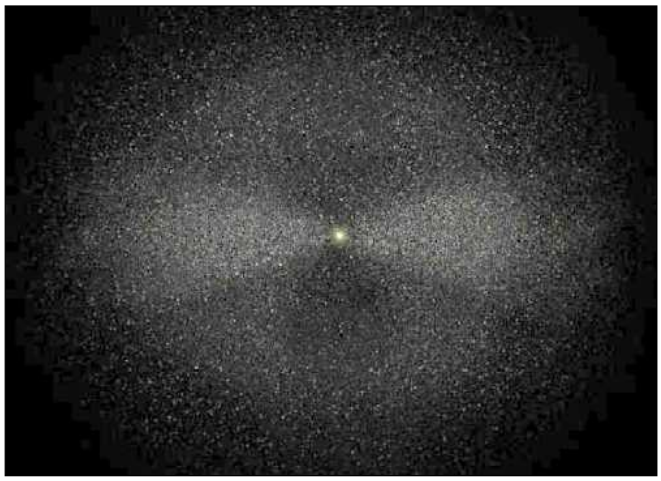
Když se Jupiter v zárodečném oblaku rychle smršťoval, na krátký čas zvýšil svůj zářivý výkon možná až na tisícinu dnešního výkonu Slunce. To zanechalo své stopy na galileovských satelitech, které právě vznikaly. Prudké zvýšení teploty způsobilo, že družice blíže ke středu mlhoviny ztratily těkavé látky a skládají se jen z pevných, těžko se vypařujících látek, zatímco objekty vzdálenější obsahují i lehčí a těkavější látky (např. ve formě ledu) [3]). Přímý průzkum galileovských družic tuto domněnku potvrzuje.

Malé družice nepravidelného tvaru se utvořily mimo tento zárodečný planetární oblak a planeta je zachytila teprve dodatečně. Může jít též o zbytky těles větších rozměrů, jež se tu srazila a roztříštila. V případě planetek je téměř jisté, že se nejedná o rozbité velké těleso, neboť pozorujeme objekty různého složení, nakupené jen v určitých oblastech pásu planetek. To by při rozbití většího tělesa nenastalo.

**O původu komet**

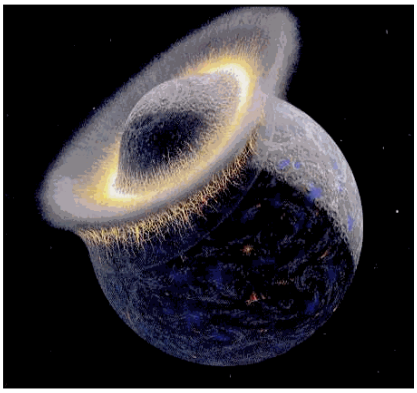
Jádra komet vznikala pravděpodobně současně se zárodky planet. Gravitačním působením obřích planet byla vyhnána na okraj sluneční soustavy, do vzdálenosti asi 50 000 až 150 000 astronomických jednotek. Tady jeden až dva biliony kometárních jader vytváří tzv. *Oortův oblak komet*.

Zbytky těchto těles ovšem zůstaly poblíž planetárních drah, jen kousek za Neptunovou. Zde nacházíme další méně hmotný prstenec těles, tzv. *Kuiperův pás*. Mohly by tu být snad až miliardy kometárních jader a planetek. V každém případě jsou jádra komet příkladem látky, jež se utvářela na samých počátcích existence sluneční soustavy (a příliš se od té doby nezměnila). Proto je výzkum komet tak důležitý.



Představa Oortova oblaku komet.

[1]) Střet cizího tělesa s povrchem planety nebo družice není pouhým dopadem, při němž se jen rozhrne hornina, je v pravém slova smyslu explozí. Geologové používají pro tento složitý proces označení „impakt“.
[2]) Je zajímavé, že tato hypotéza o původu Měsíce spatřila světlo světa až dvanáct roků po odletu posledního Apolla z měsíčního povrchu. Zazněla na vědecké konferenci, konané v roce 1984 v městečku Kona na Havajských ostrovech.
[3]) U Saturnu k tak velkému zahřátí planety při smršťování nedošlo, takže i blízké ledové satelity tuto fázi přečkaly.



čítanka

# Petr Jakeš: Hypotéza jako vtip

Seděl jsem v pracovně ústavu pro výzkum Měsíce, byl pozdní večer, doba, kdy přicházel ze své pracovny můj přítel a spolupracovník Ross Taylor, abychom vypili toho dne poslední kávu. Oba jsme byli v té době v Houstonu bez rodin (Ross Taylor je z Austrálie) a dávali jsme přednost práci v ústavu před vysedáváním doma v bytě, kde nepříjemně hučel klimatizátor a kde samota na člověka víc doléhá.

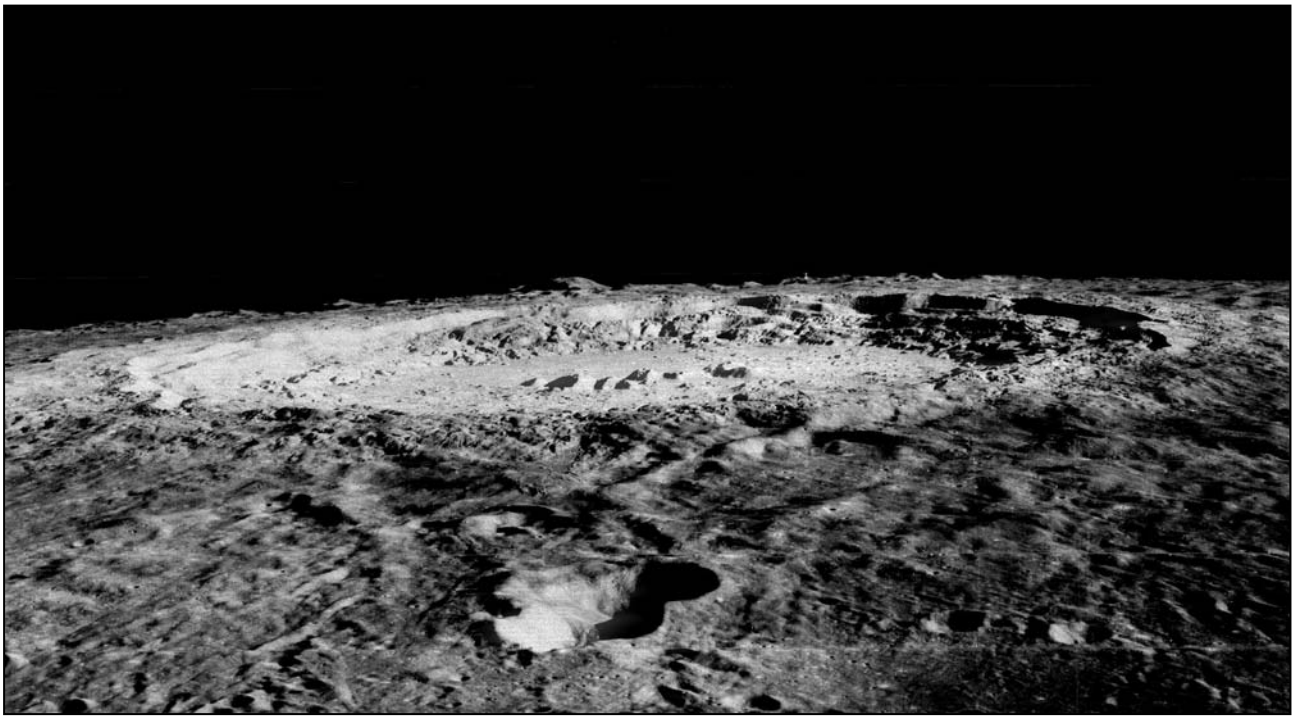
Ross je původem Novozélanďan, syn farmáře, a také tak trošku vypadá. Je to člověk všestranných zájmů v oblasti geologie, ale i mimo ni – zajímá ho hudba (zejména starší) i sportovní automobily. Okamžitě po Apollu 11 napsal první větší knihu o mineralogii a petrografii měsíčních hornin. Teď tu byl, aby knihu přepsal a aby shrnul do únosné formy výsledky, jež se za pět let intenzivního výzkumu Měsíce nakupily. Sám jsem v té době pracoval na problému „hlinitých bazaltů“, tedy hornin, jež jsou charakteristické pro Mare Fecunditatis, místo přistání Luny 16. Hledal jsem je i v ostatních vzorcích, zejména v materiálu z výpravy Apolla 14.

Ross vešel a místo o počasí nebo byrokracii či o některé z politických událostí začal hned o své práci na knize. „Víš, Petře, že by se mi ta kniha dělala daleko líp, kdybych měl napsanou poslední kapitolu, z čeho vlastně celý Měsíc je a jak vznikla jeho současná stavba? Potřeboval bych si předem vytvořit představu o tom, jak vlastně vypadá.“

Nemám daleko k velikášství a bez přemýšlení jsem prohlásil: „Já ti takový model vytvořím. Na příští konferenci kdekdo přijde s novou koncepcí vzniku a vývoje Měsíce, proč bychom my nemohli udělat něco podobného?“ S Taylorem jsem se dobře znal již od roku 1967, a proto jsem si hned vzápětí uvědomil, že tenhle vtip vezme vážně.

Ten večer jsme snad ani o našem „plánu“ víc nemluvili, ale když jsme kolem půlnoci odjížděli z ústavu, zdálo se mi, že na tom vtipu, tak jako na každém vtipu, něco je. Proč bychom se vlastně neměli pokusit?

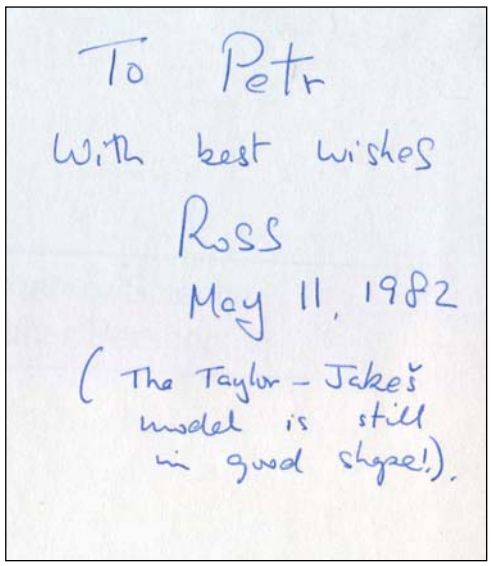
Nevím, zda to bylo hned následující den, ale myšlenka vytvořit ucelenou hypotézu o vývoji Měsíce posedla nejen Rosse, ale i mne. Hovořili jsme o tom jako o hotové věci, i když na zelené tabuli v pracovně bylo zatím jen pár velice naivních poznámek. Z těchto bodů se po několika dnech vytvořila kostra budoucí práce; zatím jsme ovšem nevěděli, zda vůbec přežije kritiku našich nejbližších spolupracovníků, z nichž mnozí patřili v té době mezi ostřílené harcovníky měsíčního výzkumu. Bylo nám jasné, že náš „model“, jak jsme mu říkali, musí mít mnoho vlastností, které dosud vysloveným hypotézám chyběly.



Kráter Copernicus z bočního pohledu (snímek pořízen sondou Lunar Orbiter 5).

Najednou jsme zjistili, že žijeme jenom modelem. Diskutovali jsme denně několik hodin, běhali do knihovny, opatřovali detaily a na obědy a večeře jsme začali chodit ve dvojici. Na tabuli přibývalo poznámek a obrázků, jež by mohly přispět ke zdravé konkurenci modelu. Uprostřed pilné a nadšené práce však přišly okamžiky nejistoty. Bylo třeba informovat kolegy, protože jsme svou myšlenkou byli natolik posedlí, že bychom se mohli stát nekritickými sami k sobě. Strach, že by nám snad někdo nějakou myšlenku odcizil, jsme neměli. Na něco takového jsem nikdy nevěřil. Badatel, který je schopen formulovat své myšlenky tak, aby mu je někdo druhý mohl „ukrást“, je vlastně se svým myšlením už o něco dále a myšlenky, které vložil do vět odborného referátu, ho obyčejně již nezajímají. Navíc jsem měl vždy dojem, že žádná myšlenka není natolik originální, aby se k ní někdo jiný se stejnou erudicí nemohl propracovat zcela nezávisle také.

Kritika od spolupracovníků je podle mého soudu jedním z nejdůležitějších bodů vědecké práce. Je-li upřímná, jak tomu obyčejně bývá, a je-li od těch, kteří pracují na podobném problému, pak často přispěje k vylepšení celého textu referátu či příspěvku, jeho stavby i jasnosti. O některých badatelích se dokonce tvrdí, že pracují tak, že napíší pár neurovnaných a mizerných myšlenek na papír, pak svou stať rozmnoží, a místo aby ji uložili do zásuvky psacího stolu a nechali uzrát, rozešlou ji k posouzení kolegům. Ti připíší „konstruktivní kritiku“ a z původně mizerného článku je solidní příspěvek. Často se pak ve vědecké práci objeví jen poděkování kolektivu spolupracovníků. To je jeden z důvodů, proč u řady odborných článků čtu úvodní slova a poděkování dřív než vlastní článek.



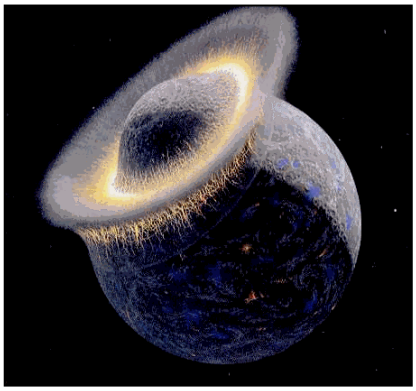

Věnování Petru Jakešovi v jedné knížce od Rosse Taylora (určitě mu rozumíte: *Taylorův–Jakešův model je na tom stále dobře!*, píše Taylor).

Nakonec musím uvést, co z naší hypotézy zbylo: pouhých patnáct minut času pro Rosse Taylora, aby celou „všeshrnující“ hypotézu přednesl na houstonské konferenci o Měsíci, a třicet minut pro mne, abych ji přednesl na moskevské sovětsko-americké konferenci o kosmochemii.

Pak už následovaly běžné kroky. Otištění článku v odborném tisku – jednou anglicky a jednou rusky. Nakonec něco, co jsme nečekali. Ohlas. Vyjádřili se nejen ti, kteří nám fandili, ale i ti, které jsme neznali, anebo i ti, kteří nám nebyli nakloněni. Vyjádřili se vesměs pozitivně. Ale to už není téma pro autora jedné z mnoha hypotéz o vzniku a historii Měsíce.

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

# 7. Zrozeni v chladu a ohni



*Je příjemné si na pravém místě zablázniti.*

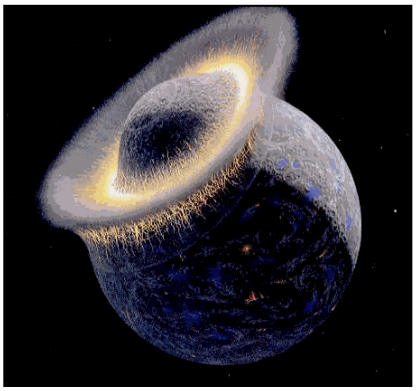
Quintus Flaccus Horatius, básník (65 – 8 př. n. l.)

## otázky a příklady

**Otázka 7.4.1.** Máte-li správnou představu, kolikrát jsou nejbližší hvězdy od nás dále než Slunce, bez problémů odpovíte, jak asi daleko (řádově) jsou od Slunce jádra komet, která se nacházejí v tzv. Oortově oblaku: a) stovky AU; b) desetitisíce AU; c) desítky milionů AU.

**Otázka 7.4.2.** Které z následujících tvrzení *není* pravdivé? a) Jupiter pravděpodobně vznikl o něco dříve než Země a další terestrické planety. b) Původní nebo jen málo přeměněný materiál, z něhož se tvořily planety, může být uložen v jádrech komet. c) Bez působení magnetického pole by nemohly vzniknout dostatečně rychle zárodky planet.

**Otázka 7.4.3.** K tomu, aby planeta zachytila kolem letící těleso (např. planetku) a donutila je, aby nadále obíhalo kolem ní jako satelit, je třeba prolétající těleso nějakým způsobem zbrzdit. Proč k tomu nestačí sama přitažlivost planety?

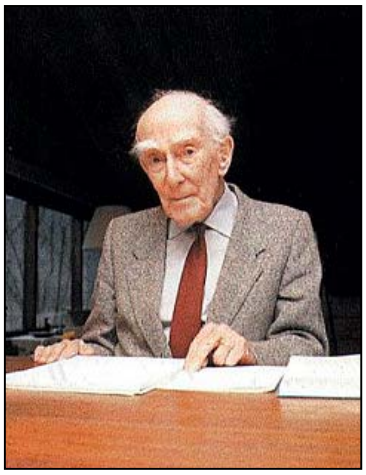


medailon

# Jan Hendrik Oort

### 28. 4. 1900 – 5. 11. 1992

Profesor Oort patří k nejvýznamnějším astronomům 20. století. Narodil se ve Franekeru v holandské provincii Frísko (Friesland) a již ve svých 17 letech se stal studentem univerzity v Groningenu. Byl žákem proslulého holandského astronoma Jacoba Kapteyna (1851–1922), průkopníka ve výzkumu stavby Mléčné dráhy. První vědeckou práci zveřejnil, když mu bylo 22 let a poslední vydal těsně před svou smrtí, takže aktivně publikoval po dobu neuvěřitelných sedmdesáti let.

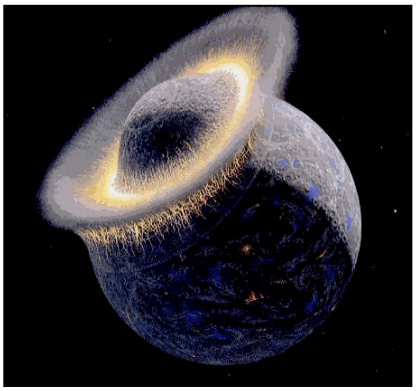


Zásluhou Jana Oorta, jenž od roku 1924 až do své smrti pracoval na slavné hvězdárně v Leidenu, jsme získali již v roce 1927 správnou představu o rotaci Galaxie a o celkové stavbě soustavy, v níž se sami nacházíme. Jeho mnohostranná výzkumná a organizační činnost byla přerušena nacistickou okupací Holandska, takže profesorem Leidenské univerzity a současně ředitelem zmíněné hvězdárny byl jmenován až v roce 1945.

O pět let později publikoval epochální práci o oblaku komet na periférii sluneční soustavy, jenž na jeho počest nazýváme oblakem Oortovým. Věnoval hodně úsilí vybudování prvotřídní holandské radioastronomické observatoře v Dwingeloo a od roku 1953 též zřízení společné Evropské jižní observatoře (ESO), jejíž ustavení v roce 1962 považoval za jeden ze svých největších životních úspěchů. Formálně odešel do důchodu v roce 1970, čímž se zbavil administrativního a organizačního břemene. Jeho vědecká tvůrčí činnost zaznamenala nové vrcholy. V roce 1977 uveřejnil zásadní práci o stavbě a vývoji centra Galaxie, v roce 1983 o soustavě nadkup galaxií a těsně před smrtí uveřejnil další objevnou práci o jádrech galaxií. Jeho předností byla neobyčejná pečlivost, důkladnost a vytrvalost, takže jeho výsledky plně platí i po desetiletích.

Byl vynikajícím učitelem mnoha proslulých astronomů, takže právě díky jemu se hovoří o holandské astronomické škole. Zastával též významné funkce v Mezinárodní astronomické unii, nejprve jako generální sekretář a později jako její prezident. Obdržel řadu významných mezinárodních ocenění a byl všeobecně milován pro své odborné i lidské vlastnosti. Do vysokého věku aktivně sportoval; po celý rok jezdil na kole a v zimě konal dlouhé projížďky na bruslích po zamrzlých holandských kanálech.

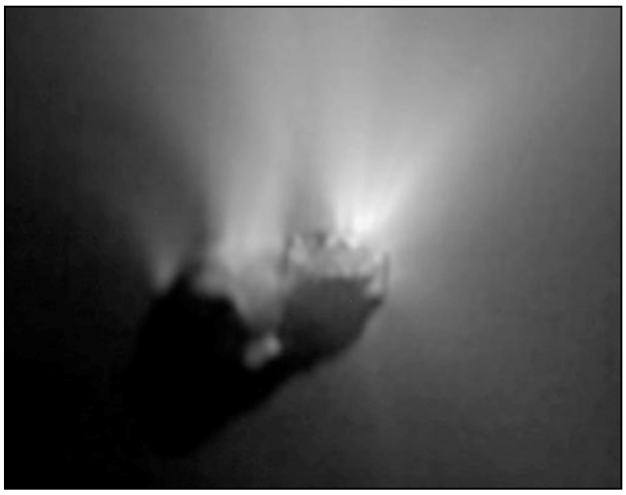
Autorem medailonu je Jiří Grygar.



čítanka

# Vladimír Železný: Konzervy s neomezenou záruční lhůtou

Jaké máme vlastně důkazy, že to před 4,6 miliardy let bylo tak a nejinak? „Dejte mi kus Měsíce a já vám řeknu, jak vznikla sluneční soustava," prohlásil Harold Urey [1]) nedlouho před startem Apolla 11. Domníval se, že na měsíčním povrchu zůstala konzervována původní nepřetavená látka sluneční soustavy. Astronauti Neil Armstrong a Edwin Aldrin se už procházejí po Měsíci a ctihodný nositel Nobelovy ceny za chemii Harold Clayton Urey je jako čestný host netrpělivě sleduje na velké obrazovce řídicího střediska kosmických letů v Houstonu. Oba astronauti hopsají po měsíčním povrchu, vychutnávají milou gravitaci, upevňují vlajku, pronášejí oficiální zdravice, fotografují se ... Ale Armstrong zatím pořád neudělal to, co měl udělat ze všeho nejdříve – zvednout a uložit alespoň jeden vzorek měsíční horniny. Střídá se s Aldrinem v pózování u vlajky, a to už povolily pětasedmdesátiletému učenci nervy. Vztyčil se ze svého křesla a na vzdálenost přes 380 000 kilometrů zařval: „Tak už, sakra, nešaškuj a zvedni ten kámen!" K úlevě vědců Armstrong ten kámen sebral a pak mnoho dalších, ale jednoznačný důkaz to nebyl. Spíše zklamání. Stopy smazány. I měsíční horniny byly přetaveny horotvornými procesy nebo přeměněny meteorickým bombardováním.



Jádro Halleyovy komety na záběrech sondy Giotto, která proletěla kolem komety 13. března 1986.

Podobně jsou důkazy pečlivě odstraněny i na velkých tělesech sluneční soustavy, na planetách. Po více než čtyři miliardy let, které následovaly po jejich vzniku, procházely přece složitým vývojem. Radioaktivní prvky zevnitř rozehřívaly jejich nitra, do takto vzniklého tekutého jádra se ponořovaly těžší prvky a lehčí naopak vyplouvaly na povrch, aby utvořily planetární kůry. Povrch planet byl mnohokrát zryt meteorickým bombardováním, leckde se přidala sopečná činnost, která to všechno zalila lá-

[1]) Čti: *uri*.

vou. Tepelný brain-washing [2]) několikerého přetavení zrušil ty nejranější vzpomínky sluneční soustavy... Zůstal tedy vůbec v naší opotřebované soustavě někde zachován nejpůvodnější materiál prachoplynného mračna?

Ano, v kometách. Jejich jádra odpočívají přece v mračnu na okraji sluneční soustavy. Zaručeně pravé, nepřetavené zbytky prachu a „popelu hvězd", nepostižené několikerým přetavením a zas kondenzací při svém vzniku. Většinu života navíc tráví v mezihvězdném prostoru, v místech s extrémně nízkou teplotou, vystaveny jen mizivým chemickým a fyzikálním změnám: fantastické konzervy s neomezenou záruční lhůtou.

Úryvek z knihy *Návraty první dámy* (Panorama, Praha 1985).

[2]) Čti: *brejn-vošing* (vymývání mozku), zde použito jako metafora.

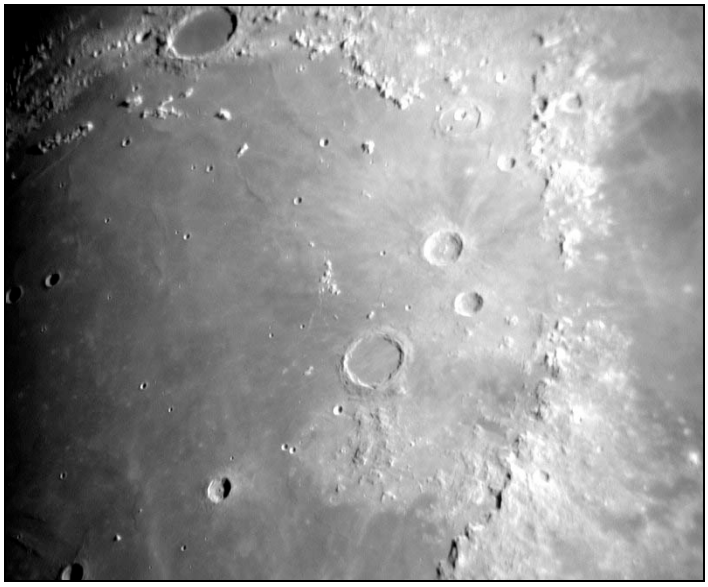
# 7.5. Planety na počátku vývoje

Všechny planety a velké družice jsou nyní rozděleny podle hustoty na tři hlavní části: *kůru*, *plášť* a *jádro*. Původně však byla zárodečná látka v místě vzniku planety víceméně stejnorodá. K jejímu rozčlenění podle hustot, k tzv. *diferenciaci látky*, došlo po jejím zahřátí působením tíže. To nastalo v době před asi 4,5 miliardy roků.

Je pravděpodobné, že v počátečním období mělo na zahřátí planety značný podíl teplo vzniklé při smršťování zárodku planety, a také teplo vznikající při nesčetných dopadech zbytků těles na vznikající planetární povrch. V dalších fázích vývoje se přidalo i teplo uvolňované rozpadem radioaktivních prvků v nitru planety.

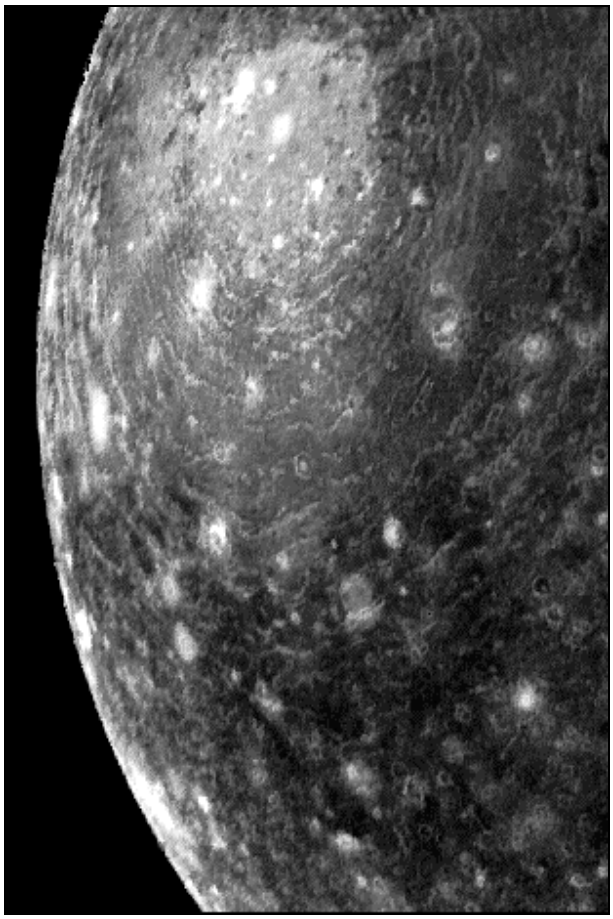
**Velké bombardování**

Před asi čtyřmi miliardami let vrcholilo velké (či intenzivní) bombardování. Po utvoření planet a jejich družic zbylo ve sluneční soustavě nesčetné množství drobnějších i větších těles. Ta se s planetami srážela a rozbíjela jejich povrch. Na povrchu vznikaly krátery, které jej zakrátko zcela zaplnily. Z té doby pocházejí i velké kruhové pánve jako Mare Serenitatis a Mare Imbrium na Měsíci, Caloris Planitia na Merkuru, Valhalla na Jupiterově družici Kallistó či Hellas na Marsu.



Mare Imbrium na Měsíci (foto: Wilfried Langer).

Caloris Planitia na Merkuru.

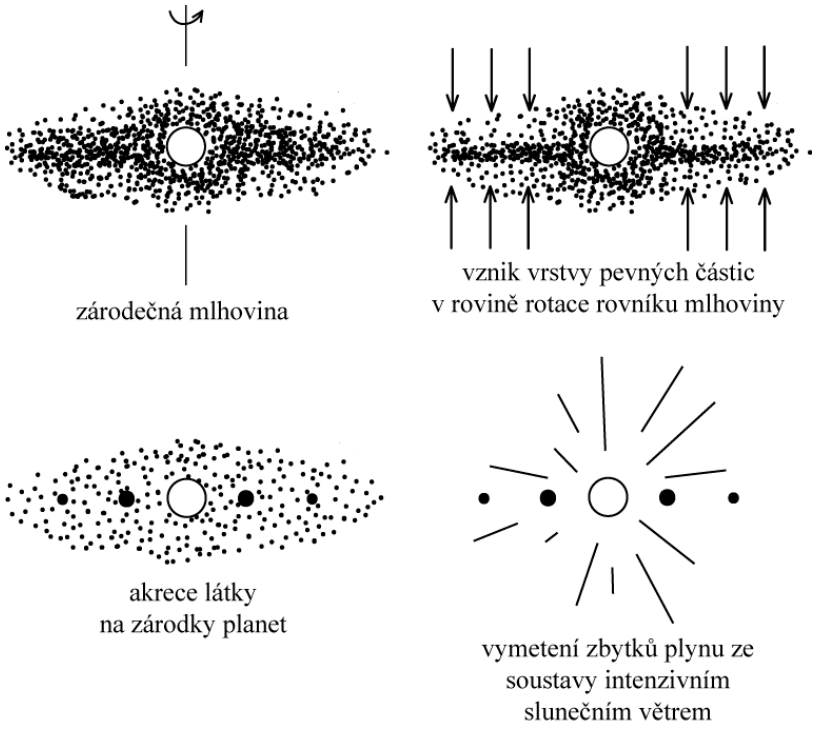


Pánev Valhalla (Jupiterova družice Kallistó).

**Hvězdná vichřice**

Dnešní sluneční soustava obsahuje relativně málo prachu a téměř žádný plyn. Pevné částice zanikly pádem na Slunce po spirálovitých drahách nebo dopadem na planety a jejich družice. Plyn byl ovšem odstraněn jinak: vytlačil jej *mohutný sluneční vítr*. Na počátku vývoje Slunce byl vítr (či spíše vichřice) natolik intenzivní, že mohl odstranit za pouhý milion roků plyn a mikroskopický prach o hmotnosti až jednoho Slunce!

Působením slunečního větru ztratily vnitřní planety zbytky původních atmosfér. Velké planety si však již předtím zachytily dostatečná množství vodíku a helia, takže jejich atmosféry zůstaly zachovány v původní podobě.




Schematické znázornění vzniku sluneční soustavy.

čítanka

# Zdeněk Pokorný: Proč jsou měsíční krátery kruhové?

Při prohlížení měsíčního povrchu, ať už přímo dalekohledem nebo jen na snímcích či mapách, vás tato otázka určitě napadne. Ne že by protáhlé krátery vůbec neexistovaly, ale těch pravidelně kruhovitých je na Měsíci taková spousta! Protože krátery vznikaly (přinejmenším v případě Měsíce) většinou dopadem cizích těles, pak je přece zvláštní, že všechny projektily vrazily do Měsíce právě kolmo k povrchu!

Nenechme se unést falešnou představou. Každý si jistě dovede představit, že když hodí pořádný kus kamene šikmo k zemskému povrchu, kámen při dopadu zeminu rozryje a zanechá zřetelně oválnou stopu, protáhlou ve směru letu. Takto však ani zdaleka nenapodobujeme proces vzniku kráterů na Měsíci.

Ten probíhá zcela jinak: dopadající těleso narazí rychlostí několika desítek kilometrů za sekundu na povrch Měsíce. Má obrovskou kinetickou energii – vždyť rychlost dopadu je vpravdě kosmická! Při střetu vzniká rázová vlna, která přenáší kinetickou energii dopadlého tělesa do hornin podkladu. Také v tělese samém se vytváří rázová vlna. V podkladových horninách rázová vlna způsobuje obrovské (až gigapascalové) tlaky; horniny se drtí, taví a vypařují. Páry a taveniny, které vznikly mezi dopadnuvším tělesem a podkladovými

horninami, tryskají do širokého okolí rychlostí mnohonásobně vyšší, než jakou mělo dopadající těleso. To vše se odehraje ve zlomcích sekundy.

Tím však akce nekončí; po stlačení je materiál rozhozen do okolí. Část látky, vymrštěné po strmých balistických drahách, spadne zpět do vyhloubeného kráteru. Materiál vyhozený do výše dopadá zpátky na povrch v obráceném pořádku – nejdříve svrchní vrstvy a ty pak překryjí vyvrženiny, jež se původně nacházely hlouběji pod povrchem. Na okraji takto vzniklého kráteru jsou všelijak posunuté a zpřevracené bloky hornin, někdy i velkých rozměrů. Část vyvržených kusů skal, rozhozených mimo kráter, vytváří při dopadu soustavu sekundárních kráterů.

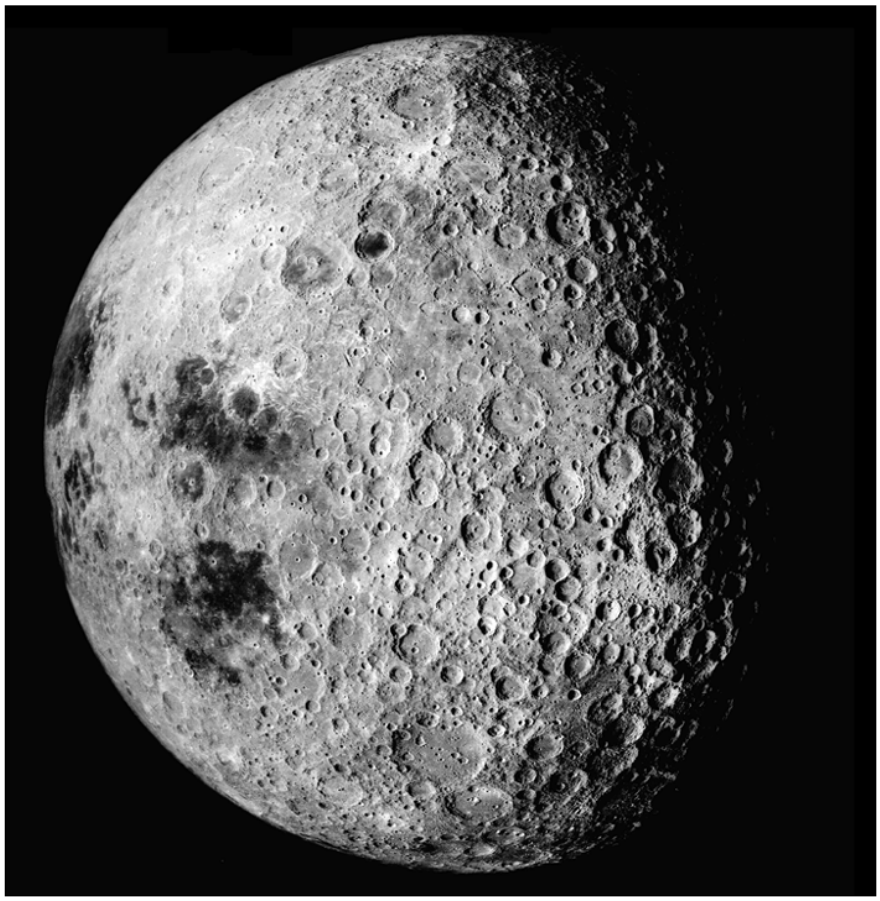
Vznik kráteru, jak vidíme, není jen rozhrnutím půdy, ale v pravém slova smyslu *explozí*. Potom ovšem tvar kráterů nezávisí na směru dopadu projektilu (snad až na případy téměř tečných střetů). Je-li podkladové prostředí stejnorodé, vzniká kráter přibližně kruhového půdorysu. Jsou-li však ve skalním podkladu nějaké nehomogenity, přijdou ke slovu i výrazné tektonické poruchy a vnitřní pnutí materiálu. Výsledkem pak mohou být krátery mnohoúhelníkové a nepravidelné. Tvar kráteru tak přináší unikátní informaci o vlastnostech měsíčních hornin v místech, které zasáhl kosmický projektil. O směru dopadu však obvykle nevypovídá vůbec nic.

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

čítanka

# Norman Mailer: Strana přivrácená a strana odvrácená

Strana Měsíce, která je přivrácená k Zemi, má svou tvářnost, má oceány, moře, horské pásy a úžiny. I když v mořích není voda a jsou to ve skutečnosti tmavé a opuštěné planiny, mají přesto určitou tvářnost. Dá se mluvit o člověku v podobě Měsíce, neboť v kontrastech mezi výšinami a moři lze nalézt tvář. Ale odvrácená tvář je na první pohled téměř bez rozlišujících známek, je to nekonečná pustina jednoho kráteru vedle druhého. Pokud Měsíc drží svou tvář obrácenou směrem k Zemi, je odvrácená strana Měsíce stejně nezajímavá jako vlasy na hlavě. Později měly z lepších fotografií vzniknout mapy a mohly se vynořovat nenápadné rysy, ale prozatím z celé té hemisféry dosud nezmapovaného terénu vyvstávalo jen několik obrovských kráterů – mohutný kráter s velikým vrcholkem uprostřed a s velmi tmavým měsíčním dnem byl poprvé spatřen Luníkem 3, první sovětskou nepilotovanou kosmickou lodí, která obkroužila satelit, a byl ihned pojmeno-



ván kráter Ciolkovskij po otci ruské raketové techniky. Tu a tam se objevovaly jiné krátery velkých rozměrů, třeba Mare Moscoviense, jiný byl dokonce pojmenován Jules Verne, ale jinak se terén z naprosté většiny jevil jenom jako bláto s tisíci dírami, jako maštalní dvůr rozrytý nesčetnými kopyty, pláž s dutinami a výstupky po tisících párů nohou. Kosmonaut Borman ho při popisu přirovnal k bitevnímu poli, a jelikož tato skrytá měsíční krajina postrádala různorodost, jelikož se jevila jako smetiště a střelnice nebeských hněvů, získávala tu na síle meteorická hypotéza, neboť povrch Měsíce jako by zde byl vystaven meteoritům všech velikostí a druhů. Země se prohýbala a propadala, svíjela se a kroutila jako písek svržený na hnízdo hadů, zdálo se, že se vaří, byla tak beztvará jako drsná kůra stromu, tak naplněná dírami kráterů každé velikosti jako tekutá struska, která se vaří v hrnci. Čím déle se však člověk dívá, tím slabší je dojem, že to byly meteority, které rozbily měsíční povrch, a tím silnější je pocit, že byly to vulkanické síly, které se kdysi vařily pod povrchem a pak se vynořily prasklinami a dírami kůry. Stačí prohlédnout okraj kteréhokoli většího kráteru a tam ve středu obvodu každého kulatého hřebene leží malý kráter, tak dokonale umístěný, že snad opravdu musel vyvřít zevnitř. Stovky kilometrů se před pohledem vskutku nerozprostírá nic než otekliny a praskliny terénu jako pokožky, pod níž se musely svíjet fúrie, matoucí, nekonečně zbrázděná rozloha téměř bez paprsků, pás hrbolatých, uzlovitých, poďobaných, vzedmutých vln jako při pohledu z nízké lodi – bez horizontu není možné zahlédnout jakoukoli rovnou plochu a všechny směry jsou beznadějné; rozbouřené rozpukané moře, zmrzlé v jediném okamžiku v kámen. A tak neexistuje žádné měřítko. Když člověk zírá na fotografii odvrácené strany, není možné bez doprovodného textu poznat, jestli jde o obraz čtverečního kilometru anebo pěti set čtverečních kilometrů. Krátery velikosti New Yorku jsou nerozeznatelné od kráterů velikosti domu. Všechna měřítka velikosti mizí.

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

Snímek odvrácené strany Měsíce pořídila posádka kosmické lodi Apollo 16.

# 7. Zrozeni v chladu a ohni

*Fakta nezmizí, i když je nebudeme brát v úvahu.*

Aldous Huxley, spisovatel (1894 – 1963)

## otázky a příklady

**Otázka 7.5.1.** Řekněme, že zářivý výkon raného Slunce činil 500násobek současného výkonu Slunce. Jak velký byl tento výkon ve wattech?

**Otázka 7.5.2.** Jedno z uvedených tvrzení *neplatí*. O které se jedná? a) Slunce i planety vznikly prakticky současně. b) Naše sluneční soustava se mohla utvořit jen z velmi ploché zárodečné mlhoviny, která náhle přestala rotovat. c) Proces formování planet z látky zárodečné mlhoviny byl relativně rychlý, nepřesáhl desetinu dnešního stáří sluneční soustavy.

**Otázka 7.5.3.** Nyní se ptáme, která trojice pojmů k sobě bezprostředně *nepatří:* a) zárodečná mlhovina, radioaktivní rozpad prvků, sluneční vítr; b) obří planeta, prvotní atmosféra, vodík; c) mezihvězdný molekulový oblak, gravitační zhroucení, zárodečná mlhovina.

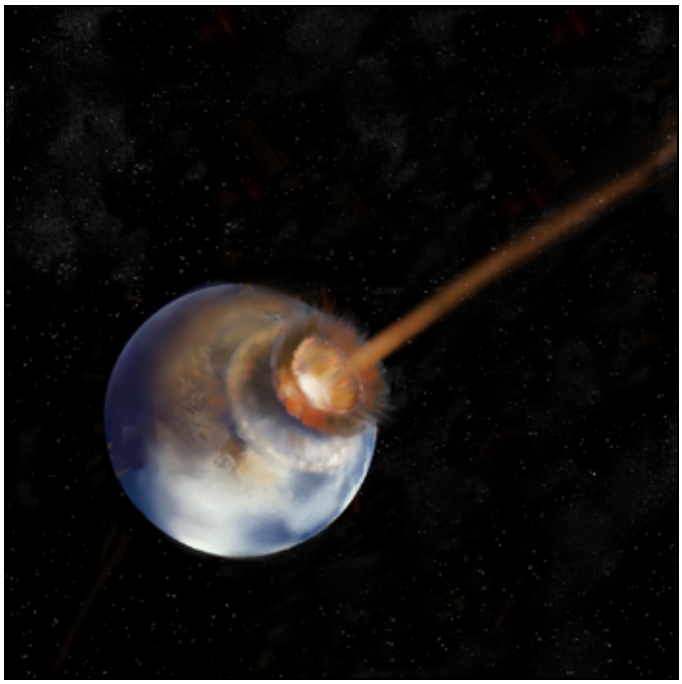
**Otázka 7.5.4.** K tomu, aby planeta zachytila okolo letící těleso (např. planetku) a udělala si z něj svou družici, je třeba toto těleso nějakým způsobem zbrzdit. Proč k takovému záchytu nestačí samotná přitažlivost planety?

**Otázka 7.5.5.** Velkým bombardováním dostala všechna pevná tělesa, která v planetární soustavě vznikla, jisté množství energie, roztavila se a diferencovala, a pak začala postupně chladnout. Menší tělesa chladla rychleji než větší, i když na počátku všechna tělesa měla přibližně stejnou teplotu. Proč?

úloha k zamyšlení

# Velké bombardování

V raných stadiích vývoje planetární soustavy často docházelo ke srážkám malých těles (zbytků z období tvorby planet) s již utvořenými planetami. Někdy šlo dokonce o tzv. obří srážku, při níž se dopadající těleso (projektil) zcela vypařilo a silně narušilo i vlastní planetu (svůj terč). Vypočítejte, jakou kinetickou energii $E_k$ má takový projektil o průměru $d$ = 100 km a střední hustotě $\rho$ = 2 Mg/m$^3$, který se srazí s planetou relativní rychlostí $v$ = 10 km/s. Srovnejte ji například se zářivou energií, kterou v současné době Slunce uvolňuje do okolního prostoru.



# 7.6. Na čem závisí další vývoj planet?

Sluneční soustava se počala tvořit před asi 4,7 miliardy roků. Tehdy – snad vlivem výbuchu blízké supernovy – se smrštila část velkého molekulárního oblaku. V něm se během několika stovek milionů roků, tedy relativně rychle vzhledem k současnému stáří planetární soustavy, utvořily Slunce i planety.

Vzniklé planety a jejich velké družice prodělaly diferenciaci látky podle hustoty, jejich povrchy byly na čas velmi intenzivně bombardovány tělesy, jež tu zbyla po utvoření planet. Před čtyřmi miliardami let nastalo období mohutného vulkanismu, kdy se na povrch vylévala obrovská množství čedičové (čili bazaltové) lávy. To trvalo asi miliardu roků. Stopy po této činnosti jsou patrné na všech terestrických planetách i na Měsíci.

**Sopky**

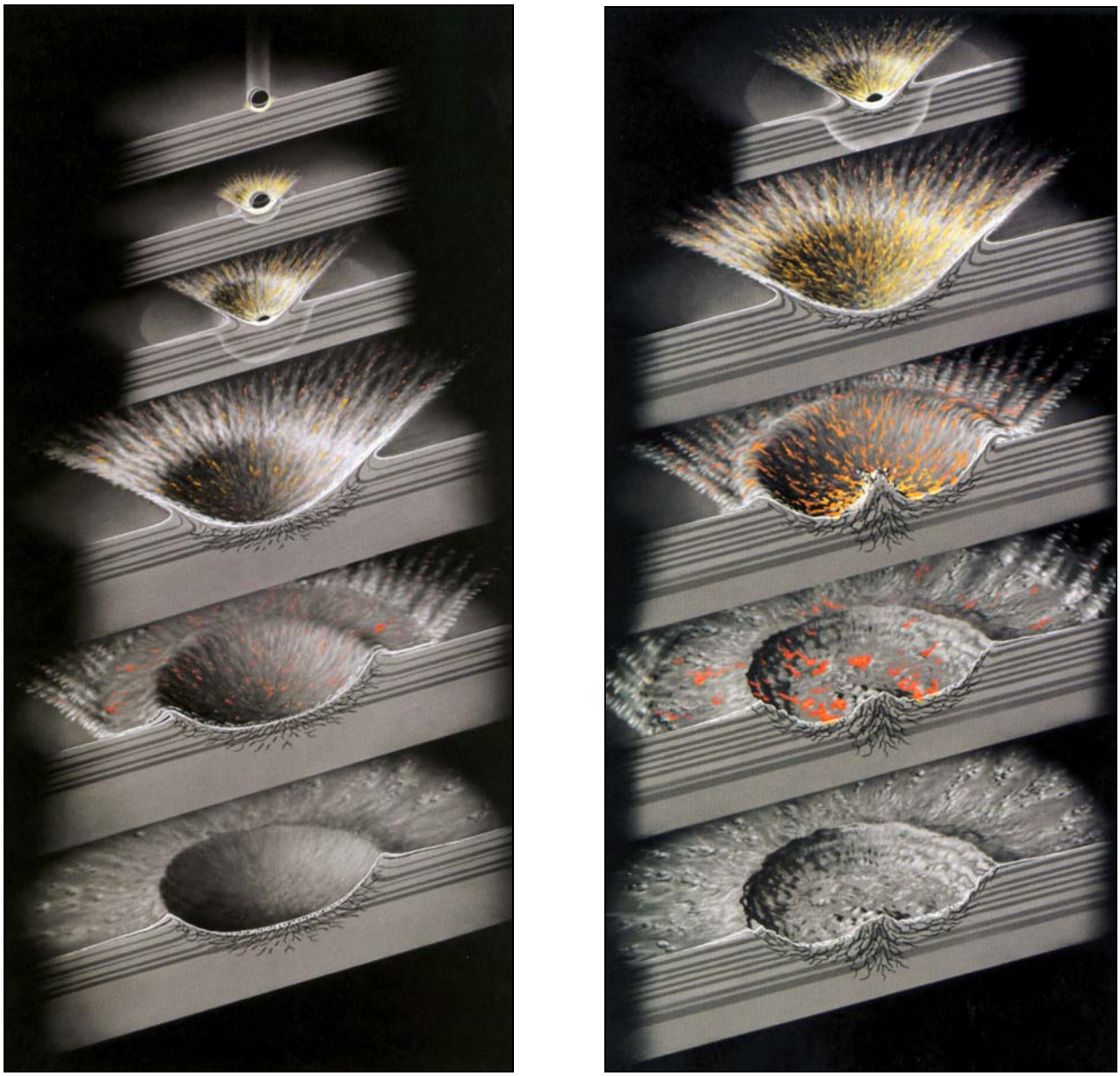
Velmi důležitými procesy, které formují povrch planety, jsou působení magmatu v hloubce (tzv. *magmatismus*) a *sopečná (vulkanická) činnost* na povrchu. U planet zemského typu byl velmi důležitý bazaltový (neboli čedičový) vulkanismus, který se projevoval plošně rozsáhlými a opakovanými výlevy lávy. Tak vznikly bazaltové plošiny, jimiž jsou například měsíční moře, hladké plošiny na Merkuru či oceánská kůra na Zemi. Pro vulkanismus jsou též typické štítové sopky, k nimž patří Olympus Mons na Marsu, Beta Regio na Venuši nebo Havajské ostrovy na Zemi.

Štítová sopka Olympus Mons na Marsu (průměr základny činí asi 550 km).

Zcela jiný typ vulkanismu má Jupiterův měsíc Ió. Zdrojem energie sopečných procesů jsou zde slapové síly Jupiteru, které mírně deformují tvar tohoto satelitu. Roztavená látka (převážně síra a její sloučeniny) proudí ven ve formě lávových výlevů a výronů plynu.

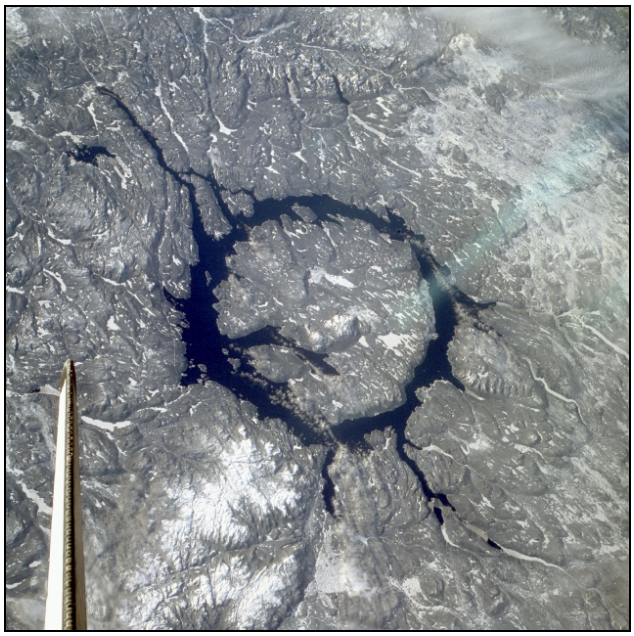
### Impakty

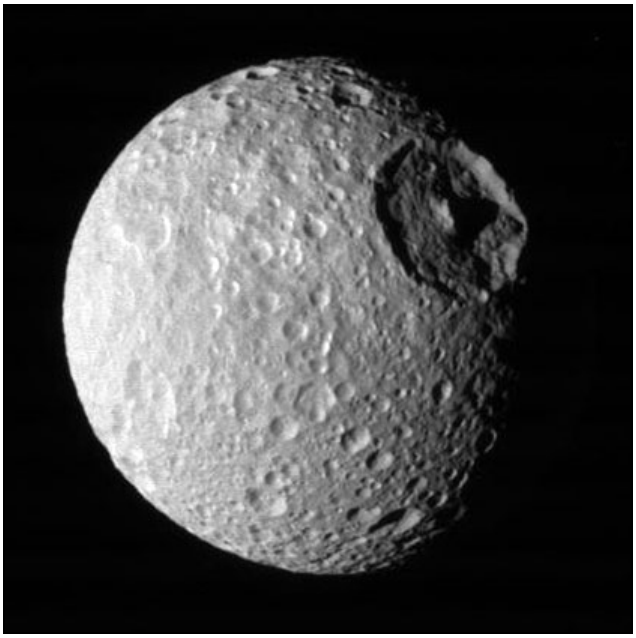
Krátery, vytvořené po střetu s cizím tělesem, najdeme na všech planetách a jejich družicích. V historii sluneční soustavy ale *impaktní krátery* nevznikaly rovnoměrně. Před čtyřmi miliardami let – v době těžkého bombardování – byly dopady těles stokrát až tisíckrát četnější než jsou dnes. Pak se tok dopadajících těles ustálil a po dobu nejméně tří miliard let byl téměř shodný s dnešním.



Vznik jednoduchého a komplexního impaktního kráteru.

U planet s intenzivním geologickým vývojem (příkladem může být právě Země) jsou ovšem staré krátery zahlazeny a uchovávají se jen ty čerstvé, vzniklé nanejvýš před miliony či desítkami milionů roků.





Vlevo na záběru z raketoplánu je vidět již silně zhlazený impaktní kráter na Zemi (Manicouagan, Kanada), vpravo je pohled na Saturnovu družici Mimas se zřetelným impaktním kráterem Herschel.

**Praskliny**

Tektonické pochody jsou velice rozmanité, každá planeta či větší družice má svůj vlastní tektonický styl. Příkladem tělesa s jednoduchou tektonikou je Měsíc. Najdeme zde soustavy trhlin a zlomů vzniklých slapovými silami. Jiné jsou vázány na vznik impaktních pánví a velkých kráterů, některé se vytvořily smršťováním lávové výplně moří.

Na Marsu pozorujeme rozsáhlé příkopy a údolí, jako je Valles Marineris (na snímku vpravo). Na Venuši jsou tektonické procesy úzce spojeny se sopečnými. Tektonika Země je nejsložitější: Země se nachází ve stadiu rozpínání oceánského dna a tzv. *deskové tektoniky*. To jsou procesy, které na ostatních terestrických planetách nalezeny nebyly.

**Proměny planetárních atmosfér**

Žádná z planet zemského typu si nezachovala svou původní atmosféru. Tu najdeme jen u planet obřích. Atmosféry terestrických planet jsou *druhotné*, poznamenané především jejich geologickou aktivitou.

Obecně platí, že čím je planeta aktivnější (tedy čím intenzivněji proběhlo odplynění povrchu a čím silnější je vulkanismus), tím je její atmosféra hustší (záleží ovšem i na hmotnosti samotné planety). V atmosféře převládá oxid uhličitý. Specifické je ovzduší naší Země: vyznačuje se vysokými obsahy dusíku a kyslíku, zatímco oxidu uhličitého je málo. K vytvoření dnešního stavu zemské atmosféry přispěla především fotosyntéza – ta redukovala původní obsah oxidu uhličitého. Také přítomnost hydrosféry je důležitá, protože zejména oceány jsou velkou zásobárnou některých složek atmosféry.

*Poznámka:* planeta Mars je v současnosti nehostinnou pustinou, na povrchu jsou relativně nízké teploty a sucho. Nicméně v první miliardě roků její existence šlo o planetu dosti vlhkou, na níž bylo i teplo v důsledku intenzivní sopečné činnosti. Husté ovzduší z oxidu uhličitého vyvolávalo poměrně silný skleníkový efekt. Při teplotách nad bodem mrazu mohla existovat voda v tekutém stavu. Docházelo zde k lijákům i sněhovým bouřím, na povrchu vznikaly vodní nádrže, do nichž ústily četné řeky. Před asi 3,8 miliardy roků prvotní sopečná činnost na Marsu opadala, koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší rychle klesala, atmosféra řídla. Proto voda na povrchu zamrzla nebo sublimovala do kosmického prostoru (velké zásoby ledu byly zjištěny pod povrchem planety). Mars se proměnil do podoby blízké té dnešní.

Záběr z povrchu Marsu (vozítko Spirit, únor 2004).

# 7. Zrozeni v chladu a ohni

*Pochybovat o všem nebo všemu věřit – to jsou dva postoje, které mají společnou výhodu v tom, že nás zbavují povinnosti přemýšlet.*

Jules Henri Poincaré, matematik a fyzik (1854 – 1912)

## otázky a příklady

**Otázka 7.6.1.** V souvislosti s „úctyhodným“ stáří Země si promyslete odpověď na tuto otázku, jež mimo jiné prověří správnost vašeho fyzikálního uvažování. Atomy, z nichž jsou tvořena všechna tělesa, jsou jak známo v neustálém pohybu. Proč ale si udržují svůj tvar po velmi dlouhou dobu – určitě po stamiliony až miliardy let – například zkameněliny?

**Otázka 7.6.2.** Kdyby kůra Marsu a kůra Země byly stejně tlusté a ze stejného materiálu, na které z těchto planet se může vytvořit vyšší sopka a proč?

**Otázka 7.6.3.** Proč na Zemi zmizely téměř veškeré stopy po geologických procesech v první miliardě let existence planety?

**Otázka 7.6.4.** Rozhodněte, které z následujících tvrzení je pravdivé: a) Z četnosti kráterů na tělesech sluneční soustavy lze usuzovat na účinnost procesů eroze v uplynulých čtyřech miliardách let. b) Najdeme-li na povrchu planety nebo družice krátery, je zřejmé, že vznikly dopadem meteoritu – impaktem. c) Na tělesech bez atmosféry zůstaly zachovány všechny krátery vzniklé při počátečním intenzivním bombardování.

**Otázka 7.6.5.** Kosmické sondy potvrdily, že sezónní změny klimatu na planetě Venuši prakticky neexistují. Přitom na Zemi jsou tyto změny (v podobě střídání ročních období) poměrně výrazné. Je tomu tak proto, že: a) Venuše na rozdíl od Země nemá žádnou družici; b) Venuše obíhá po téměř kruhové trajektorii blíž ke Slunci než Země; c) rotační osa Venuše je takřka kolmá k rovině oběhu planety kolem Slunce.

medailon

# Gerard Peter Kuiper

### (7. 12. 1905 – 23. 12. 1973)

Tento astronom je typickým příkladem všestranného vědce, který nejen zkoumá a objevuje, ale také organizuje práci, řídí velké ústavy a buduje nové přístroje. Gerard Kuiper se narodil v Nizozemí, vystudoval univerzitu v Leidenu, pak ale nadlouho, vlastně až do konce svého života, se přemístil do Spojených států. Byl by to dlouhý seznam institucí, kde působil a některé i vedl. Zajímavější však bude výčet jeho objevů (i tak je určitě neúplný).

Jako první zaznamenal oxid uhličitý v ovzduší Marsu. V atmosféře největší Saturnovy družice Titan objevil metan, v Saturnových prstencích zaznamenal vodní led. Objevil Uranovu družici Mirandu a Neptunovu Nereidu. Správně předpokládal, že měsíční moře jsou tvořena čediči. O malých Jupiterových satelitech se domníval, že jsou to tělesa dodatečně Jupiterem zachycená. Vytvořil zajímavou domněnku o původu sluneční soustavy, v níž mimo jiné předpokládal, že brzy po vzniku Slunce silná sluneční vichřice odvanula ze soustavy plyn, který tu zbyl po utvoření planet.

Seznam úspěchů na poli ryze vědeckém doplňme aspoň několika informacemi o jeho práci organizátorské. Gerard Kuiper hrál vedoucí roli v projektu *Ranger*, který v polovině 60. let dvacátého století poskytl první opravdu detailní snímky Měsíce a byl nezbytným předstupněm letu člověka na Měsíc. Kuiper se zasadil o vybudování první létající observatoře na palubě tryskového Convair 990; stal se tak jedním z průkopníků infračervené spektroskopie.

Je až k nevíře, co vše stihnul za svůj život udělat. Nezapomeňme na jeho četné publikace, dodnes hojně citované ve vědeckém světě, na jeho studenty, které vtáhl do své výzkumné práce, aniž by je omezoval v rozletu. Byl to vzácný talent, který sice nejraději trávil svůj čas u dalekohledu, ale dokázal přitom souběžně pracovat v laboratoři i teoreticky. Takových všestranných astronomů je bohužel jen pramálo.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný.

# 7.7. Život na stárnoucí Zemi

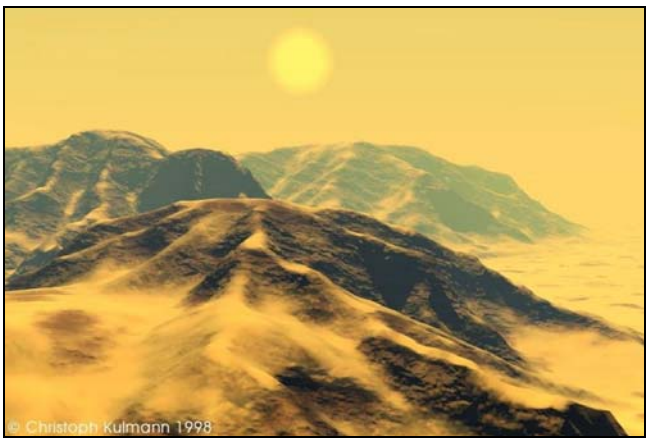
Ve velmi vzdálené budoucnosti čeká naši Zemi (a ostatně nejen ji) horký konec. Každá hvězda, která se ocitne na hlavní posloupnosti Hertzsprungova-Russellova diagramu, s časem postupně zvyšuje svůj zářivý výkon i rozměry. Toto relativně dlouhé období každá hvězda ukončí tím, že se promění v červeného obra.

Jakmile se i naše Slunce promění v červeného obra, rozepne se dokonce až do vzdálenosti jedné astronomické jednotky a pohltí planetu Merkur. Zářivý výkon se hned zpočátku zvětší na tisícinásobek současné hodnoty, později bude ještě pětkrát vyšší.

Velmi silný sluneční vítr způsobí zmenšení hmotnosti Slunce. Následkem toho se zvětší vzdálenosti všech planet od Slunce. Například Země se podle modelových výpočtů ocitne 1,7 astronomické jednotky daleko, což jak se zdá postačí, aby nikdy neskončila ve žhavém Slunci (i když tomuto osudu unikne jen taktak). V každém případě však bude zahřáta natolik, že se stane neobyvatelnou.

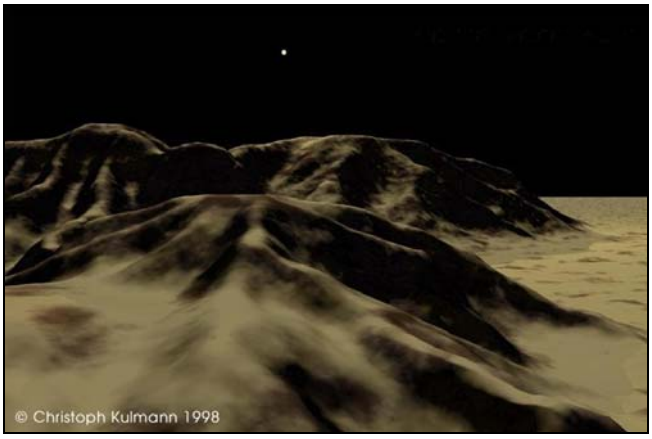
Země je v současnosti planetou s mírným podnebím, „zelenou“ a s dostatkem vody. Život překypuje na pevnině i v mořích. Všechny kresby v této kapitole: Christoph Kulmann.

Země za 700 milionů roků: výkon Slunce vzrostl o téměř 10 %, oceány se vypařují; celá Země pokryta oblaky; větší oslunění a silnější skleníkový efekt ($CO_2$ uvolněné z vody) zvyšují teplotu na 40 až 80 °C; přežívající organismy se vracejí do oceánů.




Země za 1,5 miliardy roků: sluneční výkon je o třetinu vyšší než nyní; oceány se zcela vypařily; z hornin uniklý $CO_2$ rozvinul překotný skleníkový jev; atmosférický tlak je 60krát vyšší než dnes, teplota přes 200 °C; Země je mrtvou planetou.

Země za 7 miliard roků: Slunce se stalo červeným obrem a rozepnulo se do vzdálenosti 1 AU; je tisíckrát zářivější než nyní; povrch Země se taví, planeta již pozbyla svou atmosféru; také obří planety a jejich ledové družice se výrazně mění.




Země za 10 miliard roků: Slunce se proměnilo v bílého trpaslíka a dalších 100 miliard let bude chladnout; Země přečkala, ale je pouze mrtvým, chladným a temným světem bez zdrojů energie.

Taková bude ovšem až *velmi vzdálená budoucnost* naší planety. Neměli bychom podlehnout klamu, že do té doby (nebo snad jen o trochu dřívější) bude existence nás (lidí) i celého ekosystému na Zemi bezproblémová. Z astronomického hlediska je pro nejbližších několik miliard roků dominantní opravdu jen mírné zvyšování zářivého výkonu Slunce. Z hlediska vývoje klimatu na Zemi je ale třeba uvažovat změny na škále mnohonásobně kratší – snad jen několika desítek milionů, ba dokonce tisíců (či pouze stovek?) roků. Žijeme v době meziledové, která je na rozdíl od všech předchozích pozoruhodně dlouhá (několikanásobně delší než ty dřívější). Současný trend globálního oteplování tedy vystřídá za stovky až tisíce roků další doba ledová (zatím nikdo nezveřejnil důvod, proč by se tak *nemělo* stát).

Značné změny v časové škále desítek až stovek roků čekají ovšem naši civilizaci z důvodů zcela „vnitřních“ (tedy takových, jež přímo nesouvisejí s přírodními jevy). Od poloviny 20. století mají lidé k dispozici zdroje energie srovnatelné s energiemi velkých přírodních procesů (zemětřesení, vulkanické supererupce) – těmi zdroji jsou jaderné zbraně. Tato situace nastala poprvé za existenci lidské civilizace a nelze se navrátit do doby „předtím“. Raketová technika, nebývalý rozmach biotechnologií, počítačů a informačních technologií (např. Internetu) způsobují, že náš život je pohodlnější, ale současně se stává značně nestabilním. Populační exploze, terorismus a náboženský fanatismus činí celou naši civilizaci značně zranitelnou. Vezmeme-li v úvahu nerovnoměrný technologický vývoj v různých částech světa (bohatý „sever“ versus chudý „jih“) a omezené zásoby fosilních paliv i surovin, je jasné, že civilizace na planetě Zemi neprožívá své klidné období. Jaký bude život na stárnoucí Zemi, lze v tuto chvíli předpovědět opravdu jen stěží.

čítanka

# Zdeněk Pokorný: Exkurze do budoucna

Chceme-li se v myšlenkách přenést do vzdálené budoucnosti, musíme samozřejmě předpokládat, že naše současná civilizace je schopna se vypořádat s hrozbami, které ji ohrožují bezprostředně: populační explozе, globální oteplování Země způsobené enormní činností člověka, riziko jaderného konfliktu. To vše jsou nebezpečí akutní, protože ta, o nichž se teď zmíníme, nás mohou ohrozit až za mnohem delší dobu.

Co vše se budoucím pozemšťanům změní? Například mapa Země; víme, že celé kontinentální bloky se pohybují. Už za desítky milionů roků, což je vzhledem k současnému stáří Země (téměř pět miliard let) doslova okamžik, bude Atlantský oceán široký jako dnešní Tichý oceán, který se naopak velmi zúží. Ostrovy v Pacifiku od Japonska až po Austrálii se spojí v jednu velkou zemi. Nad „horkými skvrnami“ v plášti porostou vulkanickou činností nové ostrovy, tak jako třeba dnešní Havajské. Pohoří And a Himálají se budou zvyšovat, dokud je unese podloží.

Změní se i délka dne – den bude delší. V současnosti se prodlužuje o dvě tisíciny sekundy za století. Změna délky dne, tedy rotace Země, souvisí s oběhem Měsíce. Měsíc vyvolává na Zemi pohyby vodních mas, tzv. slapy. Ty nepatrně brzdí rotaci Země. Důsledkem je i vzdalování Měsíce od naší planety. Právě pro toto vzdalování přijdou naši vzdálení potomci o možnost uvidět nádherný přírodní úkaz – úplné zatmění Slunce. Dnes je úhlový průměr Slunce a Měsíce shodou okolností stejný, měsíční disk může tedy zcela zakrýt ten sluneční. V daleké budoucnosti

bude ovšem Měsíc dál od Země, jeho úhlový průměr bude menší a úplná sluneční zatmění už nikdy nenastanou.

Jiná bude i noční obloha. Nejjasnější hvězdy nebývají většinou výrazné proto, že jsou blízko, ale že jsou hmotnější a zářivější než Slunce. Takové hvězdy se ovšem vyvíjejí nepoměrně rychleji než naše Slunce. Za astronomicky krátkou dobu z mnohých budou už jen zbytky, když předtím vybuchnou jako supernovy, nebo se z obřích hvězd promění na nevelké a málo zářivé trpasličí hvězdičky. Z oblohy tak pravděpodobně zmizí dnes nejjasnější hvězdy Sirius, Vega, Capella, Rigel, Antares, Deneb a mnohé další. Nepochybně však na obloze přibudou jiné jasné hvězdy. Určitě se nemusíme obávat, že budoucí pozemšťané nebudou mít k dispozici žádné jasné orientační hvězdy, jenom současné mapy hvězdné oblohy jim nebudou k ničemu.

V úvahách o životě na stárnoucí Zemi se nyní dostáváme ke klíčovému problému. Astrofyzikové vědí, že po devět desetin doby své existence Slunce poklidně spaluje v nitru vodík na helium, přitom však pomalu a nenápadně narůstá jeho rozměr a hlavně zářivý výkon. Když dnešní výkon označíme jako stoprocentní, pak na začátku své existence, před více než čtyřmi miliardami let, činil asi 70 procent. Za stejně dlouhou dobu dosáhne v budoucnosti až 200 procent! Naší planetě tedy hrozí nebezpečí přehřátí.

Země se zatím v celé své minulosti dokázala s tímto postupně narůstajícím tokem slunečního záření vyrovnat a klimatické podmínky na naší planetě byly pro rozvoj života trvale příznivé. Na Zemi fungují dlouhodobé geochemické cykly, které jsou s to reagovat na pomalu se měnící ozáření Země. Problémy by mohly nastat jen tehdy, kdyby se rovnováha mezi množstvím přijaté a vyzářené energie změnila rychle, natolik rychle, že by ji přírodní procesy nedokázaly znovu ustavit, ale to už je jiná záležitost.

Obyvatelé na stárnoucí Zemi se tak budou muset vypořádat s problémem stále rostoucího zářivého výkonu naší hvězdy. Cožpak nebude možné se přestěhovat dál od Slunce, třeba na Mars? I největší pesimisté budou jistě uklidněni tvrzením, že tento problém nebude akutní dřív než za půl miliardy až jednu miliardu let. Připusťme, že v tu dobu bude Zemi obývat veskrze „kosmická“ civilizace, pro niž lety odkudkoli kamkoli ve sluneční soustavě nebudou vůbec žádným problémem. Z tohoto pohledu se o osudy budoucích obyvatel naší planety určitě nemusíme obávat.

Z publikace *Záludné otázky z astronomie* (6. sešit), nakladatelství Paráda, Brno 1998.

# 7. Zrozeni v chladu a ohni

*Věda je umění zjednodušovat.*

Stanislav Komenda (1936 – )

## otázky a příklady

**Otázka 7.7.1.** Víme, že zářivý výkon bílého trpaslíka je mizivě malý ve srovnání se slunečním, hvězda však takto září bez větších proměn miliardy roků. Kdyby na planetě dostatečně blízké hvězdě existoval život, měl by zaručen velmi stabilní zdroj energie po velice dlouhé období, po které by se mohl nerušeně vyvíjet. Je taková představa reálná?

**Otázka 7.7.2.** V kapitole o vzniku a vývoji planetární soustavy i naší Země jsme poznali dost nových pojmů. Pro připomenutí některých z nich se proto ptáme: která (či které) trojice pojmů k sobě bezprostředně *nepatří*? a) terestrická planeta; odplynění planety, druhotná atmosféra; b) vnější geologické síly, impaktní krátery, období intenzivního bombardování; c) obří planeta, tektonická činnost, druhotná atmosféra; d) vulkanická činnost, druhotná atmosféra, Venuše.

**Otázka 7.7.3.** V současnosti se Severní Amerika a Evropa od sebe vzdalují rychlostí asi 2 cm za rok. Předpokládejme pro jednoduchost, že se takto rychle oba kontinenty vzdalovaly i v minulosti. Kdy tedy začal vznikat Atlantský oceán, a jak dlouhý časový úsek (v procentech) to představuje ve srovnání s celkovým stářím Země? (Současnou vzdálenost mezi západním pobřežím Evropy a východním pobřežím Severní Ameriky jistě odhadnete nebo zhruba odečtete na každé mapě světa, a celkové stáří Země zajisté také znáte.)

*Sherlock Holmes: „… když vyloučíte nemožné, pak cokoli, co zbývá – byť je to nepravděpodobné – musí být správným řešením.“*

Arthur Conan Doyle, prozaik, autor detektivek (1859 – 1930).

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 uveďte, v čem chyba spočívá.

1. Mars se může dostat do konjunkce s Jupiterem, neboť obě tělesa obíhají kolem Slunce dále než Země. Sledovat konjunkci Jupiteru s Venuší však ze Země nemůžeme, protože Venuše je blíže ke Slunci než naše planeta.

2. Představte si, že jste přistáli na povrchu planety Mars. Když atmosféra nebude příliš zaprášená a nastane noc, uvidíte na obloze tytéž hvězdy a souhvězdí jako na Zemi. Naše planeta bude patřit mezi nejjasnější objekty marsovského nebe, snad spatříte pouhýma očima i Měsíc.

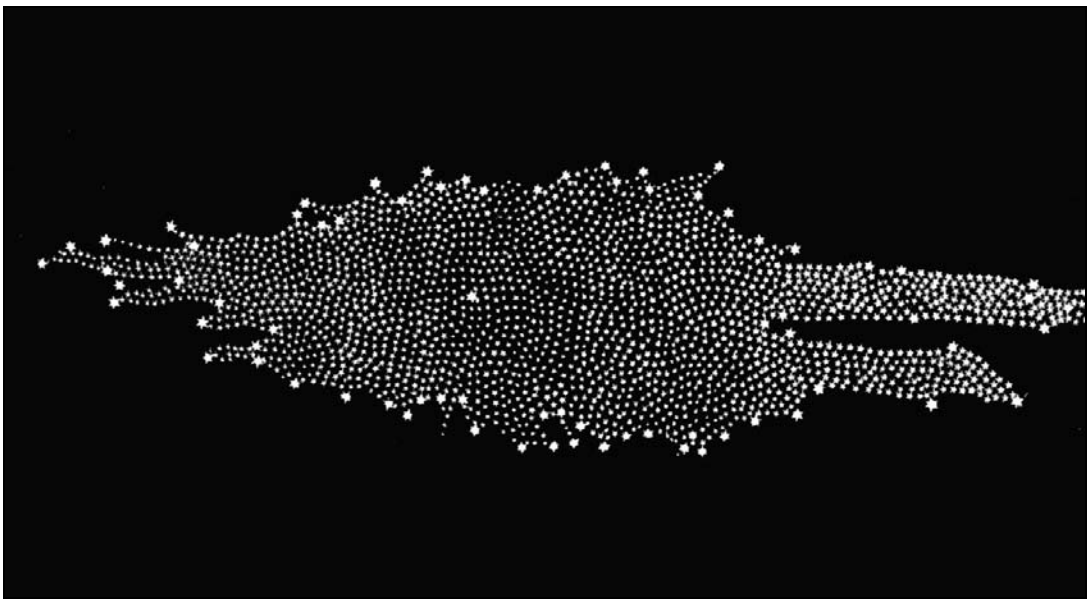
3. Hmotnosti komet jsou ve srovnání s hmotnostmi planet nicotné. Proto planety svou gravitační silou snadno ovlivňují trajektorie komet, a to ani nemusí nastat velmi těsné přiblížení komety k planetě. Tak například kometa, dosud obíhající po velmi výstředné elipse s dobou oběhu řekněme 100 000 let se dostane na trajektorii s krátkou, řekněme stoletou oběžnou dobou.

4. Absolutně černé těleso je zvláštní případ tělesa, které všechno na ně dopadající záření pohlcuje a žádné nevydává. Hvězdy, protože září, ani zdaleka nepřipomínají absolutně černé těleso.

5. Lidské oko je schopno překlenout rozdíly v osvětlení až jedna ku jedné miliardě. Toho dosahuje tím, že se mění průměr kruhového otvoru uvnitř duhovky, zvaného zornička.

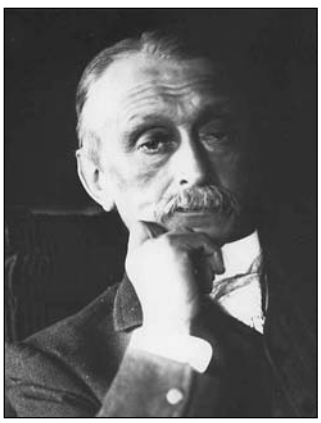
# 8.1. Naše Galaxie je složitý systém

Když se William Herschel (1738–1822) koncem 18. století zabýval otázkou tvaru Galaxie, snad jen tušil, že všechny hvězdy nemají stejný zářivý výkon. Předpokládal, že prostorová hustota hvězd je stálá a soustava má ostrou hranici. Nevěděl vůbec nic o tom, že v mezihvězdném prostoru dochází k zeslabování světla hvězd. V jeho modelu bylo Slunce takřka uprostřed hvězdné soustavy, jejíž průměr byl asi 3 kpc.



Herschelův model Galaxie se Sluncem téměř uprostřed soustavy.

Když na přelomu 19. a 20. století Jacobus Kapteyn (1851–1922) zkoumal strukturu Galaxie počítáním hvězd ve vybraných částech hvězdné oblohy, stále ještě nic nevěděl o zeslabování světla v mezihvězdném prostoru. Také v jeho modelu z roku 1922 bylo Slunce téměř ve středu hvězdné soustavy a Galaxie měla tvar zploštělého elipsoidu o průměru asi 13 kpc.



Jacobus Kapteyn.

V současnosti ovšem víme, že naše Galaxie je mnohem větší a Slunce se v ní nenachází uprostřed či poblíž středu. Je to komplikovaný gravitačně vázaný systém, složený z hvězd a rozptýlené mezihvězdné látky.

### Galaktická souřadnicová soustava

Pro popis rozložení objektů v Galaxii je vhodné zavést novou souřadnicovou soustavu, tzv. *galaktickou*. Způsob, jakým ji vytvoříme, bude odpovídat zásadám uvedeným v kapitole 2.1. (kam v případě potřeby rychle nahlédněte). Základní rovinou v této soustavě souřadnic je rovina největší koncentrace hvězd v Galaxii (na hvězdné obloze ji přibližně udává Mléčná dráha). Základní rovina (galaktický rovník), stejně jako základní směr (ke středu Galaxie, nachází se v souhvězdí Střelce) jsou přesně definovány [1]). Od základního směru se určuje *galaktická délka l* (0° až 360°), od galaktického rovníku *galaktická šířka b* (0° až ± 90°). Souřadnicová soustava je pravotočivá.

Foto: Wade B. Clark, Jr.

### Mezihvězdný plyn a prach

Nebýt zeslabování světla mezihvězdnou látkou, byla by struktura Galaxie mnohem patrnější [2]). Mezihvězdná látka je ovšem důležitou součástí Galaxie, vždyť z ní vznikají další hvězdy i planety!

Nejhmotnější složkou této látky je *plyn*, obvykle molekulární vodík (další prvky jsou zastoupeny zhruba podle četnosti výskytu prvků ve vesmíru). Asi 80 procent hmotnosti mezihvězdné látky tvoří tzv. *molekulová oblaka*, o nichž byla již zmínka v souvislosti se vznikem planet (kapitola 7.3.).

Mlhoviny, v nichž převládají atomy neutrálního vodíku (ten v optickém oboru spektra nezáří), nazýváme *oblaka neutrálního vodíku* (v astronomii se běžně označují jako oblasti H I, čti: *há jedna*). Typické „míry a váhy“ těchto oblak: rozměr 10 pc, oblaka jsou od sebe vzdálena 30 pc, teplota plynu dosahuje 40 až 120 K, hustota činí

[1]) Podle rezoluce přijaté Mezinárodní astronomickou unií v roce 1959 má základní směr galaktické souřadnicové soustavy rovníkové souřadnice (vztažené k roku 1950,0) $\alpha = 17^h\,42^m\,29{,}3^s$, $\delta = -28°\,59'\,18''$. Sklon galaktického a světového rovníku činí 62° 36,0′.

[2]) Vzpomínáte si na pohádku ze země tisíce a jedné pozorovací noci? Je zařazena v kapitole 5.6. nazvané *Majáky vesmíru*. Profesorův asistent byl nešťastný z toho, že světlo vzdálených hvězd bylo červenější než světlo hvězd blízkých. Profesor mu však vysvětlil, že je to důsledek zeslabování světla mezihvězdnou látkou. Konkrétně: drobná prachová zrna způsobují, že světlo ztrácí svou modrou barvu („odmodrává“), takže se nám jeví červenější.

1 až 10 atomů·cm$^{-3}$. Téměř všechny atomy vodíku jsou v základním stavu, září zejména v rádiovém oboru spektra.

*Ionizovaný vodík*, který najdeme kolem horkých hvězd, již spatříme i v dalekohledu: oblaka ionizovaného vodíku se projevují jako červeně svítící mlhoviny. Označujeme je jako oblasti H II (čti: *há dvě*).

Oblast H II v mlhovině M 17, přezdívané Omega. Foto: Martin Altmann a Jürgen Schmoll.

Srovnáme-li navzájem molekulová oblaka, oblasti H I a oblasti H II, pak v tomto pořadí roste teplota látky uvnitř mlhoviny, avšak hustota klesá.

Kromě plynu tvoří mezihvězdnou látku i *prach*. Nejčastěji to jsou silikátová a grafitová zrna, potažená vodním ledem a kůrou z těkavých látek. Prachová složka tvoří asi setinu hmotnosti mezihvězdné látky.

### Naše Galaxie je velký disk

Přirovnání tvaru Galaxie ke klasickému sportovnímu náčiní je rovněž klasické, a navíc dosti přesné. Nejhustší části hvězdné soustavy, ve které se nacházíme, mají opravdu podobu plochého disku: jeho průměr činí asi 30 kpc, uprostřed je poněkud vydutý a má tloušťku asi 4 až 5 kpc, mimo střed je

tlustý jen 1 kpc. Slunce leží téměř v galaktické rovině (pouze asi 15 parseků od ní), od středu je dělí vzdálenost 8,0 kpc [3]).

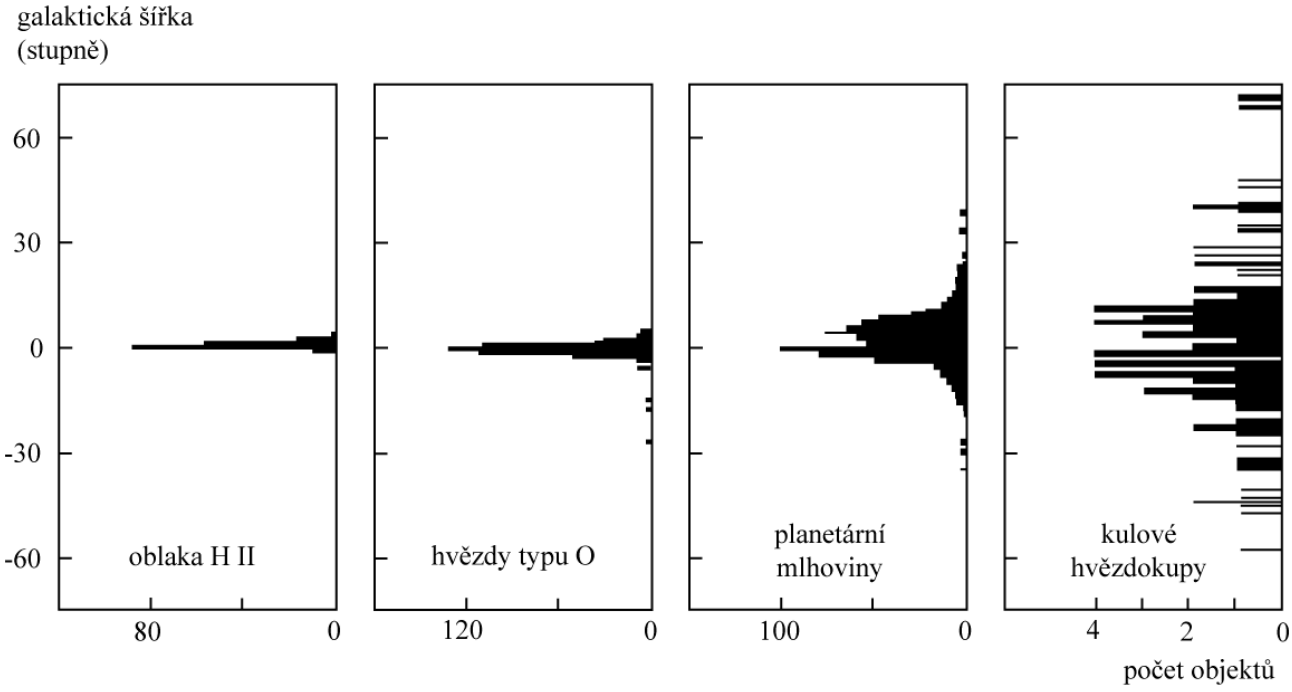
**Anatomie naší Galaxie**

Galaxii si můžeme rozdělit na několik částí, jejichž tvary a umístění ve hvězdné soustavě jsou patrné již z názvů.

*Kulová složka* čili tzv. *halo* [4]): tu tvoří nejstarší hvězdy v Galaxii. V mírně zploštělé kouli o průměru asi 50 kpc najdeme zejména kulové hvězdokupy.

*Disková složka*: k ní patří většina hvězd. Tyto hvězdy se účastní galaktické rotace.

*Plochá složka*: tu vytvářejí nejmladší hvězdy a zejména mezihvězdná látka. Právě ona vlastně udává polohu galaktického rovníku. Střed Galaxie tvoří *výduť*, jež má tvar koule o průměru přibližně 4 až 5 kpc a připomíná gigantickou kulovou hvězdokupu.




Rozložení některých druhů objektů v Galaxii. První dva jsou v ploché složce, další v diskové, poslední v kulové složce Galaxie.

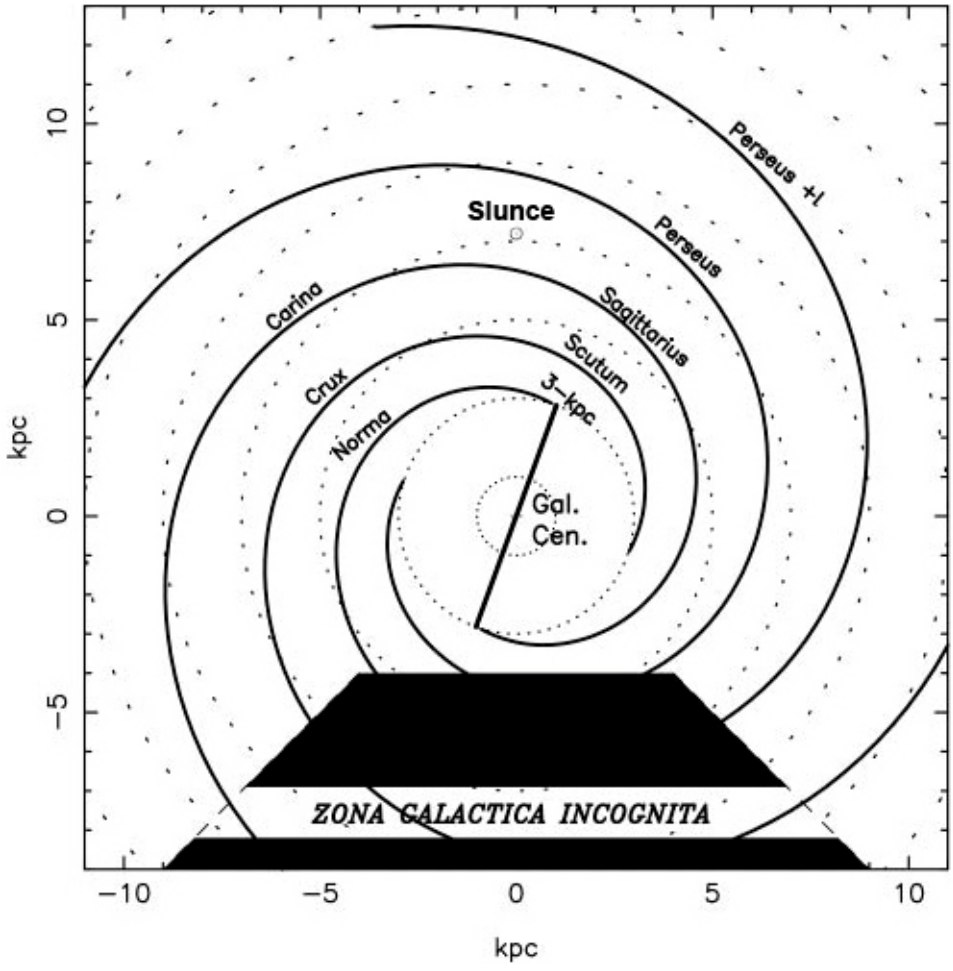
Doplňme si popis Galaxie o několik dalších konkrétních údajů. Hvězdy kulové složky mají stáří až 12 miliard let, obsahují proto jen nepatrné množství těžších prvků (do 0,1 %). Hvězdy diskové

[3]) Zajímavý je pohyb Slunce kolem středu Galaxie. Pozorovatel s jistým odstupem od naší Galaxie uvidí, že je to přibližně kruhovitý pohyb rychlostí asi 235 km/s, připomínající obíhání planet kolem Slunce. Jenže bedlivější rozbor odhalí, že dráha Slunce není uzavřenou kružnicí, ba dokonce vůbec není kružnicí! Je zvlněná ve směru kolmém na rovinu Galaxie, takže připomíná pohyby dřevěných koníčků na dětském kolotoči. Momentálně je Slunce takřka v rovině Galaxie, ale za čas poněkud povystoupí nad ni, takže pak budeme mít po jistou dobu přece jen lepší výhled do vesmíru.
[4]) Řecké *halos* znamená okraj štítu, také kruh kolem Slunce nebo Měsíce.

složky jsou staré přibližně 5 miliard let, od roviny Galaxie je dělí střední vzdálenost 300 pc. V ploché složce jsou nejmladší hvězdy (staré od milionu až po několik miliard let), v nichž najdeme až 5 % těžších prvků. Patří sem hmotné hvězdy s největším zářivým výkonem. I když tvoří jen nepatrné procento všech hvězd Galaxie, zajišťují podstatnou část jejího zářivého výkonu.

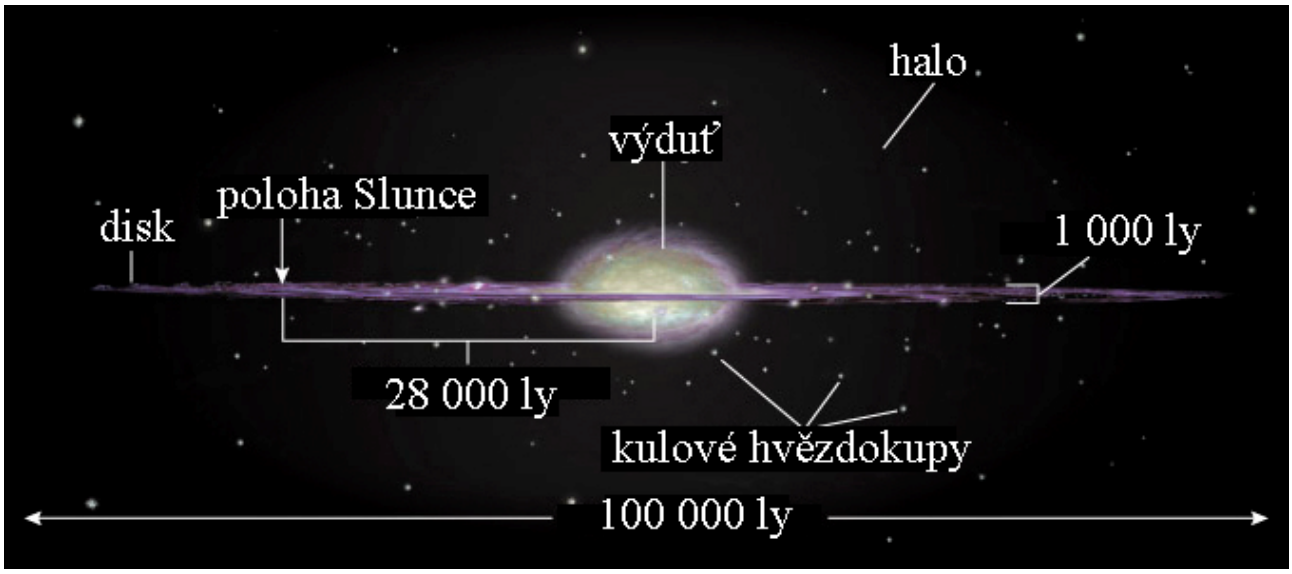
**Spirály**

Naše Galaxie jeví spirální strukturu. Znamená to, že disková a zejména plochá složka Galaxie vytvářejí ramena, jež vybíhají z galaktického jádra. Spirální ramena (zřejmě čtyři) jsou nahuštěním hvězd a mezihvězdné látky v určitých místech, v nichž se tyto objekty při svém oběhu kolem centra poněkud pozdrží. Utváří se tak poměrně stabilní *hustotní vlna*, udržovaná gravitací látky, jež se v ní právě nachází. Ve spirálních ramenech je zvýšená hustota mezihvězdné látky, proto i v současnosti v těchto místech vznikají nové hvězdy. Najdeme tu žhavé hmotné hvězdy a mladé otevřené hvězdokupy.




Schematické vyznačení čtyř spirálních ramen (při pohledu od severního galaktického pólu). Část naší Galaxie, nacházející se na galaktickým jádrem, není pro nás pozorovatelná.

O spirální struktuře Galaxie se uvažovalo již dávno, neboť mnohé blízké galaxie, např. galaxie M 31 v Andromedě, jsou spirální. Důkazy však poskytla až radioastronomie. V rádiovém oboru totiž můžeme sledovat vzdálenější oblasti než v oboru vizuálním, protože v rovině Galaxie je velká extinkce světla.




Schematický pohled na naši Galaxii z boku.

**Základní čísla o naší Galaxii**

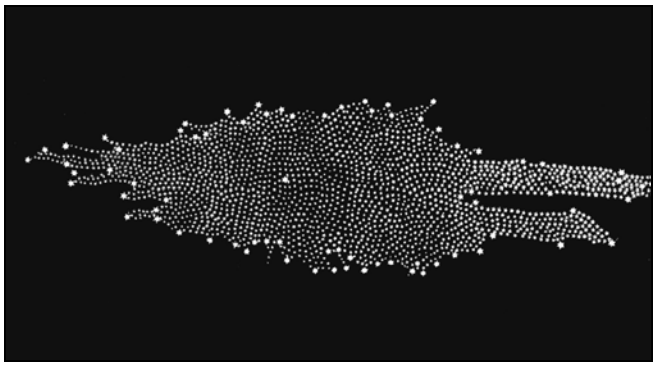
*hmotnost (zářící látky):* $2 \cdot 10^{11}\ M_S$ (celková hmotnost je až o řád větší, většina látky Galaxie je uložena v temném halu, jehož rozměry mnohonásobně převyšují velikost viditelné části Galaxie)

*zářivý výkon:* $2 \cdot 10^{10}\ L_S$ (tj. $7{,}7 \cdot 10^{36}$ W)

*počet hvězd, tvořících Galaxii:* 400 miliard (odhad)

*podíl mezihvězdné látky* na hmotnosti Galaxie: asi 10 % hmotnosti zářící látky

($M_S$, $L_S$ jsou současná hmotnost a zářivý výkon Slunce)



čítanka

# Zdeněk Pokorný: Velká debata

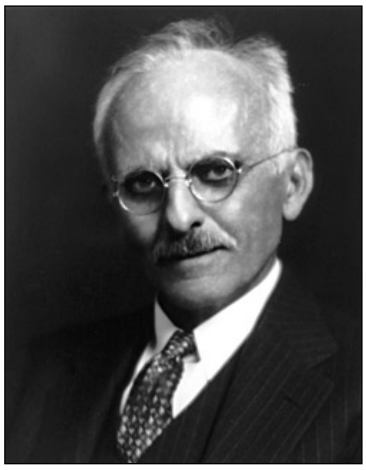
Na sklonku roku 1919 navrhl George Hale [1]) – zakladatel a ředitel hvězdárny na Mount Wilsonu, aby se na výroční zasedání Národní akademie věd USA v dubnu příštího roku zařadilo astronomické téma. Mohlo by se týkat hvězdných ostrovů, tedy galaxií v dnešní terminologii. Z korespondence víme, že ve hře byla i témata jiná, třeba z biologie, o periodách zalednění, a nebo teorie relativity. Einsteinova obecná teorie relativity se tenkrát podrobovala prvním praktickým testům. Jenže členům Akademie věd, vědcům z nejrůznějších vědních oborů, by tato nová a kontroverzní teorie mohla připadat jako zvláštní a snad i nezajímavá, takže nakonec vyhrála astronomie.

Harlow Shapley.

Astronomické téma, navíc zaměřené na vzdálený hvězdný vesmír, bylo zvoleno velmi šťastně. Vždyť tehdy se právě dokončil dvouapůlmetrový reflektor na Mount Wilsonu v Kalifornii, který pak byl na dlouhou dobu největším dalekohledem světa. Také fotografie se vylepšovala. Stelární – hvězdná – astronomie se díky nové pozorovací technice rozvíjela mnohem rychleji než třeba výzkum planet.

Zpočátku nebylo jasné, půjde-li o klasickou přednášku nebo diskusi, a kdo na ni bude pozván jako hlavní aktér. Nakonec se organizátoři rozhodli pro diskusi dvou astronomů a nazvali ji „Měřítko vesmíru“.

Prvním z oslovených byl Harlow Shapley [2]), který pozvání ihned přijal. Druhým debatujícím měl být Heber Curtis [3]) – astronom z Lickovy observatoře. Curtis se zabýval studiem „spirálních mlhovin“ – dnes bychom řekli spirálních galaxií – o nichž tvrdil, že leží mimo naši soustavu a jsou zhruba stejně velké jako „Kapteynův vesmír“. Curtis zpočátku váhal, ale nakonec pozvání na výroční zasedání Akademie přece jen přijal.

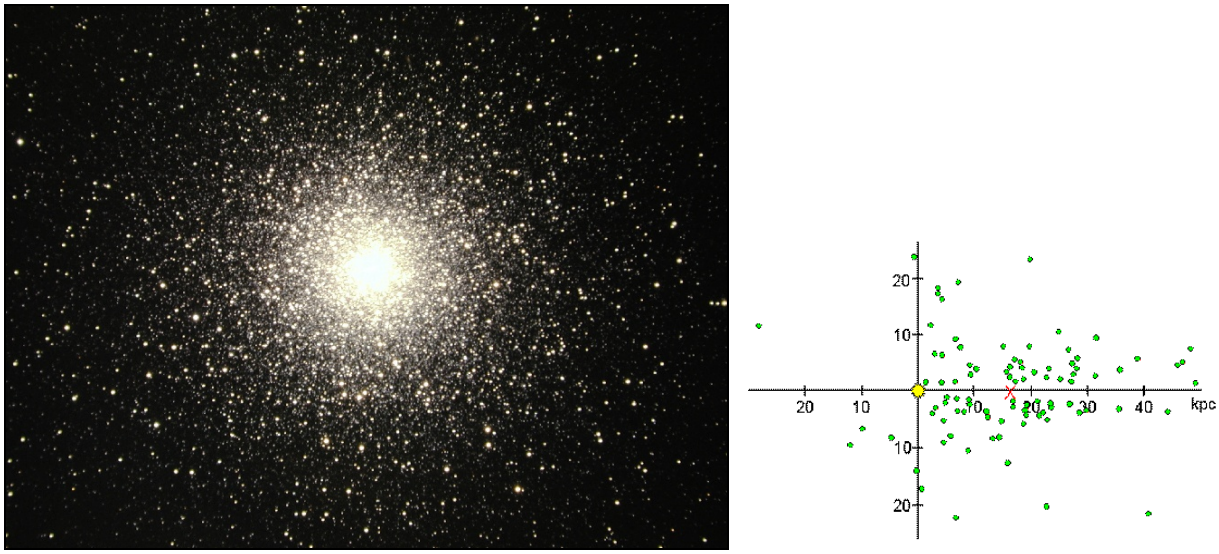


Heber Curtis →

[1]) Čti: *džórdž hejl*.
[2]) Čti: *hárlou š(h)epli*.
[3]) Čti: *híbe(r) k(h)értys*.

# 8. Hvězdné ostrovy

Velká debata se uskutečnila po důkladné několikaměsíční přípravě v pondělí 26. dubna 1920 ve Washingtonu. Shapley si připravil svůj příspěvek na docela jednoduché úrovni. Uvědomil si, že posluchači, i když jsou členy Akademie věd, nepatří mezi odborníky právě v tomto oboru a speciálním astronomickým pojmům nemohou tudíž rozumět. Curtis, ač zkušený řečník i před laickým publikem, prezentoval naproti tomu svůj příspěvek dosti technicky. Obhajoval Kapteynovy výsledky a tvrdil, že průměr naší Galaxie opravdu nepřesahuje 40 000 světelných let. Ostatní galaxie jsou podle Curtise od nás relativně daleko; například známá mlhovina v souhvězdí Andromedy je vzdálena na půl milionu světelných roků, ostatní jsou i více než dvacetkrát dál.



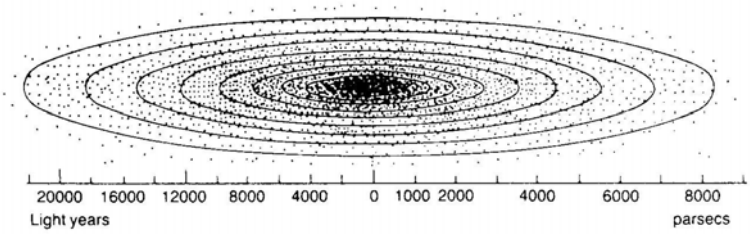

Kulová hvězdokupa M 15 a Shapleyho graf rozložení kulových hvězdokup v Galaxii (viz též praktikum „Vzdálenost středu Galaxie“).

Shapley vycházel z představy, že kulové hvězdokupy ohraničují naši Galaxii. Ta je desetkrát větší než si ji představuje Curtis, ale další spirální mlhoviny nejsou tak velké jako Galaxie a nalézají se blíže než uvádí Curtis.

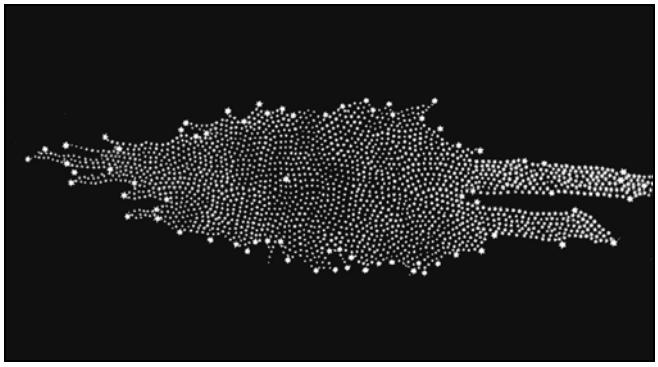
Po debatě oba diskutující zveřejnili své argumenty i v písemné podobě, a přípravě této práce věnovali nemálo úsilí. Zde se objevila řada důležitých obecných myšlenek, které přímo v diskusi nezazněly. Tak třeba Shapley jasně vyjádřil své přesvědčení, že při jakýchkoli úvahách o vzdáleném vesmíru musíme automaticky předpokládat, že pozemské zákony fyziky platí kdekoli ve vesmíru. Kdybychom to nepřipustili, byly by veškeré naše úvahy o světě hvězd a galaxií čirými spekulacemi.

Debata samozřejmě nic definitivně nevyřešila, jasného vítěze nebylo. Obě strany si podržely své původní názory a vědecká komunita zůstala rozdělena.

Z připravované knihy *Zlaté století astronomie* (Aventinum, Praha).




Kapteynův vesmír.



praktikum

# Rozložení objektů v Galaxii

Galaxie je komplikovaný gravitačně vázaný systém složený z hvězd a rozptýlené látky. Při zjišťování, jak staré jsou objekty různých typů (hvězdy, hvězdokupy, mlhoviny) a jak se vyvíjejí, je důležité prozkoumat jejich rozložení v Galaxii (v něm se odráží jejich pohyb v soustavě). Některé objekty jsou nakupeny kolem středu Galaxie, jiné se nacházejí v galaktické rovině, u dalších je stupeň koncentrace ke středu Galaxie či galaktickému rovníku nevelký. Naším úkolem bude prozkoumat rozložení jasných hvězd spektrálního typu O a B, otevřených hvězdokup a kulových hvězdokup v Galaxii.

**Pracovní postup:**

1. Při studiu rozložení objektů v Galaxii je nejvhodnější používat galaktické souřadnice. Připomeňte si proto definici galaktické délky $l$ a galaktické šířky $b$. Z mapy hvězdné oblohy vypište, kterými souhvězdími prochází galaktický rovník, kde leží střed Galaxie, ve kterých souhvězdích se nacházejí galaktické póly (výsledky zapište do připravené tabulky 1).

2. V tabulce 2 je uvedeno 10 nejjasnějších hvězd. Doplňte do tabulky jejich jména. Polohy hvězd uvedené v galaktických souřadnicích pak vyneste do obr. 1. Do stejného obrázku vyneste i polohy 20 jasných hvězd spektrálního typy O a B (tabulka 3; od předchozích hvězd je odlište jiným symbolem). Doporučení: galaktickou délku $l$ vynášejte na vodorovnou osu tak, aby délka $l = 0°$ byla uprostřed obrázku, nikoli na levém okraji. Diskutujte jejich rozložení v Galaxii.

3. Podobně jako v předchozím bodu vyneste do obr. 2 galaktické souřadnice 30 nejjasnějších kulových hvězdokup a 16 mladých otevřených hvězdokup (tabulky 4 a 5). Opět je rozlište různými symboly (např. plné, prázdné kotoučky).

Diskutujte jejich rozložení v Galaxii. Ke kterým populacím hvězd kulové hvězdokupy a otevřené hvězdokupy patří? Proč má otevřená hvězdokupa Plejády relativně velkou galaktickou šířku ($b = –23°$)?

***Vstupní data, výsledky:***

**Tabulka 1**

Galaktický rovník prochází souhvězdími (vypište jen zkratky):

_____

_____

Střed Galaxie je v souhvězdí: _____

Galaktické póly se nacházejí v souhvězdích: severní: _____

jižní: _____

**Tabulka 2. Deset nejjasnějších hvězd**

| *Označení* | *Jméno hvězdy* | *l* (°) | *b* (°) |
|---|---|---|---|
| α Tau | | 181 | –20 |
| α Aur | | 163 | 5 |
| β Ori | | 209 | –25 |
| α Car | | 261 | –25 |
| α CMa | | 228 | –8 |
| α Cru | | 300 | –1 |
| α Vir | | 317 | 50 |
| α Boo | | 15 | 69 |
| α Cen | | 316 | –1 |
| α Lyr | | 68 | 19 |

**Tabulka 3. Dvacet jasných hvězd spektrálního typu O a B**

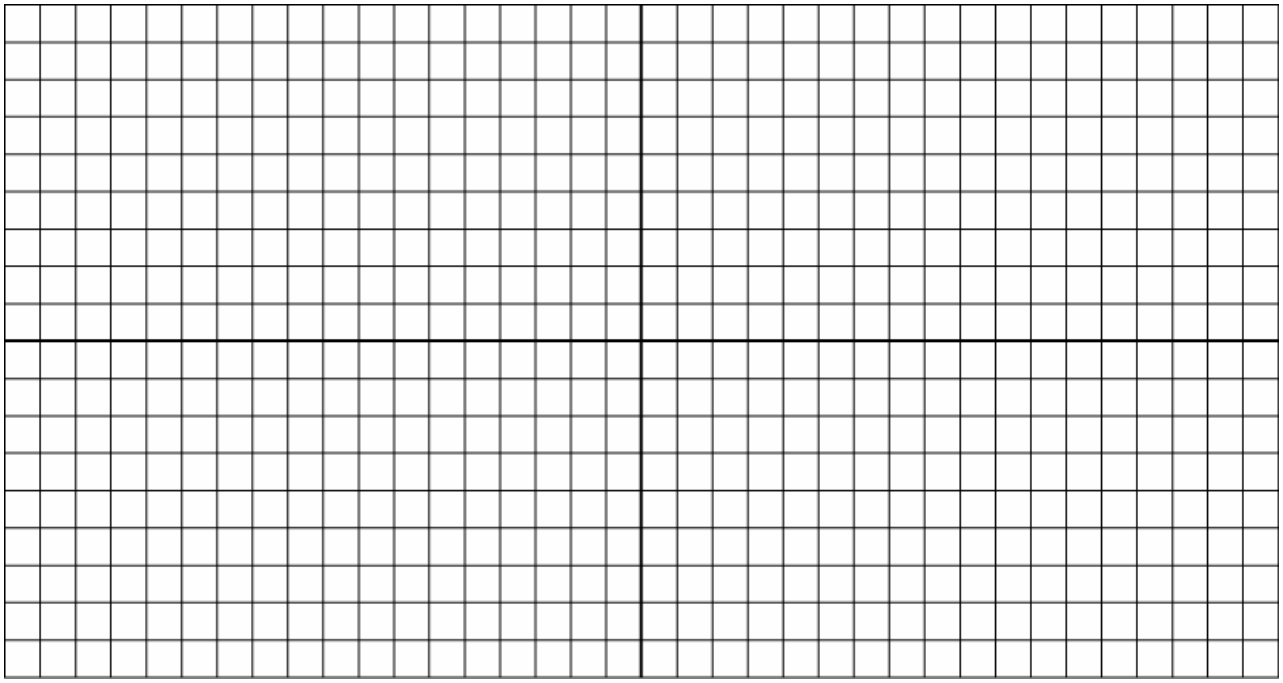
| *Označení* | *l* (°) | *b* (°) | *Označení* | *l* (°) | *b* (°) |
|---|---|---|---|---|---|
| γ Cas | 124 | –2 | β Cru | 303 | 3 |
| δ Ori | 204 | –17 | ε Cen | 311 | 8 |
| ε Ori | 205 | –17 | ζ Cen | 315 | 14 |
| ζ Ori | 207 | –16 | β Cen | 312 | 1 |
| κ Ori | 215 | –18 | ηCen | 323 | 16 |
| β CMa | 226 | –14 | δ Sco | 350 | 22 |
| ε CMa | 240 | –11 | β Sco | 353 | 23 |
| η CMa | 243 | –6 | ζ Oph | 7 | 23 |
| ζ Pup | 256 | –4 | λ Sco | 352 | –3 |
| κ Vel | 276 | –4 | κ Sco | 351 | –5 |

**Tabulka 4. Třicet nejjasnějších kulových hvězdokup**

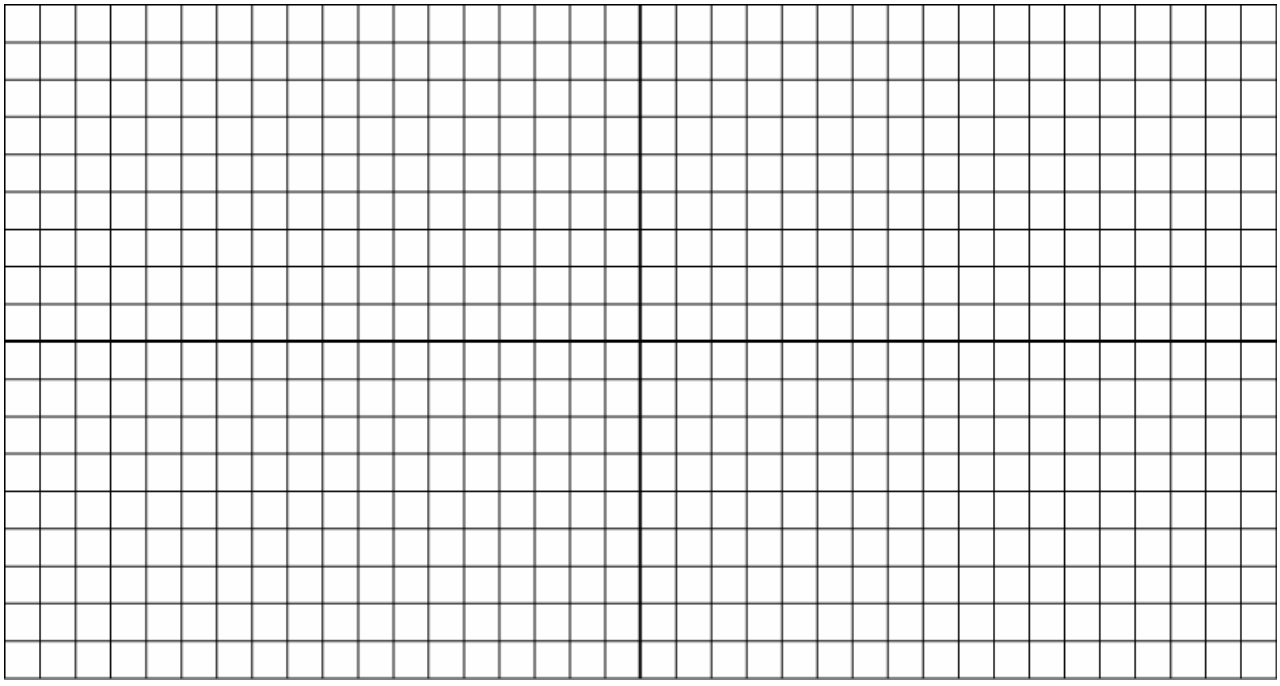
| *Označení* | *l* (°) | *b* (°) | *Označení* | *l* (°) | *b* (°) |
|---|---|---|---|---|---|
| NGC 104 (47 Tuc) | 306 | –45 | M 62 | 354 | 7 |
| NGC 1851 | 244 | –35 | M 19 | 357 | 9 |
| NGC 2808 | 282 | –11 | M 92 | 68 | 35 |
| NGC 3201 | 278 | 9 | NGC 6352 | 342 | –8 |
| NGC 4833 | 304 | –8 | NGC 6388 | 346 | –7 |
| NGC 5139 (ω Cen) | 310 | –50 | NGC 6397 | 338 | –13 |
| M 3 | 41 | 78 | NGC 6441 | 354 | –6 |
| M 5 | 4 | 47 | NGC 6541 | 350 | –12 |
| NGC 5986 | 337 | 13 | M 28 | 8 | –6 |
| M 80 | 353 | 19 | M 22 | 10 | –8 |
| M 4 | 351 | 15 | NGC 6723 | 0 | –17 |
| M 13 | 59 | 41 | NGC 6752 | 337 | –26 |
| M 12 | 16 | 26 | M 55 | 9 | –24 |
| NGC 6235 | 359 | 13 | M 15 | 65 | –27 |
| M 10 | 15 | 22 | M 2 | 54 | –36 |

**Tabulka 5. Mladé otevřené hvězdokupy (mladší než $10^8$ let)**

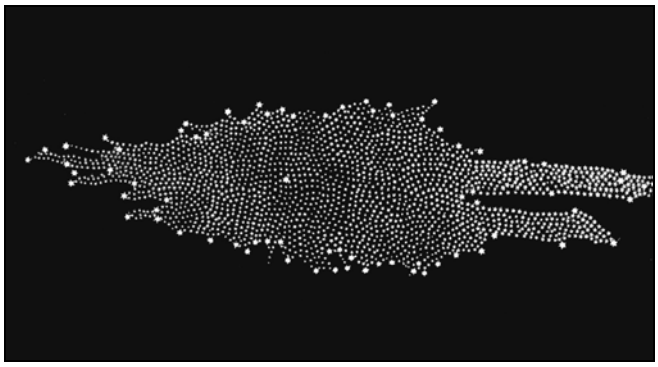
| *Označení* | *l* (°) | *b* (°) | *Označení* | *l* (°) | *b* (°) |
|---|---|---|---|---|---|
| M 103 | 128 | –1 | NGC 2362 | 238 | –6 |
| NGC 869 (h Per) | 135 | –3 | IC 2391 | 271 | –7 |
| NGC 884 (χ Per) | 134 | –3 | IC 2602 | 290 | –5 |
| Mel 20 (Perseus) | 147 | –7 | NGC 4755 | 304 | 2 |
| M 45 (Plejády) | 167 | –23 | M 21 | 8 | –1 |
| M 38 | 173 | 1 | M 16 | 17 | 0 |
| M 36 | 175 | 2 | M 11 | 28 | –3 |
| NGC 2264 | 203 | 3 | M 39 | 93 | –2 |



Obr. 1. Rozložení jasných hvězd spektrálního typu O a B



Obr. 2. Rozložení kulových a otevřených hvězdokup



čítanka

# Zdeněk Pokorný: Zářící vodík

Fyziku z Lymanovy laboratoře Harvardovy univerzity Edwardu Purcellovi a jeho studentu Haroldu Ewenovi se 25. března 1951 navečer podařilo pomocí radioteleskopu zaznamenat signál ze souhvězdí Hadonoše; zdroj záření byl přinejmenším 3000 až 5000 světelných let daleko, ale co je nejdůležitější – zářil na vlnové délce 21 centimetru. Na této vlnové délce by podle teoretických úvah měl zářit vodík, nejhojnější prvek ve vesmíru.

Zaznamenat záření vodíku se pokoušela i nizozemská skupina vedená Janem Oortem. Ta budovala první radioteleskopy z vyřazených vojenských radarů, o něž těsně po válce nebyla nouze. Holandské astronomy, kteří měli při přípravě zařízení pro detekci rádiového záření dlouho před svými americkými kolegy náskok, o prvenství připravil požár v laboratoři krátce před objevem. I tak pouze o šest týdnů později – 11. května – Oortova skupina objev potvrdila, a pak ještě se přidali australští radioastronomové Wilbur Christiansen a Jim Hindman z observatoře v Sydney (to bylo 12. července). Všechny tři skupiny, které se o svých přípravách a výsledcích navzájem informovaly, zveřejnily zprávy o pozorování záření vodíku na vlnové délce 21 centimetrů v prestižním časopisu *Nature* dne 1. září 1951. Astronomická veřejnost se tak naplno dověděla o velkém radioastronomickém objevu – vodík doopravdy září na vlnové délce 21 centimetrů.

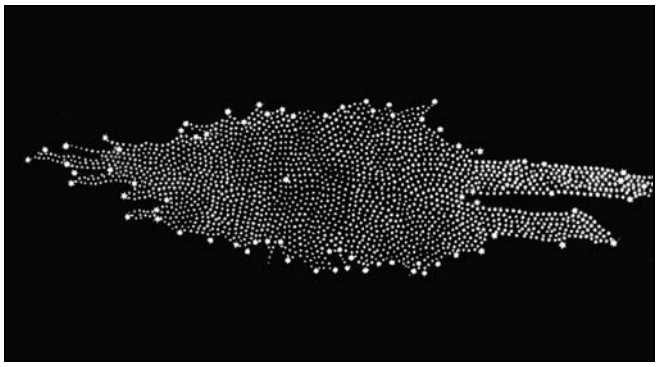
První kapitolu tohoto příběhu ale napsali teoretici: vědělo se, že mezihvězdná látka je převážně z vodíku v neutrálním stavu, ale ten ve viditelném oboru spektra nezáří. Kdyby v jiné části spektra přece jen zářil, zaznamenali bychom jej a měli tak

možnost mapovat jeho rozložení kolem nás, zkrátka „viděli“ bychom, jak vypadá naše Galaxie i ve velkých vzdálenostech od nás.

V roce 1944 holandský astronom (tehdy ještě student) Hendrik van de Hulst si uvědomil, že v podmínkách mezihvězdného prostředí dochází ke vzájemným srážkám atomů vodíku jen velice zřídka, takže některé z nich mají dostatek času k tomu, aby samovolně přešly z energeticky vyššího stavu do stavu nižšího, základního. Přechodem do stavu s nižší energií se podle všeobecně platných fyzikálních principů musí rozdíl energií vyzářit, a to na přesně dané frekvenci (či vlnové délce). Van de Hulstovi vyšlo, že chladný mezihvězdný vodík by měl zářit na frekvenci 1420 megahertzů (což ve vakuu odpovídá vlnové délce 211 milimetrů). Pravděpodobnost, že k takovému přechodu dojde, je ovšem pramalá: uskuteční se v průměru jednou za 11 milionů roků! Když ovšem uvážíme, že radioteleskopy budou sbírat sice nepatrné příspěvky, ale z obrovských oblastí mezihvězdného prostoru, mohlo by těchto přechodů nastat přece jen dostatečné množství k tomu, aby záření chladného vodíku v čáře 21 centimetrů pozorovatelné bylo. Až za sedm let se ukázalo, že tato úvaha byla pravdivá.

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

# 8. Hvězdné ostrovy



*Počítání a výpočty – to je základ pořádku v hlavě.*

Johann Heinrich Pestalozzi, pedagog (1746 – 1827)

## otázky a příklady

**Otázka 8.1.1.** Ve kterém ročním období je u nás Mléčná dráha nejhůře pozorovatelná, neboť je jen nízko nad obzorem?

**Otázka 8.1.2.** Kterým (či kterými) z následujících souhvězdí prochází galaktický rovník? Když zvládnete odpověď bez nahlédnutí do mapy hvězdné oblohy, jste zajisté dobrými znalci hvězdného nebe. a) Vlasy Bereniky; b) Orel; c) Vozka; d) Panna; e) Velká medvědice.

**Otázka 8.1.3.** K ionizaci atomu vodíku je zapotřebí energie 13,6 eV. Jakou vlnovou délku musí mít foton, aby došlo k ionizaci atomu vodíku?

**Otázka 8.1.4.** Oblaka ionizovaného vodíku (tzv. oblasti H II) jsou ve srovnání s oblaky neutrálního vodíku (H I) [hustší × řidší ] a [teplejší × chladnější].

**Otázka 8.1.5.** Bylo změřeno, že hustota oblak neutrálního vodíku H I je řádově $10^{-20}$ až $10^{-21}$ kg·m$^{-3}$. Kolik atomů vodíku se nachází (řádově) v 1 cm$^3$?

**Otázka 8.1.6.** Které hvězdy se nacházejí uprostřed oblastí H II? a) staré hvězdy; b) červené hvězdy; c) horké hvězdy.

**Otázka 8.1.7.** Proč astronomové na počátku 20. století silně podcenili velikost naší Galaxie? a) Soudili, že kulové hvězdokupy nepatří ke Galaxii. b) Neuvažovali mezihvězdnou extinkci. c) Špatně určovali hvězdné paralaxy. d) Nevěděli, že naše Galaxie je spirální.

**Otázka 8.1.8.** Pokud jste správně vyřešili praktikum „Vzdálenost středu Galaxie“, bude pro vás tato otázka snadná: která skutečnost umožnila Harlowu Shapleyovi zjistit velikost Galaxie a správné místo, které v ní zaujímá Slunce? a) Kulové hvězdokupy se koncentrují daleko od Slunce. b) Kulové hvězdokupy se nalézají v oblasti jen několik parseků veliké. c) Kulové hvězdokupy dělí od Slunce stejná vzdálenost. d) Kulové hvězdokupy se hromadí kolem galaktického rovníku.

**Otázka 8.1.9.** Které z následujících objektů *nenajdeme* ve spirálních ramenech galaxií? a) supernovy; b) velmi staré hvězdy; c) oblasti ionizovaného vodíku (HII); d) hvězdy spektrálních typů O a B.

**Otázka 8.1.10.** Převažující součástí mezihvězdné látky, která patří do ploché složky Galaxie, je: a) plyn, a to především vodík; b) pevná silikátová zrna; c) ledové krystalky.

**Otázka 8.1.11.** V místech spirálních ramen Galaxie pozorujeme nejvyšší koncentraci žhavých hvězd spektrálního typu O a B, protože: a) jsou na sebe gravitačně silně vázány (jsou to hmotnější hvězdy než Slunce); b) vyvíjejí se tak rychle, že zatím nestačily opustit místo svého vzniku; c) je zde nejméně mezihvězdné látky pohlcující záření hvězd.

**Otázka 8.1.12.** Budeme srovnávat otevřené a kulové hvězdokupy – nikoli podle toho, jak se nám jeví v dalekohledu, ale podle informací, které o nich získáme astronomickým výzkumem. Připomeňme si nejdříve, co je pro *otevřené* hvězdokupy typické. Pro tyto hvězdokupy je charakteristické, že: a) jde o relativně mladé útvary (jsou staré nanejvýš $10^7$ až $10^9$ let); b) jsou zde relativně častá (až 1krát ročně) těsná přiblížení hvězd k jedné astronomické jednotce; c) neobsahují žádnou mezihvězdnou látku.

**Otázka 8.1.13.** Pokračujme ve srovnávání otevřených a kulových hvězdokup. Která ze tří uvedených vlastností je typická pro *kulové* hvězdokupy? a) Jsou to nejvzdálenější pozorované galaktické objekty. b) Uvnitř kulové hvězdokupy se nachází velké množství mezihvězdné látky. c) Hvězdy ve hvězdokupě se navzájem pohybují velkými rychlostmi (1000 km/s i více).

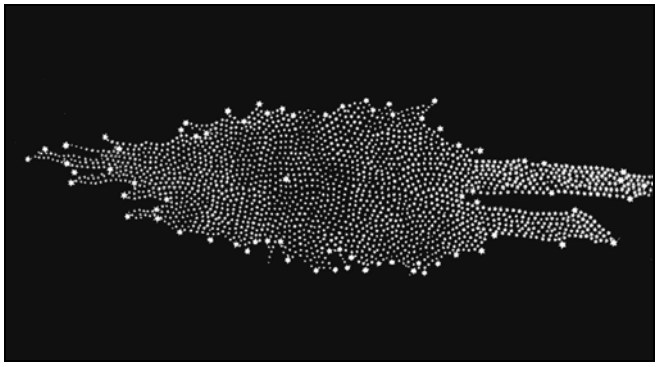
**Otázka 8.1.14.** Do třetice otevřené a kulové hvězdokupy: které jsou nejpodstatnější rozdíly mezi otevřenými a kulovými hvězdokupami?

**Otázka 8.1.15.** Hvězdy kulové složky se pohybují, jak známo, kolem středu Galaxie po protáhlých (a většinou neuzavřených) trajektoriích. Kde se zdržují nejdéle – poblíž centra Galaxie nebo naopak nejdále od centra? Dokážete vysvětlit, proč tomu tak je?

**Otázka 8.1.16.** Se znalostmi, které již máte o vývoji hvězd, už dokážete vysvětlit, proč hvězdy kulové složky obsahují relativně méně prvků těžších než vodík a helium ve srovnání s hvězdami ploché složky. Napište vaši odpověď.

**Otázka 8.1.17.** Která dvojice pojmů *nepatří* významově k sobě? a) kulová složka Galaxie, halo; b) relativně mladé hvězdy, plochá složka Galaxie; c) kulová hvězdokupa, plochá složka Galaxie.

**Otázka 8.1.18.** Jen jedno z následujících tvrzení je správné. Jistě snadno určíte, které to je. a) Hvězdy z otevřených hvězdokup patří k nejstarším objektům v naší Galaxii. b) Slunce je jednou z nejstarších hvězd v Galaxii. c) Proměnná hvězda T Tauri je mladší než Pleione (jedna z hvězd v otevřené hvězdokupě Plejády), Pleione je zase mladší než naše Slunce.



medailon

# William Frederick Herschel

### (15. 11. 1738 – 25. 8. 1822)

O rodu Herschelů napsala Paulina Šafaříková v Knihovně přátel oblohy (Praha, 1900): „Rodina Herschelova žila na začátku 17. století na Moravě... Pronásledování jinověrců donutilo ji však, by opustila vlast. Rodina Herschelova uchýlila se do blízkého Saska. Vilémův děd Abraham byl zahradníkem v Drážďanech. Jeho nejmladší syn Isaak přesídlil roku 1731 do Hannoveru, kde se mu roku 1738 narodil syn Vilém."

Dnes víme, že Herschelovi pocházeli z vesnice Heršpice nedaleko Slavkova u Brna a původně se jmenovali Jelínkovi. Jako protestanti byli vystaveni náboženskému útlaku, proto opustili rodnou vesnici a odešli do svobodomyslnějšího Saska, kde se z Jelínků stali Hirschly a později Herschely. Budoucí slavný hvězdář Wilhelm uprchl v roce 1755 do Velké Británie, aby se v Hannoveru vyhnul vojenské službě. Začal se tam živit jako varhaník a hudební skladatel a dotáhl to až na královského kapelníka.

Jeho hlavním zájmem však byla astronomie. Vypráví se, že při koncertech, jež dirigoval, využíval dlouhých potlesků a přestávek k tomu, aby na střeše koncertní síně pozoroval hvězdy. Herschelovou věrnou pomocnicí se v roce 1772 stala sestra Karolina, která ho dokonce i krmila vlastníma rukama, když brousil zrcadla pro své stále dokonalejší dalekohledy, aby totiž jídlem neztrácel drahocenný čas. Herschel jí věnoval menší dalekohled, aby mohla pozorovat oblohu v době, kdy sám bude zaneprázdněn. Byl to vynikající dárek: Karolina jím objevila svou první kometu v roce 1786 a za pouhých 11 let nalezla celkem 8 komet, což je dodnes naprosto mimořádný výkon.

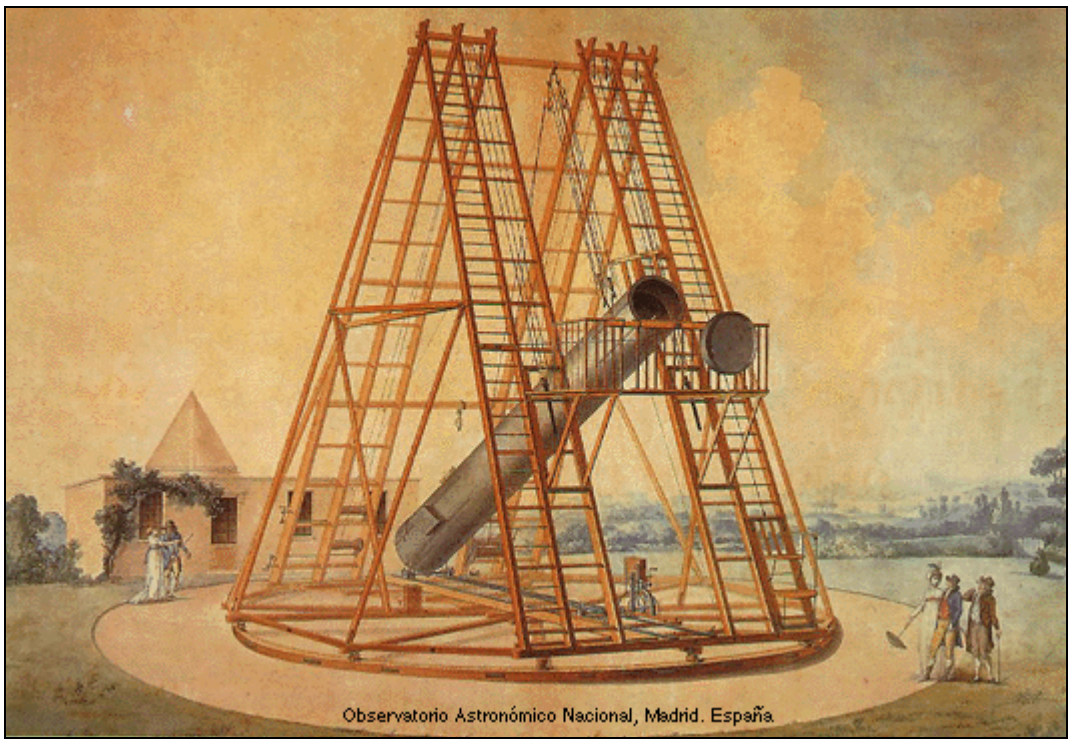
Herschel sám se proslavil roku 1781, když při prohlídce oblohy nalezl 13. března v souhvězdí Blíženců neznámé těleso, které sice zpočátku mylně považoval za kometu, ale o němž se brzy zjistilo, že jde o novou planetu. Herschel ji takticky nazval Georgium Sidus, tj. Hvězda (krále) Jiřího, a tento tah se mu vyplatil. Král Jiří III. mu stanovil zvláštní apanáž, takže od té doby se Herschel mohl věnovat astronomii naplno. Navržený název se však mezinárodně neprosadil; planetu někteří raději

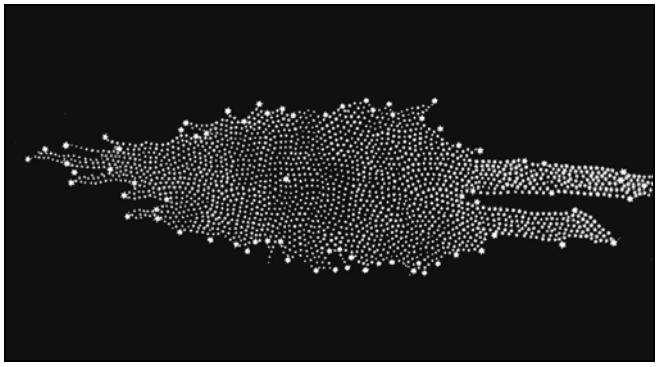
nazývali Herschel, ale nakonec se ujal dnešní název Uran, vycházející z řecké mytologie, v níž byl Uran vládcem všech bohů.

Herschel sám neusnul na vavřínech světské slávy (byl posléze jmenován lordem) a pilně dále studoval oblohu. Zasloužil se o první přibližnou představu o struktuře Mléčné dráhy, rozpoznal a sestavil první katalog vizuálních dvojhvězd a v roce 1801 v důvtipném pokusu s teploměry, vkládanými do barevně rozloženého proužku slunečního světla, odhalil existenci neviditelného tepelného záření za hranou červeného světla. Tomuto záření proto říkáme infračervené a jeho prostřednictvím sledujeme ve vesmíru chladné hvězdy, mlhoviny a mezihvězdný prach.

Teprve po své padesátce se William Herschel oženil a v roce 1792 se mu narodil syn John, který pak kráčel v otcových šlépějích a stal se neméně proslulým astronomem, když zejména rozšířil otcovy katalogy o pozorování objektů na jižním nebi při svém pobytu v Jižní Africe. Byl též průkopníkem fotografie; jemu vděčíme i za termíny pozitiv a negativ. Rod Herschelů proslavil i Johnův syn William James Herschel, který se narodil roku 1838. Jako jedenadvacetiletý mladík za pobytu v Bengálsku objevil daktyloskopii – využití otisků prstů k identifikaci osob.

Autorem medailonu je Jiří Grygar.





úloha k zamyšlení

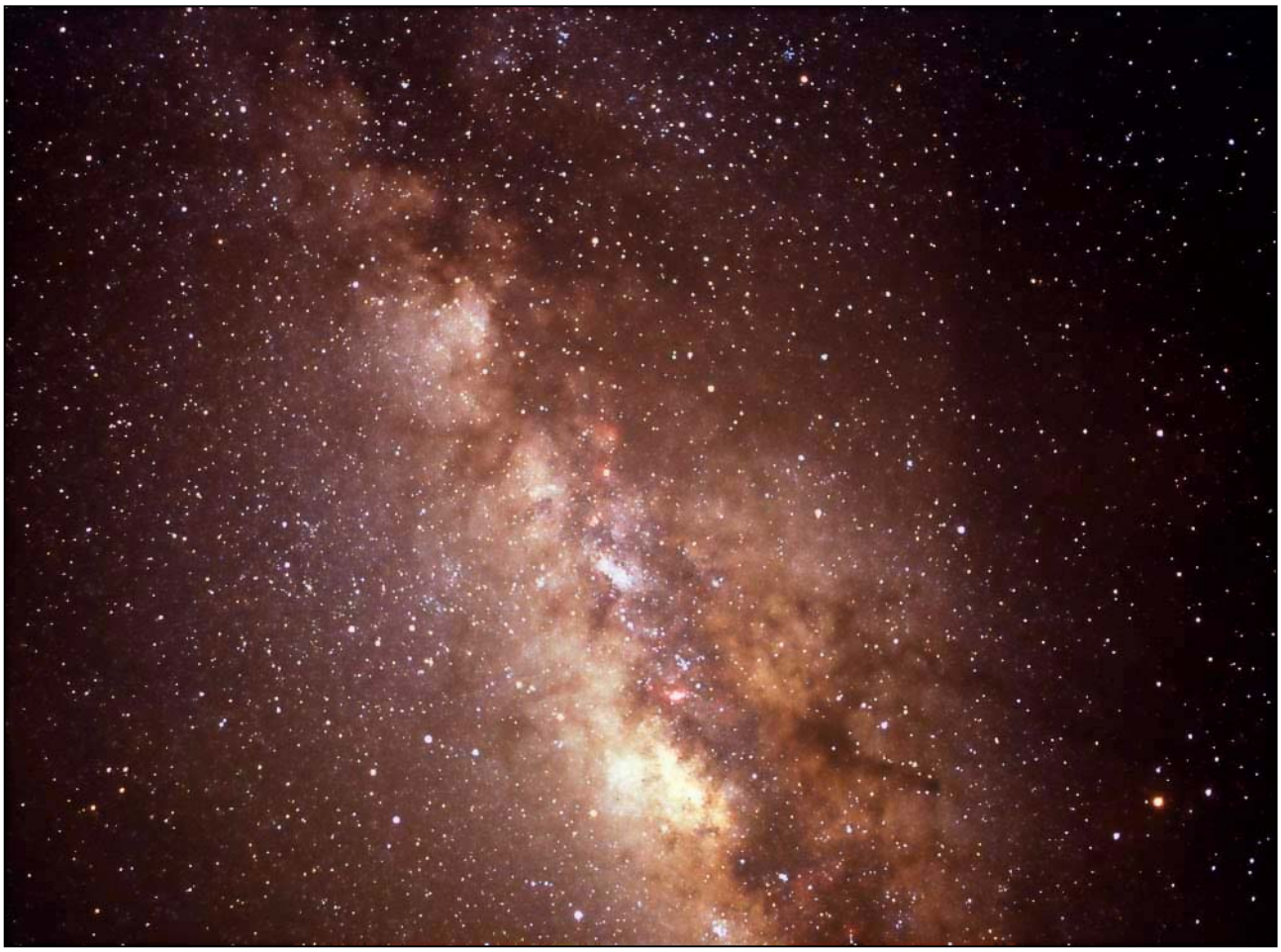
# Uvidíme hvězdy v kulové hvězdokupě?

Známá kulová hvězdokupa M 13 v souhvězdí Herkulu se jeví jako mlhavý obláček o celkové hvězdné velikosti $a$ = 5,9 mag. Jaká je střední hvězdná velikost jednotlivých hvězd, předpokládáme-li, že ve hvězdokupě M 13 je jich asi půl milionu? Výsledek srovnejte se skutečností (jak známo, za dobrých pozorovacích podmínek spatříme jednotlivé hvězdy na okraji hvězdokupy i středně velkým dalekohledem) a případný rozdíl se pokuste vysvětlit.

Kulová hvězdokupa M 13 v souhvězdí Herkula.

# 8.2. Co se skrývá uprostřed Galaxie?

Pozorujeme-li hvězdnou oblohu mezi gamou Střelce a thétou Hadonoše, díváme se přímo do centra naší Galaxie. Ani velkými dalekohledy tu ovšem nespatříme mnoho neobvyklého. Viditelné záření je totiž tímto směrem silně pohlcováno (extinkce ve viditelném oboru spektra přesahuje 30 magnitud!), takže naději na úspěch mají jen infračervená a zejména pak rádiová pozorování. Kdyby nebylo mezihvězdné extinkce směrem k centru Galaxie, spatřili bychom galaktické jádro jako narůžovělý oblak o průměru asi 25 stupňů. Tento útvar by byl po Slunci a Měsíci nejjasnějším objektem na obloze.



Mléčná dráha v souhvězdí Střelce, kde se našim pohledům ukrývá centrální část Galaxie.

### Skryté jádro

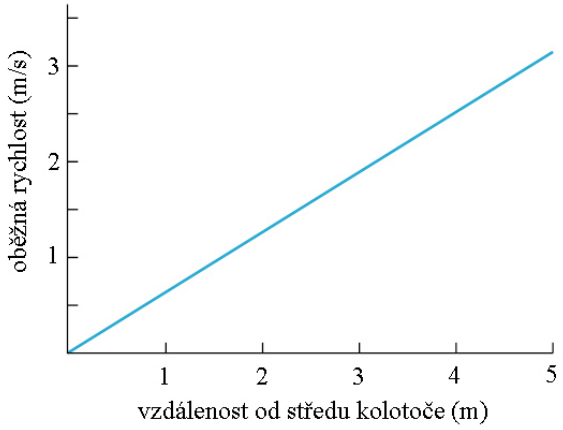
Jádrem Galaxie je patrně obrovská, mírně zploštělá kulová hvězdokupa o rozměrech 3 × 5 kpc. Má hmotnost asi 10 bilionů Sluncí, přičemž nejčetnější jsou v ní slabí červení trpaslíci. Celé jádro obklopuje hustý prstenec mezihvězdné látky, jenž dokonale znemožňuje průzkum jádra ve vizuálním oboru spektra. Koncentrace hvězd směrem ke středu prudce narůstá, rychle se zvyšuje pravděpodobnost blízkých setkání hvězd.

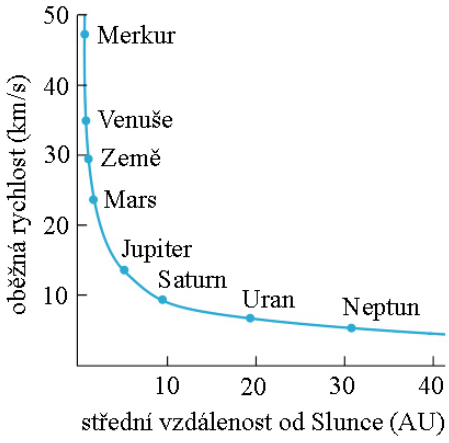
V samém centru je galaktické jadérko asi jeden parsek velké, které je zdrojem výronů plynu a netepelného rádiového záření. Zřejmě je to výsledek interakce jedné či dvou velmi hmotných černých děr s hvězdami a mezihvězdnou látkou v těsném okolí jadérka.

### Rotace Galaxie

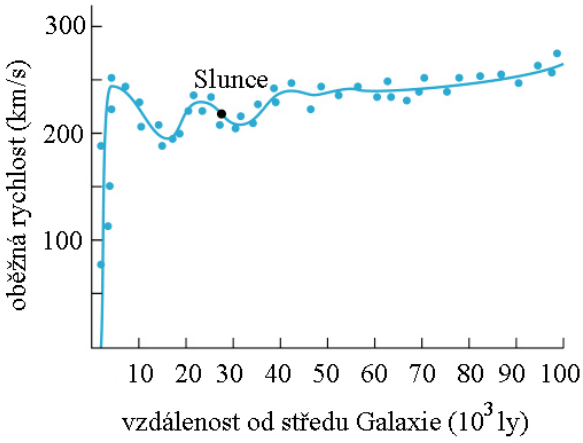
Nacházíme se uvnitř Galaxie, a přesto (či právě proto) není snadné stanovit, jak rotuje celá hvězdná soustava. Měřením radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd v širokém okolí Slunce zjišťujeme, že tyto objekty obíhají kolem centra Galaxie rychlostmi, jež závisejí na vzdálenosti od středu Galaxie.

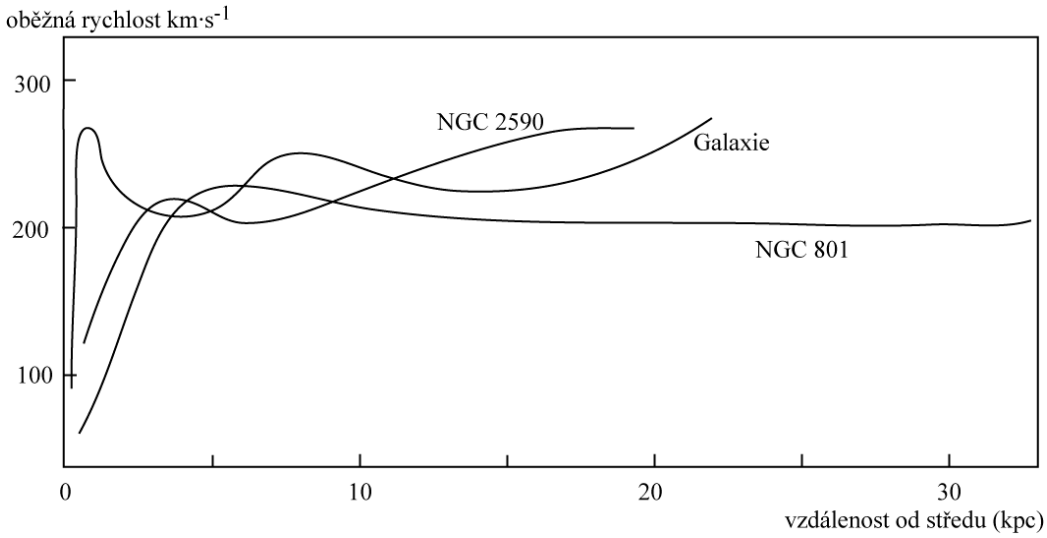
Kdyby Galaxie byla pevnou deskou, připomínající kolotoč, byla by oběžná rychlost objektů přímo úměrná jejich vzdálenosti od středu otáčení. V případě, že by se jednalo o tzv. problém dvou těles, který lze popsat Keplerovými zákony, oběžná rychlost by na vzdálenosti závisela nepřímo úměrně (viz obrázky).




Galaxie svými rotačními vlastnostmi ovšem nepřipomíná plochou desku, stejně tak nemůžeme tvrdit, že by v centru Galaxie byla soustředěna převážná část hmoty, jako je tomu v případě sluneční soustavy. Závislost oběžné rychlosti na vzdálenosti od středu hvězdné soustavy je poměrně složitou funkcí, která je navíc u různých galaxií poněkud odlišná.




Rotace několika spirální galaxií včetně naší.

čítanka

# G. Westerhout: Pohled do centra Galaxie

V roce 1952 jsme společně s Walravenem zkoumali kvalitu obrazu v Hartebeestpoortdamu (v Jižní Africe), kde se uvažovalo o zřízení pozorovací stanice. K měření jsme používali malý přenosný dalekohled. V té době Jan H. Oort poprvé ve svém životě navštívil jižní polokouli. Jelikož jsme pozorovali v naprosté tmě, poněkud nás mrazilo při pomyšlení na paviány, kteří se potloukali kolem našeho tábora. A tu pojednou Jan Oort zmizel.

V tom zprvu nebylo nic nepřirozeného, ale po čtvrthodině jsme se o něj začali skutečně strachovat. Dali jsme se do systematického pátrání s obavou, že ho mezitím napůl sežral pavián, lev nebo podobná divá zvěř. Po dosti dlouhé době jsme ho však našli nedotčeného na opačné straně návrší („vaše kapesní svítilny mne oslepovaly“), jak leží na zádech ve zvlhlé trávě, riskuje tak zápal plic a pozoruje střed naší Galaxie, který byl přímo v zenitu. Nemohli jsme ho přimět k tomu, aby se zvedl – prostě nás zahnal! Nikdy nezapomenu na dojem, který to ve mně tehdy vyvolalo. Zde ležel muž, jenž před pětadva-

Foto: Roger Groom

ceti lety jako první z lidí rozluštil strukturu Galaxie a jenž nyní poprvé spatřil v plné kráse přírodní jev, jehož je člověk součástí. Oort hleděl zcela fascinován, a teorie, jež se mu v té chvíli honily v hlavě, téměř doslova vyzařovaly z jeho bytosti.

Úryvek z knihy *Nástin Oortova výzkumu a jeho osobnosti,* D. Reidel, Dordrecht 1980, str. 164; překlad Jiří Grygar.

# 8. Hvězdné ostrovy

*Náporu armád lze vzdorovat, nikoli však myšlence, jejíž čas nadešel.*

Victor Hugo, romanopisec, básník a dramatik
(1802 – 1885)

## otázky a příklady

**Otázka 8.2.1.** Proč u nás (při pozorování ze středních zeměpisných šířek na severní polokouli) v měsíci únoru nepozorujeme téměř žádné kulové hvězdokupy?

**Otázka 8.2.2.** Které z následujících tvrzení *není* pravdivé? a) Pro hvězdy mimo jádro Galaxie nejsou typická těsná přiblížení během oběhu hvězd kolem středu Galaxie. b) Spirální ramena Galaxie jsou projevem nahušťování hvězd a mezihvězdné látky v určitých místech, kde se tyto objekty poněkud pozdrží. c) Žhavé hmotné hvězdy mají největší podíl na celkové hmotnosti Galaxie.

**Otázka 8.2.3.** Kdyby byla veškerá hmota Galaxie soustředěna poblíž galaktického centra, pak by oběžná rychlost s rostoucí vzdáleností od středu Galaxie: a) klesala; b) zůstávala konstantní; c) prudce narůstala až k hodnotě rychlosti šíření světla.

**Otázka 8.2.4.** Úhlová rychlost rotace naší Galaxie, jak plyne z pozorování, je: a) téměř konstantní; b) s rostoucí vzdáleností se zmenšuje (úměrně vzdálenosti od centra, je to svého druhu keplerovská rotace); c) je různá v různých vzdálenostech od středu Galaxie a nelze ji vyjádřit jako jednoduchou funkci vzdálenosti.

**Otázka 8.2.5.** Relativně nejmladší objekty se v naší Galaxii vyskytují: a) v samém centru Galaxie; b) v blízkosti roviny galaktického rovníku; c) výskyt není nijak omezen polohou v Galaxii.

praktikum

# Vzdálenost středu Galaxie

*„Připomínám každému, kdo bude měřit hvězdný vesmír, že hvězdné kupy jsou signální světla. Ukazují cestu do centra Galaxie i na její okraje ... Kulové hvězdokupy jsou svého druhu kostra - vágní kostra celé Galaxie, první a stále nejlepší indikátory jejího rozsahu a tvaru.“*

*Harlow Shapley (1914)*

H. Shapley určil rozborem vzdáleností a poloh 69 kulových hvězdokup vzdálenost středu Galaxie asi na 15 kpc. Jeho práce z počátku dvacátého století přesvědčivě ukázaly, že Slunce není poblíž středu Galaxie, jak se až do té doby většinou soudilo. V praktiku budeme opakovat Shapleyho postup, využijeme však moderních fotometrických dat. Vyjdeme z předpokladu, že kulové hvězdokupy jsou v Galaxii rozloženy *středově symetricky*. Zjistíme-li prostorové rozložení hvězdokup, můžeme určit také vzdálenost středu Galaxie od našeho pozorovacího stanoviště.

U kulových hvězdokup jsou všechny hvězdy hvězdokupy od nás prakticky stejně daleko. Budeme-li znát vzdálenosti byť jen některých hvězd hvězdokupy, známe vlastně vzdálenost celé hvězdné soustavy.

Na obr. 1 je schematicky zakreslen barevný diagram kulové hvězdokupy. Pro náš úkol je důležitá zejména horizontální větev, neboť v ní se nacházejí pulzující hvězdy typu RR Lyrae. Pro své změny jasnosti obvykle do diagramu nebývají zakreslovány, což se projeví jako mezera v horizontální větvi. Tato mezera nám tudíž prozrazuje, jakou pozorovanou (střední) hvězdnou velikost mají hvězdy typu RR Lyrae. Protože jejich absolutní hvězdná velikost je pro všechny tyto hvězdy přibližně stejná ($M$ = 0,6 mag), lze vypočítat vzdálenost hvězd a tedy i celé hvězdokupy.

Poněvadž známe směry, v nichž se na naší hvězdné obloze hvězdokupy nacházejí, můžeme (při známé vzdálenosti) zjistit prostorové rozložení hvězdokup.

**Pracovní postup:**

1. Pro 20 vybraných kulových hvězdokup je v tabulce 1 uvedena pozorovaná hvězdná velikost hvězd typu RR Lyr, která byla zjištěna z barevných diagramů (z polohy horizontální větve a mezery v ní, podobně

jak bylo vysvětleno v souvislosti s obr. 1). V sousedním sloupci je uvedena velikost extinkce světla, způsobená mezihvězdnou látkou. Pozorovanou hvězdnou velikost opravte o vliv extinkce (uvažte: přičtete nebo odečtete hodnotu extinkce?).

2. Znáte-li pozorovanou hvězdnou velikost $m$ hvězd typu RR Lyr, vypočítejte vzdálenost $r$

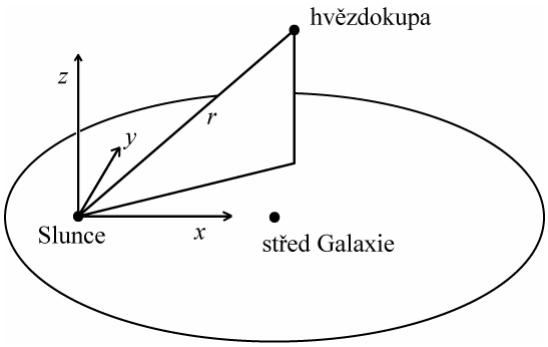
$$r = 10^{(m + 5 - M)/5},$$

kde $M = 0{,}6$ mag. Výsledky poznačte do tabulky 1.

3. Z galaktických souřadnic $l$, $b$ a vzdálenosti $r$ vypočítejte pravoúhlé souřadnice $x$, $y$, $z$, které budete nadále používat. Potřebné vztahy pro výpočet:

$$x = r \cos l \cos b,$$
$$y = r \sin l \cos b,$$
$$z = r \sin b.$$

Výsledky zapište do tabulky 1.




4. Do řezu v rovině $x$–$z$ (obr. 2) vyneste ve vhodném měřítku souřadnice $x$, $z$ všech hvězdokup z tab. 1. Z grafu stanovte střed rozložení bodů nějakou jednoduchou grafickou metodou, např. dělením na symetrické části. Takto najdete střed Galaxie, takže můžete určit vzdálenost Slunce od tohoto středu. Odpovídá hodnotám přijatým v současné době?

5. Do téhož grafu vyneste souřadnice 12 kulových hvězdokup, ležících poblíž galaktického rovníku (tabulka 2). Všimněte si zastínění, které způsobuje jádro Galaxie. Kdybyste pro určení vzdálenosti Slunce od středu Galaxie vzali v úvahu také tyto hvězdokupy, vzdálenost byste podcenili.

6. Postup popsaný v bodech 4 a 5 opakujte i pro řez v rovině $x$–$y$ (obr. 3). Změní se výsledek?

Praktikum bylo připraveno s použitím článku A. Hirshfelda: *Laboratory Exercises in Astronomy – How Far is the Galactic Center?* (Sky and Telescope 68, 1984, č. 6, 498-502).

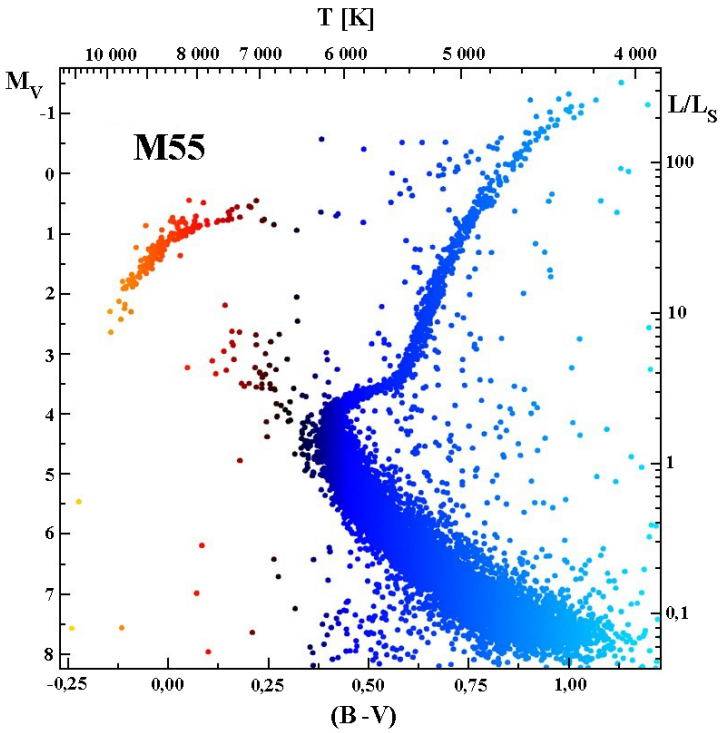
***Vstupní data, výsledky:***

**Tabulka 1**

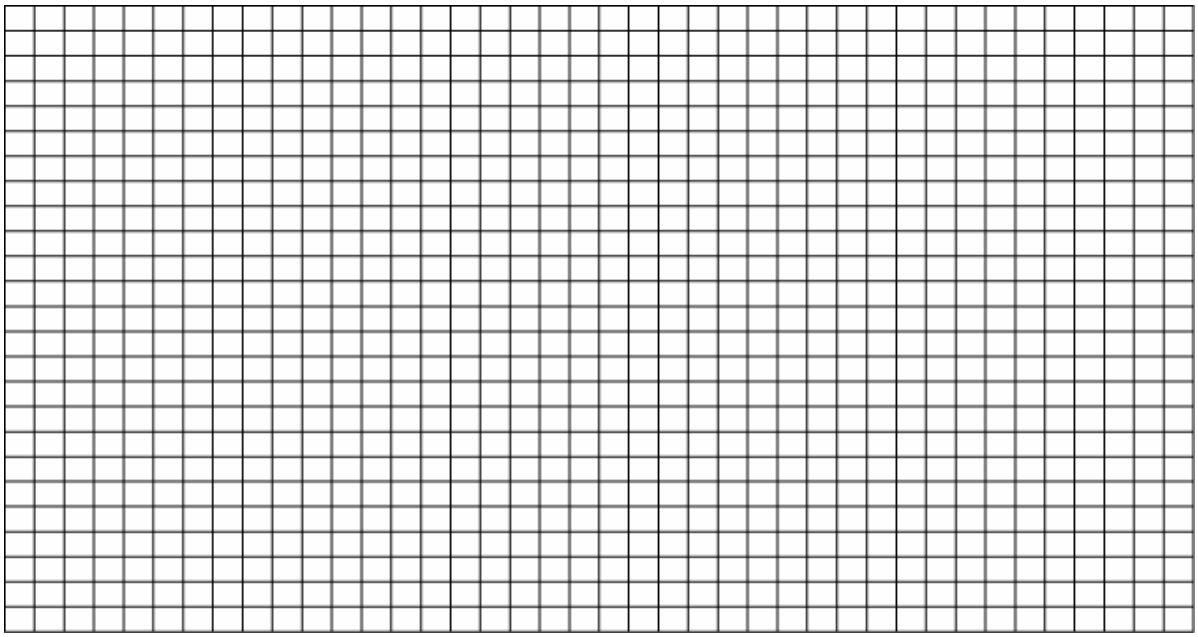
| *Hvězdokupa* | *Hv. vel. RR Lyr* | *Extinkce* (mag) | *Vzdálenost* (kpc) | *Galakt. souřadnice* | | *Pravoúhlé souřadnice* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | *l* (°) | *b* (°) | *x* | *y* | *z* |
| 47 Tucanae | 14,0 mag | 0,13 | | 305,9 | –44,9 | | | |
| NGC 288 | 15,3 mag | 0,10 | | 149,7 | –89,4 | | | |
| NGC 2298 | 16,4 mag | 0,36 | | 245,6 | –16,0 | | | |
| M 68 | 15,6 mag | 0,10 | | 299,6 | 36,0 | | | |
| NGC 5466 | 16,5 mag | 0,17 | | 42,1 | 73,6 | | | |
| IC 4499 | 17,7 mag | 0,79 | | 307,4 | –20,5 | | | |
| NGC 5824 | 17,9 mag | 0,46 | | 332,6 | 22,1 | | | |
| Palomar 5 | 17,3 mag | 0,10 | | 0,9 | 45,9 | | | |
| NGC 5897 | 16,2 mag | 0,20 | | 342,9 | 30,3 | | | |
| M 5 | 15,1 mag | 0,10 | | 3,9 | 46,8 | | | |
| M 80 | 15,9 mag | 0,69 | | 352,7 | 19,5 | | | |
| M 13 | 14,9 mag | 0,07 | | 59,0 | 40,9 | | | |
| NGC 6356 | 17,7 mag | 0,90 | | 6,7 | 10,2 | | | |
| M 54 | 17,7 mag | 0,46 | | 5,6 | –14,1 | | | |
| NGC 6723 | 15,3 mag | 0,03 | | 0,1 | –17,3 | | | |
| M 75 | 17,4 mag | 0,56 | | 20,3 | –25,8 | | | |
| M 72 | 16,9 mag | 0,10 | | 35,2 | –32,7 | | | |
| NGC 7006 | 18,7 mag | 0,43 | | 63,8 | –19,4 | | | |
| M 15 | 15,8 mag | 0,38 | | 65,0 | –27,3 | | | |
| M 30 | 15,2 mag | 0,03 | | 27,2 | –46,8 | | | |

**Tabulka 2. Kulové hvězdokupy poblíž galaktického rovníku**

| *Hvězdokupa* | *Pravoúhlé souřadnice* (kpc) | | |
|---|---|---|---|
| | *x* | *y* | *z* |
| NGC 5286 | 5,7 | –6,5 | 1,6 |
| NGC 6139 | 8,5 | –2,7 | 1,1 |
| M 10 | 3,9 | 1,0 | 1,7 |
| M 62 | 5,8 | –0,7 | 0,8 |
| NGC 6304 | 5,2 | –0,4 | 0,5 |
| NGC 6401 | 6,3 | 0,4 | 0,4 |
| NGC 6517 | 6,9 | 2,4 | 0,9 |
| NGC 6541 | 6,6 | –1,2 | –1,3 |
| NGC 6569 | 7,6 | 0,1 | –0,9 |
| NGC 6642 | 5,2 | 0,9 | –0,6 |
| NGC 6760 | 3,1 | 2,2 | –0,3 |
| M 71 | 2,2 | 3,3 | –0,3 |

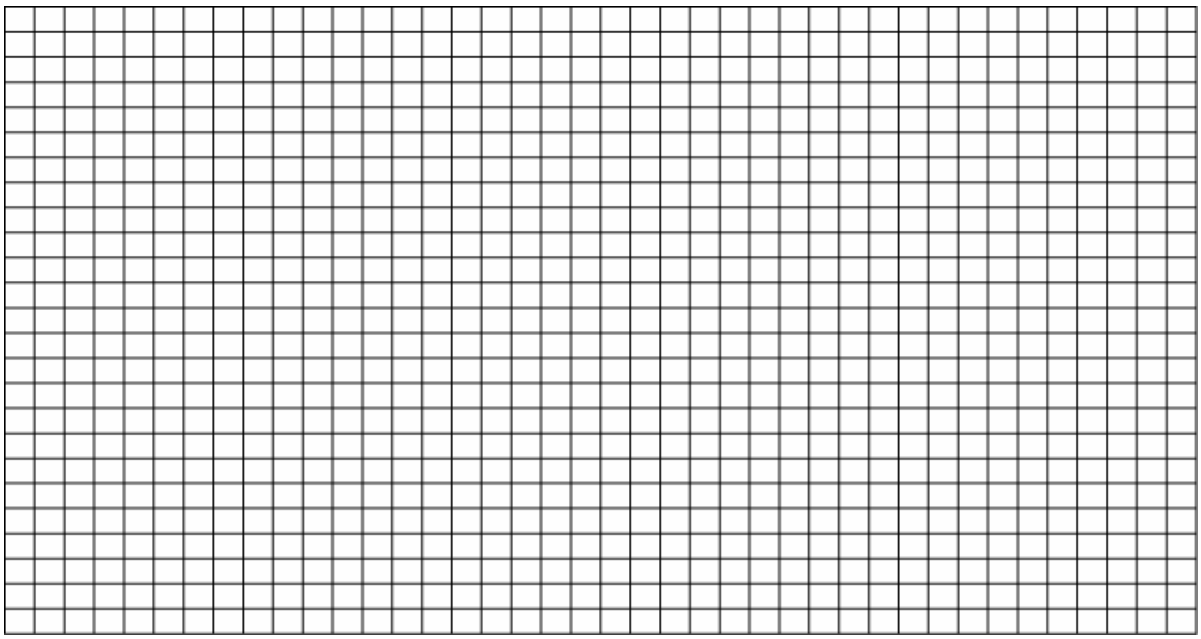



Obr. 1. Barevný diagram kulové hvězdokupy (schéma).



Obr. 2. Řez v rovině x-z.

Vzdálenost Slunce – střed Galaxie: _____ (kpc)



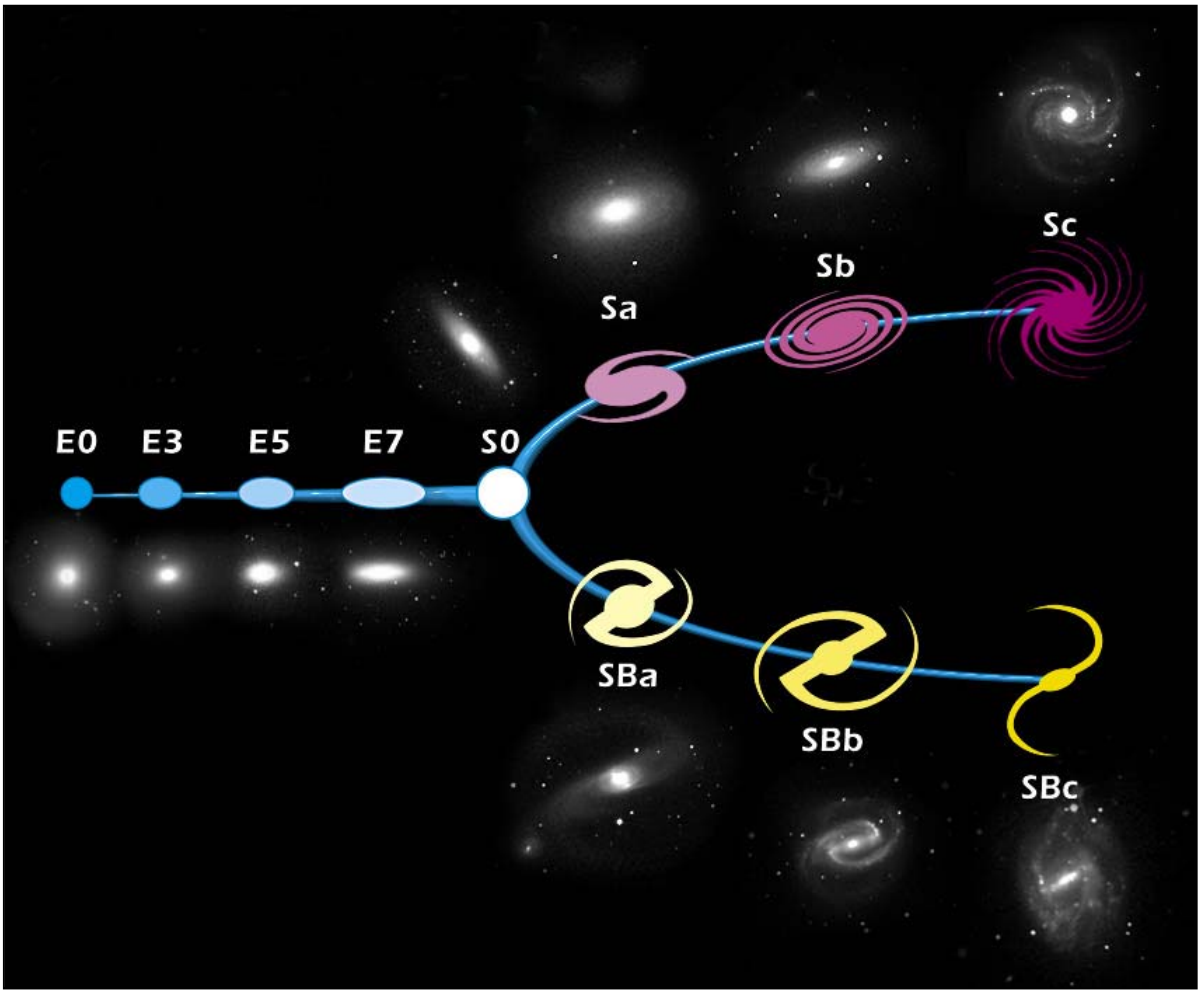
Obr. 3. Řez v rovině x-y.

Vzdálenost Slunce – střed Galaxie: _____ (kpc)

# 8.3. V říši galaxií

Jednotlivých galaxií je ve vesmíru nespočet – v dosahu dnešních dalekohledů je určitě víc jednotlivých galaxií, než kolik lidí vůbec kdy v historii pobývalo na povrchu Země (po každém lidském individuu by tedy mohla být nazvána nějaká galaxie, a ještě by jich větší množství zůstalo nepojmenováno).

Galaxie se už na první pohled navzájem liší svou velikostí i stavbou. Všimněme si těchto vzájemných rozdílů: uvedeme si klasifikaci galaxií, kterou navrhl Edwin Hubble v roce 1926 a o deset let později ji upřesnil. Hubble poté, co galaxie roztřídil do několika základních skupin (viz dále), zakreslil je v podobě zvláštního grafu, připomínajícího ladičku zvuku či vidličku.




Hubblova klasifikace galaxií.

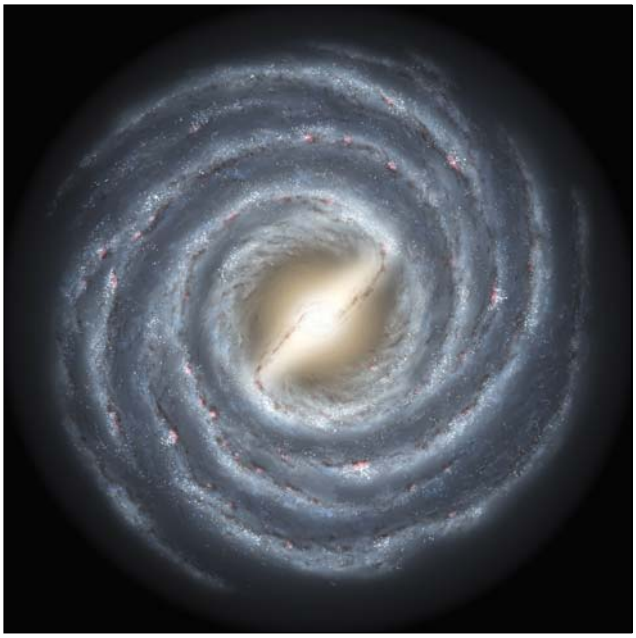
**Spirální galaxie**

Astronomové vypracovali důmyslný systém označování spirálních galaxií: za písmeno *S* se přidá písmeno *B*, jestliže jde o galaxii s příčkou (z anglického „bar“, tj. příčka, tyčka). Malé písmeno *a* až *d* pak označuje vzájemný poměr velikosti jádra a ramen; relativní rozměry jádra vůči ramenům klesají od podtypu *Sa*, resp. *SBa* až k podtypu *Sd*, resp. *SBd* (relativní rozměry jádra vůči ramenům klesají od *Sa*, resp. *SBa* až k *Sd*, resp. *SBd*). Naše Galaxie je typu *Sb* až *Sc*.

Spirální galaxie M 106.

Spirálních galaxií je nejvíce, patří k nim asi polovina všech pozorovaných hvězdných soustav (i naše Galaxie je spirální). Ačkoli mají různorodé tvary, pro všechny jsou charakteristická nejméně dvě spirální ramena. Ta se na jádro napojují přímo nebo prostřednictvím tzv. příčky (také u naší Galaxie pravděpodobně existuje u jádra malá příčka, jak ukazují výzkumy z poslední doby, takže by při pohledu shora mohla vypadat jako na obrázku napravo).

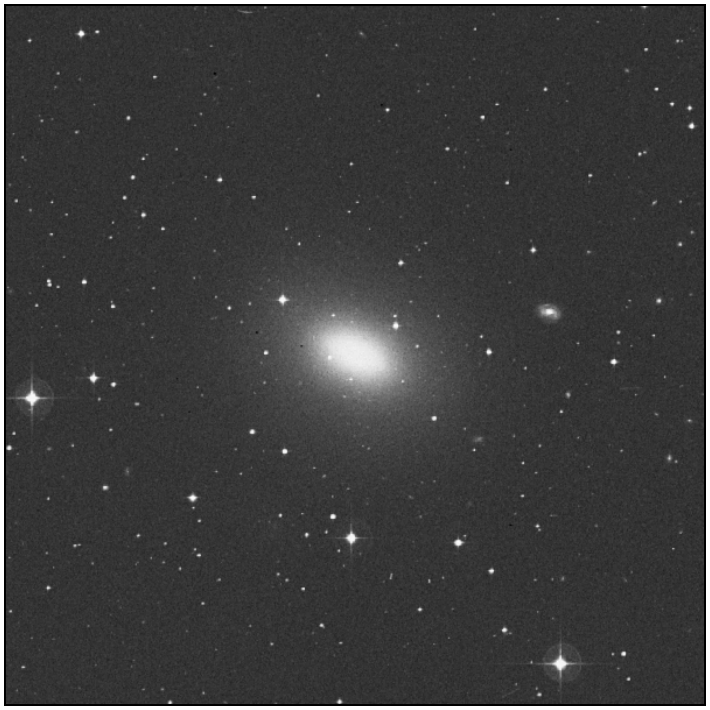
Ve spirálních ramenech je hodně žhavých hmotných hvězd, najdeme zde rozsáhlá oblaka mezihvězdné látky, například oblasti ionizovaného vodíku. Mezihvězdné látky je ve spirálních galaxiích od 1 do 20 % (hmotnostně). Rozložení objektů je zhruba stejné jako v naší Galaxii. Celkové hmotnosti spirálních galaxií činí od miliardy až po bilion hmotností Slunce.



Vypadá takto naše Galaxie?

### Eliptické galaxie

Asi čtvrtina pozorovaných hvězdných soustav jsou eliptické galaxie. Mají tvar koule nebo více či méně zploštělého rotačního elipsoidu. Také eliptické galaxie lze roztřídit do několika typů podle pozorovaného tvaru galaxie: za písmenem *E* následuje číslice, jež udává zploštění. Vzoreček pro výpočet číslice zní: číslice = 10[(*a* – *b*)/*a*], kde *a*, *b* jsou velká a malá poloosa elipsy galaxie, kterou pozorujeme. Příliš zploštělé eliptické galaxie však neexistují, takže se setkáme jen s galaxiemi typu *E0* (kruhové) až *E7*.

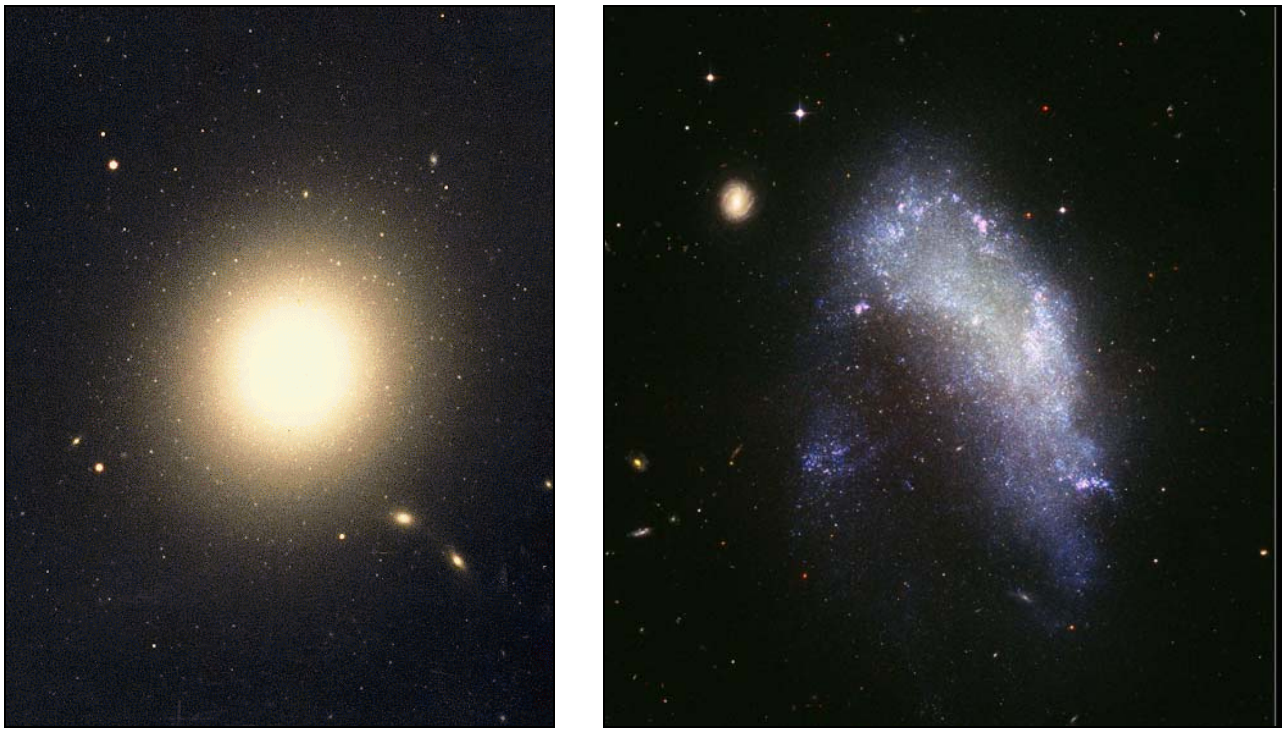


Eliptická galaxie NGC 4697.

V eliptických galaxiích najdeme většinou staré trpasličí hvězdy s hmotností do dvou slunečních a s malým zářivým výkonem. Mezihvězdná látka zde prakticky neexistuje (je jí zde do 0,2 procenta celkové hmotnosti, zatímco u spirálních galaxií je toto číslo o jeden až dva řády vyšší). Ve velikostech a hmotnostech eliptických galaxií existují značné rozdíly: najdeme obří eliptické galaxie, řádově desetbilionkrát hmotnějších než Slunce, ale i trpasličí s hmotností o sedm řádů menší, připomínající spíše kulovou hvězdokupu.

### Čočkovité galaxie

Některé galaxie nemůžeme jednoznačně přiřadit ani ke spirálním, ani k eliptickým. Mají výrazné jádro (jeho jas klesá od středu k okrajům stupňovitě), někdy sledujeme náznaky spirálních ramen, příčky a vnějšího prstence (to jim propůjčuje vzhled planety Saturn). Neobsahují takřka žádnou mezihvězdnou látku. Tvoří přechodný typ mezi spirálními a eliptickými galaxiemi. Je jich asi pětina až šestina z celkového počtu galaxií, nazýváme je čočkovitými galaxiemi a označujeme jako typ *S0*.



Eliptická galaxie M 87 (vlevo) a nepravidelná galaxie NGC 1427A (vpravo).

### Nepravidelné galaxie

Několik procent galaxií má natolik nepravidelný tvar, že u nich nenajdeme žádnou známku symetrie. Ve srovnání se spirálními galaxiemi jde zpravidla o méně hmotné soustavy, dosahující hmotností jen stovky milionů až desítky miliard hmotností Slunce.

Zato však obsahují nejvíce mezihvězdné látky ze všech galaxií: připadá na ni 30 až 40 procent celkové hmotnosti. Je zřejmé, že v těchto tzv. nepravidelných galaxiích vzniká velké množství nových hvězd. Nepravidelné galaxie astronomové označují symbolem *Irr* (z anglického *irregular* = = nepravidelný).

### Statistika typů galaxií

Zde jsou uvedeny čtyři základní typy galaxií. Poznamenejme ale, že existuje značné množství galaxií, jež zcela jednoznačně nemůžeme zařadit k žádnému z uvedených typů.

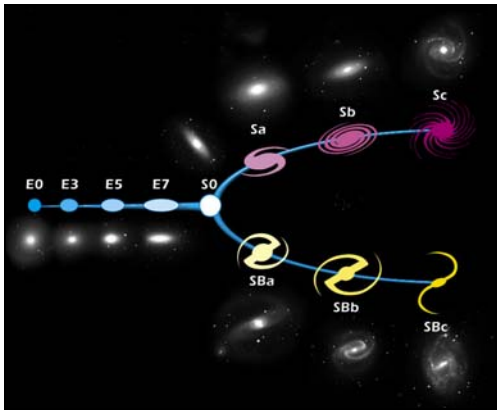
| *Typ galaxie* | *Relativní počet (%)* |
|---|---|
| spirální | 50 |
| eliptické | 25 |
| čočkovité | 20 |
| nepravidelné | 5 |

**Falešná představa**

Když se ve 30. a 40. letech dvacátého století rozběhl naplno výzkum galaxií, zdálo se, že jejich roztřídění do jednotlivých typů podle vzhledu je současně posloupností *vývojovou*. Mohlo tomu být například takto: nejmladší jsou galaxie nepravidelné, pak spirální *Sd – Sc – Sb – Sa* a čočkovité. Posloupnost končí galaxiemi eliptickými – ty by měly být nejstarší.

Dnes ale bezpečně víme, že tato posloupnost není vývojová. Všechny galaxie jsou totiž zhruba stejně staré. Rozmanitost jejich tvarů je tudíž dána něčím jiným než věkem. O to, že svět galaxií je tak rozmanitý, se přičinily různé počáteční podmínky, za nichž galaxie vznikaly. U posloupnosti galaxií, jak jsme ji uvedli, totiž klesá průměrný moment hybnosti na jednotku hmotnosti galaxie, což hraje významnou roli například při tvorbě jednotlivých hvězd. Tento jednoduchý pohled na věc se ovšem komplikuje, vezmeme-li v úvahu vzájemné interakce galaxií (o čemž bude zmínka v kapitole 8.5. – *Aktivní galaxie*, speciálně oddíl *Kanibalismus galaxií*).

Typický vzhled galaxie s příčkou – na tomto snímku je galaxie NGC 1300 (Hubblův kosmický dalekohled).

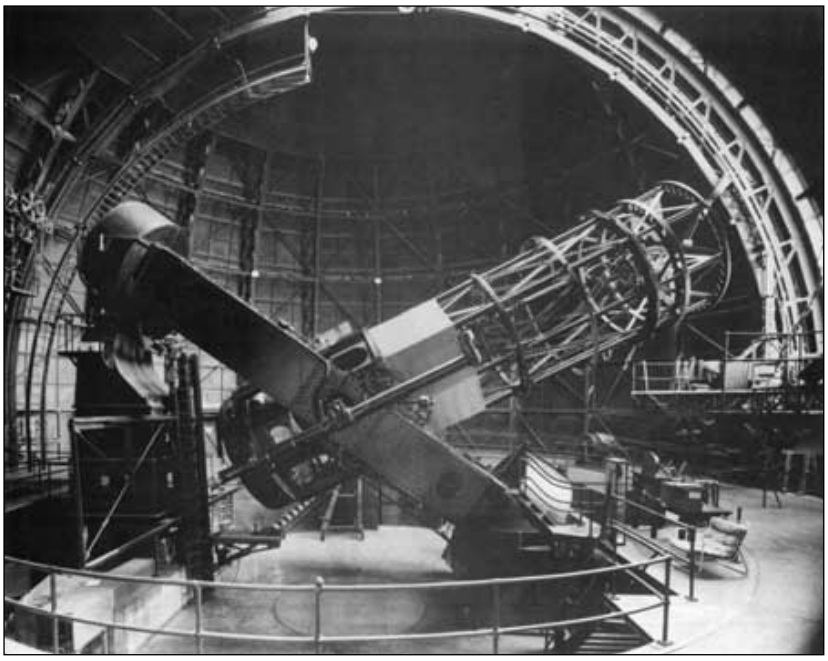



## čítanka

# Bernard Jaffe: Jak se stát astronomem

Jedním z astronomů observatoře na Mount Wilsonu, který ve 20. a 30. letech nemalou měrou přispěl k pokroku ve výzkumu vzdálených galaxií, byl i Milton L. Humason [1]) (1891 – 1972). Astronomem se stal způsobem zcela netypickým. Školní docházku dokončil ve čtrnácti letech. Ačkoli byl synem kalifornského bankéře a mohl by jistě dál studovat, neudělal to. Měl nepřekonatelný odpor ke škole.

Vrchol Mount Wilsonu, viditelný z ulic Pasadeny, Humasona fascinoval natolik, že se odebral pracoval do hotelu nedaleko právě založené hvězdárny. Odtud obdivoval sousední hory, údolí San Gabriel, města Pasadenu a Los Angeles. Byl pro hory tak zapálen, že byl ochoten vykonávat pomocné práce v hotelu, vodit mezky s nákladem pro hvězdárnu, pracovat ve velké kopuli observatoře, když bylo jasno, a pomáhat s běžnými fotografickými pracemi v laboratoři, když se zatáhlo.



Humason se později oženil s dcerou jednoho ze zaměstnanců hvězdárny a brzy poté se začal věnovat astronomické práci s plnou vervou. Stal se zkušeným hvězdným fotografem a mnozí pracovníci hvězdárny jej často žádali o radu. Byl pro ně natolik nepostradatelný, že se v roce 1922 stal stálým pracovníkem a měl tak příležitost samostatně pracovat s tehdy největším dalekohledem světa. A tak bývalý

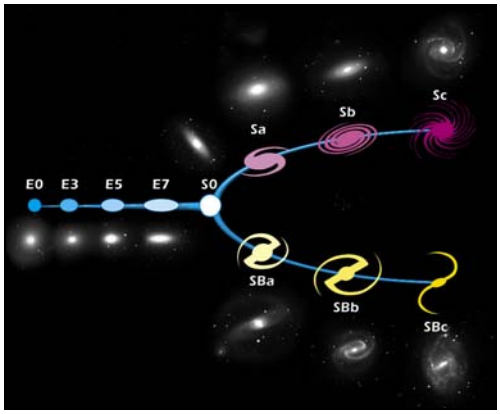
[1]) Čti: *miltn hjúmasn*.

pomocný asistent, oblečen do polárního obleku s vlněnou čapkou a krátkým přiléhavým kabátkem, chránícím ho před zimou v noci, se pohyboval ve výšinách dalekohledu a hlasitě velel mladším nočním asistentům, kteří se nalézali v temnotě nějakých patnáct metrů pod ním.

Z knihy *Men of science in America*, Overseas Editions, Inc., 1944, str. 435. Překlad: Zdeněk Pokorný.

Milton Humason.

# 8. Hvězdné ostrovy




*Dvojím způsobem končívá tajemství: odhalením, nebo zapomenutím.*

Stanislav Komenda, matematik (1936 – )

## otázky a příklady

**Otázka 8.3.1.** Již Edwin Hubble zjistil, že neexistují eliptické galaxie plošší než E7. Jaký je tedy největší poměr velké osy k malé ose rotačního elipsoidu, kterým si nahrazujeme tvar eliptické galaxie?

**Otázka 8.3.2.** V eliptických galaxiích nenajdeme veleobry – hvězdy s velkým zářivým výkonem a značnou hmotností (ve srovnání se Sluncem). Dokážete vysvětlit, proč tomu tak je?

**Otázka 8.3.3.** Která (či které) trojice pojmů spolu bezprostředně souvisí? a) nepravidelná galaxie, mladé hvězdy, Malý Magellanův oblak; b) spirální rameno, příčka v galaxii, horké hvězdy; c) eliptická galaxie, Slunce, nejmladší hvězdy; d) kulová hvězdokupa, nepravidelná galaxie, rotace Galaxie.

**Otázka 8.3.4.** U kterého typu galaxií máme největší šanci spatřit výbuch supernovy? Vezměte v úvahu nejen okolnost, ve kterých typech galaxií mohou vzplanout supernovy, ale i četnost různých typů galaxií.

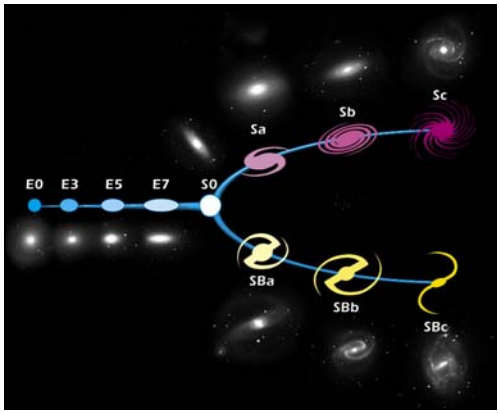
**Otázka 8.3.5.** Proč se poblíž a uvnitř Mléčné dráhy pozoruje podstatně méně galaxií než v ostatních směrech?

**Otázka 8.3.6.** Jaký fyzikální podtext odráží třídění galaxií na eliptické, spirální, čočkovité a nepravidelné? a) Je to posloupnost označující relativní stáří. b) Třídění odráží dynamické vlastnosti galaxií. c) Jde o stupnici velikostí galaxií.

**Otázka 8.3.7.** Můžeme očekávat, že Hertzsprungův-Russellův diagram pro hvězdy eliptické galaxie bude připomínat H-R diagram pro a) zbytky supernov; b) kulové hvězdokupy; c) hvězdy z oblastí, kde vznikají; d) otevřené hvězdokupy.

**Otázka 8.3.8.** Galaxie je od nás vzdálena $l$ = 2,5 Mpc a má průměr $d$ = 20 kpc. Kdybychom předpokládali, že se v galaxii nacházejí dvě cefeidy se stejnou periodou světelných změn a stejnou absolutní hvězdnou velikostí, mohli bychom na základě měření pozorovaných hvězdných velikostí těchto cefeid rozhodnout, zda se jedna z nich nachází na okraji galaxie ve směru k nám a druhá na opačném okraji galaxie? Přesnost fotometrických měření dosahuje v nejlepším případě 0,01 mag?

**Otázka 8.3.9.** Jistě snadno poznáte, že jedno z následujících tvrzení *není* pravdivé. Které to je? a) Eliptické galaxie se utvořily z těch oblak plynu, která takřka nerotovala. b) Nepravidelné galaxie jsou nejmladší, spirální jsou relativně starší a eliptické galaxie jsou nejstarší. c) Bohatství forem galaxií si vysvětlujeme značnou pestrostí podmínek při jejich vzniku.




úloha k zamyšlení

# Srážky galaxií

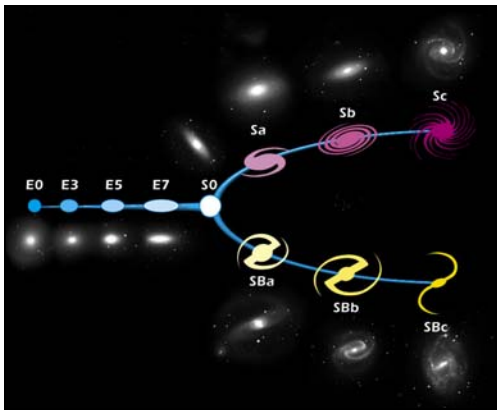
Galaxie jsou často gravitačně vázány v kupách galaxií. Zde může docházet k jejich srážkám, a možná i ke srážkám jednotlivých hvězd a atomů mezihvězdného vodíku. Vypočítejte střední doby $\tau$ mezi srážkami

a) dvou galaxií;
b) dvou hvězd;
c) dvou atomů vodíku.

Srovnejte pak tyto střední doby s časovým intervalem, po který galaxie pravděpodobně existují (tj. asi deset miliard let). Předpokládejte, že dvě galaxie se k sobě přibližují relativní rychlostí $v$ = 1000 km/s. Střední volná dráha $l$ mezi dvěma po sobě následujícími srážkami je nepřímo úměrná hustotě prostředí $\rho$ a srážkovému průřezu $\sigma$, tedy $l = 1/(\rho\,\sigma)$.

*Číselné údaje:*
Srážky galaxií: v hustých kupách připadá asi 5000 galaxií na 1 $Mpc^3$, srážkový průřez $\sigma$ = 100 $kpc^2$.
Srážky hvězd: hustota hvězd činí asi 1 hvězda na 1 $pc^3$; srážkový průřez $\sigma = 3\cdot10^{11}$ $km^2$ odpovídá hvězdě o poloměru $R$ = 300 000 km (ověřte si!).
Srážky atomů vodíku: hustota mezihvězdného vodíku je asi 1 atom na 10 $cm^3$, srážkový průřez $\sigma = 10^{-20}$ $m^2$.

Interagující galaxie NGC 2207 (vlevo) a IC 2163 v souhvězdí Velkého psa.




čítanka

# Zdeněk Pokorný: Pohled klíčovou dírkou

Získat pozorovací čas u velkého kosmického teleskopu určitě snadné není, a pokud byste požadovali desítky hodin či ještě víc, pak je určitě nedostanete. Pozorovací čas je nadmíru vzácným zbožím. Přesto však 18. prosince 1995 začal Hubblův dalekohled sérii expozic jedné malé oblasti v souhvězdí Velké medvědice, které nebyly jen „momentkami"; když o deset dní později sekvence snímání skončila, bylo na kontě tohoto projektu několik set hodin (!) expoziční doby. Projekt vešel do dějin astronomie pod označením „Hluboké pole".

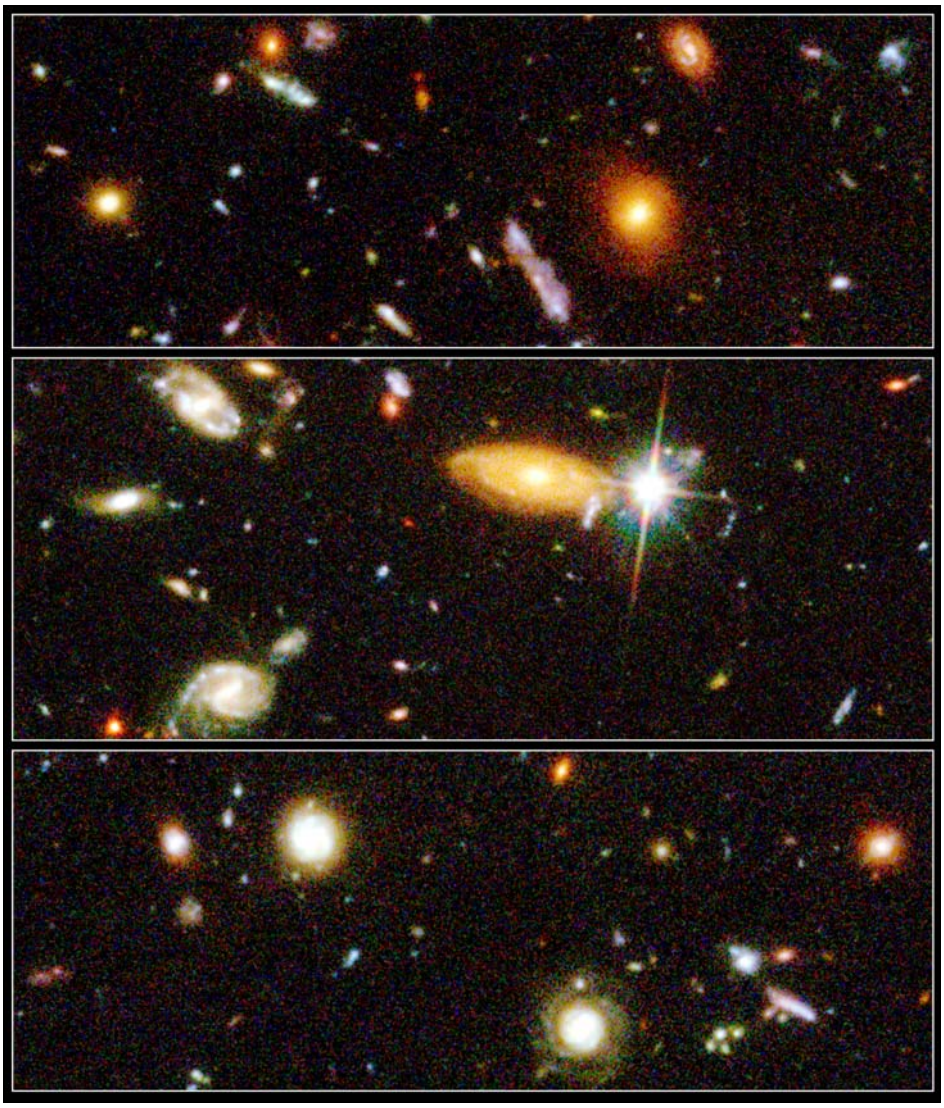
Byl to opravdu pozoruhodný experiment. Ředitel Ústavu pro kosmický teleskop v Baltimore Robert Williams vyhradil pro něj pozorovací čas, který měl z titulu své funkce k dispozici. Od 18. do 28. prosince – během 150 obletů kolem Země – pořídil Hubblův teleskop celkem 342 snímků s typickou expoziční dobou od 15 do 40 minut ve čtyřech částech viditelného spektra. Pozorované políčko poněkud nepravidelného tvaru bylo jen asi 2,5 úhlové minuty velké – šlo doslova o pohled klíčovou dírkou do velmi vzdáleného vesmíru. Na obloze toto místo leží v souhvězdí Velké medvědice, asi 6 stupňů od hvězdy delta (zvané též Megrez) směrem k souhvězdí Malé medvědice.

Místo bylo předem pečlivě vybráno. Důvody byly jednak technické (kosmický dalekohled může bez přerušení sledovat jen malý pruh na hvězdné obloze – na severní je to v souhvězdích Kasiopeji a Velké medvědice), ale zejména astronomické. V zorném poli nesmí být žádné jasné hvězdy, natož mlhoviny či blízké galaxie. Mělo jít o pohled do velmi vzdáleného vesmíru, a jasné objekty z „blízkého" vesmíru (byť třeba již za hranicemi naší Galaxie) by znemožnily sledovat objekty opravdu vzdálené, slabé a nenápadné. Souhvězdím Kasiopeji prochází Mléčná dráha, takže ihned vypadlo z výběru, ale i ve Velké medvědici bylo třeba se vyhnout velkým blízkým galaxiím a početným shlukům galaxií vzdálených.

Na vybrané malé plošce je zachyceno pouze 90 hvězd, patřících do naší Galaxie – vše ostatní jsou cizí a daleké galaxie. Celkem je na snímku Hlubokého pole zachyceno více než 3000 objektů. Většinou to jsou ty nejvzdálenější objekty, které známe. Vznikly krátce po velkém třesku, v prvních několika miliardách let. V této souvislosti si naplno uvědomujeme, proč byl projekt nazván „Hluboké pole": vždyť pohled do vzdáleného vesmíru je vzhledem ke konečné rychlosti šíření světla vždy pohledem do minulosti, a tady nahlížíme do historie našeho vesmíru opravdu hluboko.

Vědecké výsledky projektu předčily všechna očekávání: nejhlubší pohled do vesmíru ukázal překvapivě obrovské bohatství tvarů rozličných galaxií. Záhy bylo rozhodnuto, že se projekt doplní obdobným snímkem

na jižním hvězdném nebi. Volba padla na souhvězdí Tukana. Tentokrát byl do zorného pole zahrnut i jeden jasný kvasar. Snímkování proběhlo od 28. září do 10. října 1998, záběry byly pořízeny v ultrafialovém, viditelném i infračerveném světle. Oba pohledy klíčovou dírkou do raného vesmíru se staly pro stovky astronomů neocenitelným zdrojem nových informací.



Tím ovšem nahlížení do velmi mladého vesmíru neskončilo. Po výměně některých detektorů u kosmického dalekohledu, díky čemuž se zvýšila citlivost přístroje přinejmenším desetkrát, astronomové se ještě jednou podívali do vzdáleného vesmíru klíčovou dírkou. Projekt byl tentokrát označen jako „Ultrahluboké pole“. Šlo vlastně o snímky dvěma různými přístroji, které pak byly složeny. Dalekohled mířil na malé políčko o velikosti 2,4 čtverečních minut v souhvězdí Pece. Expozice začaly 3. září 2003 a skončily 16. ledna 2004, celková expoziční doba oběma přístroji dosáhla neuvěřitelných 15,8 dne. A výsledek? Pole bylo vybráno tak, aby se v něm nenacházely blízké galaxie, jen ty vzdálené. Našlo se jich tam na 10 000. Zrodily se asi 400 až 800 milionů roků po velkém třesku. Srovnáme-li jejich věk s dnešním stářím vesmíru (asi 13,7 miliardy roků), pak jsou to doopravdy velice mladé objekty.

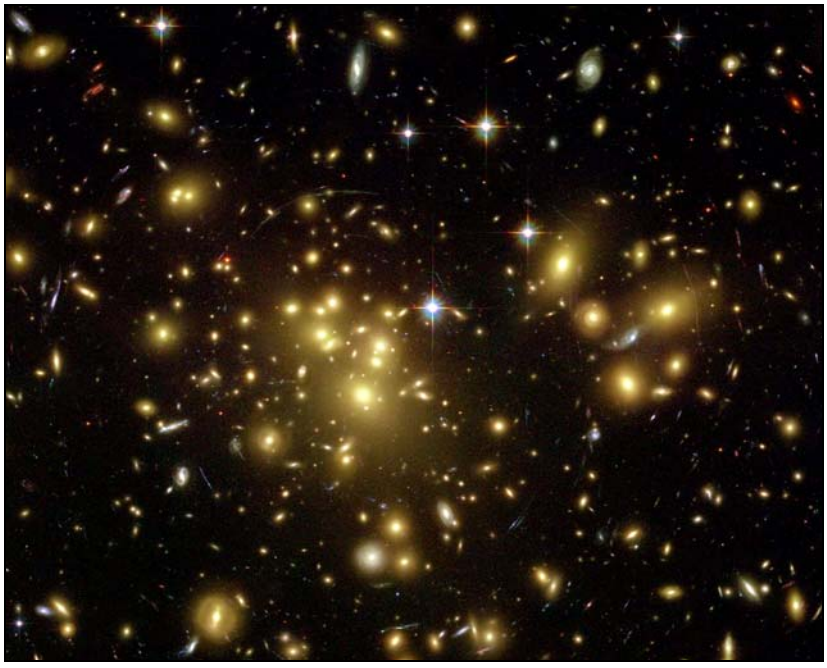
Z knihy *Kalendárium – astronomie* (CP Books, Brno 2006).

# 8.4. Vesmír velkých měřítek

Galaxie jen zřídkakdy najdeme ve vesmíru osamocené. Často se vyskytují v párech nebo menších i zcela obrovských skupinách. Také naše Galaxie má své blízké sousedy. Je členem skupiny čítající na padesát galaxií. Nazýváme ji *místní skupina galaxií*. Ze známých hvězdných soustav sem patří Velký a Malý Magellanův oblak, galaxie M 31 v Andromedě a M 33 v Trojúhelníku; naše Galaxie a galaxie M 31 jsou v soustavě nejhmotnější. Členové místní skupiny se gravitačně ovlivňují. Oblast, ve které se galaxie místní skupiny nacházejí, má průměr asi 800 kpc [1]).

**Kupy galaxií**

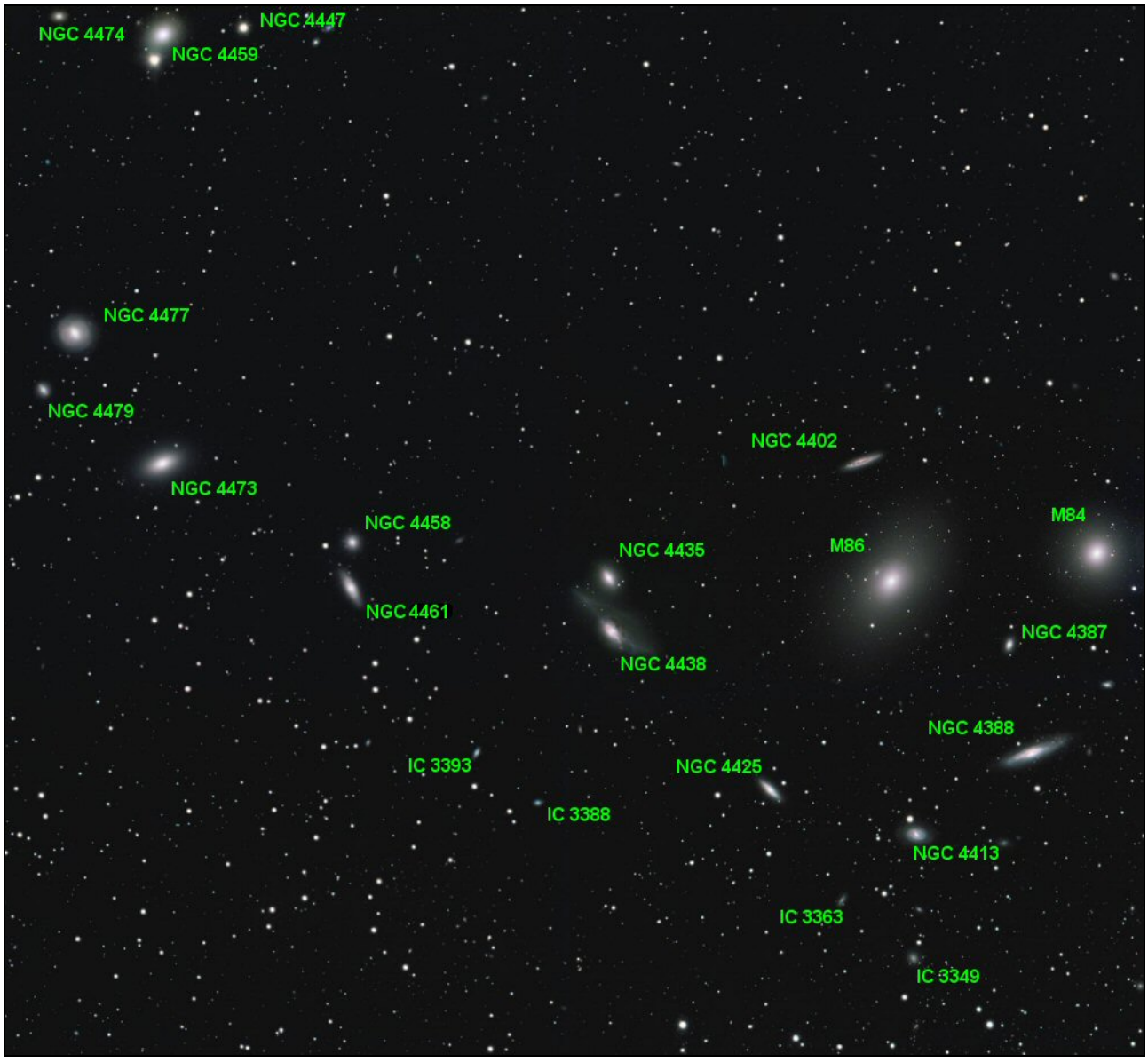
O existenci kup galaxií se snadno přesvědčíme pozorováním. Na hvězdné obloze vidíme pomocí dalekohledů řadu *kup galaxií*, výrazné jsou například v souhvězdí Vlasů Bereniky nebo Panny. Jsou to víceméně pravidelné útvary, byť často dosti zploštělé, čítající řádově tisíce až desetitisíce jednotlivých galaxií. Ty jsou ke kupě vázané gravitačně. Vůči sobě se pohybují neuspořádaně, kupa jako celek nerotuje. V centru kupy najdeme obvykle několik obřích eliptických galaxií. Průměr „obyčejné“ kupy dosahuje několika megaparseků.



Kupa galaxií Abell 1689.

[1]) Budete-li si chtít sestrojit v měřítku model okolí našeho Slunce, neuspějete. Vzdálenosti mezi hvězdami jsou vzhledem k jejich rozměrům propastně velké. Zato však model okolí naší Galaxie sestavíte bez námahy. Poměr vzdáleností okolních galaxií vzhledem k jejich vlastním rozměrům již není tak obrovský, aby jej nebylo možné vyjádřit nějakým docela názorným modelem (viz též otázka 8.4.7).

Několik čísel pro ilustraci: „typická“ kupa galaxií v souhvězdí Panny (mimo jiné je nejbližší – asi 17 Mpc daleko) sdružuje 2500 galaxií, z nichž je 7 obřích eliptických a 10 obřích spirálních. Má průměr 3 Mpc, střední vzdálenost sousedních galaxií je přibližně 100 kpc. Příkladem „obří“ kupy galaxií je kupa v souhvězdí Vlasů Bereniky: obsahuje desetkrát víc galaxií než kupa v Panně, je vzdálena asi 105 Mpc, její průměr dosahuje 8 Mpc.

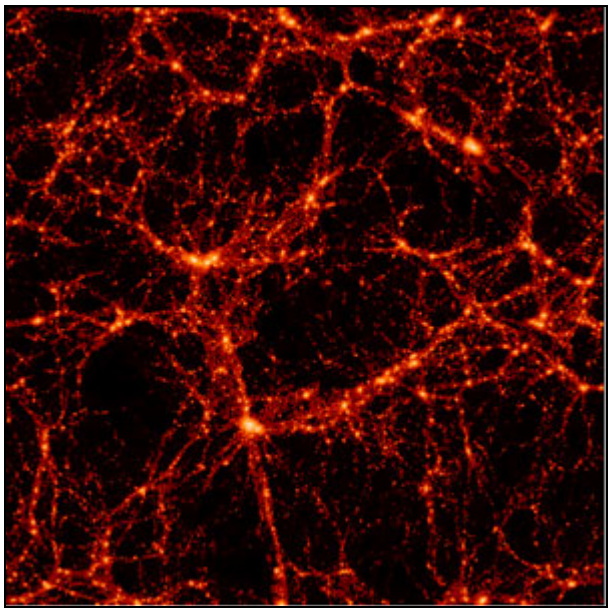



Kupa galaxií v souhvězdí Panny (s označením nejjasnějších galaxií).

### Kosmická pěna

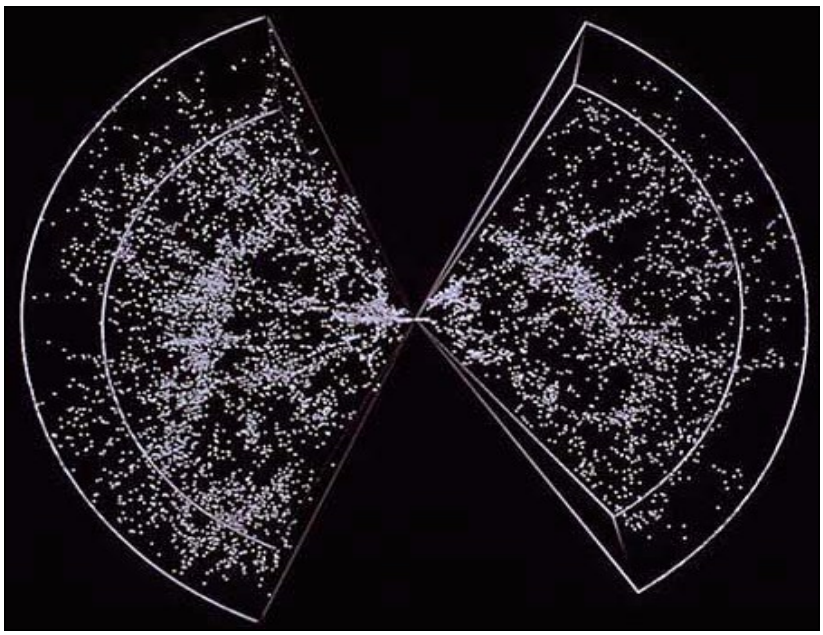
Kupy galaxií jsou největšími gravitačně vázanými strukturami ve vesmíru. Nicméně ani kupy galaxií zde nejsou rozloženy rovnoměrně, nýbrž ve shlucích, jimž říkáme *nadkupy galaxií*. Nadkupa však už není gravitačně vázána, během času se rozpadá.

Tím ale hierarchie struktur galaxií ve vesmíru nekončí. Galaxie zaujímají asi osminu objemu vesmíru; vyskytují se převážně podél stěn jakýchsi nepravidelných „buněk“, připomínajících mořskou houbu či pěnu. Rozměry „buněk“ dosahují 50 až 150 Mpc. V měřítkách větších než několik set megaparseků je však rozložení látky téměř rovnoměrné, žádné další struktury tu již nejsou.



„Buněčná“ struktura vesmíru. Každý světlý bod představuje velkou galaxii či kupu galaxií.

Tvrdíme-li, že větší struktury než nadkupy galaxií ve vesmíru neexistují, poněkud tím věc zjednodušujeme. Jsou známa dlouhá vlákna (doslova „špagety“) galaxií, dosahující délky přes půl miliardy megaparseků, stejně jako nakupení galaxií ve tvaru obrovské stěny, velké zase asi půl miliardy megaparseků. Z doby, kdy neexistovaly ještě ani galaxie, ani hvězdy, je tu jakási kostra oněch největších struktur, které dnes pozorujeme. Uspokojivé vysvětlení pro tyto úkazy dosud nemáme.



# 8. Hvězdné ostrovy

*Neexistence důkazu není důkaz o neexistenci.*

Martin J. Rees, astrofyzik a kosmolog (1942 – )

## otázky a příklady

**Otázka 8.4.1.** Jakými metodami můžeme změřit či odhadnout vzdálenosti galaxií?

**Otázka 8.4.2.** Jak nejlépe určíme vzdálenosti Velkého a Malého Magellanova oblaku?

**Otázka 8.4.3.** Máte-li dobrou představu o velikosti naší Galaxie, pak jistě správně doplníte chybějící údaj do následující věty: V místní skupině galaxií jsou střední vzdálenosti mezi galaxiemi řádově asi ___krát větší než rozměry jednotlivých galaxií.

**Otázka 8.4.4.** V centru obří kupy galaxií se obvykle nalézá jedna či více galaxií, které patří k typu galaxií a) spirálních; b) spirálních s příčkou; c) eliptických; d) nepravidelných.

**Otázka 8.4.5.** Kupa galaxií v souhvězdí Lva je vzdálena asi 310 Mpc. Astronomové ji tedy vidí takovou, jaká byla před jistou dobou. Kdy vlastně takto vypadala? (Srovnejte toto číslo se stářím Země.)

**Otázka 8.4.6.** Předpokládejme, že jste vypočítal(a) střední hustotu látky v krychli o hraně dlouhé 10 milionů světelných let tak, že jste do výpočtu zahrnul(a) všechny galaxie z této oblasti. Bude výsledek stejný, když si vyberete takovou krychli v jiné části vesmíru? A co když zvětšíte rozměry krychle na 100 milionů světelných let? ... nebo 1 miliardu světelných let?

**Otázka 8.4.7.** Máte-li správnou prostorovou představu o vzájemných velikostech a vzdálenostech galaxií v menších slupinách, jakou je například místní skupina galaxií, pak pro názorné připodobnění použijete jedno ze tří přirovnání, jež nyní uvedeme. Které je nejvýstižnější? a) Galaxie připomínají skupinu velkých námořních lodí v malé mořské zátoce. b) Je to, jako když se rozutečou žáci jedné třídy po velkém lehkoatletickém stadionu. Co žák, to jedna galaxie. c) Galaxie jsou jako auta, odstavená na téměř zaplněné ploše velkého parkoviště před supermarketem.

# 8.5. Aktivní galaxie

V nepřeberném množství galaxií, které pozorujeme ve vzdáleném vesmíru, je velmi mnoho takových, jejichž vlastnosti jsou jiné než „standardní“. Zejména *jádra* takových galaxií vykazují rozmanité anomálie: výrazně vyzařují v některém ze spektrálních oborů, často se s časem pronikavě mění tok záření, dochází zde k výraznému urychlování částic hmoty, z jádra galaxie jsou vyvrhovány celá oblaka, proudy či výtrysky ionizovaného plynu o hmotnostech až milionu hmotností Slunce. Proto dnes patří studium aktivních galaxií k základním úkolům galaktické astronomie.

Galaxie M 82 v souhvězdí Velké medvědice je aktivní galaxií, jak je vidět i na tomto snímku. Záběr pořízen v březnu 2006 pomocí Hubblova kosmického dalekohledu.

Mezi tzv. aktivní galaxie patří též *kvasary* [1]); vykazují nejmohutnější aktivitu a řadí se k nejpozoruhodnějším objektům ve vesmíru.

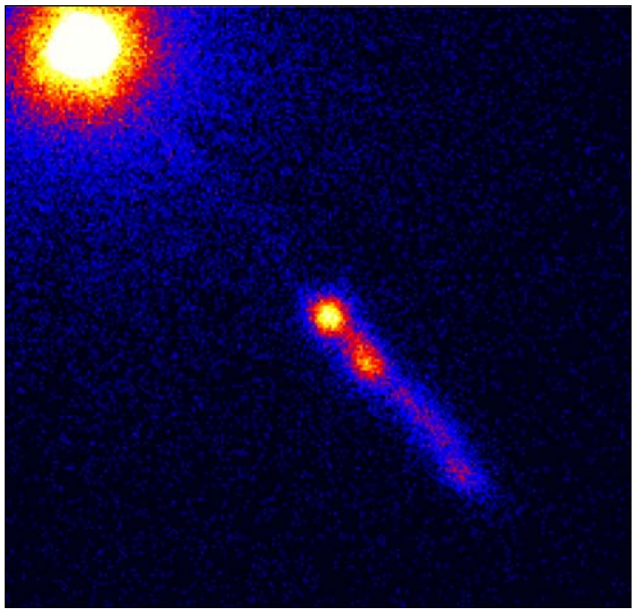
[1]) *Kvasar* je zkratkové slovo, které vzniklo zkrácením sousloví *quasistellar radio source*, tedy „kvazistelární rádiový zdroj“. Vzhledem k tomuto původu slova je třeba psát je s písmenem -s-, nikoli ve tvaru kvazar (stellar source).

### Kvasary

Kvasary jsou nejvzdálenějšími objekty ve vesmíru (soudě podle velkých červených posuvů na základě Hubblova vztahu). I nejbližší kvasar 3C 273 je asi 60 Mpc daleko. Přesto je natolik jasný, že jej můžeme sledovat menšími dalekohledy. Znamená to tedy, že kvasary jsou též *nejzářivějšími* objekty, jež ve vesmíru pozorujeme. Zářivý výkon kvasaru v celém oboru spektra dosahuje řádově tisíc bilionů Sluncí, je asi desettisíckrát větší než zářivý výkon naší Galaxie.

Podstatné však je, že tento obrovský výkon je vyzařován z objemu o 20 řádů *menšího* než je objem normální galaxie. Geometrický rozměr oblasti, ze které vychází záření, můžeme odhadnout podle rychlosti změn záření: mění-li se zářivý výkon ve škále dnů (což je právě případ kvasarů), nepřevyšuje rozměr zdroje několik světelných dnů. A to je ve srovnání s velikostmi galaxií rozměr zanedbatelně malý!

Kvasarů známe více než 50 000, i když většina z nich se v rádiovém oboru – navzdory původní definici – nijak neprojevuje (jsou to tzv. tiché kvasary).



Kvasar 3C-373 (vlevo nahoře) s výtryskem látky (snímek je ve falešných barvách).

### Kanibalismus galaxií

Galaxie jsou v prostoru rozloženy velmi nerovnoměrně. Nevytvářejí jen menší seskupení, ale i kupy galaxií, kde můžeme napočítat stovky až tisíce členů. Mnohé z galaxií mají již na první pohled zvláštní tvar. Je narušen jejich souměrný vzhled, spirální ramena – jsou-li jaká – dostávají podobu nejroztodivnějších křivek. Je zřejmé, že takové galaxie jsou či byly vystaveny gravitačnímu působení galaxií jiných, s nimiž se potkaly.

Při relativně malých vzdálenostech mezi jednotlivými galaxiemi nastávají dosti častá těsná vzájemná přiblížení a srážky. Při nich – zejména při velmi pomalých setkáních galaxií – bývá obvykle menší z nich pohlcena. Astronomové hovoří o *kanibalismu galaxií*.

← Velké interagující galaxie NGC 6872 a IC 4970 (snímek pořízen v dubnu 1999 dalekohledem VLT Antu na Evropské jižní observatoři v Chile).

Příměr „kanibalismus“ je tedy zcela namístě. Přímá srážka jednotlivých hvězd v galaxiích sice nehrozí [2]), avšak jejich dráhy (zejména těch z menší galaxie) bývají silně proměněny. Mezihvězdný materiál se při takovém setkání silně promíchává a zahušťuje, z oblak mezihvězdné látky se počnou urychleně tvořit nové hvězdy (často jich jsou řádově desítky až stovky tisíc). Pohlcením menší galaxie nabývá větší galaxie („kanibal“) na rozměrech i hmotnosti. Takové proměny jsou četné zejména v centrech velkých kup galaxií. Velcí galaktičtí kanibalové jsou obklopeni tisíci kulovými hvězdokupami, které – na rozdíl od těch v naší Galaxii – mohly vzniknout teprve nedávno.

Pro časovou představu uveďme, že taková srážka a případné pohlcení jedné galaxie druhou je záležitostí, trvající stamiliony až miliardy let.

Dvě propletené galaxie, označené NGC 3314, se nacházejí v souhvězdí Hydry (snímek pořídil Hubblův kosmický dalekohled).

[2]) Pokud jste vyřešil(a) úlohu k zamyšlení v kapitole 8.3., pak tomuto tvrzení určitě věříte.

čítanka

# Jiří Grygar: Na scénu přicházejí kvasary

*„Sviť kvasare, sviť,*
*hledám k tobě nit.*
*Žádný není jako on,*
*jas má sluncí bilion.*
*Sviť a blikej, kvasare,*
*kéž bych věděl, co to je!“*

Rusko-americký fyzik George Gamow (1904–1968), otec teorie velkého třesku vesmíru, na první texaské konferenci o kvasarech v Dallasu o vánocích 1963

Během druhé světové války byl vynalezen radar, umožňující určovat polohy a vzdálenosti nepřátelských letadel nezávisle na denní či noční době a počasí pomocí vysílání krátkých radiových impulsů, které se odrážely od kovových překážek a vracely s nepatrným zpožděním k vysílači.

Po válce hledali vojenští specialisté, kteří radary vyvinuli, civilní uplatnění; našli je mimo jiné v astronomii. Anténní soustavy vyřazených vojenských radarů se výtečně hodily k záznamu slabého rádiového šumu z vesmíru a citlivé přijímače k záznamu poloh kosmických rádiových zdrojů na obloze. Co však stačilo k identifikaci letadel, nestačilo astronomům. Nevýhodou prvních radioteleskopů byla malá úhlová rozlišovací schopnost, takže polohy rádiových zdrojů byly nesmírně nepřesné, asi jako když se na hvězdné nebe dívá krátkozraký člověk bez brýlí. Proto astronomové zpočátku vůbec nedokázali říci, co kosmické zdroje rádiového šumu opravdu znamenají.

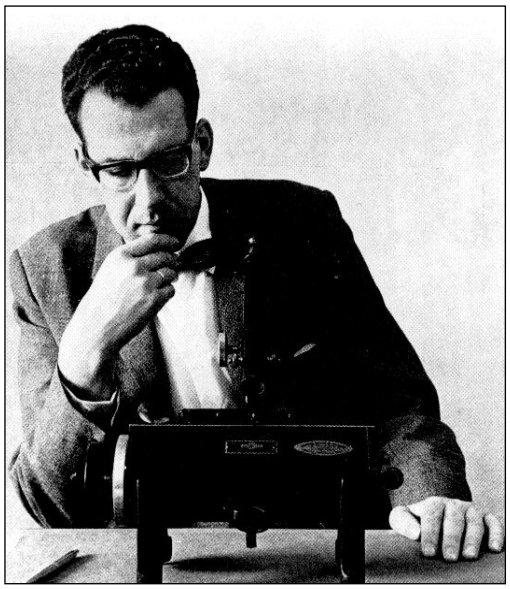
Teprve v roce 1960 se podařilo astronomům u tehdy největšího dalekohledu světa na Mount Palomaru v Kalifornii ztotožnit rádiový zdroj v souhvězdí Trojúhelníku, označený v 3. cambridgeském katalogu rádiových zdrojů jako 3C-48, se slabou hvězdičkou 16. velikosti. Pořídili její spektrum, které se však vůbec nepodobalo spektru běžných hvězd. Bylo v něm jen několik málo jasných (emisních) čar, ale ty nepatřily žádnému známému chemickému prvku. Skoro to vypadalo, že v Mléčné dráze existují podivné radiohvězdy záhadné podstaty.

Jasné světlo do celé záležitosti vneslo až pozorování jiného rádiového zdroje, označeného 3C-273, nalézajícího se v souhvězdí Panny. Toto souhvězdí je, jak známo, jedním ze zvířetníkových souhvězdí, takže jím

pravidelně prochází Měsíc. Australští radioastronomové z Parkesu odhadli, že na podzim 1962 by mohl Měsíc při svém pohybu uvedeným souhvězdím možná zakrýt rádiový zdroj a tím by se poloha zdroje významně zpřesnila. Dráha Měsíce je totiž velmi přesně známa a jestliže v okamžiku zákrytu rádiový zdroj náhle zmizí, lze tak nepřímo zjistit jeho polohu z prostého určení času počátku a konce zákrytu.

Kritického dne opakovaly rozhlasové stanice v okolí observatoře v Parkesu naléhavou výzvu, aby nikdo nezapínal rádiové vysílačky v době pozorování. Na silnicích kolem radioteleskopu dohlížely hlídky silniční policie, aby se během měření k observatoři nepřibližovala žádná vozidla, neboť elektrické zapalování ruší citlivá měření i na velkou vzdálenost. V Parkesu mezitím sejmuli z obří 63metrové kovové paraboly několik tun kovu, aby mohli uskutečnit pozorování v menší výšce nad obzorem, než dovolovala původní konstrukce. Rádiový průběh zákrytu zdroje Měsícem byl zaznamenán na dvě magnetické pásky, které pak vedoucí projektu dr. John Bolton a dr. Cyril Hazard odvezli dvěma různými letadly na univerzitu v Sydney k vyhodnocení.

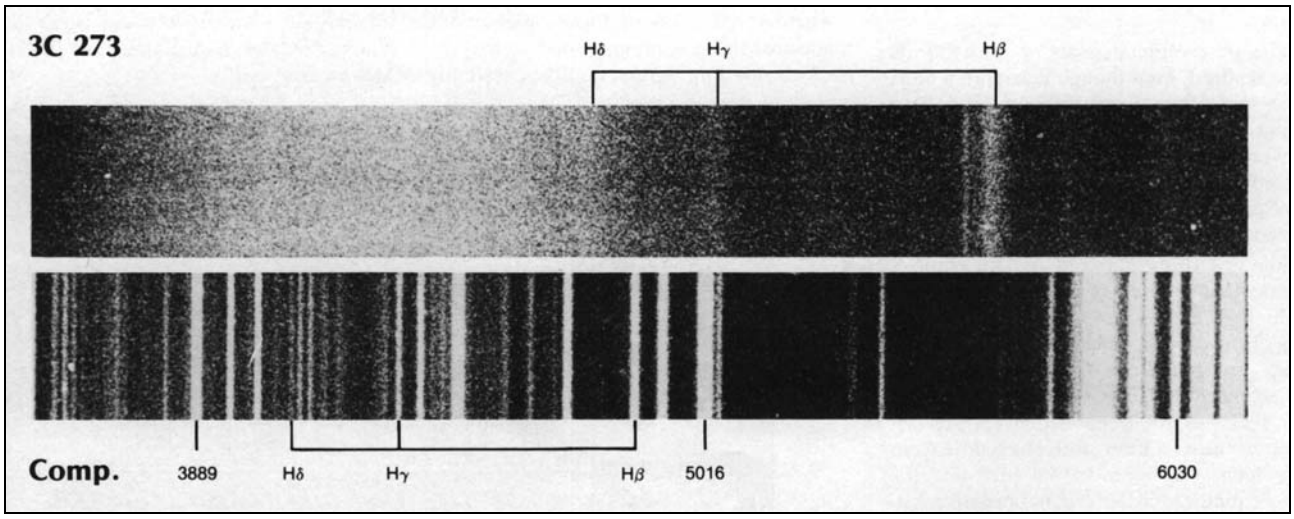
Už z těchto pro astronomy zcela neobvyklých opatření je patrné, že australští odborníci si dobře uvědomovali historický význam svého pozorování. Přesné souřadnice posloužily k nečekaně snadné identifikaci rádiového zdroje s relativně jasnou hvězdou 13. magnitudy, kterou bychom spatřili již ve 20centimetrovém dalekohledu. Získat spektrum tak jasné hvězdy palomarským pětimetrem nebylo proto problémem, ale vyložit je se ukázalo být stejně obtížné jako u zdroje 3C-48. Opět zde svítily jasné emisní čáry, ale jejich polohy neodpovídaly žádnému známému chemickému prvku, dokonce se lišily i od poloh emisních čar ve spektru zdroje 3C-48.



O rozřešení záhady se postaral mladý americko-holandský astronom Maarten Schmidt (nar. 1929), jenž si po mnoha marných pokusech povšiml, že jasné čáry ve spektru „hvězdy“ 3C-273 nejsou rozloženy nahodile, nýbrž jeví jistou povědomou posloupnost poloh. Jejich sled mu připomínal rozložení čar ve spektru nejjednoduššího a také nejhojnějšího prvku ve vesmíru – vodíku. Samotné polohy se ovšem pronikavě lišily – byly oproti laboratornímu spektru vodíku posunuty k dlouhovlnnému (červenému) konci spektra o 60 až 80 nanometrů.

Červený posuv není pro astronomy ničím novým. Pokud jej pozorujeme u hvězd, vykládáme ho podle principu, který již v roce 1842 zformuloval profesor pražské německé techniky Christian Doppler (1803–1853). Z tohoto principu plyne, že zářící těleso, jež se od nás vzdaluje, má čáry ve spektru soustavně posunuty k červenému konci vůči čarám týchž prvků v nehybné laboratoři. Tento červený posuv je přímo

úměrný rychlosti vzdalování zdroje (např. v km/s) a pro běžné hvězdy dosahuje hodnot několika desetin nanometru, čemuž odpovídá vzdalování rychlostmi nanejvýš několika málo set km/s.




Spektrum kvasaru 3C-273 (nahoře) a srovnávací spektrum (comp. – dole). Ve spektru kvasaru jsou nápadné vodíkové čáry, které jsou vyznačeny i ve srovnávacím spektru. Posun čar je evidentní.

Pokud sledujeme vzdálené galaxie, v jejich spektru nacházíme podstatně větší červené posuvy, úměrné jejich vzdálenostem od nás, jak poprvé prokázal Edwin Hubble (1889–1953) v roce 1929. Schmidtův výklad spektra 3C-273 tedy znamenal, že tato „radiohvězda“ se od nás vzdaluje závratnou rychlostí 47 tisíc km/s, naprosto nevídanou ve světě hvězd a dosti vysokou i pro galaxie. Pak by však podle Hubblova vztahu měla být od nás vzdálena neuvěřitelných 1,5 miliardy světelných let – v této vzdálenosti nedokáže rozlišit hvězdy v cizích galaxiích ani ten nejlepší dalekohled. Bylo zřejmé, že Schmidt je na stopě ještě podivuhodnější záhady, než kterou právě vyřešil rozpoznáním vodíku ve spektru radiohvězdy. Jeho objev však pomohl ihned objasnit i zmíněné už spektrum radiohvězdy 3C-48; stačilo jen předpokládat, že je od nás vzdálena 4 miliardy světelných let! To znamená, že její optické i rádiové záření se vydalo na cestu do palomarského pětimetru i cambridgeského radioteleskopu v době, kdy na Zemi vznikal život!

Obě vědecké zprávy o výkladu spekter „radiohvězd“ 3C-48 a 3C-273 vyšly současně v nejproslulejším světovém vědeckém časopise *Nature* v březnu 1963. Toto datum můžeme považovat za křtiny nového typu právě objevených kosmických objektů, jimž se začalo přezdívat *kvazistelární rádiové zdroje*. Bylo totiž zřejmé, že se jen tváří jako hvězdy, ale že to hvězdy určitě nejsou. Na návrh amerického fyzika Hong Yee Chiua se vzápětí ujalo zkratkové slovo „kvasary“, které převzaly všechny jazyky včetně češtiny.

Z knihy *Vesmír je náš svět* (Orbis, Praha 1973 – mírně upraveno).

# 8. Hvězdné ostrovy

*Smiř se s fakty jako malé dítě, buď připraven vzdát se každé předpojaté představy, následuj přírodu, ať tě zavádí kamkoli a do jakýchkoli hlubin, jinak se nic nedovíš.*

Thomas Henry Huxley, biolog (1825 – 1895)

## otázky a příklady

**Otázka 8.5.1.** Na základě čeho usuzujeme, že kvasary patří mezi velmi vzdálené objekty? a) Paralaxy, které se podařilo změřit, jsou mizivě malé. b) Kvasary mají velké červené posuvy spektrálních čar ve spektru. c) Kvasary jsou velice slabé objekty, na samé hranici pozorovatelnosti.

**Otázka 8.5.2.** Jak víme, že kvasary nejsou o mnoho větší než řekněme naše sluneční soustava? a) Obsahují černou díru, a ta musí být velmi malá. b) I v největších dalekohledech se jeví jako bodové zdroje. c) Jejich jasnost se mění v časových škálách dny až týdny. d) Jsou příliš zářivé – takové objekty nemohou být příliš velké.

**Otázka 8.5.3.** Co máme na mysli, hovoříme-li o „červeném posuvu spektrálních čar kosmologického původu“, který pozorujeme např. u kvasarů?

**Otázka 8.5.4.** Jestliže předpokládáme, že velké červené posuvy spektrálních čar kvasarů jsou kosmologického původu, pak to nepochybně svědčí o: a) velké hmotnosti těchto objektů; b) silném gravitačním působení kvasarů na okolní látku; c) velké vzdálenosti kvasarů.

**Otázka 8.5.5.** Dejme tomu, že výkon jádra aktivní galaxie prudce vzrostl v průběhu 20 dní. Co můžeme říci o rozměru oblasti, v níž se uvolňuje energie jádra galaxie?

**Otázka 8.5.6.** Galaxie s aktivními jádry mají často silně polarizované rádiové záření. O čem to svědčí? a) Úhlové rozměry jádra galaxie jsou velmi malé. b) Hmotnost galaxie je velká. c) V galaxii je přítomné magnetické pole.

**Otázka 8.5.7.** Odhadněte hmotnost látky, která by pokryla zářivý výkon kvasaru, jestliže by se v něm energie uvolňovala a) anihilací; b) termonukleární reakcí vodíku na helium. Zářivý výkon kvasaru dosahuje hodnoty až $5 \cdot 10^{40}$ W.

*My všichni žijeme pod stejným nebem, ale bohužel všichni nemáme tytéž obzory.*

Konrád Adenauer, politik (1876 – 1967)

## speciální otázky

# Čísla a zase čísla

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, napište ji místo chybné.

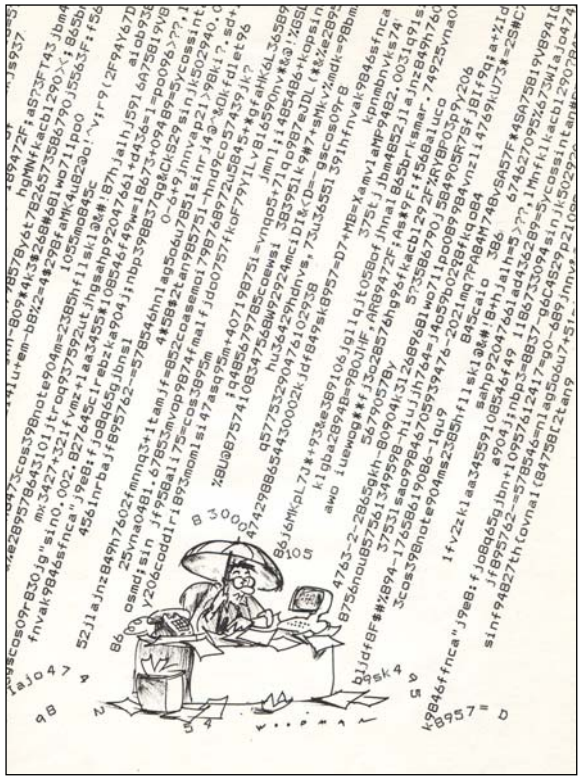
1. Chemické složení vnějších vrstev Slunce (hmotnostní zastoupení): vodík 73 %, helium 25 %, ostatní prvky 2 %.

2. Hvězdy, jejichž absolutní hvězdná velikost *M* dosahuje přibližně 10 mag, jsou asi stokrát méně zářivé než naše hvězda Slunce.

3. Když rozdíl rektascenzí dvou těles dosáhne právě $12^h$, říkáme, že tato tělesa jsou v konjunkci.

4. Friedrich Bessel zveřejnil v prosinci 1838 výsledky svých prvních měření paralaxy hvězdy 61 Cygni: 0,314". To je velice blízko dnes udávané hodnotě 0,286" a znamená to, že hvězda je od nás vzdálena přibližně 300 parseků.

5. Přenosnými astronomickými dalekohledy dosáhneme bez problémů rozlišovací schopnosti řádově desetin úhlové vteřiny.

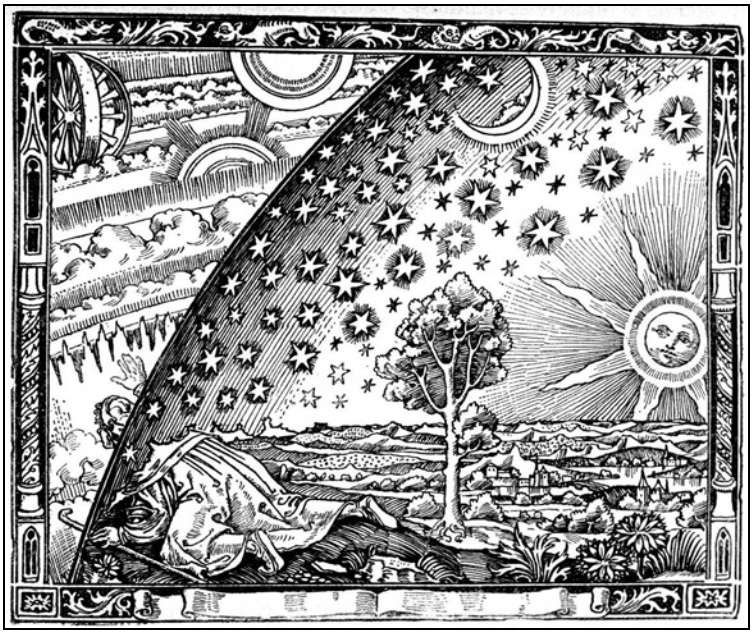


# 9.1. Architektura našeho vesmíru

Známe už řadu kosmických objektů i vztahy mezi nimi. Zákonitě nás napadne otázka: Jak vypadá vesmír celý? Právě to studuje *kosmologie*: zabývá se vesmírem jako celkem a snaží se odpovědět na otázky týkající se stáří vesmíru, jeho velikosti a tvaru, celkové hmotnosti, ale také (a zejména) vývoje.

Kosmologie je zvláštní v mnoha ohledech: například tím, že má k dispozici jen údaje z našeho blízkého okolí, kam pronikneme svými přístroji. Za hranice jejich dosahu pak musí kosmologové *extrapolovat* již známé místní vlastnosti vesmíru na vesmír jako celek. Předpokládají ovšem, že v něm *fyzikální zákony platí stejně*.

Má-li kosmolog sestavit byť i velmi jednoduchý model vesmíru, nemůže brát ohled na všechny detaily, které kolem sebe vidíme. Musí sáhnout k řadě zjednodušení.



Poutník, který zvědavě prostrkuje hlavu sférou stálic a sleduje, co se za ní skrývá. Tento zdánlivě středověký dřevořez fakticky pochází z okruhu od Camille Flammariona, význačného francouzského popularizátora astronomie z konce 19. století.

Kosmologii zajímá, jak vesmír vznikl a jak se vyvíjí. Zvláštností tohoto vědního oboru je skutečnost, že předmět studia – vesmír – je jediný. Kosmologové nemohou experimentovat s několika vesmíry, nemohou je srovnávat. Kosmologové na základě pozorovaných skutečností sestrojují pouze různé *modely vesmíru*, jež pak porovnávají se skutečností.

### První představy a první paradoxy

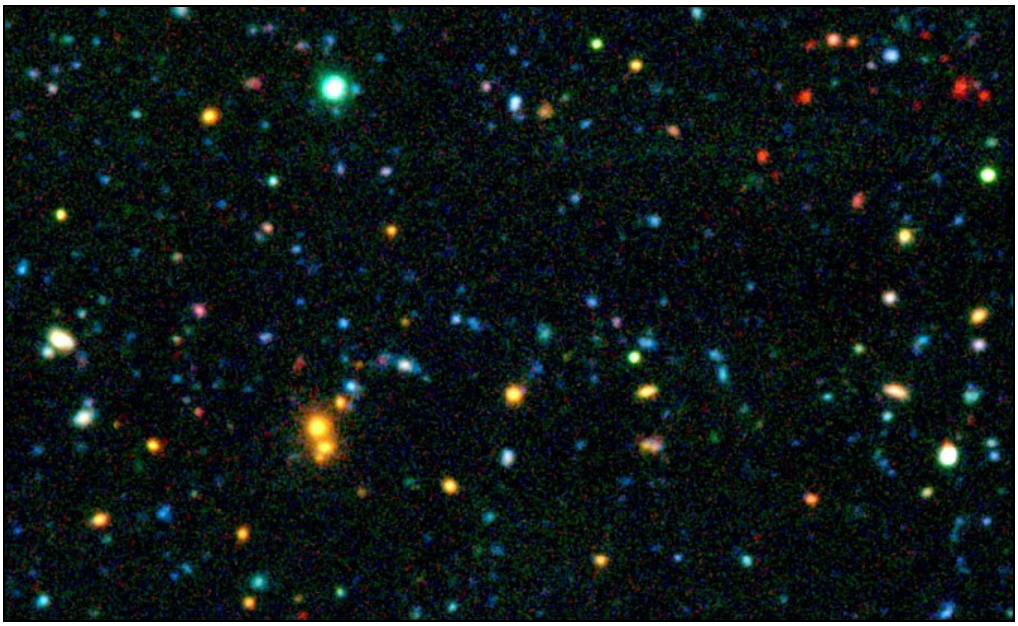
Přeskočíme-li starověkou představu hvězdného vesmíru jako pevné sféry, na níž jsou upevněny všechny hvězdy („stálice“), musíme za první model označit představu Newtonovu: vesmír je nekonečný, rovnoměrně vyplněný hvězdami, které nekonají žádný systematický pohyb.

Tento model, i když se nepříčí „zdravému rozumu“, má ovšem řadu vad, tzv. *kosmologických paradoxů* [1]), jak říkáme neshodám mezi teorií a pozorovanými fakty. Například by zde neměl existovat gravitační potenciál: výsledné gravitační pole nekonečného počtu kosmických objektů by způsobilo, že by se neprojevovaly gravitační síly. Zdá se, že by tu měl existovat i paradox vyvolaný tím, že nekonečně mnoho hvězd září [2]).

### Kosmologický princip

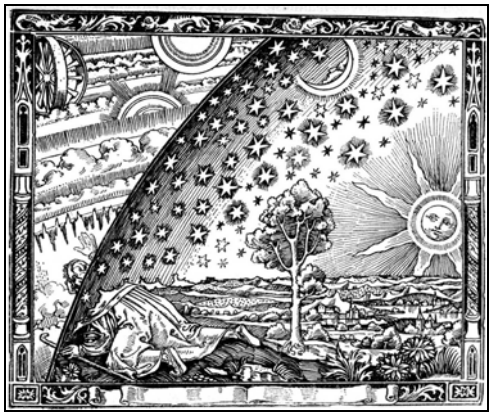
Intuitivně očekáváme, že vesmír by měl vyhlížet stejně, ať se pozorovatel nachází kdekoli a dívá se kterýmkoli směrem. Takový předpoklad je natolik přirozený (přinejmenším od dob Koperníkových), že jej anglický astrofyzik Edward Milne (1896–1950) nazval *kosmologickým principem*.

Jinak formulováno: kosmologický princip předpokládá, že vesmír je *homogenní* a *izotropní* [3]). Je tedy ve všech místech stejný, má ve všech směrech stejné vlastnosti. Podle tohoto principu žádný bod ve vesmíru nemá nějaké privilegované postavení, neexistuje žádný „střed“ a žádný „okraj“ [4]).



Kus hvězdné oblohy o rozloze 2 × 4 úhlové minuty je vyplněn jen vzdálenými galaxiemi (snímek pořízen v infračerveném oboru na observatoři ESO v La Silla, Chile).

[1]) Řecké *paradoksos* značí mimo jiné nepodobný, podivný, neočekávaný, neuvěřitelný.
[2]) Pokud se vám zdá, že problém je zde jen nakousnut a nedořešen, přečtěte si v čítance článek *V noci musí být tma*.
[3]) Izotropní – řecké *isos* znamená stejný, *tropos* směr („ve všech směrech stejný“); homogenní: z řeckého *homos* – stejný, *genos* – rod, tedy doslova „stejnorodý“.
[4]) Jak víme z pozorování, vesmír velkých měřítek je homogenní a izotropní. Za základ však musíme brát prostor velký nejméně několik stovek kiloparseků; pak se nám vesmír opravdu jeví jako rovnoměrně vyplněný látkou. Uveďme příklad z běžného života, kdy je tomu obdobně: voda je v našich běžných měřítkách homogenní, i když v pohledu mikroskopickém sestává z jednotlivých molekul a atomů.



čítanka

# Steven Weinberg: Obr a kráva

Vznik světa je vylíčen ve sbírce norských mýtů mladší Edda, sepsané kolem roku 1220 Islanďanem Snorrim Sturlusonem. Na začátku, tvrdí Edda, nebylo vůbec nic. „Nebyla země, ni nahoře nebe, jen pustá, pustá, bez trávy zela propast."

Na sever a na jih od propasti ležely oblasti mrazu a ohně, Niflheim a Muspelheim. Teplo z Muspelheimu rozpustilo trochu mrazu z Niflheimu a z kapek tekutiny vznikl obr Ymer. Čím se Ymer živil? Zdá se, že existovala také kráva Audhumla. A čím se živila ona? No, bylo také trochu soli. A tak dále.

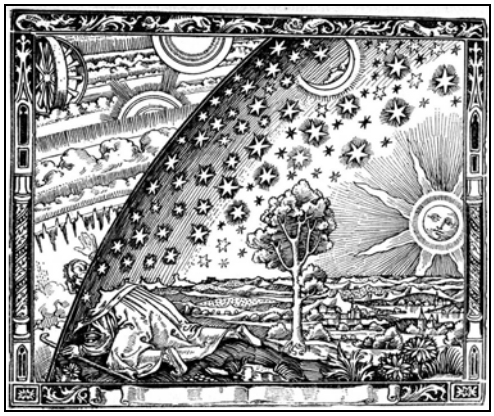
Nechci se dotknout náboženského cítění, zejména náboženského cítění vikingů, ale troufám si říci, že to není příliš přesvědčivý obraz počátků světa. I když ponecháme stranou všechny námitky proti logice báje, příběh vyvolává tolik otázek, na kolik jich odpovídá, a každá odpověď vyžaduje další komplikace v počátečních podmínkách.

Nedokážeme se pouze usmívat nad Eddou a zříci se všech kosmologických spekulací – touha sledovat historii vesmíru až k jeho počátkům je neodolatelná. Fyzikové a astronomové se od počátku moderní vědy v šestnáctém a sedmnáctém století k problému vzniku vesmíru neustále vraceli.

Tyto výzkumy však často narážely na nepochopení. Vzpomínám si, že v době, kdy jsem byl ještě student a když jsem v padesátých letech dvacátého století začínal s vlastním bádáním (týkajícím se jiných problémů), studium počátků vesmíru bylo všeobecně považováno za něco, čemu by opravdový vědec neměl věnovat čas. Toto mínění nebylo tehdy neodůvodněné: téměř po celé období, které nazýváme obdobím moderní fyziky a astronomie, neexistovaly přiměřené experimentální a teoretické podklady, z nichž by bylo možné vycházet při výzkumech raného vesmíru.

Od šedesátých let se všechno změnilo. Teorie raného vesmíru je do té míry přijímána, že ji astronomové často nazývají standardní model. Je to víceméně stejná teorie jako teorie velkého třesku, je však doplněna mnohem podrobnějším popisem struktury vesmíru. O této teorii raného vesmíru budeme ještě mnohokrát hovořit.

Výňatek z knihy *První tři minuty* (Mladá fronta, Praha 1983). Přeložil Michal Horák.



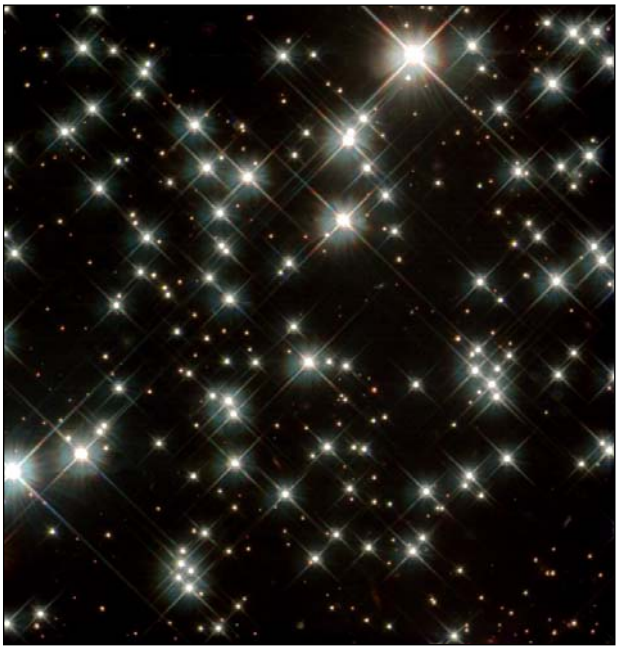
čítanka

# Zdeněk Mikulášek: V noci musí být tma

*„Je-li to pravda a jsou-li hvězdy stejné povahy*
*jako Slunce, proč tato slunce dohromady*
*nepředčí naše Slunce v jeho jasnosti?“*

Johannes Kepler: Rozprava s „Hvězdným poslem“ (1610)

V nekonečném vesmíru, v němž se všude nacházejí zářící hvězdy, by měla být hvězdná obloha pokryta kotoučky hvězd tak, že bychom na ní neměli najít ani kousíček temný. Každý cípek oblohy by měl zářit zhruba týmž oslepujícím jasem jako sluneční kotouč. V tomto hvězdném pekle by život zanikl během sekundy, oceány by se vypařily za minutu a Země samotná by se změnila v horký plyn v průběhu hodiny. Nic takového se však neděje. Kde jsme tedy udělali chybu v úvaze?



Otázku, proč je noční obloha temná, si položil už Johannes Kepler a našel na ni také svou odpověď – odmítl nekonečný vesmír. Kepler spolu s Koperníkem se ještě plně nevymanili ze zajetí aristotelovských představ o světě a věřili, že vesmír je konečný – končí sférou nebes posetou hvězdami.

Při vzniku Newtonova pojetí vesmíru, vesmíru nekonečného v prostoru a čase, začal být problém temné oblohy zvlášť tíživý. Uvědomoval si ho i sám Isaac Newton, i když ten se soustředil spíše na podobný paradox, na paradox gravitační. Přeskočme řadu vysvětlení, z nichž mnohá jsou chybná očividně, jiná skrytě. Na první pohled se zdá, že tento tzv.

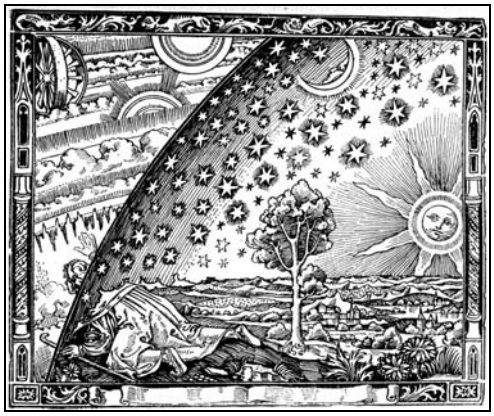
*fotometrický paradox* souvisí s vlastnostmi celého vesmíru; on však souvisí spíše s vlastnostmi samotných hvězd.

Paradoxy se „ničí“ tím, že dokážeme, že některý z předpokladů, který vedl k jeho konstrukci, je chybný. Připusťme teď pro jednoduchost, že žijeme v nekonečném Newtonově vesmíru, v němž jsou hvězdy rozloženy rovnoměrně s četností, s jakou se vyskytují ve skutečném vesmíru. K tomu, aby drobné kotoučky hvězd zcela pokryly naši oblohu, bychom potřebovali dohlédnout až do vzdálenosti $10^{23}$ světelných let! V tomto objemu se nachází kolem $10^{60}$ hvězd. Bylo by však ještě třeba, aby všechny tyto hvězdy posledních $10^{23}$ let zářily stejně jako dnes. To je ale v příkrém rozporu s faktem, že hvězdy září jen asi 10 miliard let, čili dobu desetibilionkrát kratší, než by bylo zapotřebí. Obloha musí mít tedy desetibilionkrát menší jas než oslnivě jasné kotoučky hvězd.

Temnota nočního nebe je dána tím, že vesmír zkrátka neobsahuje dostatek energie k tomu, aby se vytvořila jasně zářící obloha. Světlo všech hvězd je příliš slabé na to, aby „osvětlilo“ temný vesmír.

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

# 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie



*Není to nesmírnost hvězd, co zaslouží náš obdiv, nýbrž člověk, který ji změřil.*

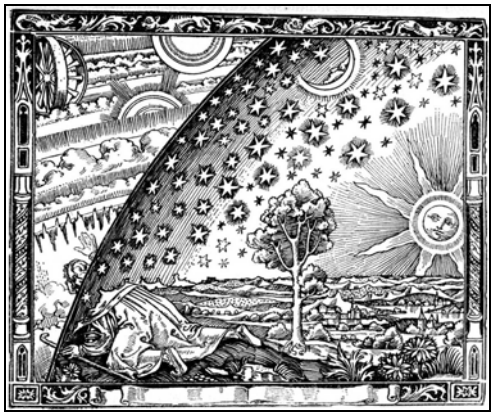
Blaise Pascal, matematik a fyzik (1623 – 1662)

## otázky a příklady

**Otázka 9.1.1.** Představte si, že se zcela náhodně octnete na nějakém místě ve vesmíru, a tam budete porovnávat osvětlení vyvolané kosmickými objekty s tím, co známe ze Země. S největší pravděpodobností zjistíte, že: a) bude mnohem větší než za slunečního dne na Zemi; b) bude srovnatelné s osvětlením v noci za měsíčního úplňku; c) bude srovnatelné s osvětlením za temné bezměsíčné noci; d) bude mnohem menší než osvětlení za nejtmavší pozemské noci.

**Otázka 9.1.2.** Máte-li již v sobě vypěstovaný určitý cit pro velká čísla, bude pro vás tato úloha určitě velice snadná (ke správnému výsledku přijdete ovšem také logickou úvahou). Nuže: seřaďte podle *rostoucí* velikosti tyto objekty či vzdálenosti: a) kulová hvězdokupa; b) veleobr; c) místní skupina galaxií; d) typická vzdálenost mezi hvězdami v okolí Slunce; e) kulová složka (tzv. halo) naší Galaxie.

**Otázka 9.1.3.** Které z následujících tvrzení *není* pravdivé? a) Hubblova klasifikace galaxií *ne*představuje vývojovou posloupnost. b) Velmi zploštělé galaxie nazýváme též čočkovité. c) Jednotlivé galaxie v galaktické kupě jsou k ní vázány gravitačně. Kupa galaxií však již není gravitačně vázána s jinou galaktickou kupou.



Mephistopheles:

*Šedá, můj příteli, je všechna teorie,*
*a žití zlatý strom se zelená.*

Johann Wolfgang von Goethe v díle *Faust*,
překlad Otokar Fischer

## speciální otázka

# Řádový odhad je důležitý

Ověřte si, zda jste schopni odhadnout některé veličiny alespoň *řádově*. Odpovězte tedy na následující otázky tak, že uvedete *řádový výsledek* (např. $10^2$ hvězd, $10^8$ m, ...). Když váš údaj bude o max. ± 1 řád jiný než očekávaný výsledek (např. místo $10^7$ uvedete $10^6$), jedná se stále ještě o přijatelnou odpověď.

1. Kolik hvězd na *celé* hvězdné obloze lze spatřit běžným ručním triedrem?
2. Jakou přesnost (v procentech) dosahují měření vzdáleností blízkých pohybových hvězdokup?
3. Kolik kulových hvězdokup známe?
4. Kolik hvězd tvoří typickou kulovou hvězdokupu?
5. Jak velká vzdálenost (v parsecích) dělí hvězdy v okolí Slunce?
6. Kolik minut trvá adaptace lidského oka na úplnou tmu?
7. Kolik planetek, pro něž byla spočítána jejich trajektorie, je v současné době známo?
8. Kolik hvězd obsahuje galaxie přibližně stejně velká jako naše?
9. Kolik kilometrů činí průměr největších družic planet v naší sluneční soustavě?
10. Jaká teplota panuje v samém středu Slunce?

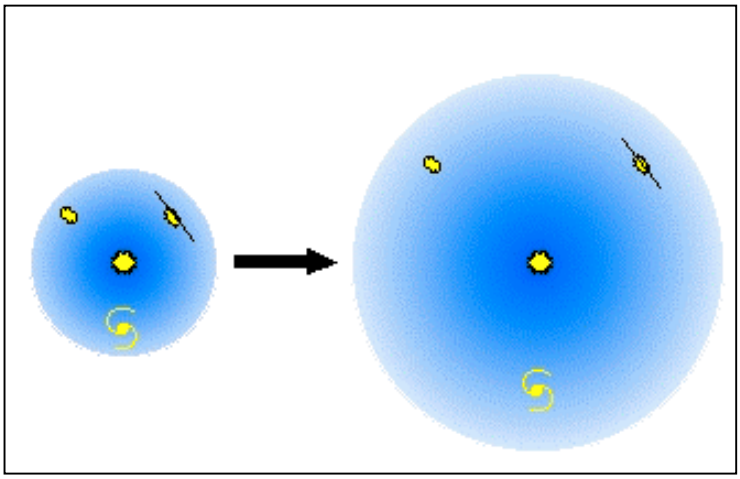
# 9.2. Vesmír se rozpíná

Ano, vesmír se rozpíná. Je to představa dost neobvyklá, neboť o neměnnosti vesmíru se lidé po tisíciletí přesvědčovali na základě každodenní zkušenosti. Nicméně dnes víme, že vesmír statický není.

Tento stav je důsledkem homogenity vesmíru. Hvězdy, planety a konečně i my sami se nacházíme ve stavu hydrostatické rovnováhy. Máme-li dlouhodobě vzdorovat gravitaci, musí být gravitační síla velmi přesně vyrovnána silou vztlakovou. Ta je dána rozdílem tlaků ve směru k centru gravitace. V případě vesmíru, který je ve velkých měřítkách homogenní a má tudíž všude stejný tlak, ovšem žádný rozdíl tlaků nevzniká. Zde se uplatňuje pouze gravitace, tu nelze nijak odstínit. Vesmír tedy musí být *dynamický*, musí se buď *rozpínat* nebo *smršťovat*; jiná alternativa dlouhodobě neexistuje [1]).

**Jak máme rozumět rozpínání vesmíru?**

Představme si velkou gumovou blánu (kupříkladu ve tvaru balónku), na niž nakreslíme drobné tečky. Ty mohou představovat třeba kupy galaxií. Taková situace velmi dobře napodobuje poměry v reálném vesmíru, i když namísto tří rozměrů nyní uvažujeme jen dva. Budeme-li blánu rovnoměrně roztahovat do všech směrů (balónek nafukovat), tečky („kupy galaxií“) se budou od sebe vzdalovat.



Expanze vesmíru není nějakým úprkem galaxií, je to doopravdy *rozpínání prostoru*, v němž se nacházejí kupy galaxií. V současné době přibude v jednom krychlovém metru objemu ročně 0,23 krychlových milimetrů. V naší analogii s gumovou blánou jde o její roztahování. Kdyby to byla

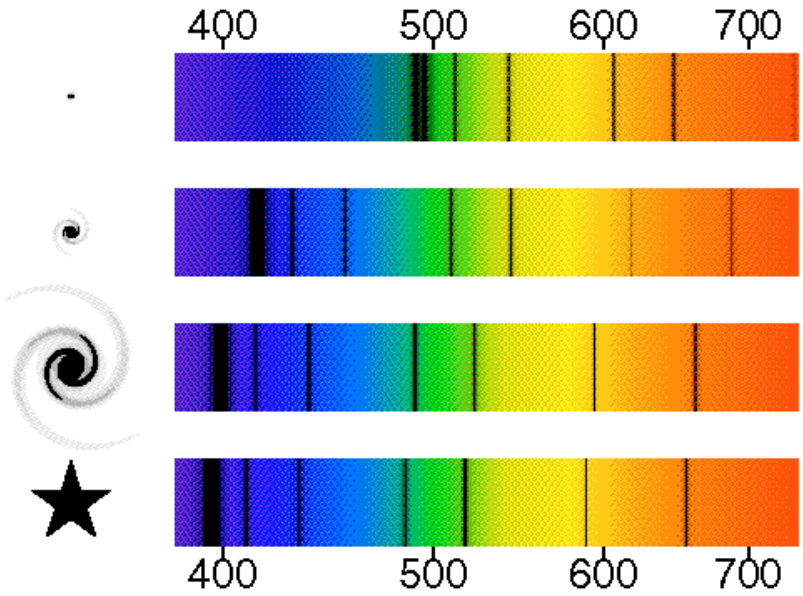
[1]) O tom, že vesmír opravdu *je* dynamický, si přečtěte více v čítance v následující kapitole 9.3. (*Vesmír se musí vyvíjet*).

tkanina z pružných vláken, asi bychom řekli, že se roztahuje výplet. Body – kupy galaxií – se napříč blánou prakticky nepohybují.

Matematicky to popíšeme *Hubblovým vztahem* [2]). Vztah platí pro libovolné dva body. Když bude gumová blána dostatečně velká, nikde na ní nenajdeme okraje či střed. „Střed“ neexistuje, případně se nachází v libovolném bodě – jak chcete. Pozorovateli v kterémkoli bodě (galaxii) se expanze vesmíru jeví zcela stejným způsobem.

**Existují důkazy o rozpínání vesmíru?**

Již na počátku 20. století existovaly první náznaky, že mnohé tzv. „spirální mlhoviny“ (tedy galaxie) jeví červený posuv spektrálních čar. Pozorujeme-li jej u objektů v našem bezprostředním okolí, můžeme jej pomocí Dopplerova jevu interpretovat jako důsledek vzdalování objektů.




Schematické znázornění červeného posuvu spektrálních čar u blízkých a vzdálenějších galaxií (čísla označují vlnovou délku v nm).

U vzdálených galaxií však tuto interpretaci použít nemůžeme, neboť vesmír velkých měřítek se rozpíná. Červený posuv pozorovaný u galaxií je tzv. *kosmologický*, a je důkazem rozpínání vesmíru. Představíme-li si foton jako klubko vlnění, pak při své cestě vesmírem se klubko natahuje úměrně tomu, jak se rozšiřuje sám prostor. Vlnová délka záření se prodlužuje, ze záření modrého vzniká například červené či infračervené. *Kosmologický červený posuv, který foton vykazuje, tak poskytuje informaci, kolikrát se zvětšil vesmír za dobu jeho putování prostorem.*

Je důležité si uvědomit, že rozpínání vesmíru nemá vliv na vzdálenosti objektů, které jsou navzájem vázány např. gravitačně nebo jinou interakcí. Proto se v důsledku rozpínání vesmíru nemění velikosti atomů či molekul, vzdálenost Země – Slunce nebo vzdálenosti hvězd v Galaxii. Rozpínání vesmíru nemá vliv ani na poměry v gravitačně vázaných kupách galaxií. Ty teprve tvoří ony základní „hmotné body“, k nimž můžeme vztahovat rozpínání vesmíru.

[2]) Pro připomenutí: o Hubblově vztahu byla zmínka již v kapitole 2.6.

### Horký a hustý vesmír

Jestliže vesmír v současnosti expanduje, pak při obrácení toku času musíme dojít ke stavu, kdy měl nulové rozměry. Když začalo rozpínání vesmíru – byl to okamžik *velkého třesku* – rozběhl se čas; před velkým třeskem *čas neplynul, ba vůbec neexistoval*, takže nebylo žádné „předtím“. Vesmír v minulosti byl tedy menší, hustší a – teplejší. S domněnkou o horkém a hustém vesmíru na samém počátku jeho existence přišel v roce 1948 astrofyzik George Gamow (1904–1968). Tehdy však jeho názory většina odborníků nebrala nijak vážně, protože zatím neexistovaly důkazy, jež by tuto jistě neobvyklou představu potvrzovaly.

### Velký třesk

Tato dvě dnes už okřídlená slova znamenají pro astronomy a kosmology počátek rozpínání prostoru a spuštění času. Zvukomalebný pojem ovšem podvědomě svádí k představě exploze: vesmír vybuchne a postupně zachvacuje větší a větší část prostoru. Ne, tak tomu určitě nebylo, velký třesk *není* obdobou gigantického výbuchu, protože vesmír se nikam nerozpíná, nese si svůj prostor s sebou.

Při velkém třesku se počal rozpínat sám prostor, v tu chvíli začal plynout čas, neboť prostor a čas jsou navzájem nerozlučně propojeny. Je to okamžik zrodu našeho vesmíru. Tvrzení, že tomu tak doopravdy bylo, je ovšem třeba podepřít důkazy. Dnes jich existuje řada; jeden z nejpádnějších pochází z roku 1965 a je spjat s objevem *reliktního záření*.

### Reliktní záření [3])

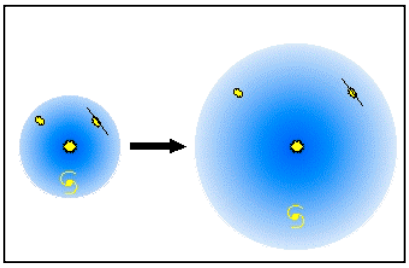
Dnes již víme, že děje krátce po velkém třesku předurčily současný vzhled vesmíru, v němž se nacházíme. V období krátce po vzniku vesmíru byly částice látky a fotony v neustálé a velmi silné interakci. Neutrální atomy tehdy ještě neexistovaly, vesmír obsahoval jen samostatná atomová jádra lehkých prvků a volné elektrony. Právě tyto elektrony velmi účinně rozptylovaly fotony, vesmír byl fakticky neprůhledný.

Jenže v důsledku rozpínání vesmír řídl a současně chladnul. Energie fotonů se zmenšovala přímo úměrně teplotě, která neustále klesala. Fotony teď existovaly déle než předtím, látka postupně průhledněla.

Prudký zlom nastal v okamžiku, kdy teplota vesmíru poklesla asi na 3000 K. Volné elektrony se tehdy houfně spojovaly s atomovými jádry a vznikaly atomy; fotony se naposledy rozptýlily na elektronech – a skončilo tak období těsného soužití látky a záření. Ničím neomezované fotony se osamostatnily a dodnes nesou informaci o tehdejším rozdělení látky ve vesmíru.

Ke vzniku fotonů reliktního záření došlo několik set tisíc let po velkém třesku. Toto záření je opravdu pozůstatkem (reliktem) dávné doby, po níž fotony reliktního záření již ani nevznikaly, ani nezanikaly, i když některé své původní vlastnosti změnily. V důsledku rozpínání vesmíru poklesla totiž jejich energie natolik, že v současnosti typická vlnová délka reliktních fotonů činí asi 2 mm (je to tedy mikrovlnné záření).

[3]) Latinské *reliquus* je pozůstalý, zbývající.

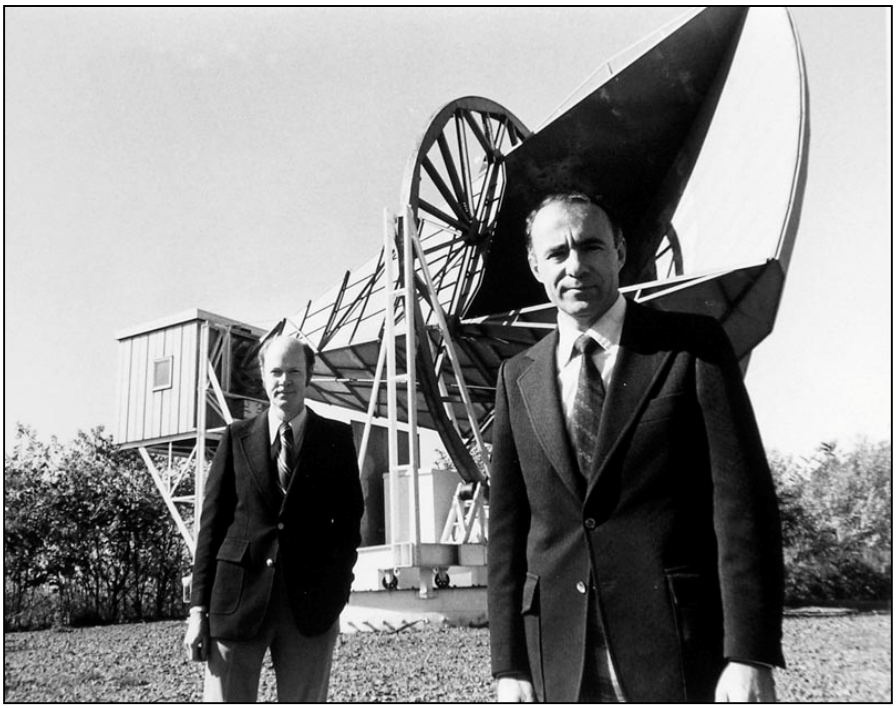


čítanka

# Zdeněk Pokorný: Neodstranitelný šum

Na téměř stejném místě, kde před třemi desítkami let stavěl svou anténu průkopník radioastronomie Karl Jansky – na Crawford Hillu v Holmdelu – vyrostla v roce 1960 další neobvyklá rádiová anténa. Zvláštní byl především její zcela nesouměrný šestimetrový vlnovod, připomínající trychtýř, a pak i skutečnost, že se aparatura vyznačovala mimořádně nízkým vlastním šumem. Pro dva radioastronomy – Arno Penziase a Roberta Wilsona, zaměstnané v Bellových laboratořích, to byl ideální přístroj pro rádiový výzkum vesmíru.

Přístroj byl však postaven a zpočátku také používán ke komerčním účelům. Nicméně po startu družice Telstar nebyla již trychtýřová anténa v Holmdelu pro práci s družicemi zapotřebí a tak byla roku 1963 uvolněna pro vědu.



Arno Penzias (v popředí) a Robert Wilson u netradičně řešeného radioteleskopu, kterým v roce 1965 objevili reliktní záření, přicházející z vesmíru.

Penzias a Wilson anténu ihned využili k měření galaktického šumu mimo oblasti Mléčné dráhy. Byli však překvapeni, že i přes všechna pečlivá technická opatření a kompenzace v elektrických obvodech přece jen někde vznikal jistý nadbytečný signál. Nepodařilo se jej potlačit ani chlazením aparatury na velmi nízkou teplotu tekutého hélia, ani všemožnými konstrukčními zásahy. Dokonce vyhnali i párek holubů, který se uhnízdil přímo v hrdle antény, a pak pečlivě očistili celou anténu od toho, co dobře znají všichni obyvatelé měst (Penzias to později decentně nazval „bílým dielektrickým materiálem"). Nepomáhalo to – hladina pozorovaného šumu se nesnížila.

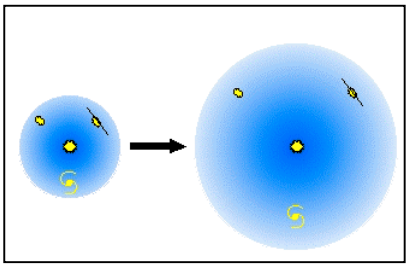
Těmito pracemi strávili Penzias a Wilson celý rok. Zjistili přitom, že registrovaný šum odpovídá záření tělesa, které je vyhřáto na teplotu asi tří a půl kelvinů – tedy 3,5 stupně nad absolutní nulou. Co však bylo zvlášť zajímavé – množství záření vůbec nezáviselo na směru, kam anténu namířili, ba neměnilo se ani v průběhu času. Prostě – bylo to záření, které k nám přicházelo naprosto stejnoměrně z celého vesmíru!

Ve stejné době, kdy Penzias a Wilson měřili v Holmdelu podivný šum pomocí zvláštní trychtýřové antény, v 60 kilometrů vzdáleném Princetonu budovala skupina astronomů vedená profesorem Robertem Dickem malou nízkošumovou anténu. Chtěli registrovat záření, které mělo pocházet z horkého raného období našeho vesmíru. To naznačovala řada teoretických prací.

Několik týdnů před tím, než Dickeho skupina zahájila svá pozorování, došlo shodou řady náhod k setkání Penziase a Dickeho. Robert Dicke naznal, že Penzias s Wilsonem již objevili záření, které jeho skupina chtěla vypátrat. Dohodli se, že v prestižním vědeckém časopisu *The Astrophysical Journal* uveřejní dvě stručné zprávy: Penzias a Wilson oznámí výsledky svých pozorování, a Dickeho skupina podá jejich vysvětlení.

A tak 1. července 1965 vyšel ve zmíněném časopisu nenápadný článek, nazvaný „Měření nadbytku anténní teploty na frekvenci 4080 megahertzů". Penzias s Wilsonem uvedli jen strohé výsledky měření, interpretaci přenechali kolegům z Princetonu. Později přiznali, že byli sice rádi, že záhadný šum měl nějaké fyzikální vysvětlení (zejména když důsledky týkající se historie vesmíru byly tak významné), ale přesto jejich nálada byla ještě po nějakou dobu jen opatrně optimistická.

Z připravované publikace *Zlaté století astronomie* (Aventinum, Praha).

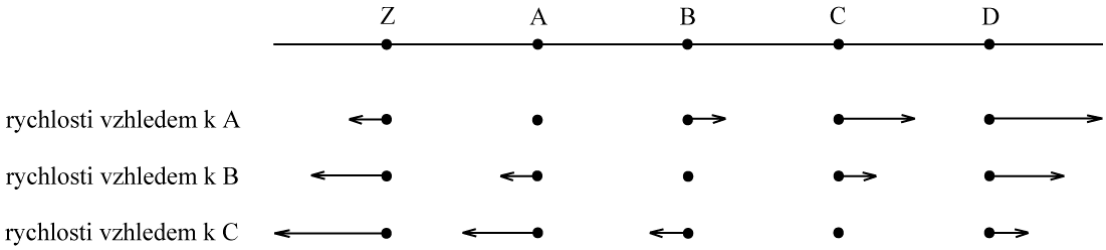


doplněk

# Homogenní a izotropní vesmír

Kosmologický princip aplikovaný na galaxie vyžaduje, aby pozorovatel viděl stejné rozložení rychlostí ostatních galaxií nezávisle na tom, ve které galaxii se právě nachází. Přímým matematickým důsledkem tohoto principu je, že relativní rychlost libovolných dvou galaxií musí být úměrná vzdálenosti mezi nimi, jak experimentálně zjistil Hubble.

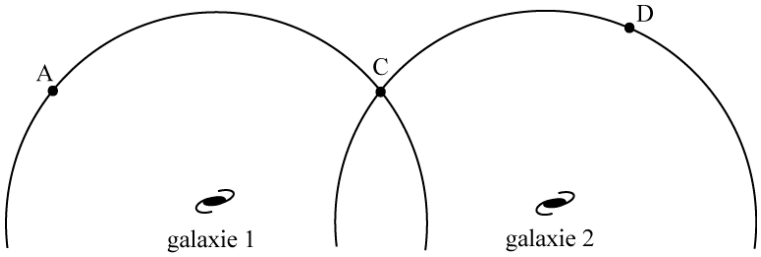
Abychom to pochopili, uvažujme tři galaxie A, B a C rozložené na přímce (obr. 1). Předpokládejme, že vzdálenost mezi A a B je stejná jako vzdálenost mezi B a C. Ať je rychlost B vzhledem k A jakákoli, kosmologický princip vyžaduje, aby C mělo stejnou rychlost vzhledem k B. Z toho pak vyplývá, že galaxie C, která je dvakrát dále od A než od B, se musí pohybovat dvakrát rychleji vzhledem k A než k B. Do tohoto řetězce můžeme přidat víc galaxií a vždy dojdeme k výsledku, že rychlost pohybu libovolné galaxie vzhledem k jiné je úměrná vzdálenosti mezi nimi.




Obr. 1: *Homogenita a Hubblův zákon*. Na obrázku je nakreslen řetězec navzájem stejně vzdálených galaxií Z, A, B, C ... Jejich rychlosti měřené vzhledem k A, B, C jsou znázorněny šipkami různých délek a směrů. Princip homogenity vyžaduje, aby se rychlost C vzhledem k B rovnala rychlost B vzhledem k A; sečtením těchto dvou rychlostí dostaneme rychlost C vzhledem k A, znázorněnou šipkou dvojnásobné délky. Pokračujeme-li tímto způsobem, dostaneme postupně všechny rychlosti znázorněné na obrázku. Je vidět, že rychlosti splňují Hubblův zákon: rychlost libovolné galaxie vzhledem ke kterékoli jiné jej úměrná jejich vzdálenosti. Toto je jediný možný způsob rozdělení rychlostí, který je v souladu s principem homogenity vesmíru.

Jak se často ve vědě stává, tento argument může být použit v jednom i ve druhém směru. Hubble zjištěním úměrnosti mezi vzdáleností galaxií a rychlostí jejich vzdalování nepřímo potvrdil správnost kosmologického principu. To nás ohromně uspokojuje filozoficky – proč by se měla jedna část vesmíru nebo jeden směr ve vesmíru lišit od jiného? To nás také přesvědčuje, že astronomové skutečně pozorují dosti značnou část vesmíru, ne pouze nějaký místní vír ve větším kosmickém maelströmu. Obráceně, kosmologický princip můžeme považovat *a priori* za správný a odvodit vztah úměrnosti mezi vzdáleností a rychlostí galaxií, jak jsme to právě udělali. Potom jsme schopni z poměrně snadného měření Dopplerova posuvu určit vzdálenost dalekých objektů.

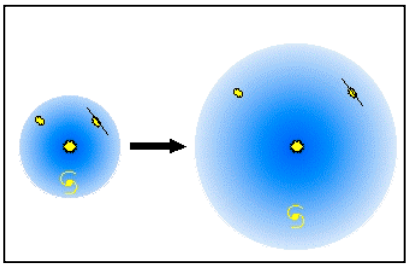
Kosmologický princip je experimentálně potvrzován ještě jinak, než měřením Dopplerova posuvu. Zanedbáme-li zkreslení způsobené naší Galaxií a blízkými kupami galaxií v souhvězdí Panny, zdá se vesmír pozoruhodně izotropní, tj. vypadá stejně ve všech směrech. (Ještě přesvědčivěji to ukazuje reliktní záření.) Avšak už od dob Koperníkových se učíme vyhýbat se předpokladům o zvláštním umístění lidstva ve vesmíru. Tedy je-li vesmír izotropní kolem nás, měl by být izotropní kolem každé galaxie. Každý bod vesmíru může být přenesen do kteréhokoli jiného bodu postupnými rotacemi kolem pevných středů (viz obr. 2), takže je-li vesmír kolem nějakého bodu *izotropní*, je nutně také *homogenní*.




Obr. 2: *Izotropie a homogenita*. Je-li vesmír izotropní kolem galaxie 1 i kolem galaxie 2, pak je homogenní. Abychom ukázali, že podmínky v libovolných dvou bodech A a B jsou stejné, nakreslíme kružnici se středem v galaxii 1, procházející bodem A, a jinou kružnici se středem v galaxii 2, procházející bodem B. Izotropie kolem galaxie 1 vyžaduje, aby podmínky byly stejné v bodě A a v bodě C, kde se obě kružnice protínají. Podobně izotropie kolem galaxie 2 vyžaduje, aby byly stejné podmínky v B a C. Jsou tedy stejné podmínky i v A a B.

Převzato z knihy Stevena Weinberga *První tři minuty* (Mladá fronta, Praha 1983, překlad Michal Horák, 25-26).

# 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie



*Omyl, který vzbudí rozruch, je cennější než pravda vedoucí do slepé uličky.*

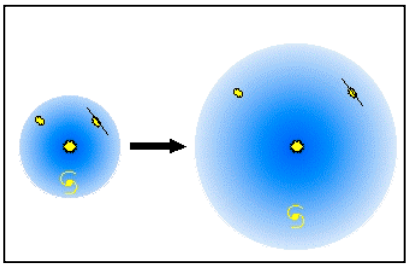
Alessandro Volta, fyzik (1745 – 1827)

## otázky a příklady

**Otázka 9.2.1.** Můžeme ve spektru hvězdy $\alpha$ Centauri, což je jak známo jedna z našich nejbližších hvězd, pozorovat červený posuv odpovídající Hubblovu vztahu? Vysvětlete, proč ano nebo ne.

**Otázka 9.2.2.** Jak daleko je galaxie, jestliže vodíková spektrální čára Hβ je v jejím spektru posunuta k vlnové délce $\lambda = 500$ nm? (Poznamenejme, že vlnová délka čáry Hβ, je-li zdroj záření v klidu vůči pozorovateli, činí $\lambda_0 = 486$ nm).

**Otázka 9.2.3.** I když pozorujeme vzdalování galaxií (což je odvozeno z pozorování červeného posuvu spektrálních čar), neznamená to, že naše Galaxie má nějaké privilegované postavení ve vesmíru. Stejný efekt – vzdalování galaxií rychlostí úměrnou vzdálenosti – zjistí pozorovatel nacházející se v libovolné galaxii. Dokažte toto tvrzení.



úloha k zamyšlení

## Mikrovlnné reliktní záření

Reliktní mikrovlnné záření se řídí Planckovým zákonem pro záření absolutně černého tělesa. Z tohoto zákona plyne mimo jiné důležitý vztah mezi vlnovou délkou $\lambda_{max}$, na níž těleso nejvíce vyzařuje, a teplotou záření $T$: $\lambda_{max}\ T$ = konstanta (je to Wienův zákon posuvu). Toto záření vzniklo posledním rozptylem na částicích vesmírné látky na konci éry záření, zhruba půl milionu roků po velkém třesku. Jaká byla v té době jeho vlnová délka $\lambda_{max}$ a do kterého oboru elektromagnetického spektra spadala? Jak velký je nynější červený posuv $z$ pro reliktní záření?

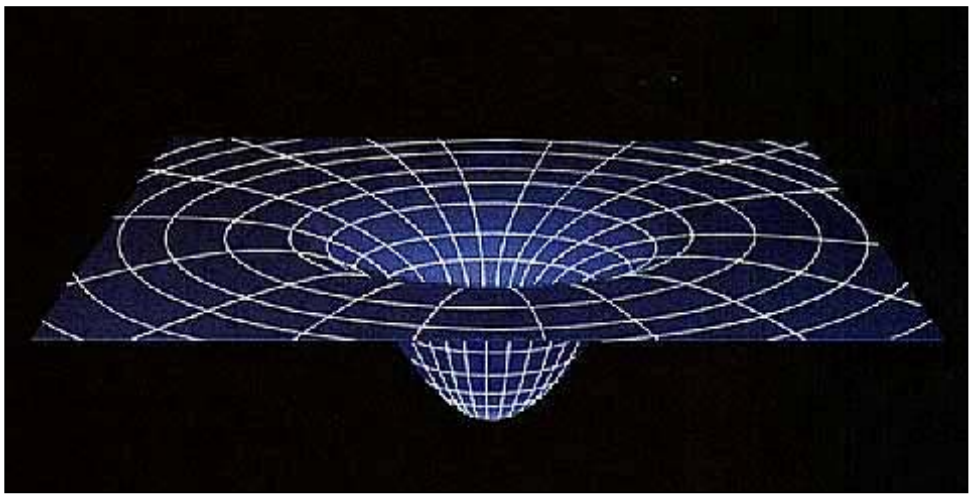
# 9.3. Modely vesmíru

Dominující silou ve vesmíru je síla gravitační. Je dalekého dosahu, ubývá jen s druhou mocninou vzdálenosti. Kromě toho ji nelze ničím odstínit. Proto kosmologické modely, pomocí nichž zkoumáme strukturu a vývoj vesmíru, závisí především na teorii popisující gravitační působení.

Nejvíce přijímanou teorií je v současnosti Einsteinova obecná teorie relativity. I když není jedinou teorií gravitace, je z nich nejjednodušší a všechny její důsledky dobře souhlasí s pozorováními. Podle obecné teorie relativity se tělesa nepohybují pod vlivem gravitačních sil, ale po nejpřímější možné dráze v prostoročasu zakřiveném působením hmotných těles.

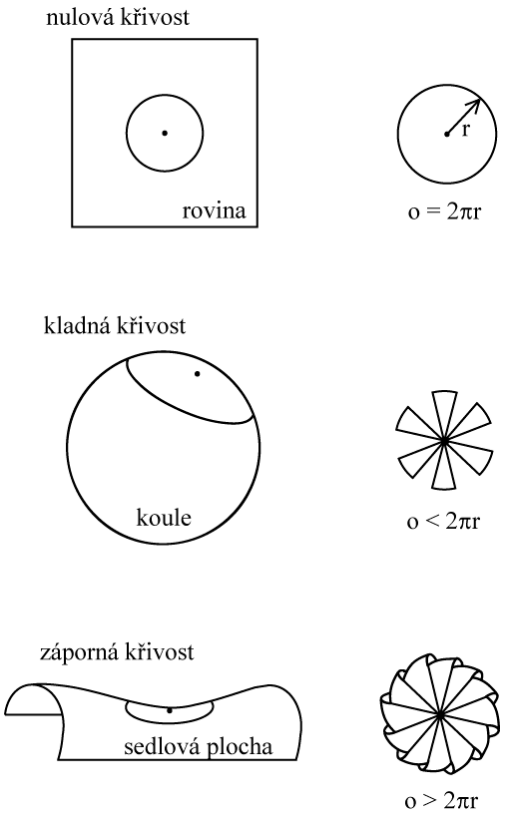
### Geometrie vesmíru

Za předpokladu, že platí kosmologický princip (tedy vesmír je homogenní a izotropní), lze geometrii vesmíru popsat parametrem, nazývaným *křivost prostoru*. Zakřivený trojrozměrný prostor si nedovedeme představit, použijme proto dvojrozměrné analogie. Je-li křivost kladná, má trojrozměrný



Podle obecné teorie relativity se tělesa pohybují po nejpřímější možné dráze v prostoročasu zakřiveném působením hmotných těles.

prostor vlastnosti obdobné vlastnostem povrchu koule: má konečný objem, i když je bez hranic, součet vnitřních úhlů v trojúhelníku je vždy větší než 180 stupňů. Nulové křivosti odpovídá nekonečný a nezakřivený prostor, v němž platí euklidovská geometrie. Konečně prostor se zápornou křivostí má dvojrozměrnou analogii v ploše tvaru sedla. Prostor je nekonečný, součet úhlů v trojúhelníku je menší než 180 stupňů.




Dvourozměrné analogie různých prostorů.

**Fridmanovy modely**

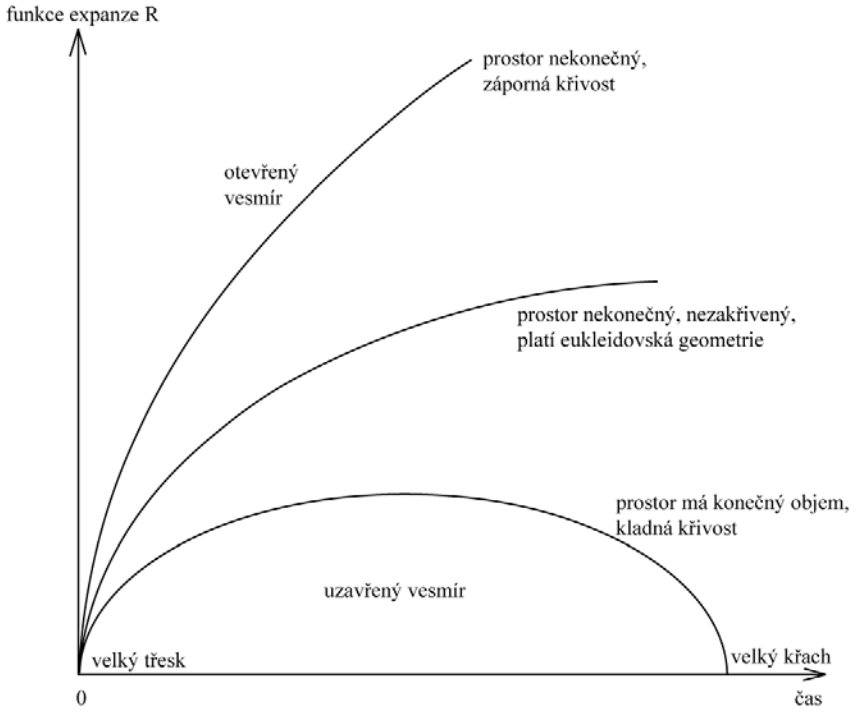
V roce 1922 nalezl ruský matematik a meteorolog Alexandr Fridman (1988–1925) taková řešení rovnic obecné teorie relativity, podle nichž lze popsat vývoj vesmíru v čase. Stručně řečeno: v počátečních fázích se vesmír rozpíná. Expanze vesmíru probíhá buď stále, nebo se za jistých okolností může rozpínání časem změnit ve smršťování (viz obr. na následující straně).

Rozhodující je, že Fridmanovy modely předpověděly dynamické chování vesmíru. Nezávisle na Alexandru Fridmanovi došel k podobným závěrům v roce 1927 belgický kosmolog Georges Lemaître [1]) (1894–1966). To bylo stále ještě dva roky před zveřejněním Hubblovy práce, která rozpínání vesmíru uvedla ve všeobecnou známost.

**V jakém vesmíru žijeme?**

Lze vůbec nějak zjistit, ve kterém ze tří hlavních typů vesmíru, naznačených Fridmanovými modely, žijeme? V principu ano. V každém z těchto vesmírů je jiná geometrie, podobně jako platí různé geometrie v rovině, na kouli nebo na ploše tvaru sedla. Bohužel přímé testy, při nichž bychom měřili a navzájem porovnávali úhly a objemy částí prostoru, jsou obtížné a nedávají dostatečně přesné výsledky.

[1]) Čti: *džórdž lemétr*.




Vesmír na trojí způsob (o funkci expanze *R* viz poznámka pod čarou [2]) ).

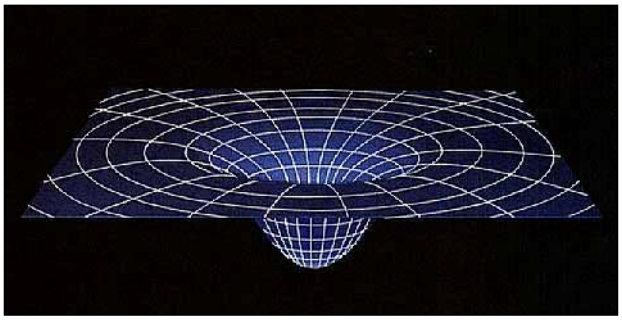
Nabízejí se i jiné metody testování: má-li být vesmír uzavřený, musí být jeho střední hustota látky větší než tzv. *kritická* (ta odpovídá jednomu atomu vodíku asi v jednom litru prostoru). Ovšem ani tato cesta zatím k cíli nevede, protože ve vesmíru registrujeme našimi přístroji jen několik procent hmoty, zbylá část nám zůstává skryta [3]).

[2]) Funkce expanze *R* je bezrozměrné číslo, které udává, jak se s časem mění vzdálenosti ve vesmíru. Byla-li v čase $t_0$ vzdálenost dvou kup galaxií rovna $l_0$, pak ze znalosti průběhu funkce expanze můžeme určit jejich vzdálenost $l_t$ v čase $t$ jako

$$l_t = R(t)\, l_0.$$

Z definice funkce expanze přímo plyne, že $R(t_0) = 1$.

[3]) Problém, že z celkového množství látky tvořící náš vesmír pozorujeme jen několik málo procent, nazýváme *paradoxem skryté hmoty*. Je znám už od 30. let dvacátého století. Zatím není jasné, jakého druhu by skrytá hmota mohla být. Nejsou to ani běžné elementární částice, ani nevelká, málo zářící tělesa (například tzv. hnědí trpaslíci). Pozornost kosmologů a astrofyziků se v souvislosti se skrytou hmotou obrací nejčastěji k exotickým a dosud neobjeveným částicím, jako jsou gravitina, fotina, axiony, které by byly pozůstatkem procesů v raném vesmíru.



čítanka

# Igor Novikov: Vesmír se musí vyvíjet

Skutečnost, že vesmír, ve kterém žijeme, se musí buď rozšiřovat, nebo smršťovat, byla teoreticky předpověděna vynikajícím sovětským vědcem Alexandrem Fridmanem v letech 1922–1924. Fridmanovy práce byly čistě matematické a vycházely z Einsteinovy teorie gravitace. K pochopení základní podstaty jeho objevu však není třeba užívat přesné matematiky. Jako všechno veliké má i tento objev velice prostý základ.

Vzpomeňme si, proč se nesmršťuje nebo nezvětšuje obyčejná hvězda. Gravitační síly jsou v ní udržovány v rovnováze spádem tlaku od hustého nitra, kde je tlak největší, k volnému povrchu, kde je nulový. Ale vesmír je ve velkých měřítkách homogenní, všude stejný, proto v něm k žádnému spádu tlaku nemůže dojít. Znamená to, že jedinou podstatnou silou zůstává gravitace.

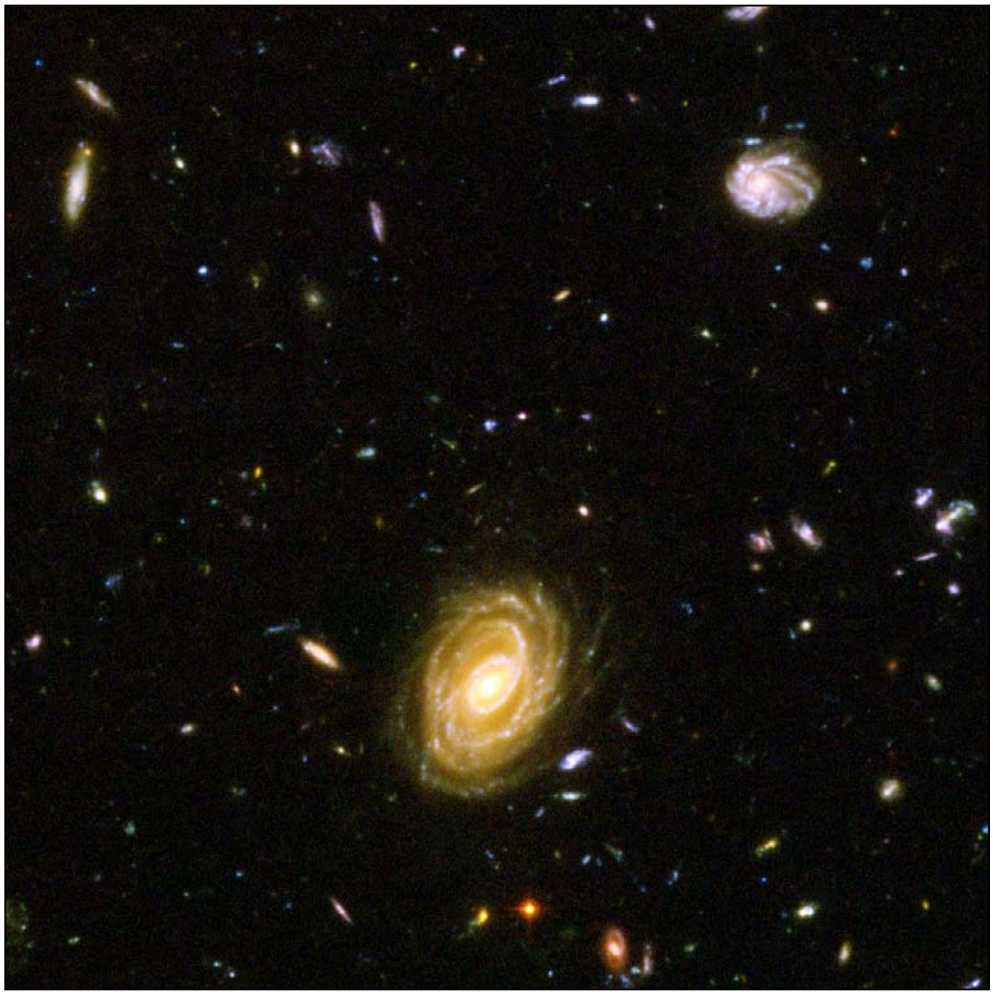
Pokud si tedy představíme, že v nějakém okamžiku jsou veškeré ohromné hmoty vesmíru v průměru v klidu, pak v následujícím okamžiku je gravitační síla uvede do pohybu, jednotlivé částice se k sobě budou přibližovat, a látka se začne smršťovat. V poměrně malých soustavách může vytvořit rovnováhu kruhový pohyb po oběžné dráze, jak je tomu třeba ve sluneční soustavě, nebo chaotický pohyb těles po velmi protáhlých trajektoriích, jak je tomu například v eliptických galaxiích. Ale v ohromném vesmíru je to nemožné – kdybychom si chtěli představit vesmír jako obrovskou kouli udržovanou v rovnováze pohybem jednotlivých objektů, překračovala by rychlost některých objektů rychlost šíření světla, což zákony přírody nepřipouštějí.

Vesmír nemůže být ve stacionárním stavu, to znamená – odhlédneme-li od místních nepravidelností – ve stavu časově neproměnném. K takovému závěru dospěl Fridman. To však neznamená, že se vesmír musí nezbytně pod účinkem gravitace smršťovat. Pokud na začátku byly jednotlivým hmotným bodům uděleny takové rychlosti, že se od sebe navzájem vzdalovaly, bude se vesmír rozšiřovat a gravitace bude toto rozpínání pouze brzdit. Bude-li se vesmír rozpínat nebo smršťovat, závisí tedy na počátečních podmínkách, na fyzice procesů, které určily počáteční rychlosti jednotlivých hmotných částic. Fridmanův objev tak předpovídal nutnost vývoje vesmíru jako celku.

Jednalo se o zcela novou, neobvyklou myšlenku. V průběhu minulých věků vládly ve vědě různé představy o stavbě vesmíru, měly však jedno společné. Všechna (nebo téměř všechna) tato schémata byla náčrty stavby, ne vývoje, tedy přetváření vesmíru, a ve všech byla zabudována představa „neměnného mechanismu vesmírných hodin“. Myšlenka stacionárnosti vesmíru jako celku se zdála být samozřejmou. Ve vesmíru mohou probíhat nejrůznější složité procesy, ale z čeho, z jakého stavu se může rozvíjet celý vesmír?

Myšlenka o vývoji vesmíru jako celku se pokládala za nehezkou; i řada význačných vědců ji těžko a nerada přijímala. Příkladem může být sám Einstein. Tvůrce teorie relativity chápal, jak důležitá pro kosmologii

jeho obecná teorie relativity je. Krátce po jejím vytvoření začal zkoumat, mají-li rovnice gravitačního pole, použité pro homogenní vesmír jako celek, statické řešení, tj. řešení popisující stav nezávislý na čase. Ale takové řešení gravitační zákon obecné teorie relativity nepřipouštěl. Einsteinovi však připadalo jako samozřejmé, že by se měl dát sestrojit statický (ne vyvíjející se) model vesmíru. Idea statického světa mu připadala natolik přitažlivá, že pojal nedůvěru ke svým původním rovnicím a pozměnil je takovým způsobem, aby stacionární řešení připouštěly.



Snímek Hubblovým kosmickým dalekohledem, pořízený v rámci projektu „Ultrahluboké pole“, kdy se v období září 2003 až leden 2004 snímal malý kousek hvězdné oblohy v souhvězdí Pece.

Proč byla myšlenka statického vesmíru tak přitažlivá?

Příčinou byla zřejmě zdánlivá stacionárnost, neměnnost astronomických těles a soustav, ať už jde o sluneční soustavu, hvězdy, hvězdná seskupení nebo galaxie. Pozorovaná neměnnost astronomických jevů ve všech člověku známých měřítkách byla mimovolně extrapolována i na vesmír jako celek. Velice výrazně hovoří o zdánlivé neproměnnosti světa Aristoletés ve spise *O nebi*: „V průběhu uplynulých věků nenacházíme podle letopisů předávaných potomkům pokolení od pokolení ani stopu změny na vzdáleném nebi jako celku, ani v některé jeho části.“

Dnes se nám představa vyvíjejícího se vesmíru zdá přirozená. Víme totiž, že neměnnost hvězd a jiných kosmických těles či jejich soustav je jen zdánlivá. Lidstvo je pozoruje po příliš krátkou dobu, než aby vývoj, změnu, zaznamenalo. Hvězdy se ale rodí, žijí, umírají. Jejich život trvá často miliardy let. Zdrojem energie,

kterou vyzařují, jsou jaderné reakce probíhající v jejich nitru. Ale žádný zdroj energie není věčný; i zásoby energie jaderných zdrojů jsou konečné. Znamená to, že Slunce i hvězdy vznikly před konečnou dobou a mají svou historii.

Dnes pozorujeme bouřlivé procesy výbuchů a vývoje v tak gigantických soustavách, jako jsou galaxie. Látka tvořící galaxii je postupně přetvářena jadernými procesy, jež probíhají ve hvězdách. Vodík se přeměňuje v hélium a to pak dále v těžší chemické prvky.

Statický obraz tedy nevyhovuje pro žádnou astronomickou soustavu, pokud má zachytit dostatečně dlouhý časový interval. Kdybychom tedy dnes stáli před úlohou znovu vytvořit model vesmíru, musel by to být model vývojový, v němž by byla jasně vyznačena etapa, kdy se začaly tvořit hvězdy, galaxie atd.

První Fridmanovu práci dokazující, že vesmír se musí vyvíjet, obdržela redakce německého *Časopisu pro fyziku* koncem června 1922. Einstein byl zřejmě natolik přesvědčen, že řešení rovnic popisujících stav vesmíru musí být statické, že Fridmanovo řešení prohlásil za chybné. V polovině září 1922 zaslal redakci téhož časopisu krátkou poznámku, ve které, řečeno slovy akademika Foka, „poněkud povýšeně říká, že Fridmanovy výsledky se mu zdály podezřelé a že v nich našel chybu, po jejímž odstranění Fridmanovo řešení přechází v řešení stacionární“.

Fridman se dověděl o Einsteinově názoru z dopisu svého petrohradského kolegy Jurije Krutkova, který byl tehdy na zahraniční cestě. V prosinci 1922 napsal Einsteinovi dopis, v němž podrobně vyložil podstatu svých výpočtů a přesvědčivě dokazoval jejich správnost. Dopis končil slovy:

„Pokud shledáte výpočty vyložené v mém dopise správnými, neodmítněte prosím mou žádost a sdělte to redakci *Časopisu pro fyziku*; možná že v takovém případě uveřejníte opravu svého tvrzení nebo umožníte přetisk úryvku z tohoto mého dopisu.“

Fridmanův dopis se zachoval v Einsteinově archívu. Ovšem Einstein jej tehdy buď nečetl, nebo mu nevěnoval pozornost, protože byl přesvědčen o správnosti svého stanoviska.

V květnu 1923 se Krutkov setkal s Einsteinem v Leidenu v domě známého holandského fyzika Paula Ehrenfesta; v několika diskusích se mu podařilo prokázat správnost závěrů sovětského matematika. V dopise své sestře z 18. května 1923 napsal: „Zvítězil jsem nad Einsteinem ve sporu o Fridmana. Čest Petrohradu je zachráněna!“

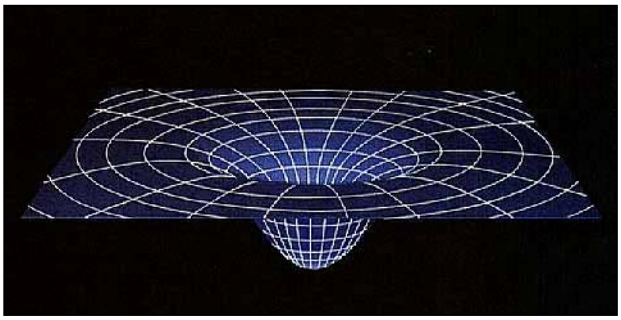
Krátce po rozhovorech s Krutkovem zaslal Einstein do *Časopisu pro fyziku* poznámku *K práci A. Fridmana O křivosti prostoru*:

„V předchozí poznámce jsem podrobil kritice výše uvedenou práci. Jak jsem se však přesvědčil z dopisu A. Fridmana, který mi doručil pan Krutkov, zakládala se moje kritika na výpočetní chybě. Výsledky A. Fridmana pokládám za správné a podnětné. Ukazuje se, že rovnice pole připouštějí pro strukturu prostoru spolu se statickým i dynamické (tj. na čase závislé) centrálně symetrické řešení.“

Einstein i později vždycky zdůrazňoval přínos Fridmanových prací pro současnou kosmologii.

Úryvek z knihy *Černé díry a vesmír* (Mladá fronta, Praha 1989). Přeložil Jiří Langer.

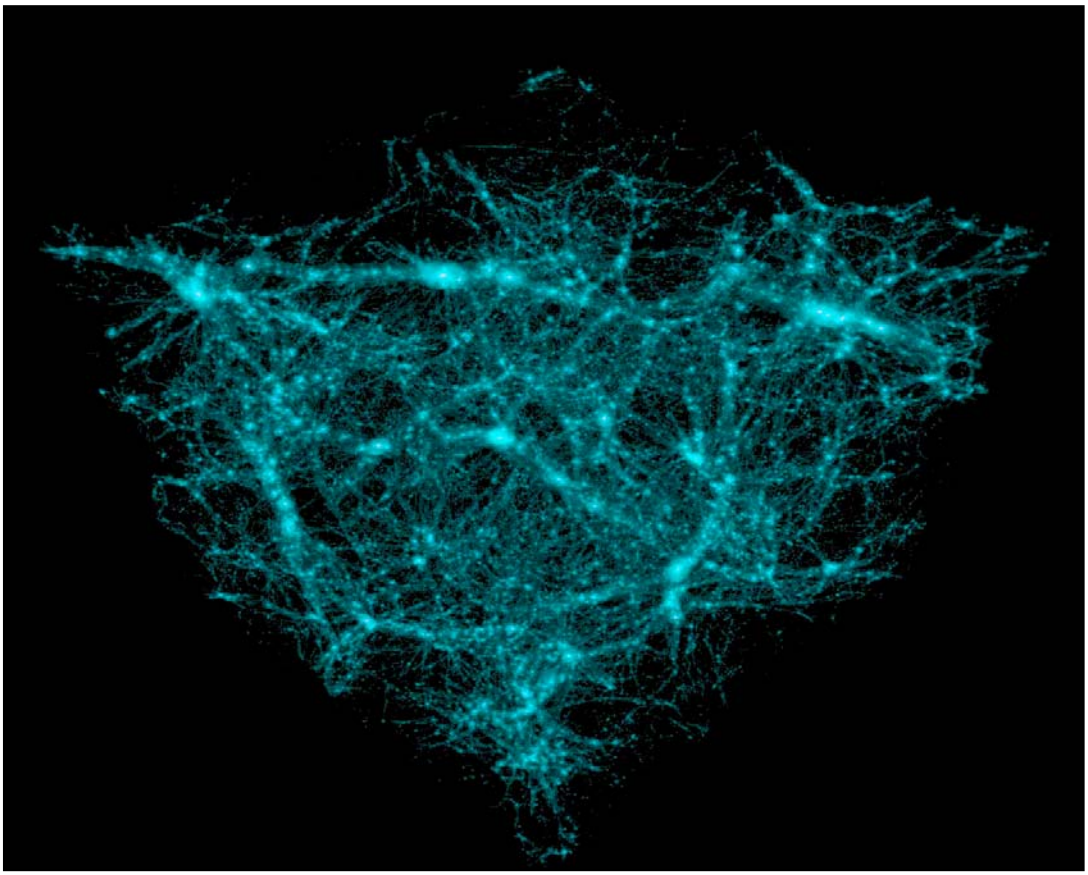
# 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie



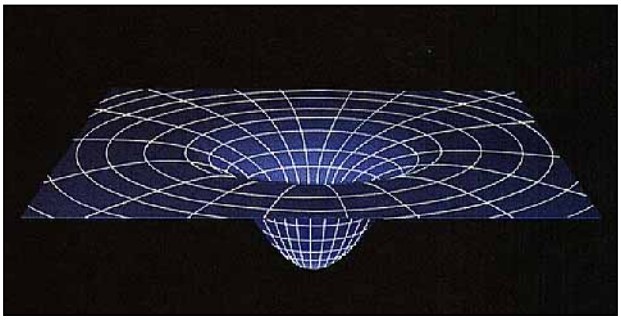
## citát

*V každém případě je zřejmé, že větší část hmoty ve vesmíru je neviditelná, takže astronomie je téměř docela teoretickou záležitostí.*

Raymond A. Lyttleton, *The Times*, 24. 2. 1973



# 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie



*Je-li jednou princip jasný, zdají se následovníkům bludné cesty pošetilostí, nesprávné názory zaslepeností, problémy prostou záležitostí.*

C. W. Ceram (Kurt Wilhelm Marek), publicista o archeologii (1915 – 1972)

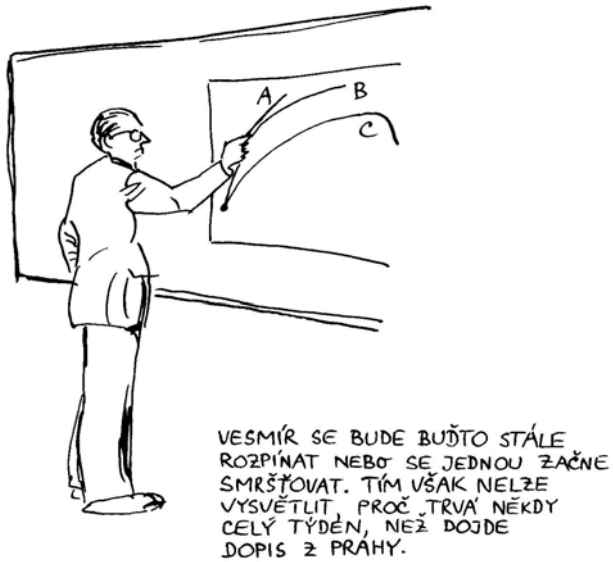
## otázky a příklady

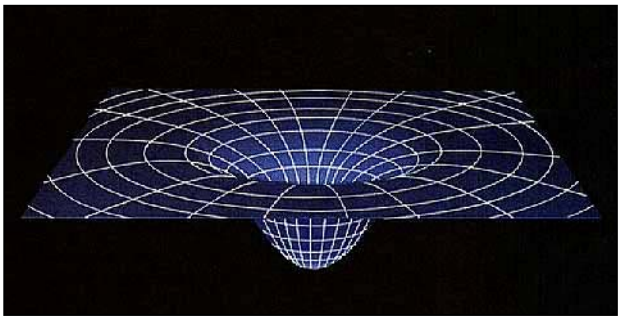
**Otázka 9.3.1.** Náš vesmír je zřejmě izotropní. Co to znamená? a) Vždy byl a bude stejný. b) Je stejný ve všech místech vesmíru. c) Je stejný ve všech směrech, kterými hledíme do vesmíru.

**Otázka 9.3.2.** Která z následujících kombinací veličin *není* ve Fridmanových modelech vesmíru možná? a) Kladná křivost, neomezeně se rozpínající vesmír. b) Nulová křivost, kritická hustota látky. c) Stále se rozpínající vesmír, hustota látky nižší než kritická.

**Otázka 9.3.3.** Tato otázka se týká Fridmanových modelů vesmíru. Které z následujících tvrzení je správné? a) Hustota vesmíru s nulovou křivostí je rovna právě kritické hustotě. b) Rychlost rozpínání vesmíru nijak nezávisí na kritické hustotě látky ve vesmíru. c) Pro hustoty látky ve vesmíru vyšší než je kritická platí, že vesmír je otevřený a stále se rozpíná.

**Otázka 9.3.4.** Jak lze zjistit, zda se bude náš vesmír rozpínat stále?



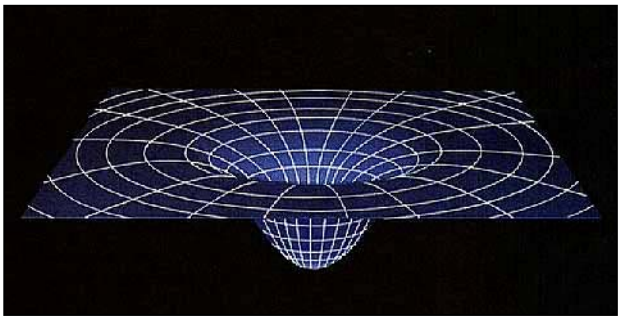


úloha k zamyšlení

## Jak je to s hustotou látky ve vesmíru?

V okolí našeho Slunce připadá jedna hvězda na 8 $pc^3$. Víme, že hmotnost průměrné („typické“) hvězdy je šestina hmotnosti Slunce. Jaká je střední hustota látky v okolí Slunce, která připadá na vrub hvězd? Je vyšší nebo nižší ve srovnání se střední hustotou mezihvězdné látky, která se odhaduje na $10^6$ atomů/$m^3$? Srovnejte ji také s tzv. kritickou hustotou látky ve vesmíru.

Tak to dopadne, když se věhlasní kosmologové snaží názorně popsat velký třesk.

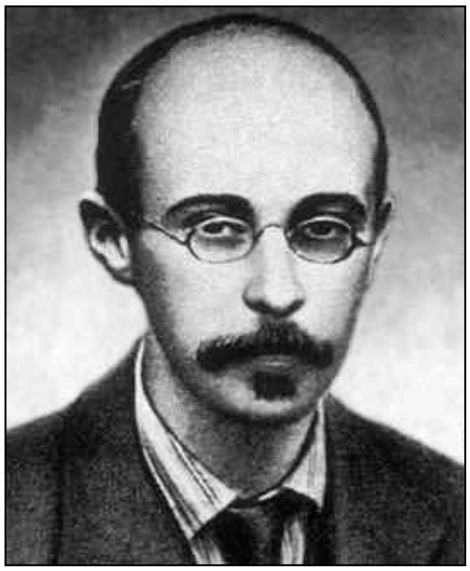


medailon

# Alexander Alexandrovič Fridman

### (17.(29.) 6. 1888 – 16. 9. 1925)

Byl to muž mnoha zájmů. S astronomií se seznámil již jako dítě prostřednictvím knížky francouzského popularizátora astronomie Camilla Flammariona *Populární astronomie*, ale na Petrohradské univerzitě studoval v letech 1906–1910 především matematiku a současně již také publikoval své první vědecké práce. Nakonec se ale soustředil na teoretickou meteorologii, když předtím prohlásil, že „špatný matematik se stane fyzikem a špatný fyzik meteorologem". Z Fridmanových úst to byla ovšemže zřetelná sebeironie, neboť jeho všestranný talent se od mládí prosazoval neobyčejně výrazně.



Po ukončení studií se zabýval dynamickou meteorologií v Pavlovsku na předměstí Petrohradu a své vzdělání si prohloubil v Lipsku. Jeho práce významně přispěly ke zlepšení metod předpovídání počasí. Bylo ale těsně před vypuknutím první světové války. Když v létě 1914 válka začala, přihlásil se jako dobrovolník do carské armády a účastnil se mimo jiné leteckého bombardování německých pozic v haličské pevnosti Przemysl. Vypracoval teorii přesného bombardování a prakticky ji využíval tak znamenitě, že němečtí vojáci v zákopech ihned poznali, že „ten den určitě bombarduje Fridman".

Po skončení války se stal v roce 1920 profesorem matematiky a mechaniky, seznámil se s Einsteinovou teorií relativity a začal přednášet její matematické základy. V letech 1922 a 1924 publikoval v německém fyzikálním časopise *Zeitschrift für Physik* dvě epochální práce: *O křivosti prostoru* a *O možnosti existence vesmíru s konstantní zápornou křivostí prostoru*. Stal se tak prvním člověkem, který dokázal, že z Einsteinovy gravitační teorie vyplývá, že se vesmír musí rozpínat (popřípadě smršťovat) v závislosti na plynoucím čase.

Je kuriózní, že tento odvážný závěr sám Einstein nejprve neuznal (v dopisu redakci časopisu sděluje: „Výsledky týkající se nestacionárního vesmíru, uvedené ve Fridmanově práci, mi připadají podezřelé. Ve skutečnosti se ukazuje, že uvedená řešení nevyhovují rovnicím pole.") Naštěstí Fridmanův kolega a přítel Jurij Alexandrovič Krutkov dokázal Einsteina přesvědčit o jeho omylu a Einstein se vzápětí veřejně písemně omluvil. Tím pochopitelně velice přispěl k Fridmanově proslulosti ve vědeckém světě i k přijetí modelů rozpínajícího se vesmíru, které se později staly základem dnes všeobecně uznávané teorie velkého třesku.

Mezitím se však Fridman věnoval řadě dalších problémů zvláště v aplikované matematice. V červenci 1925 pro změnu ustavil v balonu společně s Fedosejenkem platný světový rekord, když společně dosáhli výšky 7400 metrů. Nikdo netušil, že to je závěr jeho brilantní vědecké dráhy. Koncem srpna se Fridman náhle necítil dobře. Diagnóza: břišní tyfus; po čtrnáctidenním pobytu v nemocnici 16. září 1925 umírá. Bylo mu teprve 37 let.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (z připravované knihy *Zlaté století astronomie*, Aventinum, Praha).

*Poznámka ke psaní jména Fridman:* v literatuře často najdeme německý způsob psaní tohoto jména, tedy *Friedmann*, příp. *Fridmann*. My zde používáme způsob, vzniklý přímým přepisem z ruštiny (Фридман), neboť to považujeme (vzhledem k národnosti nositele jména) za nejsprávnější.

# 9.4. Nejdůležitější konstanta

Takovou konstantou v kosmologii je bezesporu Hubblova konstanta. Jak známo, tato konstanta je koeficient úměrnosti mezi rychlostí vzdalování a vzdáleností galaxie. Udává tedy, oč se zvětší rychlost vzdalování (vyjádřená v kilometrech za sekundu), přejdeme-li k objektům vzdálenějším o jednotku vzdálenosti (astronomové v tomto případě používají jeden megaparsek). Proto má jednotka Hubblovy konstanty poněkud podivný tvar: km/(s·Mpc). Fyzikální rozměr je však jednoduchý: čas na minus první.

„Konstanta“ ovšem nemá stálou hodnotu, s časem se mění, protože rychlost rozpínání se s časem mění.

### Stáří vesmíru

Velikost Hubblovy konstanty se stářím vesmíru bezprostředně souvisí. Vysvětlíme si to na jednoduchém příkladu. Když se vesmír rozpíná, je rychlost rozpínání ovlivňována jedinou silou: gravitační. Prázdný vesmír se rozpíná konstantní rychlostí. Převrácená hodnota Hubblovy konstanty je tak rovna času, který uplynul od počátku rozpínání.

I když příklad prázdného vesmíru vypadá příliš akademicky, naznačuje nám, že převrácená hodnota Hubblovy konstanty je přinejmenším dobrým *odhadem* stáří vesmíru. V reálném vesmíru musí být stáří poněkud menší, protože tempo expanze se působením gravitační síly zvolňuje. Pro standardní kosmologický model vychází doba existence vesmíru na 2/3 převrácené hodnoty Hubblovy konstanty [1]).

Edwin Hubble (s neodmyslitelnou dýmkou, tehdy ještě kouření bylo „*in*“) při proměřování fotografických desek s galaxiemi.

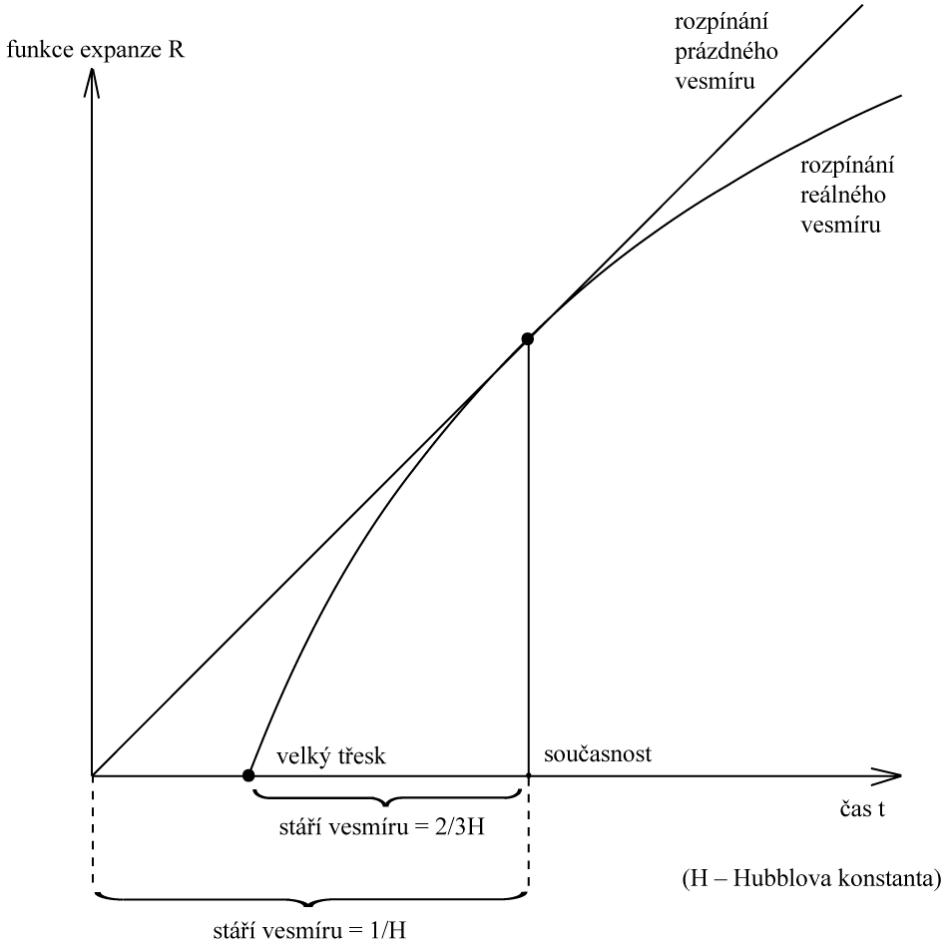
### Strašidlo příliš mladého vesmíru

Známe-li velikost Hubblovy konstanty, můžeme odhadnout stáří vesmíru a porovnat je se stářím některých kosmických objektů. Stáří vesmíru zajisté nemůže být menší než stáří objektů v něm obsažených.

Stanovení velikosti Hubblovy konstanty není ani zdaleka jednoduchou záležitostí. V současné době existují dvě podstatně odlišné skupiny výsledků: podle první z nich činí Hubblova konstanta přibližně

[1]) Teď je ta správná chvíle na řešení úlohy k zamyšlení, která je uvedena dál v této kapitole a jmenuje se – *Stáří vesmíru*.

50 km/(s·Mpc), což by znamenalo, že skutečné stáří vesmíru může dosáhnout (u standardního modelu) asi 13 miliard let. Když uvážíme, že nejstarší hvězdné objekty (kulové hvězdokupy, někteří bílí trpaslíci) existují přinejmenším 12 let, pak (s mírným přimhouřením oka) můžeme konstatovat, že zde zásadní rozpor není. Nicméně druhá skupina výsledků udává Hubblovu konstantu blízkou 80 km/(s·Mpc). Stáří vesmíru, určené na základě této hodnoty, je ovšem nepřijatelně nízké: jen asi 8 miliard roků.



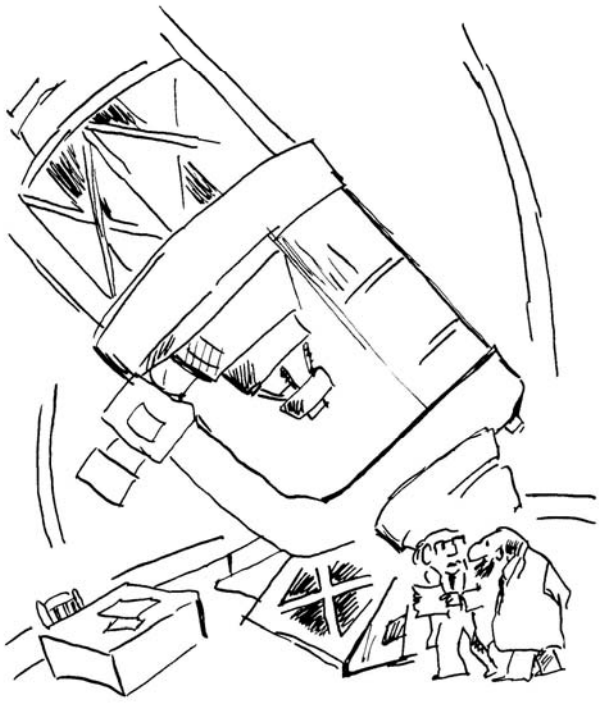

Stáří vesmíru.

Zjištění hodnoty Hubblovy konstanty s přesností vyšší než 10 procent patřilo mezi klíčové projekty kosmického dalekohledu v oblasti extragalaktického průzkumu (mezitím však bylo dosti přesné stáří vesmíru zjištěno jinak). V současnosti můžeme za nejpravděpodobnější považovat hodnotu H = 70 km/(s·Mpc) s nejistotou asi 5 procent.

úloha k zamyšlení

## Stáří vesmíru

Předpokládejme, že rozpínání vesmíru probíhá bez brzdění, tedy že rychlost jeho rozpínání byla v minulosti stejná jako je nyní. Pak ovšem snadno zjistíme, kdy vesmír měl nulový rozměr. Jinými slovy: ze současné hodnoty Hubblovy konstanty $H$ určete stáří vesmíru a porovnejte s odhady stáří, zjištěnými jinak.




(Podle *Mercury* May-June 1981, 88.)

# 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

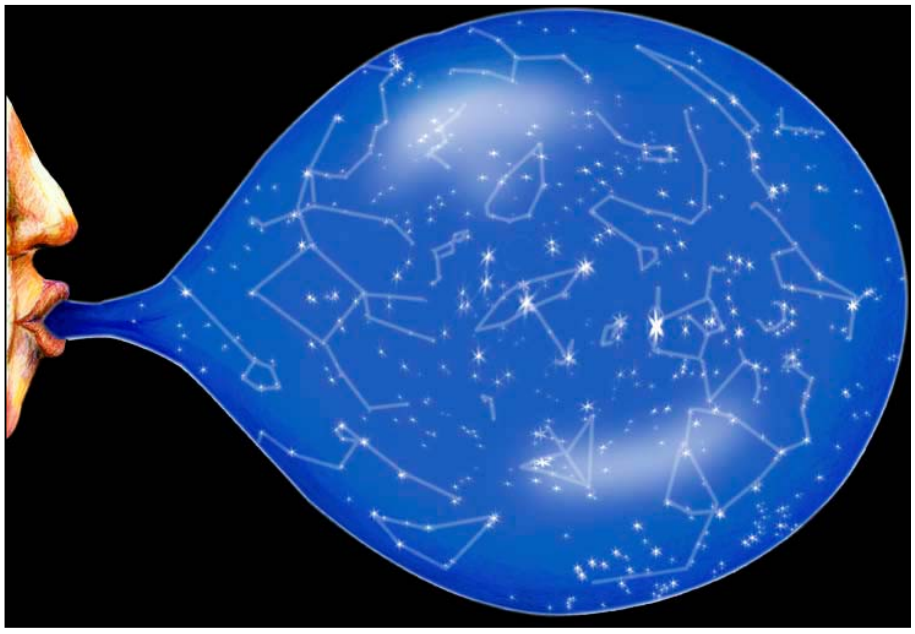
*Neklid, to je pocit neuspokojení, a právě ona nespokojenost se sebou samým je tou první podmínkou pokroku. Ukažte mi člověka naprosto spokojeného a já vám dokážu, že tento člověk nemá šanci být úspěšný.*

Thomas Alva Edison, technik a vynálezce (1847 – 1931)

## otázky a příklady

**Otázka 9.4.1.** Je Hubblova „konstanta“ opravdu konstantou? (Odhlédněte od toho, že se její hodnota „mění“ proto, že ji určíme pokaždé trochu jinak, tedy že ji měříme, podobně jako všechny fyzikální veličiny, s určitou chybou.) Bude se měnit, i kdyby rychlost rozpínání vesmíru byla konstantní?

**Otázka 9.4.2.** Autor obrázku chtěl nějakým způsobem znázornit rozpínání vesmíru. Použil obvyklý dvourozměrný příklad (jak známo, rozpínání třírozměrného prostoru lze vhodně znázornit jen přechodem do prostoru dvourozměrného nebo jednorozměrného) – nafukujeme gumový balónek. Přitom se ale dopustil značné nepřesnosti, kterou pohledem na obrázek jistě odhalíte. O jakou chybu jde?



**Otázka 9.4.3.** Představme si rozpínání vesmíru na příkladu nafukování gumového balónku. Když řekneme, že povrch balónku nemá žádný střed, co myslíme tímto tvrzením?

**Otázka 9.4.4.** Za jakých podmínek je stáří vesmíru, odvozené z aktuální hodnoty Hubblovy konstanty, rovno skutečnému času, který uplynul od velkého třesku?

medailon

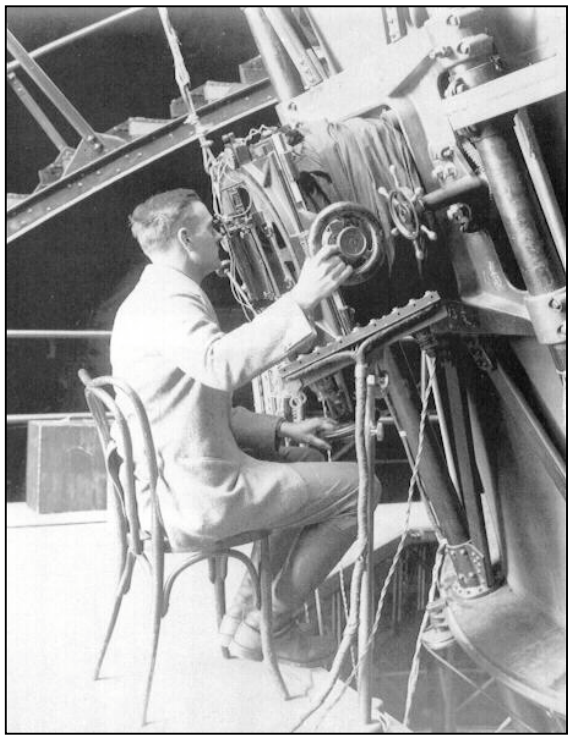
# Edwin Powell Hubble

### (20. 11. 1889 – 28. 9. 1953)

Nechybělo mnoho a širší veřejnost by Američana Edwina Hubbla, pokud by o něm vůbec věděla, znala jako právníka. V roce 1913 totiž získal právnický titul na Oxfordské univerzitě. Hubblovi bylo 24 let a zahajoval svou praxi v Louisville ve státě Kentucky. Jenže po roce změnil kariéru právníka za astronomickou, protože (jak sám říkal) „i kdyby se stal druhořadým astronomem, byla to astronomie, na které mu záleželo“. Pro astronomické studium si zvolil univerzitu v Chicagu. V srpnu 1914 se zúčastnil schůze Americké astronomické společnosti, na níž Slipher referoval o svých spektroskopických výzkumech mlhovin. Zřejmě inspirován jeho výsledky se pustil do přípravy doktorské práce *Fotografické výzkumy slabých mlhovin*.

Edwin Hubble měl slíbené místo na observatoři Mount Wilson a doktorskou práci již téměř hotovu, když 6. dubna 1917 vstoupily Spojené státy americké do války. Urychleně práci dokončil, obhájil a již tři dny po získání doktorátu – to bylo 15. května – se hlásil jako budoucí důstojník ve vojenském výcvikovém táboře. V září 1918 se jako velitel praporu v hodnosti majora přesouval se svou jednotkou do Evropy. Do bojů ale již nezasáhl, mezitím bylo dojednáno příměří.

Po demobilizaci se v srpnu 1919 ihned vrátil na observatoř na Mount Wilsonu a se vší energií se pustil do studia galaxií. K dispozici měl největší dalekohled světa. 6. října 1923 se mu podařilo získat opravdu unikátní snímek. Byla na něm sice jen „obyčejná“ galaxie v Andromedě, ovšem Hubble na fotografii identifikoval tři proměnné hvězdy. Jedna z nich patřila mezi tzv. cefeidy.



Edwin Hubble u teleskopu na Mount Wilsonu v roce 1922. →

U cefeid se jasnost mění v pravidelném rytmu, a jak už počátkem století zjistila astronomka Henrietta Leavittová z Harvardovy observatoře – perioda světelných změn závisí na výkonu hvězdy, na množství záření, které cefeida vysílá do okolního prostoru. Hubblovi bylo ihned jasné, že právě s jejich pomocí může zjistit vzdálenost celé galaxie. Využil toho: podařilo se mu získat 83 měření jasnosti hvězdy, která byla na samé hranici pozorovatelnosti obřím dalekohledem. Úžasný výkon v té době! Pak stejný postup zopakoval i pro další blízkou galaxii v souhvězdí Trojúhelníku.

U vzdálenějších galaxií Hubble vzdálenosti odhadl za předpokladu, že výkony nejjasnějších hvězd jsou přibližně stejné. Tak se mu podařilo stanovit více či méně přesně vzdálenosti 24 galaxií. Spektra a v nich změřené posuvy čar měl k dispozici od 46 objektů, mnohé z toho však byla dřívější pozorování Slipherova.

Ve čtvrtek 17. ledna 1929 zaslal Edwin Hubble k uveřejnění do sborníku *Zprávy Národní akademie věd* krátký článek. V březnu 1929 práce vyšla; dnes je považovaná za jednu ze stěžejních astronomických publikací 20. století. Její název zní: *Vztah mezi vzdáleností a radiální rychlostí extragalaktických mlhovin*. Hubble na základě měření 24 galaxií nalezl lineární vztah mezi jejich vzdálenostmi a rychlostmi vzdalování. Tento vztah byl prvním experimentálním potvrzením představ o rozpínání vesmíru.

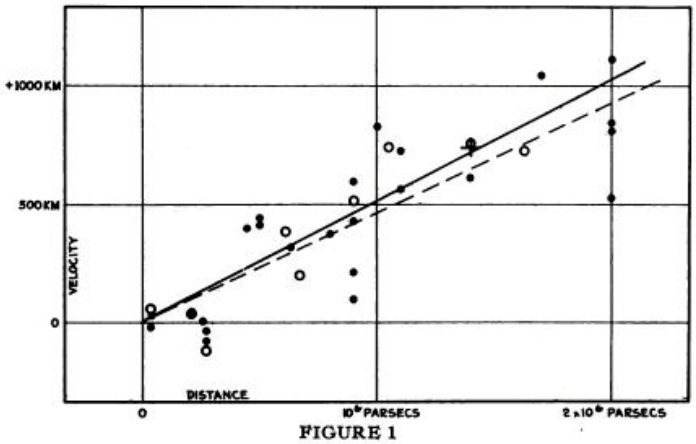



FIGURE 1

**Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.**

**Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.**

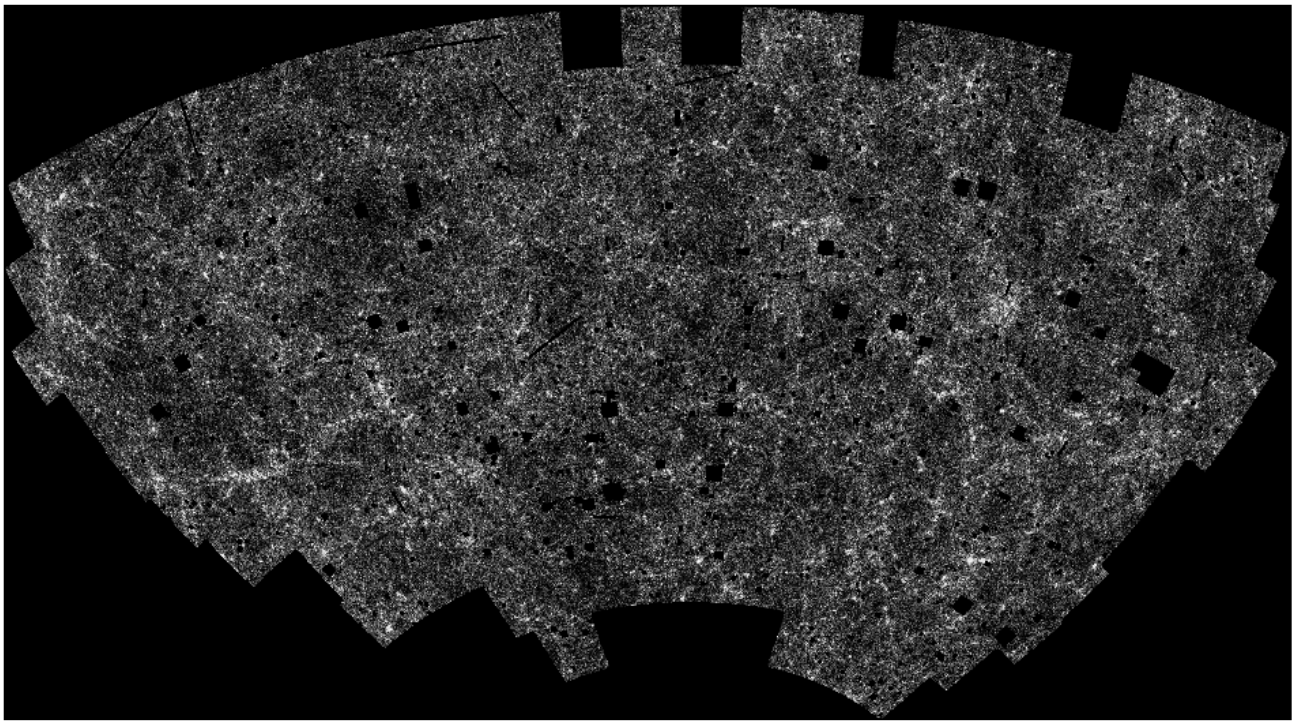
Původní diagram z Hubblovy práce, uveřejněné v roce 1929.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (z připravované knihy *Zlaté století astronomie*, Aventinum, Praha).

# 9.5. Velký třesk a co bylo poté

Pro děje v čase od nuly do $10^{-44}$ sekundy nemá současná fyzika vyhovující teorie. Je však jasné, že v té době, kdy hustota, teplota a tlak nabývaly obrovských hodnot, bylo chování látky dost odlišné od běžného chování.

Platily tu fyzikální zákony v jejich extrémních podobách, neboť dnes již samostatné interakce (gravitační, silná jaderná, elektromagnetická a slabá jaderná) tenkrát byly ještě spojeny. Tato dokonale souměrná univerzální interakce se postupně a velmi rychle narušila. Přitom vznikaly celé skupiny subnukleárních částic (nukleony, leptony, miony, hyperony, mezony a mnohé další). K hlavním narušením symetrie došlo záhy po velkém třesku, v časech $10^{-43}$, $10^{-35}$ a $10^{-10}$ sekundy. Jak klesala s rozpínáním vesmíru teplota a hustota látky, začaly se fyzikální zákony formovat do podoby, v níž je známe nyní.



Protože velký třesk ani procesy, které proběhly krátce poté, nelze nějak názorně vyobrazit, zařazujeme tento pohled na strukturu vesmíru velkých měřítek: složený snímek vznikl v rámci projektu APM – *Automated Plate Measuring*. Bylo proměřeno 185 fotografických desek z observatoře Siding Spring v Austrálii, které dohromady zachycují 1,3 steradiánu oblohy (to je asi 10 % celé hvězdné oblohy). Na obrázku je údajně 10 milionů hvězd a 2 miliony galaxií.

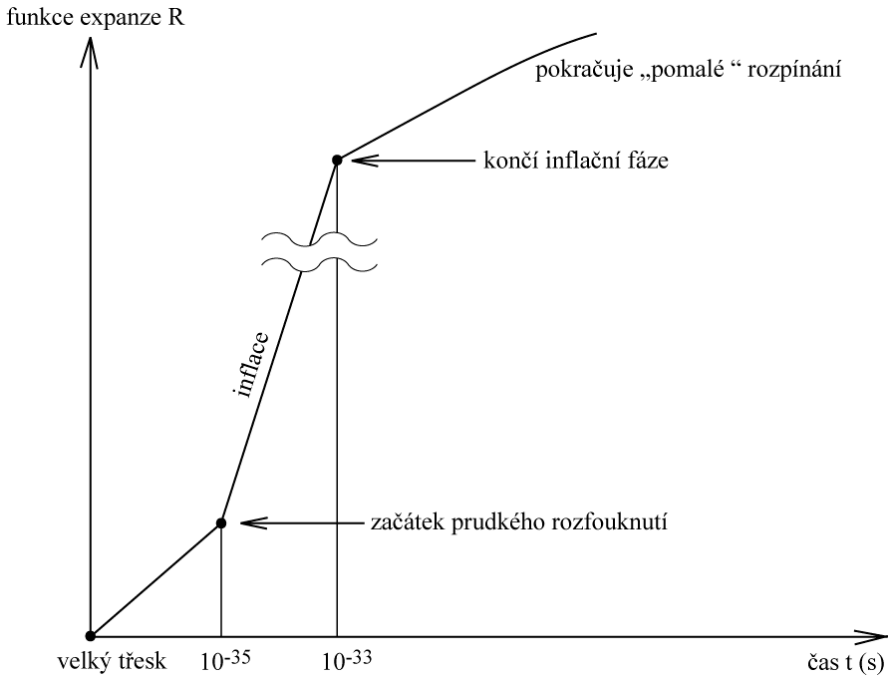
**Antilátka** [1]**) mizí ze scény**

V raném vesmíru existovala naprostá rovnováha mezi počtem *částic* a *antičástic*. V této směsi se však v době asi $10^{-35}$ sekund po velkém třesku počala projevovat mírná nesouměrnost ve prospěch částic: při vzniku a rozpadu tzv. těžkých X-bosonů nebyl rozpad zcela symetrický, na miliardu antičástic připadla miliarda +1 částice.

Při dalším rozpínání a ochlazování vesmíru látka s antilátkou postupně anihilovala a změnila se v reliktní záření, které dnes prostupuje celým vesmírem. Z částic, na které však žádná antičástice při anihilaci nezbyla, se utvořil dnešní výhradně látkový vesmír. Náš vesmír tudíž *téměř postrádá antilátku*. Ony nepatrné stopy, které nyní nalézáme, vznikaly později a jinak.

**Inflace vesmíru**

Vesmír se od velkého třesku neustále rozpíná. Když byl starý asi $10^{-35}$ sekundy, jeho rozpínání se fantasticky zrychlilo. Vesmír prošel fází překotného nafouknutí (*inflace* [2]), během níž se jeho rozměry zvětšily o mnoho (nejméně 30) řádů!



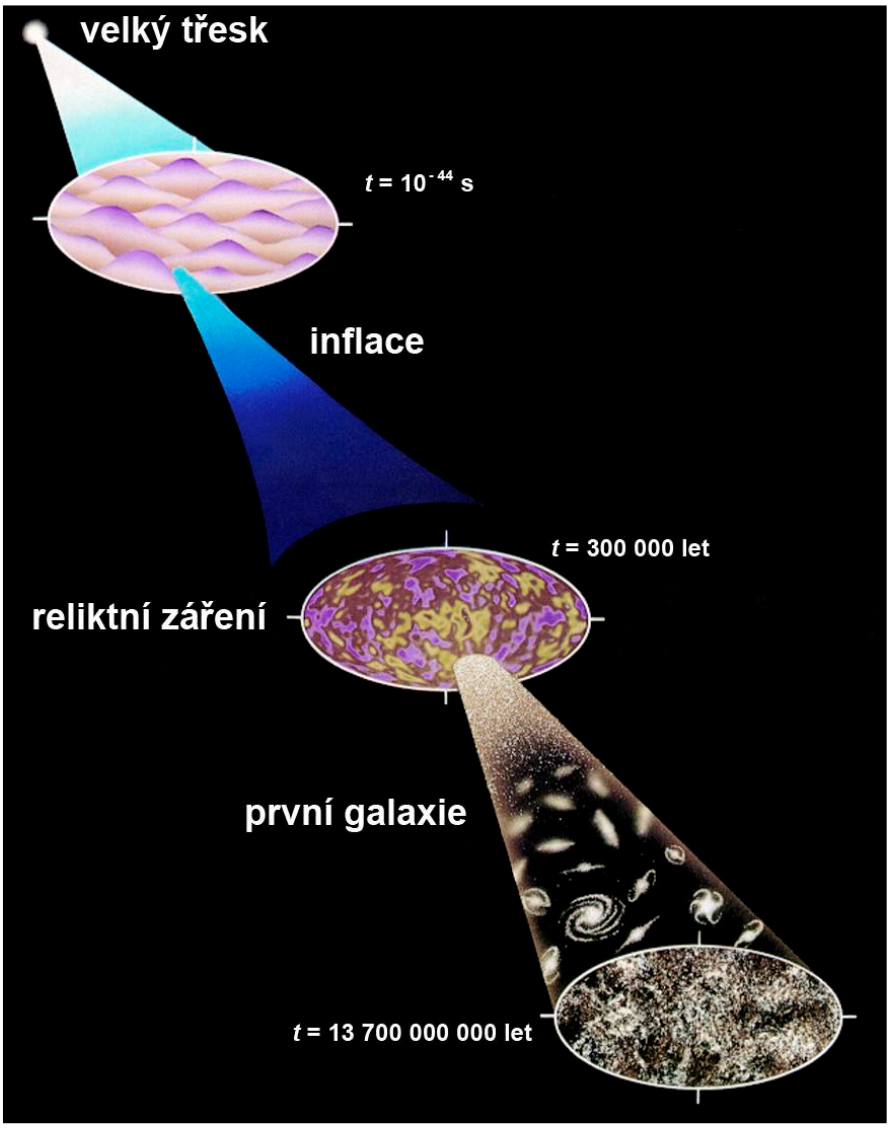

Co bylo příčinou tohoto rozfouknutí? Byly to obrovské odpudivé gravitační síly vyvolané působením gigantického záporného tlaku. Souběžně s nafukováním vznikala ve vesmíru i nová hmota. Po skončení inflační fáze, která trvala nesmírně krátce do času $10^{-33}$ sekundy, překotné rozpínání vesmíru přešlo znovu v rozpínání pomalé.

[1]) Nebo též *antihmota*; zde fyzikální terminologie není jednotná, ale k omylu určitě nemůže dojít.
[2]) *Inflace* je enormní nárůst, záplava či zmožení (peněz, titulů, slov...) – z latinského *inflatus*: dutí, nafukování.

### Prvotní vodík a helium

Do několika minut po velkém třesku poklesla teplota vesmíru natolik, že se začaly slučovat protony s neutrony. Tvořila se tak jádra vodíku a jeho izotopů, později i jádra helia a lithia. Tím ovšem jaderný vývoj *v raném vesmíru* prakticky končil, protože vesmír chladl a řídl tak rychle, že v něm jaderné reakce již neprobíhaly.

Na vznik dalších jader helia či dokonce těžších prvků jsme si museli počkat ještě mnoho milionů let, až se v nitrech hvězd první generace zažehly termonukleární reakce.




### Vodíkové atomy

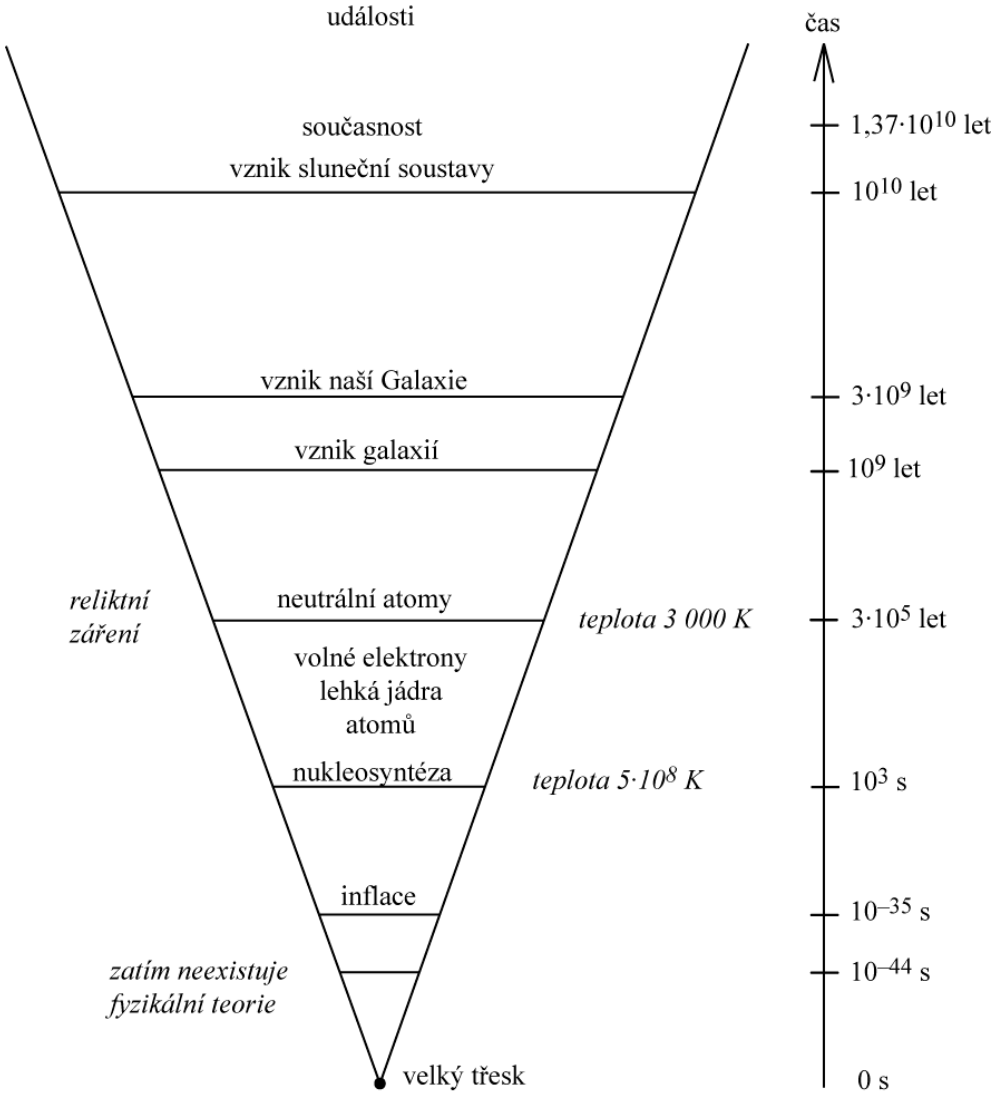
Významnou událostí v prvním milionu roků existence vesmíru byl vznik atomů vodíku. Víme, že tento nejjednodušší prvek ve vesmíru jednoznačně převládá. Když byly až do té doby volně se pohybující elektrony zachyceny atomovými jádry a vytvořily tak kompletní atomy vodíku, stal se vesmír pro záření průhledným – neutrální atomy pohlcují a rozptylují záření podstatně méně než

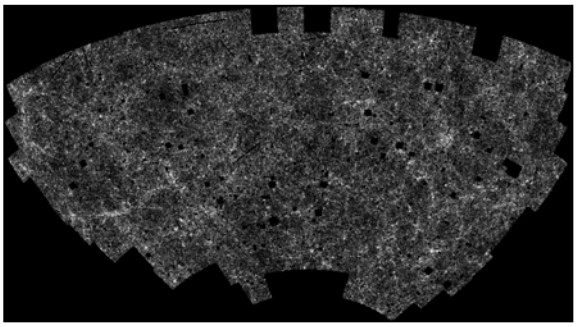
volné elektrony. Fotony, které původně s látkou neustále interagovaly, se od ní oddělily a vyvíjely se už nezávisle na látce. Jak již víme, je to počátek samostatné existence tzv. *reliktního záření*.

**Od reliktního záření ke galaxiím**

Reliktní záření k nám přichází ze všech směrů téměř zcela rovnoměrně. Nicméně nevelké odchylky intenzity tohoto záření od rozdělení zcela izotropního, jež zjistila družice COBE, svědčí o tom, že již v raném vesmíru existovaly jakési zárodečné chuchvalce látky. Z nich nakonec „vyrostla“ známá houbovitá struktura, obsahující vlákna a stěny galaxií, oddělené velkými prolukami.

Vytvořily se *protogalaxie* – zárodky dnešních galaxií, a v nich hvězdy první generace. Krátce po překotném počátečním vývoji našeho vesmíru tu již existují galaxie s prvními hvězdami a začíná relativně pomalý vývoj těchto kosmických objektů. To ale jsou procesy, jež nezkoumá kosmologie, nýbrž astrofyzika.





čítanka

# Zdeněk Pokorný: Co říká antropický princip?

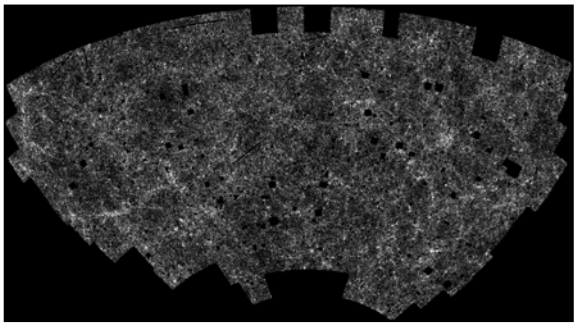
Z názvu určitě vytušíte, že půjde o člověka (*anthropos* = člověk), v tomto případě však v kosmických souvislostech. Princip, o němž bude řeč, vůbec není nový, i když svého označení dosáhl zásluhou britského fyzika Brandona Cartera až v roce 1973. Už dříve řadu fyziků a astronomů překvapovalo, že tu na Zemi jsme, protože by stačilo jen velmi málo, a my bychom neexistovali. Přesněji – nemusely by vzniknout těžší prvky, bez nichž je život nemyslitelný, ba dokonce by se vůbec nemusely vytvořit atomy. Stačilo by, aby základní fyzikální konstanty, jako například gravitační či Planckova konstanta, rychlost šíření světla nebo poměr hmotností protonu a neutronu, byly trošičku jiné. Nebo třeba Hubblova konstanta: kdyby byla podstatně větší nebo menší než právě je, nevznikl by ve vesmíru život buď proto, že by vývoji bylo dopřáno příliš málo času, nebo proto, že by se vesmír po velkém třesku příliš rychle rozepnul, takže by nevznikly ani galaxie, ani hvězdy či planety.

Život ve vesmíru však existuje (dokonce je tu i člověk, myslící bytost), a bez ohledu na to, zda jsme ve vesmíru jediným exemplářem či nikoli – z pouhé naší existence plynou mnohá omezení základních fyzikálních a astronomických veličin. Zajímavé, viďte? Vůbec nemusíme pracně měřit různé fyzikální veličiny a pozorovat, jaký vesmír skutečně je, jen ze samotné naší přítomnosti je můžeme docela dobře odhadnout!

Antropický princip můžeme formulovat nejen tak, že povaha vesmíru je slučitelná s naší existencí, ale i silněji: vesmír musí mít takové vlastnosti, které dovolí životu, aby se v jisté fázi dějin vesmíru vyvinul. To je opravdu kontroverzní tvrzení: vždyť vesmíru vlastně podsouváme určité úmysly. Vesmír je nucen si „vybrat" určité fyzikální konstanty, aby se v něm jednou mohl objevit alespoň jeden druh myslících pozorovatelů, tedy lidé.

Antropický princip, zejména v tzv. silné formulaci, provokuje a nutí astronomy, fyziky a filozofy ke společným diskusím. Doslova propojuje mnohé vědní obory, a to je jeho nepopiratelná zásluha.

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



Je obtížné něco vysvětlovat, i když tomu rozumíte,
a téměř nemožné, když ani to ne.

Paul Ehrenfest, fyzik (1880 – 1933)

speciální otázky

# Nebylo bezejmenných vědců

Pozorně si přečtěte následující věty. Popisují určitou skutečnost, vždy je tam uvedeno jméno některého význačného vědce a také letopočet, který událost datuje. V řadě případů tomu bylo opravdu tak, jak uvádíme. V některých ale jméno nebo letopočet nesouhlasí. Z okolností jistě snadno poznáte, která tvrzení jsou chybná a v čem. Uveďte správná jména nebo letopočty místo těch chybných!

1. Ve světě galaxií platí přibližně lineární vztah mezi vzdáleností dvou galaxií a rychlostí jejich vzájemného vzdalování; je to důsledek rozpínání vesmíru. Tento vztah objevil Edwin Hubble v roce 1929.

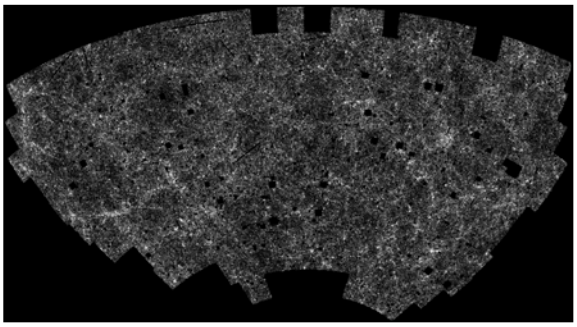
2. Anglický astronom William Herschel se už koncem 16. století zabýval otázkou tvaru naší Galaxie. Řešil tak jako jeden z prvních problém, kterému jeho velcí předchůdci, například Johannes Kepler a Galileo Galilei, mnoho pozornosti nevěnovali.

3. Na schůzi Královské české společnosti věd dne 25. května 1842, konané v Praze, formuloval poprvé Joseph Fraunhofer – řečeno dnešními slovy – zákon o změnách kmitočtu záření při změnách vzájemné polohy zdroje a pozorovatele. Tento zákon nachází dnes široké uplatnění i v astronomii, a pochopitelně nese autorovo jméno.

4. Když na přelomu let 1609 a 1610 pohlédl Galileo Galilei svými prvními dalekohledy k Jupiteru, spatřil tam postupně čtyři jeho největší družice. Plným právem je proto dnes označujeme jako družice galileovské.

5. V roce 1905 upozornil dánský astronom Ejnar Hertzsprung na to, že vedle slabounkých červených hvězd existují i velice jasné červené hvězdy. Přirovnal je k velrybám mezi rybami. Tento poznatek nakonec vedl až ke konstrukci velmi důležitého astrofyzikálního diagramu, který nese též Hertzsprungovo jméno.

# 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie



*K údivu stačí jediná minuta, jenže abychom se mohli obdivovat nějaké věci, k tomu je zapotřebí mnoha let.*

Claude Adrien Helvétius, filozof (1715 – 1771)

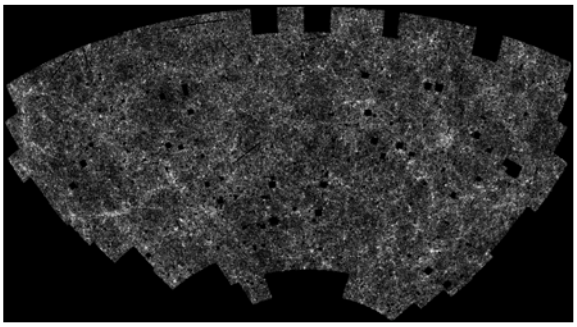
## otázky a příklady

**Otázka 9.5.1.** Většina i velmi starých kosmických objektů obsahuje nezanedbatelné množství helia. Tato skutečnost svědčí o tom, že: a) teorie velkého třesku je pravděpodobně správná; b) gravitaci nelze ničím odstínit; c) ve vesmíru existuje nezanedbatelné množství tzv. skryté látky; d) souvisí to s malým výskytem antihmoty ve vesmíru.

(Podle *Sky and Telescope*, March 1990, 257)

**Otázka 9.5.2.** Reliktní záření pochází od plynu, zahřátého na 3000 K. Proč pak ale pozorujeme reliktní záření v rádiovém oboru spektra a nikoli v optickém?

**Otázka 9.5.3.** Jaký by byl osud našeho vesmíru, kdyby se prokazatelně zjistilo, že hustota látky v něm je vyšší než tzv. kritická hustota?



čítanka

# Ilja Hurník: Kosmologie

*Z přednášky Sira Hayworda v londýnském Rotary-klubu: „Ač vědec, pokusím se podat výklad přiměřený vaší úrovni. Náš vesmír je antropický, dámy a pánové, to jest, vyvinul se nejen tak, že se zrodil život, nýbrž* ***aby*** *se zrodil. Už při velkém třesku bylo rozhodnuto, aby vyvrcholením vesmírného tvůrčího aktu bylo co? Člověk, tedy já, zde pan předseda, vy, kdokoli...“*

Květu opadaly plátky a z jeho blizny se vyvinula hruška. Zprvu jen biologický mechanismus dospěl ke stavu, kdy onen plod se stal schopným sebereflexe a vědeckého nazírání.

„Můj svět – zvěme jej strom – je reálný a poznatelný,“ uvažovala hruška. „Poznávám například, že se rozpíná. Větve se od sebe nepatrně, leč přece jen vzdalují. Jděme zpět v čase a logicky dojdeme ke stavu, kdy tento strom byl nekonečně malý. A tu dostal impuls, Velký rozpuk. Nastal vývoj, na jehož vrcholu visím já, smysl a cíl tohoto vývoje. Očividně zde byl plán: mohla jsem nabýt i jiného tvaru, mohla jsem být zelenější nebo žlutší, jsem však taková, jaká jsem, zřejmě nutně. Jsem vrcholem jsoucna, a to jediným. Vrchol je vždy jediný. Dokud není důkazů, že existují další hrušky, a takových důkazů není, pak jsem ve světě sama, a to v jediném světě.

Pravda, přiletěl sem pták a nemít odpor k fantazírování, řeknu, že přiletěl z jiného světa. Jistě, občas zmizí za horizontem větví a listí, ale to se jen vnořil do čtvrtého rozměru, který je sice nepředstavitelný, leč reálný.“

Takto uvažovala hruška, tkvíc v jistotě poznání. Tu však pocítila jakýsi nepokoj. Dosud hleděla ze sebe, teď se však cosi pohnulo v jejím nitru. Jako by se tu otevíral nový svět, jen tušený, leč stále zřetelněji skutečný, plný dosud nepojmenovaných jevů; a byla to úzkost, naděje, ale i prázdnota, dojetí i strach.

(Podle *Sterne und Weltraum*, 4/1982, 177)

Zatím trocha listí kolem ní opadala, ve tmě koruny bylo tušit jiné hrušky, otevřel se pohled na horizont, ale ona ho nedbala, zahleděná do sebe, vědouc, že jen tam dojde pravého poznání. A housenka v její dřeni žrala a žrala, prohlubujíc nitro v propast, nad níž hrušku jímala závrať.

Zbývala z ní už jen slupka, když jednoho dne se odpoutala od stopky. Pohřížená do sebe vnímala jen let, opojnou lehkost, svobodu bez hranic.

„Stoupám k poznání nejvyššímu," zvolala a rozplácla se do trávy.

Uveřejněno v *Kosmických rozhledech* 2/1989, str. 65-66, jako součást záznamu panelové diskuse *Astronomie a filozofie*.

(Podle *Sterne und Weltraum*, 7-8/1982, 329)

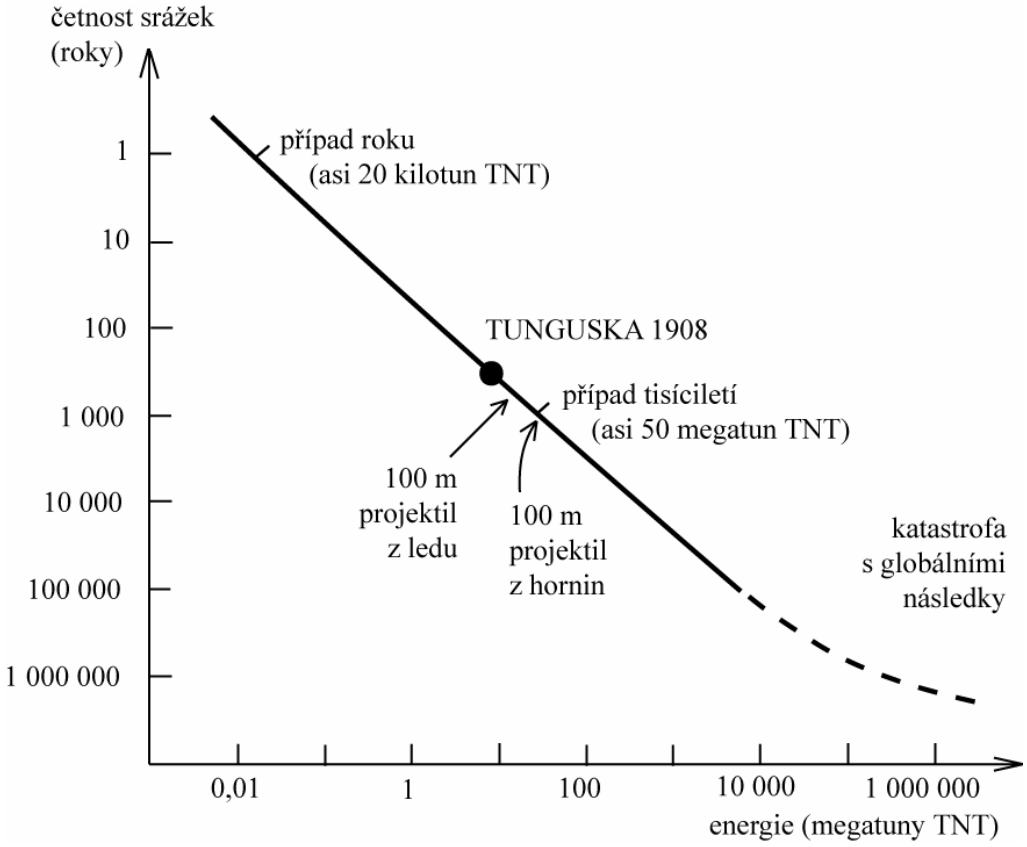
# 10.1. Hrozí nám nebezpečí z kosmu?

Na povrchu naší planety se intuitivně cítíme bezpečni před vším, co nás může ohrozit z kosmického prostoru. Je to samozřejmě pocit falešný, vznikající souhrou řady okolností. S rostoucími poznatky o sluneční soustavě i vesmíru vzdálenějším si stále naléhavěji uvědomujeme, že biosféra Země je snadno zranitelná. Na destrukci našeho životního prostředí se mohou podílet nejen procesy bezprostředně související se Zemí, ba přímo s lidskou civilizací, ale také jevy kosmické.

Nejznámějším rizikem je střet Země s cizím tělesem (planetkou, jádrem komety). Tělesa o velikostech do 20 cm, která vniknou do zemské atmosféry rychlostí řádově desítky kilometrů za sekundu, se většinou během průletu ovzduším zcela vypaří [1]). Větší tělesa až do rozměru několika metrů se při průletu zbrzdí, částečně vypaří a na Zemi dopadá jejich zbytek – meteorit. Tělesa původně větší než několik metrů již nejsou nijak výrazně ubrzděna před svým setkáním s povrchem Země, pro ně atmosféra nepředstavuje žádnou výraznější překážku.

[1]) Záleží pochopitelně také na struktuře látky tělesa.

Země se může srazit s tělesy, jejichž oběžné trajektorie se protínají se zemskou (obecně se taková tělesa označují jako *blízkozemní*). Pravděpodobnost střetu sice velká není, nicméně zcela zanedbatelná také ne. Určit pravděpodobnost srážky s velkými tělesy, která již mohou způsobit lokální či dokonce globální katastrofu, je značně obtížné, neboť data o podobných událostech, k nimž došlo v minulosti, se získávají jen obtížně. Nicméně pro kvalifikovaný odhad můžeme použít následující obrázek.



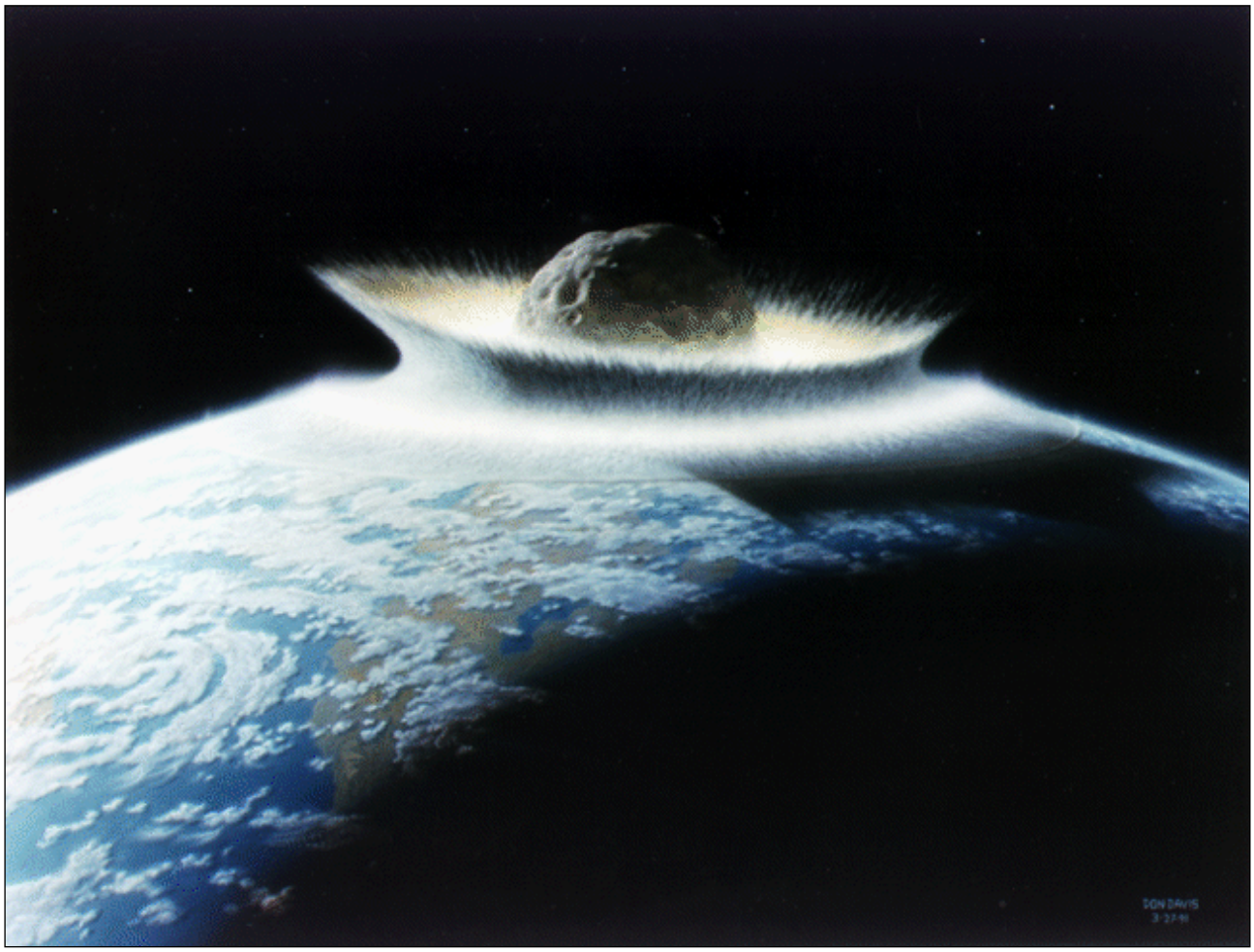

Pravděpodobnost srážky tělesa kosmického původu se Zemí. Poznámka: energie uvolněná při výbuchu je vyjádřena jako hmotnost vysoce výbušné látky – trinitrotoluenu TNT (tento způsob je obvyklý ve vojenství). Platí: 1 tuna TNT = $= 4{,}18 \cdot 10^9$ J. Energie uvolněná při výbuchu hirošimské atomové bomby se odhaduje na 15 kilotun TNT.

K poslednímu velkému střetu s planetkou asi 10 km velkou došlo před 65 miliony roků. Srážkou (impaktem) vyhloubilo toto těleso v zemském povrchu kráter asi 200 kilometrů velký (ten se nachází u malé vesničky Puerto Chicxulub [2]) v severní části mexického poloostrova Yucatán, nyní je již překryt dalšími horninami). Do ovzduší, až vysoko do stratosféry se zvedlo obrovské množství prachu, které rychle zahalilo celou planetu do temnot. Tento stav trval několik let. Dopad planetky vyvolal také četná zemětřesení a závratně vysoké přílivové vlny, a to vše spolu s požáry vykonalo dílo zkázy. Vymřelo mnoho živočichů, mezi nimi i pověstní druhohorní ještěři, ale také významná

[2]) Čti: *čiksulub*.

skupina hlavonožců – amoniti, skupina mořských dírkovců, které označujeme jako globigeriny, a dlouhá řada dalších.

Fakt, že k tomuto a několika dalším případům hromadného vymírání rostlin a živočichů v geologické minulosti Země došlo, nikdo nezpochybňuje – je o tom dostatek paleontologických důkazů. Různí se jen názory na příčinu tohoto jevu. Nelze jistě tvrdit, že *všechna* taková vymírání mají jedinou příčinu – impakt; na druhé straně právě to poslední takovou příčinu mělo, a možná i některá další.



Představa střetu planetky větších rozměrů se Zemí naštěstí může zůstat – vzhledem k pranepatrné pravděpodobnosti – jen v oblasti hypotetických hrozeb pro naši civilizaci. Tak velká tělesa se vyskytovala ve větším množství na kolizních drahách se Zemí jen krátce po vzniku sluneční soustavy, v době tzv. intenzivního bombardování.

Na lidskou civilizaci má nepochybně vliv i naše Slunce. Nyní nemáme na mysli jeho gravitační působení či ustálený zářivý tok (tento vliv na vše živé na Zemi je nezpochybnitelný, protože je podmínkou existence života na planetě), ale naopak krátkodobé proměny tohoto toku, označované jako *sluneční aktivita*. Na Slunci vznikají a po jistou dobu (dny až měsíce) tu existují *aktivní oblasti*, což jsou místa se zesíleným magnetickým polem. Ta vznikají, rozvíjejí se a opět zanikají v důsledku radiální konvekce (promíchávání) v podpovrchových vrstvách a za přispění rotace Slunce. Vzhledem

k tomu, že rotace Slunce je ve srovnání s rotací jiných hvězd velmi pomalá (činí asi 25 dní, ostatní hvězdy v průměru asi 4 dny), je také sluneční aktivita mimořádně nízká, porovnáme-li ji s jinými hvězdami. Zdá se, že jen díky nízké úrovni dosavadní aktivity Slunce se mohl na Zemi rozvinout složitější život.

Nicméně existují období, kdy zvýšená úroveň sluneční aktivity, projevující se např. narušením zemské magnetosféry [3]), může vyvolat stavy, ztěžující náš život (přepětí indukovaná v elektrických rozvodných sítích, ohrožení posádek vysoko létajících letounů, poruchy či zničení elektroniky na družicích apod.). Zdá se, že je to daň, kterou naše technologicky pokročilá civilizace musí platit za svůj rozvoj.

Fatálním nebezpečím pro vše živé na Zemi by byl výbuch blízké *supernovy*. Proud nabitých částic a neutronů by dokázal tuto planetu dokonale sterilizovat. Naštěstí stačí si prohlédnout seznamy nejbližších hvězd – žádná z nich není natolik hmotná, aby zakončila svou existenci explozí supernovy.

[3]) Magnetosférou nazýváme prostor kolem kosmického tělesa (planety, hvězdy, pulsaru), v němž dominuje jeho vlastní magnetické pole. Procesy spojené se vznikem a pohybem nabitých částic jsou ovládány především oním centrálním tělesem, a nikoli vnějšími procesy.

čítanka

# Zdeněk Pokorný: Zatím poslední případ

Zatím poslední případ srážky Země s kosmickým tělesem natolik velkým, že neunikl pozornosti i zcela náhodných svědků, se udál na počátku dvacátého století. Dne 30. června 1908 v 0 hodin 17 minut světového času došlo v nehostinné sibiřské tajze, v povodí řeky Podkamennaja Tunguska, k mohutné explozi. Detonaci bylo slyšet na tisíc kilometrů daleko. Vzdušná rázová vlna byla po pěti hodinách zaznamenána mnoha meteorologickými stanicemi v Evropě, 6000 kilometrů daleko od místa výbuchu, a dvakrát oběhla celou zeměkouli. Byla tak razantní, že ve vzdálenosti 35 kilometrů od epicentra vymrštila skupinu kočovných pastevců ze stanů. Strojvůdce transsibiřského vlaku, když uslyšel ten příšerný rachot, zastavil soupravu a k smrti vyděšení cestující sledovali ohnivou kouli nad krajinou. Několik následujících nocí byla obloha v Evropě mimořádně světlá, takže bylo možné bez potíží číst noviny. Sibiřské noci byly takto jasné ještě celé dva následující měsíce.

Už tenkrát bylo zřejmé, že se jedná o srážku s cizím kosmickým tělesem. Pro průzkum této jistě nevšední události se však nic konkrétního nepodniklo. Teprve

# 10. Vesmír plný otazníků

19 let po výbuchu se do poničené, téměř neobydlené oblasti střední Sibiře vydala první vědecká výprava. Členové expedice našli na předpokládaném místě dopadu pouze nezměrnou spoušť a zkázu: v kruhu o průměru 60 kilometrů byly stromy zcela zpřelámány, ulomené koruny směřovaly od epicentra výbuchu. Les byl zničen i následným požárem. Zajímavé však je, že zde nebyl nalezen žádný dopadový kráter.

Takový je tedy výsledek střetu Země s tělesem sotva sto metrů velkým. Kosmický vetřelec tentokrát nepronikl až k povrchu, vybuchl už ve výšce 6 až 8 kilometrů, ale rázová vlna, vzniklá při explozi, poničila les v širokém okolí. Kráter však již nebyla schopna vytvořit.

Tunguzská událost se může přihodit i několikrát za tisíc let.

Z připravované knihy *Zlaté století astronomie* (Aventinum, Praha).

čítanka

# Arthur Clarke: Vesmírná ochrana

Dříve či později k tomu muselo dojít. Třicátého června 1908 unikla Moskva zkáze o tři hodiny a čtyři tisíce kilometrů – podle kosmických měřítek o vlásek nepatrně tenoučký. Další ruské město vyvázlo ještě těsněji, dvanáctého února 1947, když druhý ohromný meteorit dvacátého století vybuchl blíže než čtyři sta kilometrů od Vladivostoku. S jeho explozí mohla soupeřit jenom nedávno vynalezená uranová bomba.

V těch dobách nemělo lidstvo žádné prostředky, jež by je mohly ochránit před těmihle nevypočitatelnými střelami, jimiž je bombardoval vesmír a které kdysi zjizvily tvář Měsíce. Meteority z let 1908 a 1947 dopadly do neobydlených pustin; jenomže koncem jedenadvacátého století už se na Zemi nerozkládala končina, již by nebesa mohla bezpečně použít jako cvičný terč. Lidstvo se rozlilo od pólu k pólu. A tak, nevyhnutelně...

Ráno v 9.46 světového času 11. září výjimečně nádherného léta roku 2077 spatřila většina obyvatel Evropy, jak se na východní obloze objevila oslnivě zářící ohnivá koule. V několika sekundách se stala jasnější než Slunce a jak se pohybovala napříč nebem – nejprve za naprostého ticha – zanechávala za sebou vířící sloup prachu a kouře.

Kdesi nad Rakouskem se začala rozpadat a vyvolala řadu tak silných tlakových vln, že více než jednomu milionu lidí zůstal natrvalo poškozený sluch. To byli ti šťastnější.

Tisíc tun skály a kovu pohybující se rychlostí padesát kilometrů za sekundu dopadlo na rovinu severní Itálie a v několika žhoucích okamžicích zničilo úsilí celých staletí. Města Padova a Verona byla smetena z povrchu zemského a zbytky věhlasu Benátek navždy klesly do moře, když se vody Jadranu po úderu kosmického kladiva hřímavě vzduly proti pevnině. Zahynulo šest set tisíc lidí a celkové škody přesáhly jeden bilion dolarů. Avšak ztráty, jež utrpělo celé lidstvo na umění, historii, vědě – a to navždy –, byly nevyčíslitelné. Vypadalo to, jako by vypukla veliká válka a ještě téhož jitra se prohrála; a jenom málokdo se dokázal upřímně radovat ze skutečnosti, že se celý svět stal svědkem těch nejúžasnějších východů a západů Slunce od dob výbuchu sopky Krakatoa, poněvadž prach zvířený explozí usedal jen zvolna.

Po počátečním šoku reagovalo lidstvo s odhodláním a v jednotě, jakou neprokázalo za žádné dřívější éry. Taková katastrofa, uvědomovalo si, se nemusí přihodit dalších tisíc roků, ale stejně dobře k ní může dojít zítra znovu. A následky by příště mohly být dokonce ještě horší.

Tak dobře: *žádné příště už tedy nebude*.

O sto let dříve mnohem chudší svět, se zdroji daleko omezenějšími, plýtval svým bohatstvím při pokusech zničit už odpálené rakety, jež lidstvo zcela sebevražedně namířilo samo proti sobě. Tohle úsilí nikdy sice úspěch nemělo, avšak tehdy získané zkušenosti se nezapomněly. Nyní se daly využít k mnohem vznešenějšímu účelu a v měřítku daleko větším. Žádnému meteoritu, dost velikému na to, aby způsobil katastrofu, se nepovolí, aby prolomil obranu Země.

Tak vznikl projekt VESMÍRNÁ OCHRANA.

Začátek knihy žánru sci-fi *Setkání s Rámou* (Svoboda, Praha 1984). Přeložil Zdeněk Volný.

čítanka

# Zdeněk Pokorný: „Novodobá astrologie“

*„Pouze šarlatáni jsou si něčím jisti.*
*Pochybnost není právě příjemným stavem,*
*ale jistota je směšná.“*
Voltaire (1694 – 1778)

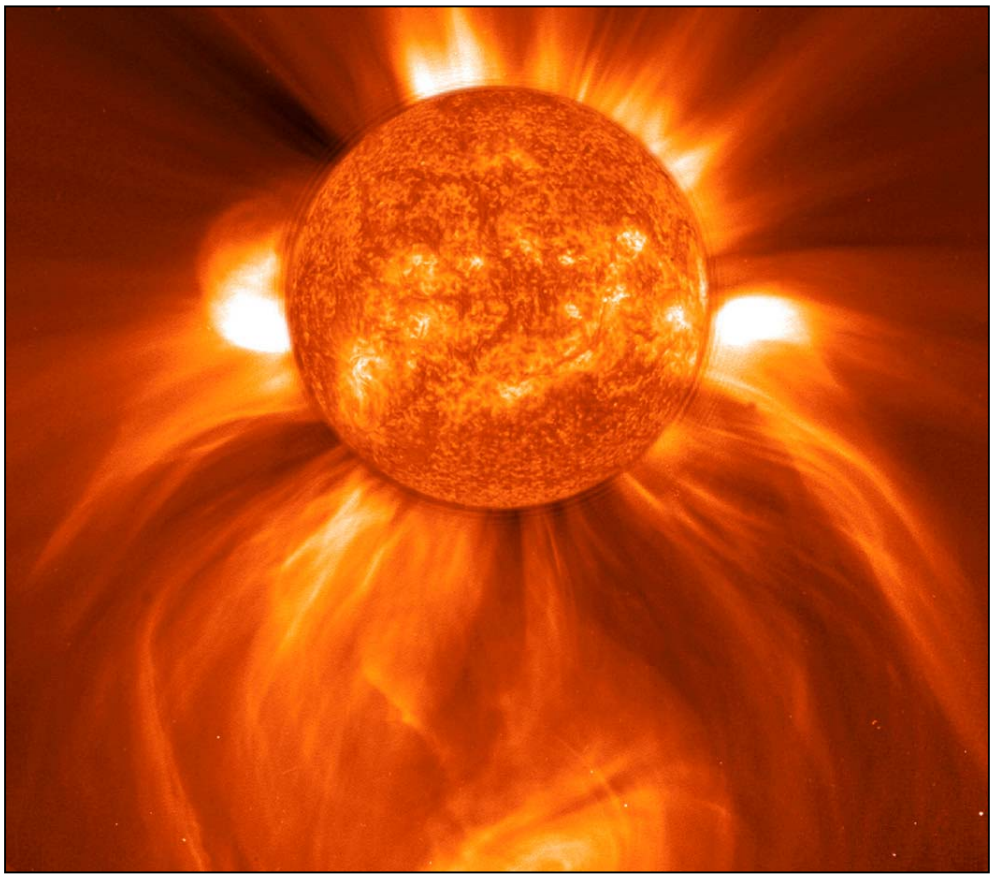
Tíhneme k jistotám, k takovým, jež nás naplňují klidem a optimismem. Minulost, kterou alespoň v principu známe dokonale, ostře kontrastuje s nejistou budoucností. Jsme tvory snadno zranitelnými, křehkými. Tušíme, že na nás číhá tisíce nebezpečí, z nichž mnohá přicházejí i z kosmu. Budeme-li je znát, můžeme se bránit. Je to jistě lepší, než kdybychom bez odporu čekali, až rána dopadne.

Čím nám vlastně vesmír hrozí? Srážkou s kometou? Možná, ale to je přece jev natolik vzácný, že se nedotýká našeho každodenního života. Je tu hrozba méně okázalá, všednější – naše Slunce. Dárce života na Zemi, a snad proto ve všech mytologiích posvátný bůh, po tisíciletí vzor dokonalosti a stálosti. Ale také hvězda, která čas od času zvyšuje svou aktivitu a vyvrhuje do okolí proudy částic a záření vysokých energií.

V současné době již nikdo nepochybuje o tom, že Slunce, i když je od nás vzdáleno 150 milionů kilometrů, ovlivňuje a narušuje řadu procesů na naší planetě. Na některé pozemské děje má sluneční aktivita nepochybně vliv přímý, na jiné jen zprostředkovaný.

Dostáváme se k jádru našeho problému: může sluneční činnost ovlivňovat i živé organismy na Zemi? Člověka? Jsou pro nás aktivní děje na Slunci skutečným nebezpečím, před nímž je třeba se chránit?

Nezastírejme, že řada odborníků z různých oborů se domnívá, že přímá souvislost mezi sluneční aktivitou a člověkem existuje. Alespoň tomu věří. Proč jinak by vznikaly stovky prací na téma „Slunce a člověk“? Jsou to většinou práce statistické, a často se sobě (svým provedením i obsahem) podobají jako vejce vejci. Sluneční aktivita, charakterizovaná nějakým číslem – tzv. indexem (jsou jich desítky), je jednoduchou statistickou metodou porovnávána s výskytem akutních srdečních onemocnění, pracovními úrazy, počtem dopravních nehod apod. Obvykle se takto zkoumají jen stovky případů, a nezřídka i méně. Výsledky nebývají nijak přesvědčivé, přesto jsou interpretovány nadmíru optimisticky: ano, k ovlivňování člověka dochází, a tady je jeden z důkazů.



Složený snímek Slunce ze dvou záběrů, které pořídila družice SOHO.

Není to však novodobá astrologie? Nevěříme něčemu jen proto, že by to tak mělo být? Trochu nadsaďme: nesvádíme každou naši bolest hlavy, píchnutí v boku či nezdar v práci na „Slunce plné skvrn“?

Rozeberme si vše ještě jednou. Začněme u statistiky: abychom prokázali souvislost dvou jevů, která není nijak výrazná, musíme mít k dispozici mnoho jednotlivých případů, jež porovnáváme. Mnoho – to jsou desetitisíce, statisíce. Měli bychom též vědět, zda v našich datech nejsou skryty souvislosti s jinými jevy, které by případně mohly námi studované vztahy zcela zamaskovat. Data nesmíme upravovat jen proto, abychom dostali „lepší“ výsledek. Dost požadavků a mnohým v našem případě nelze vyhovět. I vztahy „Slunce – člověk“ jsou jen volným vztahem. Člověk je totiž příliš hluboko vsazen do přírody a reaguje především na toto své okolí. Proto ve všech statistikách, do nichž je zahrnut člověk, se nutně musí projevit především vztahy „člověk – okolí“. Ty budou dominantní a ty musíme nejdříve poznat, chceme-li pak studovat jevy mnohem subtilnější, třeba vlivy sluneční aktivity na člověka.

Současný výzkum vztahů „Slunce – člověk“ míří většinou do prázdna. Ale neodsuzujme jej! Uvěříme-li, že mezi aktivitou na Slunci a naším chováním a jednáním zde na Zemi je nějaká přímá souvislost, budeme v obdobích zvýšené aktivity opatrnější, pozornější a disciplinovanější. Co často nezmohou dobře míněné příkazy a rady člověka, zastane naše neklidné Slunce.

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

# 10. Vesmír plný otazníků

*Počet přemýšlivých lidí je velmi malý a netroufají si obtěžovat svět.*

Voltaire (Francois Marie Arouet), spisovatel a filozof (1694 – 1778)

## otázky a příklady

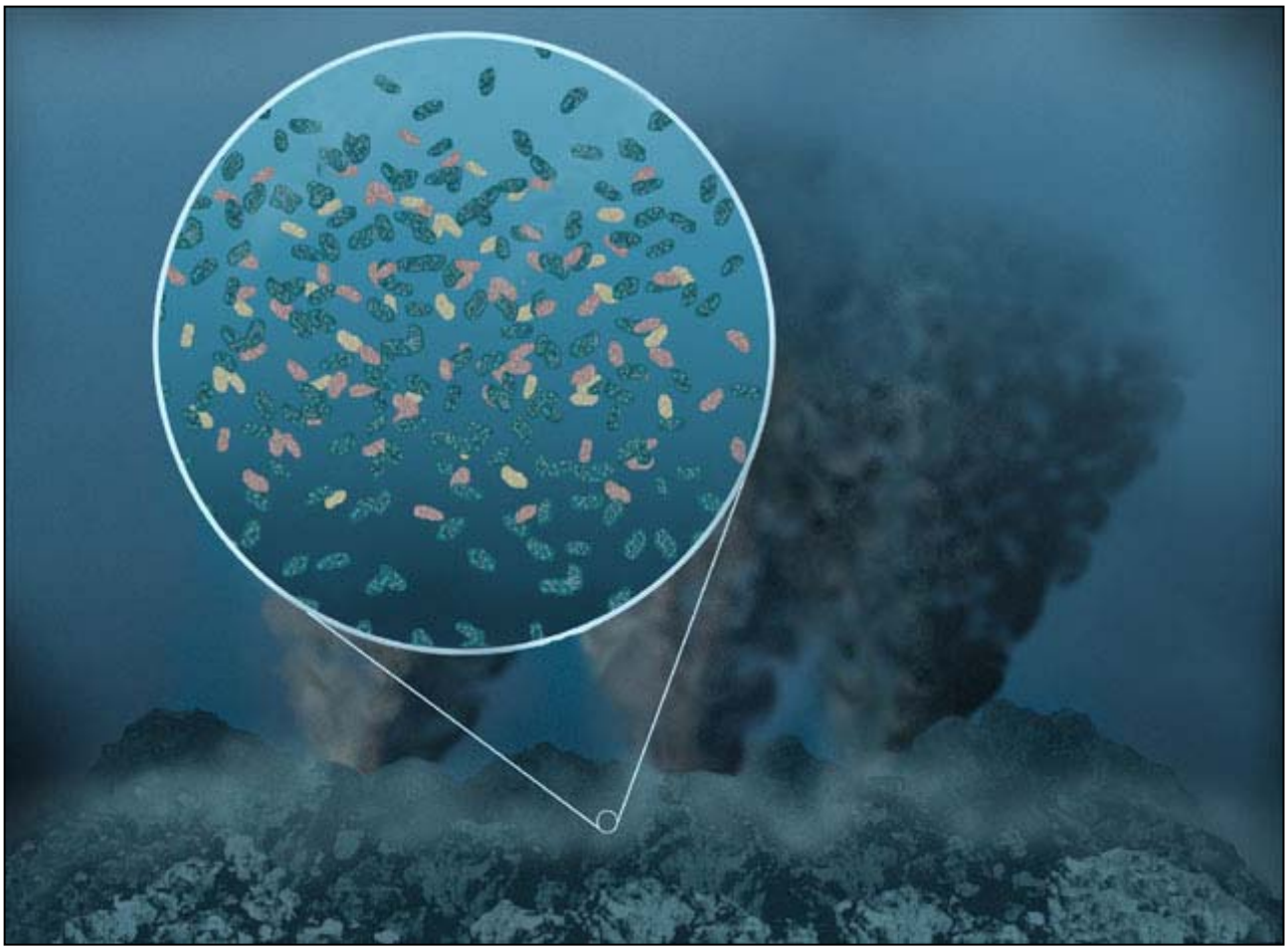
**Otázka 10.1.1.** Kometa Grigg-Skejellrup patří mezi krátkoperiodické (doba oběhu činí 5,1 roku), které se v afelu přibližují k trajektorii Jupiteru (afelová vzdálenost komety je 4,93 AU) a v perihelu jsou dokonce blíže ke Slunci než naše Země (perihelová vzdálenost činí 0,993 AU). Je už z těchto údajů zřejmé, že se kometa může někdy srazit se Zemí? Když není, co je třeba ještě vzít v úvahu?

**Otázka 10.1.2.** Nejdříve uvažte fakt, že Slunce vůči Zemi rotuje. Pokud ze Slunce vyletí nějaký oblak plazmatu (rozměrů srovnatelných se Zemí či o řád větších) rychlostí řekněme $v$ = 1000 km/s, bude trvat jistou dobu, než se dostane do vzdálenosti Země (pro jednoduchost předpokládejme, že se tato rychlost s časem nebude měnit). Aby oblak Zemi také zasáhl, určitě nemůže vyletět ze středu slunečního disku, jak ho vidíme ze Země – to by se musel pohybovat rychlostmi blízkými rychlosti šíření světla. Zasáhne nás tedy spíše oblak plazmatu, vymrštěný z míst u některého okraje Slunce (východního či západního). Kterého, a asi za jak dlouho po opuštění Slunce?

**Otázka 10.1.3.** Jedna z nejjasnějších hvězd na naší obloze je Vega. Nahlédnutím do hvězdných katalogů zjistíme, že se jedná o hvězdu hlavní posloupnosti, vzdálenou od nás 25 ly, jejíž hmotnost je přinejmenším 3 hmotnosti Slunce. Jak známo, bílí trpaslíci mohou mít hmotnost nanejvýš 1,4 hmotnosti Slunce, hmotnější hvězdy vybuchují jako supernovy. Vega je blízkou a relativně hmotnou hvězdou. Může tedy vybuchnout jako supernova a ohrozit tak život na Zemi, nebo se nabízí i jiný scénář vývoje Vegy?

# 10.2. Život ve vesmíru z pohledu astronoma

Paleontologické výzkumy naznačují, že život na Zemi existoval již krátce poté, co ustalo intenzivní bombardování povrchu naší planety (to bylo před asi 3,8 až 4,0 miliardy roků). Důkazy z té doby jsou ovšem nepřímé. Nejstarší známé fosilie pocházejí z doby před asi 3,6 miliardy roků. Spolehlivé informace o tom, jak život vznikl a zda je „původní“ nebo zavlečený odjinud, doposud chybí. I tak má ovšem smysl diskutovat o podmínkách, které musí být splněny, aby mohl život existovat (byť v jednoduché podobě), a nebo se dokonce mohl rozvíjet do složitějších struktur, třeba až

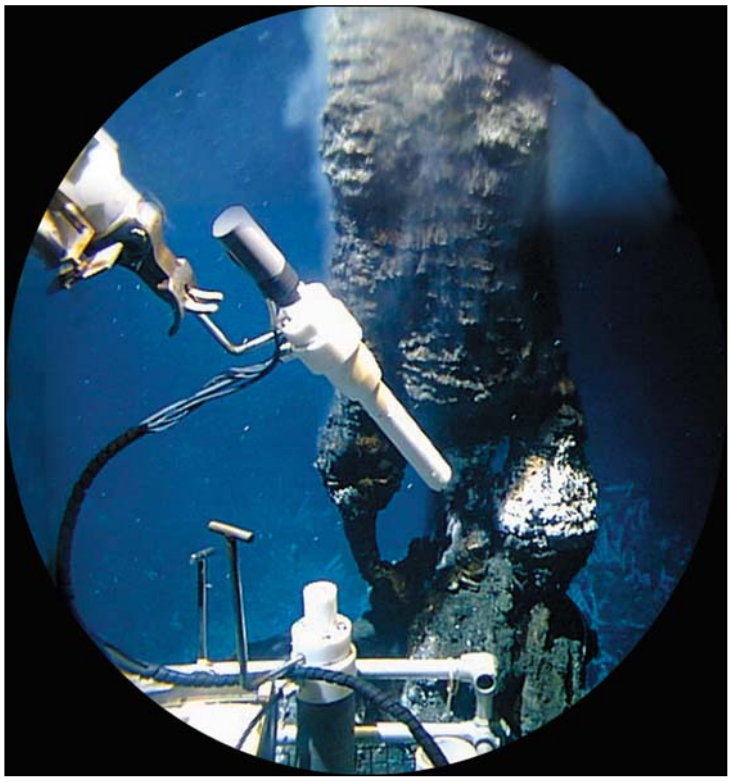


do stadia vyspělé technologické civilizace. My se nyní omezíme převážně na aspekty astronomické, i když mlčky předpokládáme, že jde o komplexní problém, který bez přispění zejména biologů a chemiků nejde vyřešit.

Život bez přítomnosti (byť jen stopové) těžších prvků než je vodík a helium je nemyslitelný. Protože těžší prvky v době vzniku vesmíru neexistovaly (byl tu jen vodík s malou příměsí helia), ale

vznikají postupně v důsledku hvězdného vývoje, je zřejmé, že ve vesmíru budou existovat mnohé tzv. *mrtvé zóny* [1]). Všude, kde nacházíme hvězdy pouze z prvních generací (jde tedy o hvězdy vzniklé záhy po velkém třesku), je prvků těžších než vodík a helium pramálo. Kolem těchto hvězd nemohou obíhat terestrické planety, ale nanejvýš tělesa Jupiterova typu (ale bez hutného železnato-kamenného jádra). Právě proto musí být mrtvými zónami například eliptické galaxie, či malé galaxie, a v té naší hvězdné soustavě třeba kulové hvězdokupy. To vše jsou příklady objektů, které se utvořily nedlouho po velkém třesku.

Najdeme však i další mrtvé zóny. V centrech galaxií je mnohem vyšší hustota hvězd než třeba v okolí Slunce. Výbuchy velmi blízkých supernov dokáží sterilizovat vše živé v jediném okamžiku. Ve středových oblastech galaxií je zkrátka příliš mnoho energie v malém prostoru – jsou to nepochybně oblasti bez života. Naopak na okraji galaxie je hvězd málo, ale přesto i zde se jedná o mrtvou zónu: tady jen zřídkakdy dojde k výbuchu supernovy, a proto je zde málo těžších prvků, podobně jako v počátcích vesmíru.



Hydrotermální průduch v hloubce asi 2 km (foto: University of Delaware and Analytical Instrument Systems, Inc.).

Pro vznik a vývoj života je zapotřebí, aby fyzikální podmínky v daném místě (především teplota a tlak) umožňovaly existenci vody v *tekutém* stavu, a to *dlouhodobě*. Intuitivně i na základě školního vzdělání v biologii má každý z nás jakési podvědomé představy o podmínkách, za jakých může živý organismus existovat. Je pozoruhodné, že výzkumy posledních několika desetiletí ukazují, že jednoduché mikroorganismy mohou dlouhodobě přežívat i za dosti extrémních podmínek. Počátkem 70. let minulého století mikrobiolog Thomas Brock poprvé zaznamenal jednoduché mikroorganismy v horkých gejzírech Yellowstonského národního parku. Přežívají ve vodě zahřáté na 80 °C, takže záhy se jim začalo říkat *termofilní mikroorganismy*.

Objevy podobných mikroorganismů, které se nyní označují jako *extremofilní*, nedaly na sebe dlouho čekat. Najdeme je například u podmořského dna, v hloubkách několika kilometrů, nedaleko tzv. hydrotermálních průduchů. To jsou místa, kde horká voda s rozpuštěnými minerály vyvěrá ze dna oceánu, a tam přežívají celé kolonie extremofilních mikroorganismů. Jsou tam zcela bez slunečního světla, za vysokého tlaku a ve vodě teplé až 110 °C. Energii čerpají z rozpadajících se chemických sloučenin, například sirovodíku a metanu.

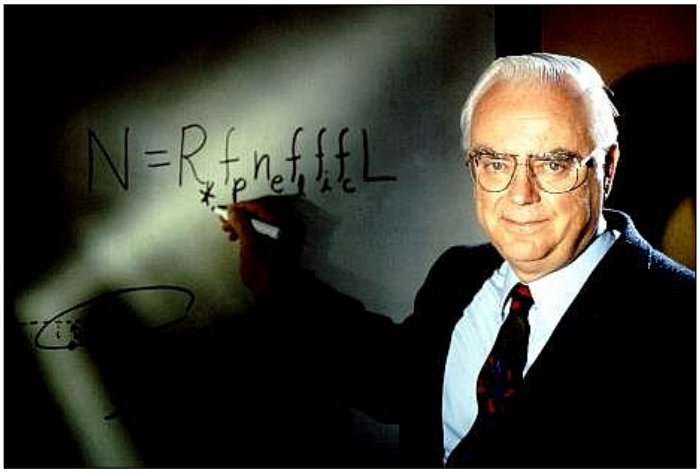
[1]) Tak nazveme oblasti bez šancí na vznik živých organismů.

Nyní známe mikroorganismy, které přežívají i při závratně vysokých tlacích, tisíckrát větších než je běžný pozemský, mohou též existovat ve zcela kyselém i zásaditém prostředí od faktoru pH rovnajícího se nule až po dvanáct. Některé extremofilní mikroorganismy najdeme v silně radioaktivním prostředí, kde vydrží neuvěřitelně vysoké dávky ozáření.

Objevy extremofilních mikroorganismů na Zemi zvyšují naději, že se podobné jednoduché živé organismy mohou najít i na Marsu, případně ve slaném oceánu pod ledovým příkrovem na Jupiterově družici Europa [2]).

Je třeba si uvědomit, že od jednoduchých mikroorganismů vedla k organismům mnohobuněčným (a pak ještě dál ke složitějším formám života) zřejmě neuvěřitelně dlouhá cesta. V případu Země se první mnohobuněčné organismy objevily před 2,5 miliardy roků (tedy téměř až v polovině doby, po kterou na Zemi existuje život!). Teprve před 530 miliony roků se objevují první zvířata s krunýři a kostrami, před 200 miliony roků první savci, nejstarší známé fosilie hominidů jsou z doby před 4,4 milionu roků. Už z těchto čísel je zřejmé, že vhodné podmínky pro vývoj života musí existovat dlouhodobě a výkyvy nesmí být náhlé ani drastické.

Zdálo by se, že kupř. v naší Galaxii, kde se nachází asi 400 miliard hvězd, se musí situace obdobná té, kterou známe ze sluneční soustavy, replikovat poměrně často. Z tohoto úhlu pohledu nejsou šance na nalezení cizího života (a dokonce podobně rozvinutého jako na Zemi, či dokonce ještě pokročilejšího) nijak malé. Přejděme však od kvalitativních úvah, které postrádají přesnější vymezení, k rozboru kvantitativnímu, a použijme postupu poprvé navrženého americkým radioastronomem Frankem Drakem [3]).



Frank Drake a jeho rovnice.

Jde opravdu o průhledný způsob: pravděpodobnosti jevů, které nastávají v přírodě, lze vyjádřit číselně od nuly do jedné. Když daná skutečnost nastane pokaždé, je její pravděpodobnost výskytu rovna jedné, když nenastane nikdy, pak je nulová. Samozřejmě nula a jednička jsou krajní hodnoty – reálně bude pravděpodobnost rovna číslu mezi nulou a jedničkou. Když však vznik nějaké události závisí více okolnostech, které jsou vzájemně *nezávislé* a z nichž každá má nějakou pravděpodobnost výskytu, pravděpodobnost výsledku se rovná *součinu* oněch jednotlivých pravděpodobností.

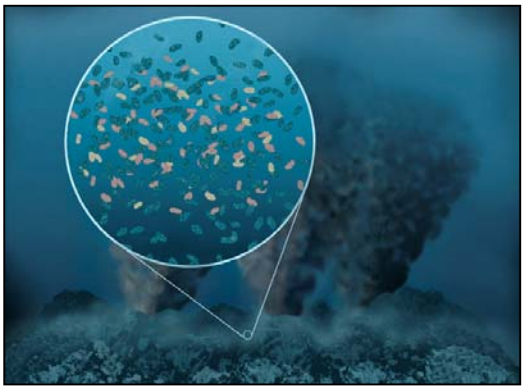
Rovnice, kterou uvedl Frank Drake (dnes pochopitelně nazývanou *Drakeovou rovnicí*), je takovým součinem několika pravděpodobností. Určuje, kolik civilizací podobných naší může existovat v Galaxii, ve které se nacházíme. Sestavení rovnice není složité, stačí si jen uvědomit, na jakých

[2]) Důkazy o existenci tekuté (slané) vody pod ledovou vrstvou Europy jsou zatím jen nepřímé, prozrazují to měření magnetického pole družice, vykonaná orbitální sondou Galileo.

3) Čti: *frenk drejk*. Drake byl jedním z jedenácti vědců, kteří na radioastronomické observatoři v americkém Green Banku ve dnech 1. a 2. listopadu 1961 diskutovali o problematice hledání mimozemských civilizací (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence* – SETI). Ve svém příspěvku seznámil přítomné, jak v principu jednoduše můžeme statisticky odhadnout počet civilizací žijících v současné době v naší Galaxii.

okolnostech bude počet civilizací v Galaxii záviset. Počet hvězd v naší Galaxii, které jsou vhodné z hlediska existence života (např. září víceméně stabilně a dostatečně dlouho, takže na případných planetách může vzniknout život), vynásobíme podílem planet, na nichž mohou existovat přijatelné podmínky pro život (nacházejí se v tzv. *obyvatelné zóně*). Samozřejmě jen na některých z nich mohl život vzniknout, opět jen na některých se vyvinul život inteligentní (v našem slova smyslu), a pouze některé inteligentní bytosti vytvořily technickou civilizaci, která je schopná a ochotná např. komunikovat v mezihvězdném měřítku. Posledním faktorem, který musíme vzít v úvahu, je doba trvání takové technické civilizace. Součin pak udává, kolik je v současné době v Galaxii kosmických civilizací, schopných komunikovat s civilizacemi jinými.

Je zřejmé, že samotný výpočet Drakeovy rovnice je triviální; co však vůbec není snadné, je odhad jednotlivých činitelů, tvořících součin. Například: jaká je pravděpodobnost vzniku inteligentního života, když už na planetě vůbec nějaký život existuje? Je vznik rozumu vzácností? Je každá rozumná bytost schopná a ochotná vyvíjet se v našem technickém duchu? Snad nejvíc diskutabilním členem rovnice je ovšem doba trvání technické civilizace. Zaniká sto let poté, co je technicky schopna řešit problém mezihvězdného rádiového (či jiného) kontaktu, nebo je tato doba mnohonásobně delší?



čítanka

# Jay Pasachoff: Je možný život na Zemi?

(Část úvodního referátu na sympóziu pořádaném Marťanskou akademií věd)

Celá staletí zkoumají astronomové Zemi, která patří k nejzajímavějším objektům na obloze; někdy ji pozorujeme jako jitřenku, jindy je pro nás večernicí. Poněvadž Země patří mezi vnitřní planety, můžeme ji sledovat pouze před východem nebo po západu Slunce a nikdy ne vysoko na noční obloze, kdy by její světlo procházelo minimální vrstvou naší atmosféry.

Hlavní problém spojený s pozorováním Země však netkví v marťanské atmosféře, ale v samotné této planetě. Větší část Země je většinou zakryta bílými mraky, které zabraňují pozorování jejího povrchu. Jestliže však pozorujeme někdy mezeru mezi oblaky, můžeme vidět, že většina povrchu Země je pokryta modrozelenou látkou, která odráží mnohem méně světla než mraky. Malá část povrchu je pokryta méně tmavým materiálem, jehož barva se někdy mění s ročními obdobími, neboť když přichází jaro, stává se tento materiál zelenějším.

V atmosféře této planety je mnohem méně životodárného oxidu uhličitého než v našem ovzduší a naproti tomu je na Zemi kyslík (ve formě $O_2$ a $O_3$), který je pro nás smrtelně nebezpečný. Země má polární čepičky podobně jako Mars, a jejich

rozměry se během roku mění. Tyto čepičky jsou pravděpodobně obrovským rezervoárem kysličníku uhličitého ve formě ledu (zmrzlý $CO_2$). Někteří vědci, jichž je však menšina, vyslovili názor, že polární čepičky jsou možná částečně tvořeny zmrzlým oxidem vodným, který známe jako „mokrý led“ (zmrzlý $H_2O$). Jsou plánovány další výzkumy, aby tato možnost byla seriózně posouzena.

Během posledních několika let bylo k Zemi vysláno několik kosmických sond typu Terra, z nichž byla úspěšná až Terra 3, jež se přiblížila k Zemi na vzdálenost 8 miliard ramů (i ve zracionalizované soustavě jednotek se připouští tato jednotka, která je definována jako délka levého tykadla královny Schrip, která panovala v létech 15391–99). Této sondě se podařilo získat řadu unikátních fotografií Země i jejího měsíce Selene. Snímky ukázaly, že temné plochy na Zemi mohou být tzv. maria a z radarových pozorování vyplynulo, že tato maria jsou tvořena tekutým oxidem vodným.

Stanice Terra 4 se stala první umělou družicí Země a během aktivní činnosti trvající desetinu selenonu (selenon, který je roven přibližně 100 phobonům, je doba oběhu družice Selene; tato jednotka se tradičně užívá při studiu Země) se podařilo vybrat několik míst vhodných pro přistání následující sondy série Terra. Prokázalo se nade vši pochybnost, že maria nejsou vhodná pro přistání. Zpočátku byla zvolena místa v tzv. desertech, které odrážejí více slunečního záření a navíc nevykazují sezónní změny.

První výzkumy přistávacího modulu stanice Terra 5 nepotvrdily náznaky ze stanice Terra 4 o možnosti hojného výskytu oxidu vodného na Zemi. Naopak se ukázalo, že zemský povrch je v místě přistání tvořen sypkými horninami ne nepodobnými tomu, co známe z Marsu. V rozporu s těmito výsledky jsou měření orbitální sekce a měření během přistávání, které svědčí o hojném výskytu oxidu vodného v mracích.

Pokud jde o otázku života na Zemi, můžeme říci, že dosud nejsme schopni učinit definitivní závěr. Tím více předčasné jsou úvahy některých vědců o existenci inteligentních bytostí na Zemi. Bylo by zejména vhodné, kdyby se naše sympózium soustředilo na sporné argumenty, které tito pracovníci vyslovili:

(a) Linie procházející přes celé kontinenty svědčí podle nich o uvědomělé činnosti (tyto linie by měly být tzv. silnice; domnívám se, že i v případě existence inteligentních bytostí by spíš šlo o potrubí přivádějící nedostatkový oxid uhličitý k ostrovům života vzdáleným od polárních čepiček).

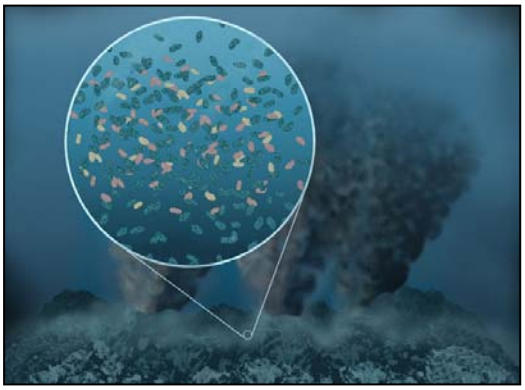
(b) Velmi rozsáhlé změny světlezelené látky jsou údajně projevy zemědělské činnosti.

(c) Pravidelně sestavené kameny (grady) jsou prý velká sídliště inteligentních pozemšťanů.

Všechny tyto názory vyžadují podrobný výzkum a za nejnadějnější můžeme považovat tento postup: Pokud na Zemi život existuje, můžeme jej nejspíš hledat buď v oblasti polárních čepiček (jež jsou jak z hlediska teplot, tak vzhledem k výskytu $CO_2$ pro život nejpřijatelnější), nebo pod povrchem tzv. desertů, které rovněž odrážejí značnou část slunečního záření, takže živé organismy by se mohly i v oblastech blízkých k zemskému rovníku chránit před kyslíkem a před slunečním žárem, jaký na Zemi panuje.

Z časopisu *Mercury* 7, 1978, č. 2 volně přeložil Pavel Andrle (překlad byl zveřejněn v časopisu *Říše hvězd*, 1979, 69–70).

# 10. Vesmír plný otazníků



*Občas děláme chyby tak neinteligentní, že se z nich nikdo nemůže ani poučit.*

Gerhard Branster, spisovatel a filozof (1927 – )

## otázky a příklady

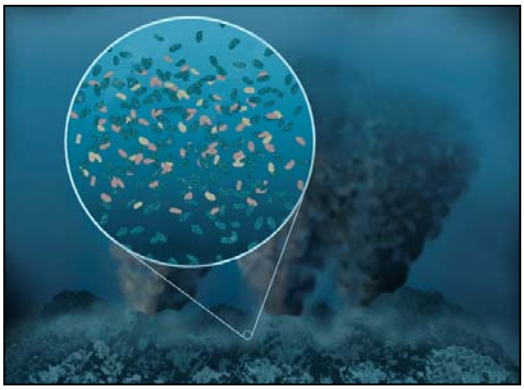
**Otázka 10.2.1.** Proč si myslíme, že inteligentní život může existovat pouze na planetách, které obíhají kolem hvězd slunečního typu nebo jen poněkud hmotnějších?

(Podle *Sky and Telescope*, April 1978, 320)

**Otázka 10.2.2.** Mění se poloha obyvatelných zón kolem hvězd s průběhem času? Poznamenejme, že obyvatelnou zónou nazýváme oblast kolem centrální hvězdy, ve které na planetě s vhodným složením atmosféry voda trvale nezmrzne ani se zcela nevypaří (oba tyto procesy jsou nevratné!), ale bude existovat v tekutém stavu. Pokud ano, proč a jak?

**Otázka 10.2.3.** Mohl život vzniknout na planetách kolem prvních hvězd v prvních galaxiích, které se utvořily po velkém třesku v našem vesmíru? Je vůbec tato otázka korektní, nepůjde jen o spekulace?

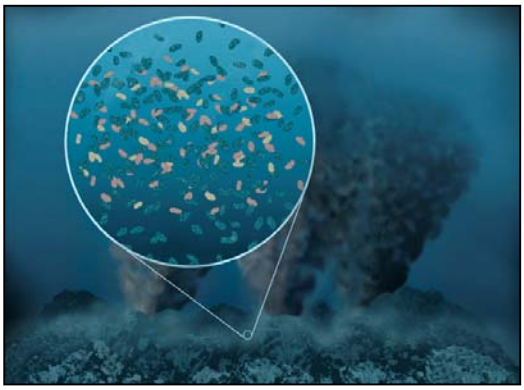
# 10. Vesmír plný otazníků



## citát

*Pokroky evoluční biologie jasně naznačují, že život není prostým výsledkem statistické hry se stavebními kameny života. Pěkně to vyjádřil prof. Fred Hoyle: „Pravděpodobnost náhodného vzniku života je asi stejná, jako když se nad vrakovištěm aut přežene tornádo a zůstaví po sobě zbrusu nový dopravní letoun B-747.“ Zdá se zkrátka, že nestačí jen, aby na určité planetě po dosti dlouhou dobu existovaly příhodné podmínky pro život: navzdory tomu zde život vůbec nemusí vzniknout. Řekněme, že si večer doma připravíme pohodlnou a dobře vybavenou kolébku, vysteleme ji nejjemnějším prádlem, budeme ji udržovat na vhodné teplotě a ještě pro jistotu do rohu postavíme láhev se Sunarem. Ale ani tím vším nezaručíme, že ráno bude v kolébce vrnět novorozeně.*

Jiří Grygar, Vladimír Železný: *Okna vesmíru dokořán* (Naše vojsko, Praha 1989, str. 198).



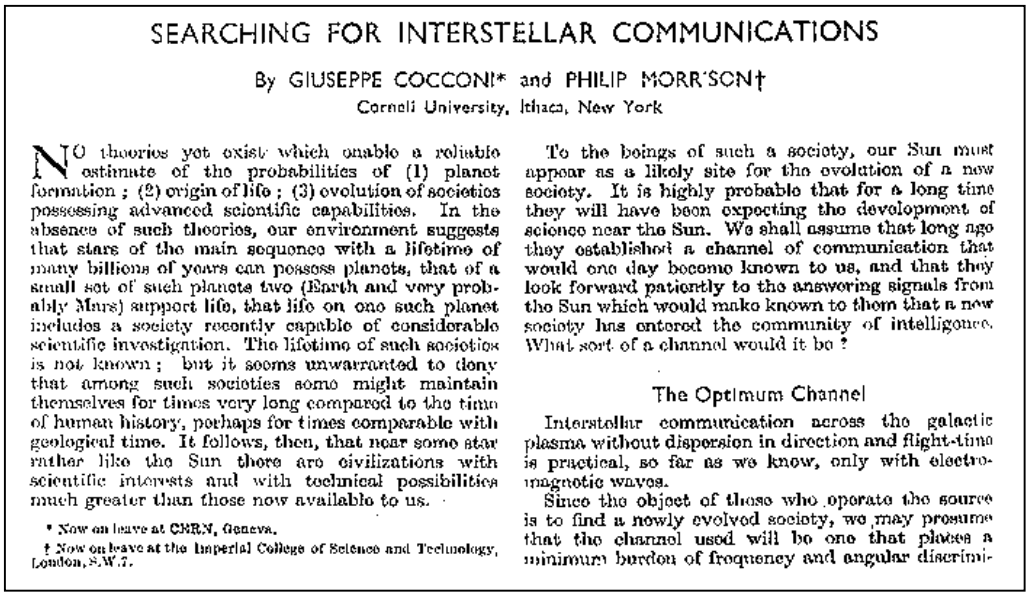
čítanka

# Zdeněk Pokorný: Hledání mimozemské inteligence

V sobotu 19. září 1959 vyšlo číslo 4690 časopisu Nature, v němž nejdeme třístránkový článek s poněkud neobvyklým názvem „Pátrání po mezihvězdném spojení“. Prvním z autorů byl Giuseppe Cocconi, italský fyzik, po válce pracující na Cornellově univerzitě v USA. Tam se zabýval kosmickým zářením a interakcemi elementárních částic. Druhým autorem byl Philip Morrison, americký fyzik, který za války pracoval v Los Alamos na přípravě atomové bomby, a po ní přišel také na Cornellovu univerzitu.

Cocconi s Morrisonem mimo jiné napsali: *„Na jaké frekvenci můžeme signál očekávat, budeme-li chtít naslouchat cizím civilizacím? Dlouhodobé vyhledávání slabého signálu neznámé frekvence v celém spektru je obtížné. Jenže právě v nejvhodnější části rádiového spektra se nalézá unikátní objektivní standard frekvence, který musí být znám každému pozorovateli ve vesmíru: čára neutrálního vodíku na frekvenci 1420 megahertzů (vlnová délka 21 centimetrů). Logicky můžeme očekávat, že vysoce citlivé přijímače záření pro tuto frekvenci se konstruují už v nejranějším období rozvoje radioastronomie. Takto by jistě uvažovali i operátoři předpokládaného zdroje vysílání, a současný stav naší techniky tyto předpoklady potvrzuje. Proto se domníváme, že nejperspektivnější je hledání v okolí frekvence 1420 megahertzů.“*

Práce Morrisona a Cocconiho v seriózním vědeckém časopisu vyvolala značnou pozornost. Vznikla na základě příznivé shody okolností. Oba působili na Cornellově univerzitě po více než deset let nezávisle na sobě, každý měl své vlastní výzkumné zájmy. Na jaře roku 1959 se však sešli nad společným problémem: Morrison se právě zabýval zářením gama kosmického původu. Jeho kolega Cocconi studoval paprsky gama, vycházející ze synchrotronového urychlovače částic na Cornellově univerzitě. Cocconi navštívil Morrisona a zeptal se jej, zda by mohly být paprsky gama použity pro mezihvězdnou komunikaci mezi civilizacemi, protože takové záření je ve vesmíru jistě velice vzácné. Morrisona problém ihned zaujal: usoudil ovšem, že kvůli menšímu rušení by byla pro spojení vhodnější rádiová oblast spektra. Cocconi vzápětí spočítal, že právě dokončený největší radioteleskop světa v Jodrell Banku v Anglii, jehož plně pohyblivá anténa má průměr 76 metrů, by byl schopen přijmout rádiové signály ze vzdálenosti nejbližších hvězd, pokud by byly alespoň tak intenzivní jako ty nejsilnější pozemské, produkované v té době. Převratné myšlenky je třeba bez okolků prezentovat celé vědecké komunitě, usoudili oba, a tak vznikl článek v Nature.



SEARCHING FOR INTERSTELLAR COMMUNICATIONS

By GIUSEPPE COCCONI* and PHILIP MORRISON†

Cornell University, Ithaca, New York

NO theories yet exist which enable a reliable estimate of the probabilities of (1) planet formation; (2) origin of life; (3) evolution of societies possessing advanced scientific capabilities. In the absence of such theories, our environment suggests that stars of the main sequence with a lifetime of many billions of years can possess planets, that of a small set of such planets two (Earth and very probably Mars) support life, that life on one such planet includes a society recently capable of considerable scientific investigation. The lifetime of such societies is not known; but it seems unwarranted to deny that among such societies some might maintain themselves for times very long compared to the time of human history, perhaps for times comparable with geological time. It follows, then, that near some star rather like the Sun there are civilizations with scientific interests and with technical possibilities much greater than those now available to us.

* Now on leave at CERN, Geneva.

† Now on leave at the Imperial College of Science and Technology, London, S.W.7.

To the beings of such a society, our Sun must appear as a likely site for the evolution of a new society. It is highly probable that for a long time they will have been expecting the development of science near the Sun. We shall assume that long ago they established a channel of communication that would one day become known to us, and that they look forward patiently to the answering signals from the Sun which would make known to them that a new society has entered the community of intelligence. What sort of a channel would it be?

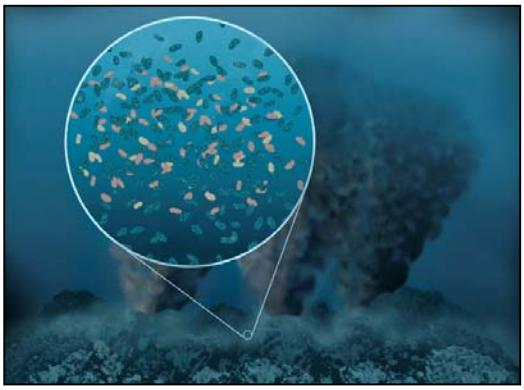
The Optimum Channel

Interstellar communication across the galactic plasma without dispersion in direction and flight-time is practical, so far as we know, only with electromagnetic waves.

Since the object of those who operate the source is to find a newly evolved society, we may presume that the channel used will be one that places a minimum burden of frequency and angular discrimi-

Je to vpravdě pionýrská práce, nad kterou je třeba se hluboce zamýšlet. K úvahám vyzývá i její závěr: *„Čtenář jistě může tyto úvahy považovat za oblast science-fiction. Domníváme se však, že existence mezihvězdného vysílání je v dokonalém souladu se vším, co známe, a pokud tu takové signály jsou, pak máme k dispozici prostředky, jak je zachytit. Někteří budou popírat nesmírný význam – praktický i filozofický – který by mělo zachycení mezihvězdného vysílání. Jsme si vědomi toho, že pátrání po signálech vyžaduje velké úsilí. Je obtížné předpovědět pravděpodobnost úspěchu, ale jestliže je hledat nebudeme, naděje na úspěch bude nulová.“*

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



čítanka

# Carl Sagan: Hledání mimozemské inteligence

Po celou historii lidstva uvažujeme o hvězdách a dumáme o tom, zda je lidstvo ve vesmíru jedinečné nebo zda kdesi v hlubinách noční oblohy jsou nějaké jiné bytosti, které (jsouce našimi myslícími vrstevníky v kosmu) přemýšlejí a žasnou stejně jako my. Takové bytosti mohou samozřejmě posuzovat sebe i celý vesmír jinak než my. Někde v prostoru mohou existovat nezvyklé exotické biologické systémy, technologie a společnosti. Na kosmické scéně, neobyčejně rozlehlé a věkovité nad jakoukoli lidskou představu, jsme trochu osamělí; můžeme proto naopak přemýšlet o nejvlastnějším významu naší titěrné, leč exkluzivní planety, pokud takový význam vůbec existuje. Hledání mimozemské civilizace je hledáním obecně přijatelného kosmického kontextu pro lidský druh. V nejhlubším slova smyslu je hledání mimozemské inteligence poznáváním nás samých...

Někteří vědci, kteří pracují na otázkách poznávání mimozemské inteligence (a já mezi nimi), se pokusili odhadnout počet vyspělých technických civilizací (jež se pracovně definují tak, že jsou schopny provozovat radioastronomii) v naší Galaxii. Tyto řádové odhady jsou o něco lepší než pouhé hádání z ruky: vyžadují přiřazení číselných údajů hodnotám, jako je počet a stáří hvězd, množství planetárních soustav a pravděpodobnost, že na nich vznikne život – o těchto veličinách víme velmi málo – a konečně pravděpodobnost vývoje inteligentního života a životnosti technické civilizace, o čemž nevíme skoro nic.

Příslušnými kupeckými počty obdržíme údaj kolem jednoho milionu technických civilizací v Galaxii. To je číslo, které svou velikostí téměř vyráží dech. Člověk se může doslova obveselovat představami o rozdílech, životních stylech a obchodních vztazích milionu cizích světů. Galaxie ovšem obsahuje zhruba 250 miliard hvězd, takže i kdyby se v ní nacházelo na milion civilizací, znamenalo by to, že jenom jedna hvězda z dvou set tisíc bude mít planetu obydlenou vyspělou civilizací. Přitom nemáme skoro žádné vodítko, které hvězdy jsou nejpravděpodobnějšími kandidáty, a proto jich musíme prohlédnout opravdu hodně. Tyto úvahy ihned naznačují, že hledání mimozemské inteligence bude vyžadovat nesmírné úsilí...

Souběžně s rostoucím zaměřením na solidní výzkum se však objevily i mírně záporné hlasy, jež jsou nicméně docela pozoruhodné. Několik vědců položilo dotěrnou otázku: je-li mimozemská inteligence tak hojná, proč už jsme neobjevili její projevy? Zamysleme se nad pokroky naší vlastní civilizace za posledních deset tisíc let a představme si obdobný vývoj v nejbližším milionu či miliardě let! I kdyby jen nepatrný zlomek civilizace byl o milion či miliardu let pokročilejší než my, proč zde nevidíme jejich umělé produkty, za-

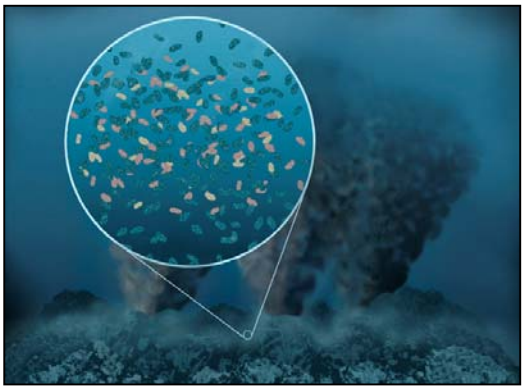
řízení či dokonce průmyslové znečištění takových rozměrů, že by nemohlo uniknout naší pozornosti? Proč už si dávno nepřestavěly celou Galaxii ke svému prospěchu?

Skeptici se rovněž táží, proč jsme nenašli žádný zřejmý důkaz návštěv mimozemšťanů na Zemi. My sami jsme už vypustili pomalé a skromné mezihvězdné plavidlo. Společnost pokročilejší než naše by měla být schopna běžně využívat mezihvězdného prostoru docela pohodlně, bez vynaložení zvláštního úsilí. Během milionů let by takové společnosti měly budovat kolonie, které by samy mohly organizovat mezihvězdné expedice. Proč už zde dávno nejsou? Člověka to vede k závěru, že pokročilých technických civilizací je nejspíš jen několik – buď proto, že navzdory statistice jsme jednou z prvních technických civilizací, jež se ve vesmíru vynořily, anebo proto, že osudem všech takových civilizací je nějaký druh sebezničení dříve, než se dostanou podstatně dál, než jsme zatím pokročili my.

Myslím si však, že takový pesimismus je předčasný. Všechny podobné argumenty totiž závisejí na tom, zda správně odhadujeme záměry bytostí mnohem pokročilejších, než jsme my sami. Jestliže se jimi zabýváme podrobněji, zjistíme, že v pozadí zmíněných úvah se skrývá řada pozoruhodných lidských namyšleností. Proč bychom měli očekávat, že bude tak snadné rozpoznat projevy velmi pokročilé civilizace? Nepodobá se naše situace spíše případu příslušníků izolovaného kmene v povodí Amazonky, kteří prostě nemají prostředky, aby zjistili intenzivní rádiovou a televizní komunikaci, která probíhá všude kolem nich? Vždyť přece v astronomii je celá řada neúplně pochopených jevů. Co když například modulace pulsarů nebo energetický zdroj v kvasarech má umělý technický původ? Co když existuje něco jako galaktická etika s principem nezasahování do vývoje zaostalých či rozvíjejících se civilizací? Možná, že bychom měli počítat s něčím, jako je čekací doba, po níž se teprve považuje mezihvězdný kontakt za vhodný. Třeba se nám dává příležitost se sami zahubit, jestliže k tomu máme sklony. Co když všechny společnosti mnohem pokročilejší než my dosáhly praktické osobní nesmrtelnosti, a tím ztratily jakoukoli motivaci pro kratochvilné mezihvězdné toulky, což může být podle všeho právě jen znakem dospívající civilizace? Zralé civilizace třeba také nechtějí znečišťovat kosmos. Takový seznam různých „třeba“ může být nekonečně dlouhý, přičemž málokterou položku seznamu jsme s to nějak přesněji posoudit.

Proto si myslím, že otázka mimozemských civilizací je naprosto otevřená. Zdá se mi mnohem obtížnější porozumět vesmíru, v němž jsme jedinou nebo jednou z mála technických civilizací, než stavu, kdy je kosmos plný inteligentního života. Naštěstí lze mnohé rysy problému ověřovat pokusem. Můžeme se snažit najít planety u cizích hvězd, můžeme hledat jednoduché formy života na blízkých planetách, jako je Mars, a můžeme provádět rozsáhlé laboratorní studie chemie původu života. Můžeme dokonce mnohem hlouběji zkoumat vývoj organismů a společností na Zemi. Problém přímo volá po dlouhodobém, otevřeném a systematickém výzkumu, jehož jediným rozhodčím v otázce, co je a co není pravděpodobné, je příroda sama.

Výňatek z knihy *Brocův mozek: Úvahy o romantice ve vědě*, Random House, New York 1979 – 6. vydání; uveřejněno ve Světové literatuře 30, 1985, 143–149, překlad Jiří Grygar.



čítanka

# Iosif Šklovskij: Miliony obydlených světů?

V současné době nemůžeme říci naprosto nic o pravděpodobnosti vzniku života na nějaké mladé planetě. Příklad naší sluneční soustavy, kde se nachází jen jediná obyvatelná planeta – Země, názorně ukazuje, že zdaleka ne na každé planetě vzniká život. Není vyloučeno, že počet takových planet je velice malý. Dokud za hranicemi sluneční soustavy neobjevíme planety, jejichž atmosféry budou pozměněny přítomností života, nemůžeme očekávat ani výrazný pokrok při řešení tohoto strhujícího problému.

Zcela odděleně je zapotřebí posuzovat otázku existence rozumného života za hranicemi naší Země. Je zbytečné zdůrazňovat, že tento problém vzrušoval lidstvo odpradávna mnohem víc než otázka existence „obyčejného“ nerozumného života ve vesmíru. Ostatně, jestliže někde ve vesmíru jsou ohniska života, proč by to nemohla být ohniska rozumného života? Vývoj života od jeho nejjednodušších forem až k těm nejsložitějším je velmi zdlouhavý a složitý proces, v němž hybnou silou je darwinovský přirozený výběr a mutace. Domníváme se, že toto platí nejen pro život pozemský, ale i pro život mimo Zemi, neboť zdroje výživy a zajištění životních pochodů organismů jsou vždy omezené, ať se vyvíjejí kdekoli.

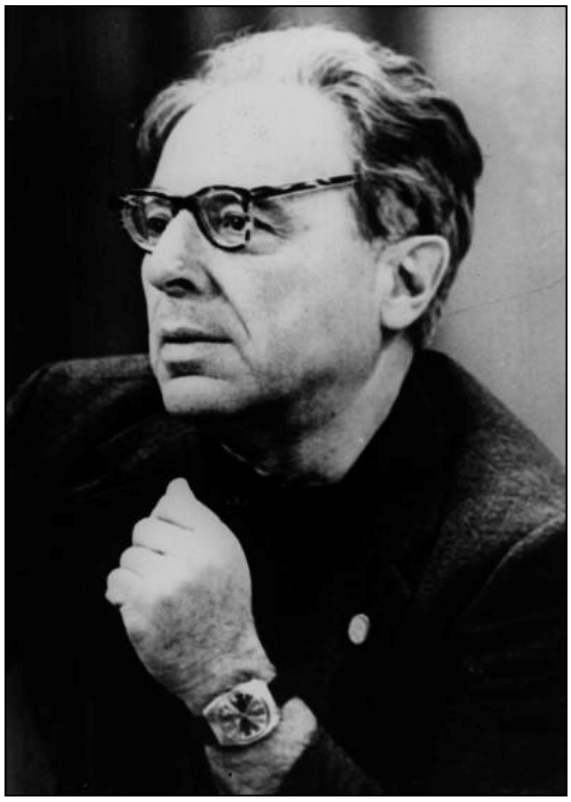
Během vývoje vznikaly z prosté nutnosti ty či ony velmi důležité a často i složité „vynálezy“, jež umožňovaly přežití různých druhů organismů. Rozum ostatně můžeme považovat taktéž za jeden z takových „vynálezů“, který, podobně jako i jiné vynálezy vzniklé v průběhu vývoje, dával příslušnému druhu zprvu nevelké, později však stále větší a větší výhody v boji o přežití.

Typickou vlastností rozumu je neobyčejně krátké údobí jeho rozvoje. U druhu *Homo sapiens* se tato časová škála zpočátku počítala na stovky a desítky tisíc let. Avšak s nástupem technologické éry se tempo rozvoje katastrofálně zrychlilo. Druh obdařený rozumem již nadále není v rovnováze s biosférou – vstupuje do období bouřlivé expanze. Rozum v této fázi vývoje přestává být jedním z prostředků, zabezpečujících přežití druhu, a stává se mohutným samostatným faktorem. Je to zřetelně vidět na vývoji lidstva. Na zajištění druhu *Homo sapiens* by zcela dostačoval mozek neandrtálce.

Rozumnému druhu je však „těsno“ na mateřské planetě. Zahajuje expanzi do kosmu. Do sféry činnosti rozumného druhu se zapojují stále významnější zdroje surovin a energie. Seriózní a vědecky podložené odhady naznačují, že pro využití všech surovinových a energetických zásob v planetární soustavě je zapotřebí tak asi tisíce let. Jestliže například nyní přeměňujeme energii $10^{13}$ joulů za sekundu, pak za tisíciletí to bude $10^{23}$ joulů za sekundu. Lidstvo osídlí celou sluneční soustavu a přemění ji v umělou biosféru se zdroji mili-

ardkrát většími než ty původní, „mateřské“. Současně vysoké úrovně dosáhne i umělý rozum, jenž v podstatě nebude možné odlišit od rozumu „přirozeného“. O takovém vývoji lidstva uvažoval před mnoha lety K. E. Ciolkovskij a v nedávné době Freeman Dyson.

Tím se však pokrok (pokud ho ještě můžeme označit jako „pokrok“) nezastaví. Rozum začne pronikat do celé Galaxie, jak na to jako první upozornil N. S. Kardašev. K ovládnutí zdrojů v celé hvězdné soustavě je zapotřebí podle velmi konzervativních odhadů jen několika milionů let. To je doba nicotně krátká ve srovnání s 10 až 15 miliardami let vývoje Galaxie, ostatně je krátká i ve srovnání s 200 miliony let, kdy Slunce jednou oběhne kolem středu Galaxie.



Iosif Šklovskij

Je jistě možné namítnout, že rozumné bytosti, když poznají zhoubnost neomezené expanze, se dají cestou přísné hospodárnosti a zamezí kvantitativnímu růstu základních ukazatelů svých civilizací. Stěží však budou takto postupovat všechny civilizace. A kromě toho, rozvoj „jen do hloubky“ je také nejspíš jen iluzí.

Musíme proto připustit, že byť jen malá část civilizací v Galaxii se vydá cestou neomezené expanze. Avšak v takovém případě bychom pozorovali kosmické projevy rozumného života, svého druhu „kosmické zázraky“. Neslyšíme žádné výzvy předpokládaných „příbuzných“, nepozorujeme žádné stopy kosmické budovatelské činnosti, nikdo nikdy nenavštívil naši Zemi. Vesmír mlčí a nejeví ani náznak rozumného života. Mohl by však mluvit! Vždyť například v sousední galaxii M 31 v Andromedě by mohly mít supercivilizace mohutné radiomajáky. Nejsou tam však.

„Mlčení“ vesmíru je sám o sobě důležitý vědecký fakt. Je třeba jej vysvětlit, neboť je v přímém rozporu s koncepcí neomezeného rozvoje supercivilizací. Nejjednodušší, řekněme až triviální vysvětlení spočívá v tom, že vysoce rozvinuté mimozemské civilizace v našem nejbližším okolí (dejme tomu v místní soustavě galaxií) jednoduše neexistují. I v případě, že život je ve vesmíru široce rozšířen, je to možné. Stačí jen přirozený předpoklad, že život se nikdy nevyvine až do stadia supercivilizace, nebo že z vnitřních příčin (například rozpadem biosféry, která jej zrodila) má taková civilizace velmi krátkou životnost.

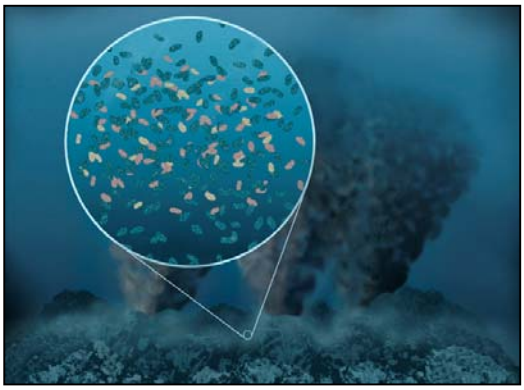
Budeme-li trvat na tom, že rozum je jedním z „vynálezů“ vývojového procesu, pak je třeba poznamenat, že ne všechny „vynálezy“ jsou v konečném případě pro daný druh užitečné. Příroda je slepá, postupuje tápavě, metodou „zkoušek a omylů“. Ukazuje se, že valná část „vynálezů“ není k ničemu a dokonce škodí v rozkvětu druhu. Tak vznikají slepé uličky v procesu vývoje.

Historie vývoje života na Zemi – to je v podstatě samé pohřebiště druhů. Charakteristickým znakem vývojové slepé uličky je hypertrofie nějaké funkce, vedoucí ke stále narůstajícímu narušování harmonie. Vzpomeňme nestvůrně neúměrně vyvinuté tesáky šavlozubého tygra. Bezděčně se nám navrací analogie: nejsou právě ty soudobé hypertrofované „aplikace rozumu“ u druhu *Homo sapiens* příznakem blížící se vývojové slepé uličky tohoto druhu? Jinak řečeno, není sebevražedná činnost lidstva (úděsné hromadění jaderných zbraní, ničení životního prostředí) podobnou hypertrofií jeho rozvoje jako rohy a pancíř triceratopse nebo tesáky šavlozubého tygra? Není slepá ulička možným koncem vývoje rozumných druhů ve vesmíru, což by přirozeným způsobem vysvětlovalo i jeho mlčení?

# 10. Vesmír plný otazníků

Přijmeme-li názor, že rozum je jen jeden z nesčetných „vynálezů“ vývojového procesu, jenž nadto – a to nelze vyloučit – zavádí druh do vývojové slepé uličky, pak lépe pochopíme místo člověka ve vesmíru; současně též objasníme, proč nepozorujeme žádné kosmické zázraky. A to samo o sobě není málo...

Uveřejněno pod názvem *Existují mimozemské civilizace?* v časopisu *Zemlja i vselennaja* 1985, 76–80; překlad Zdeněk Pokorný.



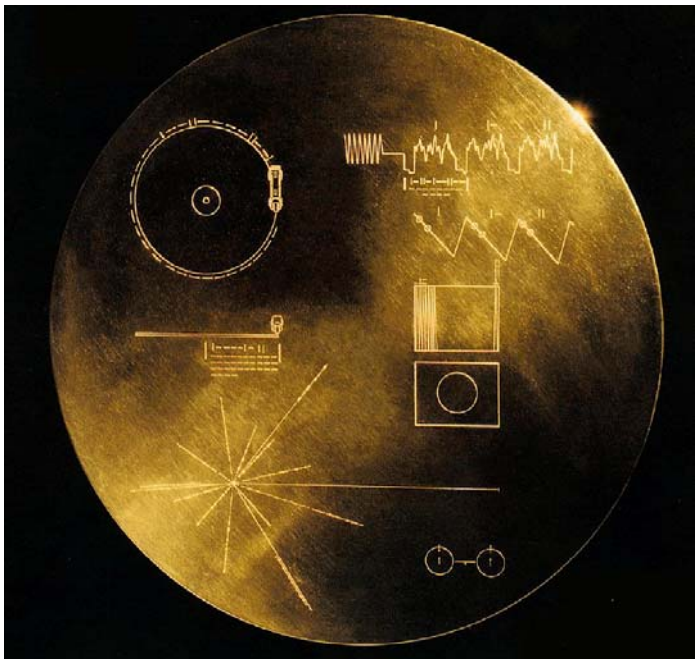
čítanka

# Lewis Thomas: Vzkaz jiným civilizacím

Předpokládejme, že je tu nebo onde v dalekém vesmíru skutečně vjemů schopný život a že s ním navážeme spojení. O čem, proboha, s ním budeme mluvit? Je pravděpodobné, že je vzdálen nějakých sto – dvě stě světelných let, a že tedy budou v konverzaci dlouhé prodlevy. Základní komplimenty, jakými začínáme své rozhovory, jako *Haló, jste tam?* z naší strany, *Ano, uctivost*, z jejich strany, základní komplimenty tedy budou trvat nějakých dvě stě let, a to nejmíň. Než se dostaneme k rozvinuté společenské konverzaci, může se stát, že zapomeneme, co jsme chtěli říci.

Můžeme vsadit na přesnost a věrnost naší techniky a prostě vyslat zprávy o sobě samých, něco jako tiskem rozmnoženou vánoční gratulaci, ale jednotlivé prvky musíme vybírat velmi pečlivě, podle setrvalosti jejich platnosti a významu. Informace, již si vybereme, musí dávat smysl, aspoň nám i po dvou stech letech, musí se zdát důležitou stále, jinak bude konverzace trapná pro všechny účastníky. Jak dobře víme, během dvou set let je snadné ztratit nit rozhovoru.

Snad nejbezpečnějším úvodem je vyslat hudbu, pokud to bude technicky možné. To by mohl být nejlepší jazyk, jímž bychom těm ve vesmíru vysvětlili, jací jsme, jazyk nedvojsmyslný a přesný. Já bych navrhoval Bacha, jakéhokoli Bacha, který by se nechal tryskat do vesmíru kolem dokola a pořád. Samozřejmě bychom se trochu chvástali, ale to se snad dá prominout, když si někdo při tak památ-



Tento pozlacený disk se zprávou je umístěn na obou sondách *Voyager*, letících pryč ze sluneční soustavy.

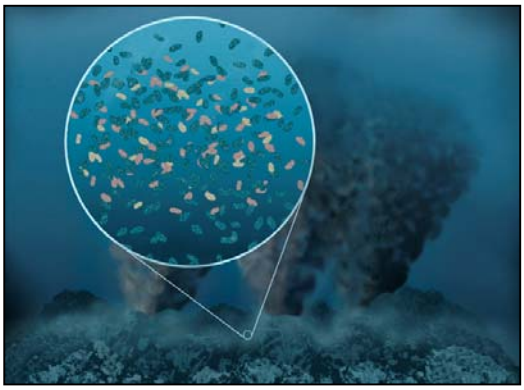
ném seznámení nasadí tu nejlepší masku. Nebo tvář. O těch horších věcech bychom se mohli taktně zmínit později. Ostatně, abychom se zase tak moc nepodceňovali, hudba by podala spravedlivější obraz naší duchovní reality než mnoho jiných poselství, jako třeba noviny a časopisy, řekněme *Time*, nebo historie Spojených států nebo prezidentské projevy. Ovšemže bychom mohli vysílat svou vědu, ale představte si to utrpení, když zdvořilé poznámky k našim výsledkům dojdou za dvě stě let. Cokoli bychom mohli nabídnout jako největší duchovní šlágr dneška, vyšlo by z módy a ztratilo by význam i vážnost. Bylo by k smíchu. Myslím, že bychom se měli držet hudby.

Snad by se podařilo přizpůsobit techniku tak, aby se dalo vyslat něco z obrazů. Nic nemůže tak pěkně zachytit stav této Země a popsat jej jinozemci než třeba onen Cézannův obraz ukazující, že jablko je ve skutečnosti zčásti plod a zčásti planeta.

A nač bychom se měli zeptat? Volba bude těžká a každý bude chtít klást nejdříve tu svoji zvláštní otázku. *Co jsou vaše nejmenší částice hmoty? Mysleli jste si, že jste jedineční? Trpíte nachlazením? Máte tam něco rychlejšího než světlo? Říkáte vždy pravdu? Pláčete?* A tak dále, je toho nekonečná řada.

Možná bychom měli chvilku počkat, až budeme vědět, co chceme vědět, a teprve pak přistoupit k detailním otázkám. Koneckonců bude hlavní hned ta první: *Haló, jste tam?* Když se ukáže, že odpověď je *Ano, nazdar*, měli bychom možná přestat a zamyslit se, dost zhluboka a zdaleka se zamyslit.

Z knihy *Buňka, medúza a já* (Mladá fronta, Praha 1981). Přeložil Miroslav Holub.

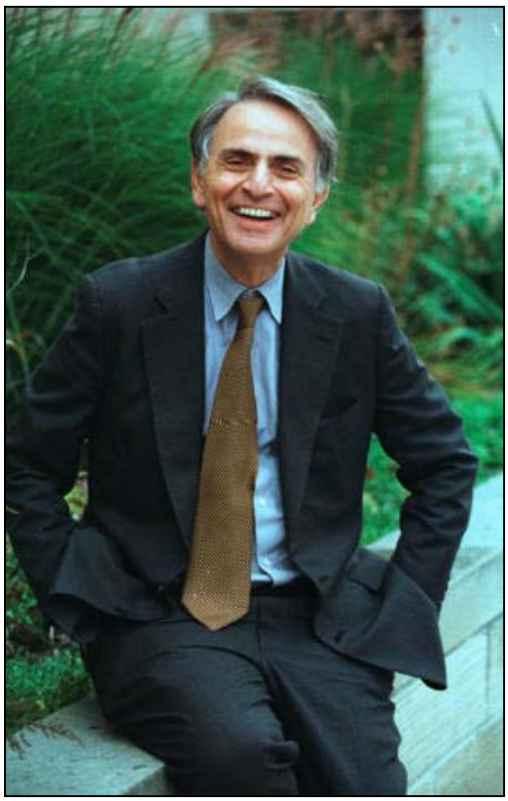


medailon

# Carl Edward Sagan

### (9. 11. 1934 – 20. 12. 1996)

„Právě teď jsme, vážení diváci, dostali do studia zprávu, že v Centru Freda Hutchinsona v Seattlu ve věku 62 let zemřel po dvouleté bitvě o život na zápal plic Carl Sagan. Tento světově uznávaný popularizátor astronomie se v Centru léčil již od roku 1994, kdy lékařské vyšetření odhalilo leukémii. O rok později se zde lékaři pokusili o transplantaci kostní dřeně, kterou mu darovala jeho sestra.“ Asi tak oznámili v pátek dvacátého prosince 1996 na televizní stanici CNN smrt vědce a popularizátora Carla Sagana. V nekrologu se o něm hovořilo jako o ambiciózním, velice sebevědomém a suverénním vědci, který se vzdal výzkumné práce pro její popularizaci. Byl takový doopravdy?



Píše se rok 1934. Evropským kontinentem se jak zhoubný nádor šíří fašismus a celý svět se zotavuje z hospodářské krize. Mnozí upírají svůj zrak k nebi a ptají se, zda tam někde na Marsu, Venuši, Jupiteru, Měsíci či u vzdálených hvězd existuje život, zda není lepší než ten pozemský. A do těchto úvah se devátého listopadu v Newyorkském Brooklynu narodil Carl Edward Sagan.

Studoval na chicagské universitě, kde roku 1956 absolvoval studium fyziky. Doktorát z astronomie a astrofyziky získal o čtyři roky později. Pak jen na krátko působil na Harvardově universitě a poté přešel na universitu Cornellovu. Na níž zůstal po zbytek života, zde také roku 1971 získal titul profesora astronomie a astrofyziky. To ale v čase příliš předbíháme – vraťme se do druhé poloviny 50. let dvacátého století.

V té době Carl Sagan dokončuje svou disertační práci, v níž popisuje projevy skleníkového efektu na Venuši. Při této příležitosti spekuluje o možnosti existence primitivního života v atmosféře planety. A právě tímto argumentem podpořil projekt sondy Mariner 2, která se chystala prozkoumat Venuši. K planetě v té době již mířily sovětské sondy Veněra (nebyly ovšem úspěšné). Projekt Mari-

ner 2 nebyl ani prvním, ani posledním, na kterém se Sagan podílel. Dalo by se říci, že se brzy stal jednou z vůdčích osobností amerických nepilotovaných letů k planetám. Jeho jméno nalezneme v týmech připravujících sondy Mariner, Viking, Voyager i Galileo. Není divu, přistávací modul sondy, která dopravila na Mars vozítko Pathfinder krátce po jeho smrti, byla na počet tohoto velkého vědce přejmenována na *Carl Sagan memorial station*.

Carl Sagan byl vášnivým zastáncem myšlenky, že ve vesmíru nejsme sami. Jistě nás nepřekvapí, že to byl on, kdo prosazoval, aby sonda Viking nesla gramofonovou desku s poselstvím od pozemšťanů. Již dříve ozdobil sondu Pioneer10 plaketou, na které je znázorněna poloha Země ve sluneční soustavě. Tato sonda již opustila hranice naší mateřské soustavy a míří do mezihvězdného prostoru.

Sagan si vybudoval dobrou pozici ve vědě poté, co výzkum ukázal, že Venuše má skutečně velmi horký povrch a Mars je naopak chladnou pouští zvrásněnou pradávnými vodními kanály. Situaci na rudé planetě připodobnil stavu, který by na Zemi nastal po globální nukleární válce. Za přínos při výzkumu planet byl odměněn mnoha uznáními od různých společností: je nositelem medaile NASA za výjimečný přínos vědě a dvou cen za význačnou veřejnou službu; dostal též cenu Konstantina Ciolkovského, kterou mu udělila sovětská federace kosmonautů. Během svého života zastával řadu čelných funkcí v astronomické i geofyzikální komunitě. Dvanáct let byl editorem prestižního časopisu Icarus, který je zaměřen na planetární výzkum.

Mezi jeho přednosti patřila nepochybně schopnost komunikovat s širokou veřejností o výsledcích vědy. Tyto schopnosti naplno uplatnil ve svých televizních inscenacích. V jedné z nich prohlásil: „Výzkum výskytu mimozemské civilizace ve vesmíru je životní otázkou. Především pro pochopení nás samotných a naší historie.“ Ano, Sagan se podílel také na programu hledání cizích civilizací. Součástí tohoto programu je vysílání zpráv o naší existenci pomocí obřích radioteleskopů. Na tyto zprávy jsme nedostali žádnou odpověď – zatím. Ale naznačuje nám to, že život na Zemi může být velice vzácným fenoménem, což samozřejmě zvedá jeho hodnotu. Sagan nad dosavadními neúspěšnými pokusy najít mimozemský život neztrácel naději, jak můžeme poznat z mnoha jeho prohlášení: „Naše úsilí nekončí, budeme život hledat za hranicemi sluneční soustavy a v mezihvězdném prostoru, a pak budeme putovat v temnotách mezi hvězdami.“

Nejznámější Saganovou aktivitou byla bezesporu popularizace astronomie. Svou televizní a publikační aktivitou vnesl do milionů domácností ve Spojených státech i v zahraničí vzrušení z vědeckého poznávání vesmíru. V tomto oboru získal takovou prestiž, že byl považován za jednoho z nejlepších, o čemž svědčí řada cen a ocenění, kterých se mu dostalo. Za svůj seriál *Kosmos* na televizní stanici PBS získal cenu Emmy, neboť jeho pořad měl největší sledovanost v historii popularizačních pořadů. Za populárně vědecké články a knihy obdržel Pulitzerovu cenu. Světově proslulá kniha *Kosmos* (vydaná též česky) byla na seznamu bestsellerů v New York Times po sedmdesát týdnů! Sagan se podílel se svou ženou Ann Druyan jako koproducent na tvorbě filmu *Kontakt* (film byl natočen po jeho smrti společností Warner Brothers, hlavní roli astrofyzičky ztvárnila Jodie Foster).

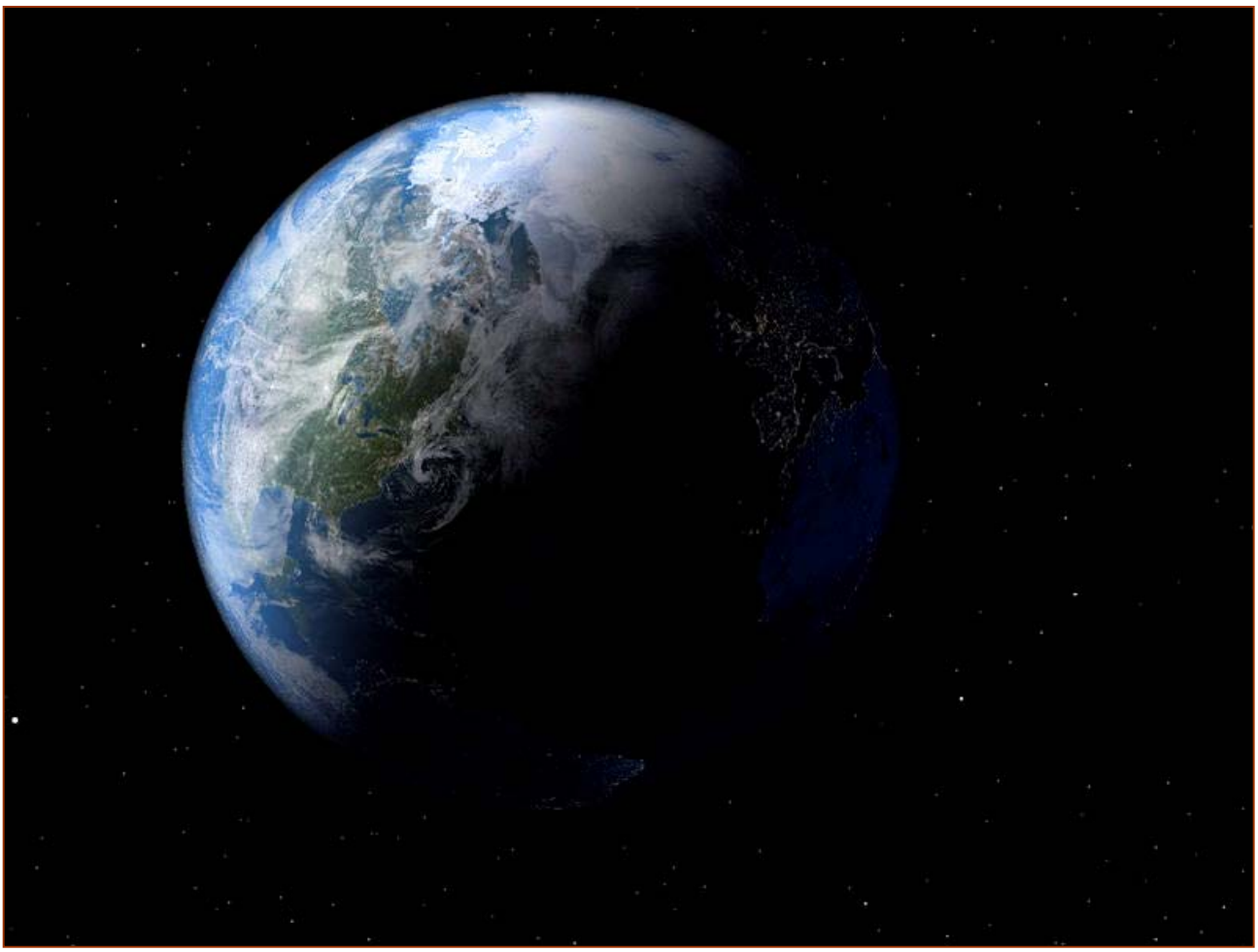
Bohaté dílo Carla Sagana není snadné shrnout do několika vět. Zajímal se o mnoho zásadních problémů. A o nich dokázal veřejnost seznamovat poutavě a s přehledem. Sagan snil o průzkumu cizích světů, životě mimo Zemi, o možných kontaktech s cizími civilizacemi. Podle jeho vlastních slov „je to všechno jako sen... Sen, který se stává skutečností.“

Autorem medailonu je Štěpán Ledvinka.

# 10.3. Domněnka o vzácné Zemi

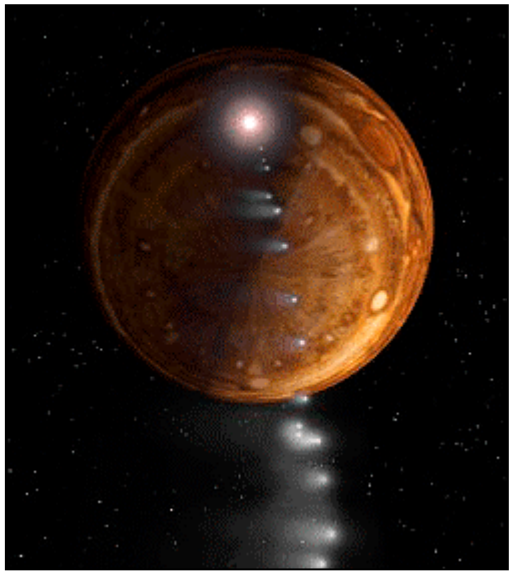
Zásadní otázka, na kterou chce každý přemýšlivý obyvatel této planety získat uspokojivou odpověď, se týká naší Země a života na ní. Byly okolnosti, za nichž zde kdysi vznikl život a posléze se rozvinul až do podoby vyspělé technologické civilizace, natolik obvyklé, že je možné uvažovat o existenci mnoha podobných civilizací? Nebo šlo jen o souhru řady okolností, které nastávají zřídka, takže naše existence v tomto vesmíru je víceméně náhodná? Známe vůbec všechny podstatné okolnosti, které rozhodovaly v minulosti (a rozhodují i nyní) o tom, že Země je obyvatelnou planetou?

Víme, že na naší Zemi se vyskytuje jednoduchý život v podobě mikroorganismů i na velice neobvyklých a naprosto nehostinných místech (*extremofilní mikroorganismy*). Aby se však jednoduché živé organismy mohly rozvíjet do složitějších forem, je zapotřebí, aby se klimatické podmínky



vhodné pro život měnily jen málo a pomalu. Proto je důležité, že trajektorie planet v naší sluneční soustavě jsou od doby jejího vzniku víceméně stabilní (snadno si dovedeme představit, že klima na Zemi by bylo nestabilní, kdyby naše planeta obíhala po výstředné a navíc často se měnící dráze). Zvlášť důležitá je stabilita trajektorií Jupiteru a Saturnu, neboť to jsou nejhmotnější planety. Modelové výpočty ale ukazují, že aktuální situace je pouze jednou z mnoha možných situací. Kdyby Jupiter a Saturn byly poněkud hmotnější než jsou nyní, kdyby byly blíže k sobě nebo kdyby existovala třetí podobně velká planeta jako tyto dvě, byla by celá naše planetární soustava nestabilní. Máme tedy štěstí...

Jupiter hraje v naší sluneční soustavě ještě jednu vysoce důležitou roli: nachází se *vně* pásu terestrických planet, a tak je schopen vychytávat, vychylovat či jinak zamezit častému střetu Země s malými tělesy – planetkami o průměru řekněme 10 kilometrů. Takové se nyní srážejí se Zemí v průměru jednou za 100 milionů roků – viz třeba poslední srážka na rozhraní geologických období křídy a terciéru před 65 miliony roků. Kdyby Jupiteru nebylo, byly by kolize přibližně 10 000krát četnější, tedy jednou za 10 000 roků. Srážky každých 10 000 roků namísto 100 milionů by zcela určitě ničily všechny složitější formy života hned v zárodku. Země by mohla být domovem jen pro bakterie, řasy nebo sinice.

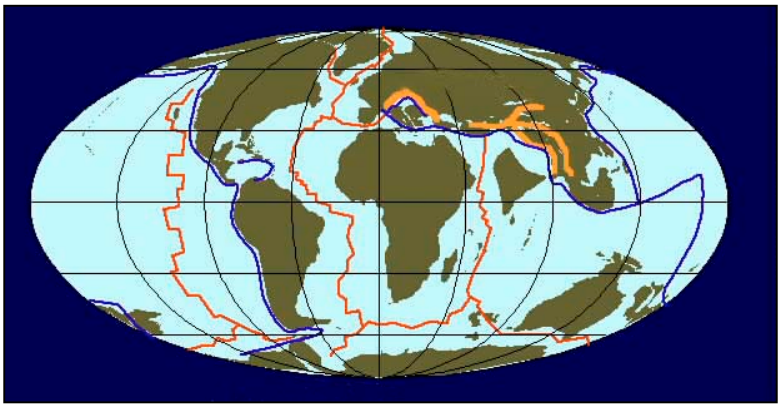


Pád komety Shoemaker-Levy na Jupiter v červenci 1994.

Planetární soustava, pokud se utvoří spolu s hvězdou, musí být tudíž *stabilní*: žádné hmotné planety na výstředných drahách, žádné obří planety těsně u hvězdy, jak známe z mnohých cizích planetárních soustav. Planeta vhodná pro život musí mít hmotnost zřejmě nepříliš odlišnou od té zemské. Bude-li mít větší, obalí se hustou atmosférou Jupiterova typu a v ní život nebude mít dlouhého trvání (plynná atmosféra je silně turbulentním prostředím, nevhodným pro pomalý vývoj živých organismů). Malá planeta zase nemá dostatek energie k udržení geochemických cyklů, bez nichž se dlouhodobě nenastaví stabilní klimatické poměry. Planeta musí být samozřejmě též ve vhodné vzdálenosti od hvězdy (v obyvatelné zóně), aby na ní voda mohla existovat v kapalném stavu.

Konečně je tu řada omezení, týkající se přímo vlastní planety. Planetu musí doprovázet relativně hmotná družice, jinak její rotační osa neudržuje dlouhodobě stabilní směr v prostoru. Nebýt Měsíce, neměla by naše planeta rotační osu mírně skloněnou k oběžné rovině (což způsobila obří srážka, při níž Měsíc vznikl), ale hlavně – sklon rotační osy by se s časem dosti rychle proměňoval (v časové škále statisíců až milionů roků). Tak je tomu třeba u Marsu, který svůj dostatečně hmotný měsíc nemá. Stálý sklon osy rotace zajišťuje nejen pravidelné střídání ročních období ve středních zeměpisných šířkách, ale i stabilní klima kdekoli na zeměkouli. Přesně to je zapotřebí k nerušenému vývoji života na planetě.

Na planetě vhodné pro život musí fungovat proces obdobný tomu, jenž v případě Země nazýváme *desková tektonika*: Tak označujeme neustálý, byť pomalý pohyb bloků kůry po svrchním plastickém plášti zeměkoule. Bloky – jakési kontinenty – se na řadě míst srážejí, v místech střetů se tvoří horstva, jeden blok se podsouvá pod druhý. Jinde se zase kůra rozestupuje.



Schematické znázornění dnešního rozložení velkých kontinentálních desek na Zemi.

Díky deskové tektonice se tvoří kontinentální kůra, poněkud lehčí než oceánská. Vyčnívá nad hladinu oceánů, a tak se na ní mohl uchytit a rozvíjet složitější život. Ale především: tento proces funguje jako *celoplanetární termostat*. Jak už víme, na počátku vývoje planetární soustavy mělo Slunce menší zářivý výkon než má nyní, asi jen 70 procent dnešního. A sluneční výkon se bude zvyšovat i nadále, to platí pro všechny hvězdy. Když ovšem dříve Slunce ohřívalo Zemi méně, musel být na Zemi silnější skleníkový efekt, aby zde bylo dostatečně teplo a oceány nezamrzly. Oxidu uhličitého – hlavního skleníkového plynu – bylo v ovzduší dost, ale vymývaly ho silné deště. Jakmile vodní srážky dopadly na pevninu, vznikaly uhličitanové a hydrouhličitanové ionty, které řeky splavily do oceánů. Tam plankton a jiné organismy tyto ionty pohlcovaly a vytvářely z nich vápencové schránky či ulity. Tak se ze zbytků těchto organismů hromadily na oceánském dně vápencové usazeniny.

Návrat oxidu uhličitého do atmosféry pak zajišťuje právě pohyb kontinentálních desek. V místech, kde se mořské dno i s vápencovými horninami noří do pláště Země, taví se a chemicky rozkládá. Při sopečných erupcích se pak oxid uhličitý znovu navrací do atmosféry. Když se Země hodně oteplí, zvýší se atmosférické srážky a z ovzduší se vymyje více oxidu uhličitého. Následkem toho se skleníkový efekt zeslabí a teplota poklesne [1]). Na druhé straně se vulkanickými procesy do atmosféry navrací přibližně stále stejné množství tohoto skleníkového plynu.

Dlouhodobě je množství oxidu uhličitého ovlivňováno řadou geologických, atmosférických a hydrologických procesů. Až doposud – po celé čtyři miliardy let – se množství oxidu uhličitého v atmosféře měnilo tak, že vždy na naší planetě zachovalo klima vhodné pro život. Možná, že je to jen náhoda.

Desková tektonika funguje pouze na Zemi. Nenajdeme ji na Merkuru ani na Marsu, ba ani na Venuši, i když její rozměry a hmotnost jsou jen nepatrně menší než zemské. Nikdo zatím přesně neví, proč se s deskovou tektonikou setkáváme právě jen na naší planetě. Je to ... jen další náhoda?

Pro úvahy o životě je klíčová pochopitelně *otázka vody*. Na planetě musí být dostatek tekuté vody, ale ... vody musí být tak říkajíc „správné množství“ – protože vodou zcela pokrytá planeta by neumožnila rozvoj vyšších forem živočichů, a planeta bez vody je samozřejmě mrtvým tělesem.

Tento výčet podmínek, za kterých se planeta může stát tělesem vhodným pro rozvoj života, určitě není konečný, ale už tak je dost vysoký. Na první pohled to skoro vypadá, že inteligentní život – kupříkladu pokročilá civilizace našeho typu – ve vesmíru ani nemůže vzniknout. Nicméně jedna určitě existuje.

[1]) Je to klasický případ tzv. *záporné zpětné vazby*.

Vše, co jsme doposud uvedli, nám dává možnost zformulovat jednu dosti závažnou hypotézu – *domněnku o vzácné Zemi* [2]). Ta ve své první části říká: ***Život ve své nejjednodušší podobě (jako jsou mikroby nebo jejich obdoba) může být ve vesmíru značně rozšířen.*** K tomu ale musíme dodat i část druhou: ***Komplexní život (a míníme tím vyšší rostliny a živočichy) se ovšem vyskytuje jen málokde, a možná též pouze na krátkou dobu, protože planety, na nichž by takový život mohl vzniknout a vyvíjet se, jsou ve vesmíru velice vzácné.***

Domněnka o vzácné Zemi je založena na mnoha poznatcích soudobé astrofyziky, geologie či biologie. Nicméně na druhé straně je třeba poznamenat, že to není bezesporná teorie či dokonce definitivní, již „neměnná pravda" – je to pouze domněnka. A ta se bude proměňovat a upřesňovat s dalším vývojem vědy.

[2]) Domněnku o vzácné Zemi popsali Peter Ward a Donald Brownlee v knize Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe

čítanka

# Zdeněk Pokorný: UFO je tady!

V úterý 24. června 1947 začala novodobá éra UFO. Kenneth Arnold, vážený obchodník, při pilotování svého soukromého letadla v blízkosti Mount Rainier ve Skalnatých horách v americkém státě Washington nahlásil, že sleduje devět objektů tvaru disku, které letí ve formaci rychlostí určitě přes 1000 mil za hodinu. Vzhledem k tomu, že Arnold byl též zástupcem šerifa, byla jeho pozorování brána vážně a dostalo se jim publicity. *„Bylo to, jako když házíte talíř přes vodu“,* prohlásil později Arnold – a odtud byl pouhý krůček k termínu, který vzápětí vymysleli novináři a přešel do všech jazyků světa: šlo o *létající talíř*.

Začněme ale popořádku – Kenneth Arnold popsal pozorování ze svého letadla takto: *„Zcela spolehlivě jsem viděl jejich obrysy na sněžném pozadí, když se blížily k hoře. Letěly velice těsně u vrcholků hor, přímo na jiho-jihovýchod podél hlavního hřebenu, letěly jako husy roztažené do řady, ale jako by byly připoutány k sobě.*

*Uletěly přibližně 20 až 25 mil a zmizely mi z dohledu. Během těch tří minut, co jsem je sledoval, tento řetězec předmětů připomínajících talíře a roztažený v délce asi pěti mil lavíroval mezi vysokými horskými vrcholky. Byly to velmi ploché předměty, jako pánve, a téměř jako od zrcadla se od nich odrážely sluneční paprsky. To vše jsem viděl zcela jasně a zřetelně.“*

Arnold usoudil, že rozměry toho, co viděl, mohlo odpovídat asi tak velikosti letadla DC-4, které také proletělo nedaleko jeho stroje. Jejich rychlost Arnold odhadl na 1200 mil za hodinu, ale v tom se asi spletl: kdyby po dobu tří minut, co je Arnold sledoval, urazily oněch 25 mil, pak by rychlost nepřevýšila 500 mil za hodinu; i tak je to závratné číslo.

Pro úkazy, jaké viděl Arnold 24. června 1947 a po něm ve velkém množství mnozí další, se posléze ujalo označení UFO – neidentifikované létající ob-

jekty (*Unidentified Flying Objects* [1]) ). Je to označení sice poněkud zavádějící (proč létající?, proč objekty?), ale to v tuto chvíli ponechejme stranou.

Zprávy o UFO se od té doby staly součástí našeho světa. Vše zvláštní, co sledujeme na obloze a nedokážeme si bezprostředně vysvětlit, je UFO. Zcela v pořádku, jedná se přece o *neidentifikovaný* jev či objekt! Při pozorném pozorování oblohy nad námi určitě dříve nebo později každý z nás uvidí jev, který není s to vysvětlit. Je chvályhodné, že si takto všímáme světa kolem sebe a snažíme se jej popsat.

Jenže právě popisování neobvyklých jevů na obloze je velmi obtížné. Není totiž vůbec snadné pozorovat a pak správně vylíčit to, co jsme viděli. To dávno poznali kriminalisté, mající bohaté zkušenosti s popisy, které jim poskytují svědci trestných činů. V našem případě ale nejde jen o popis vzhledu, ale času, vzdálenosti, rychlosti... Například vzdálenost jevu: je-li větší než asi 50 až 100 metrů, nemůžeme ji v principu spolehlivě určit. Zjistíme pouze úhlový rozměr objektu či jevu. Také úhlovou rychlost, s jakou se UFO pohybuje po obloze, udáváme velice nespolehlivě, protože čas plyne pro každého z nás v různých situacích jinak rychle. Zda neobvyklý jev vydává zvuk nebo ne, může být ovlivněno směrem větru, o kterém obvykle nevíme vůbec nic. Nejsme-li opravdu velice *kritickými* pozorovateli, tvrdíme často i to, co jsme neviděli, ale jen si domýšlíme (často podvědomě).

Z praxe víme, že málo zkušení pozorovatelé (a takoví jsme prakticky všichni) za UFO považují nejčastěji jasnou planetu nebo hvězdu mihotající se nízko nad obzorem, halové jevy v ovzduší, oblaka zespodu nasvětlená Sluncem, ba i vysoko letící letadlo. V poslední době přibývají světelné úkazy, vznikající rozptylem světla v mracích při ozařování lasery, kterými například při letních diskotékách svítí diskžokejové do nebe. Velmi mnoho rozruchu vždy způsobí skutečně *kosmická* událost – nejčastěji zánik družice nebo nějaká operace při vypouštění raket. Klasickým příkladem je UFO z 3. května 1994, pozorovatelné z celé Evropy. Šlo o vyprazdňování zbytku paliva vyhořelého stupně vojenské rakety. Start rakety měl být utajen, jenže nikdo si neuvědomil, že zbytky paliva budou osvětleny Sluncem a že nad Evropou, kde se už setmělo, bude v tu dobu nádherně jasno a hodně všímavých pozorovatelů. Mimochodem – v podobných případech, které sledovaly stovky laiků, se jasně ukázalo, jak jsou individuální popisy svědků nejasné, nepřesné a nespolehlivé.

Dobrá – řekněme, že 95 procent případů UFO nějak vysvětlíme. Budou to zvláštní mraky, zanikající družice, vzdálená letadla... Co však se zbylými pěti procenty? Mnohá UFO z této kategorie jistě sledovali i zkušení pozorovatelé, tato pozorování nelze tedy bagatelizovat. *Toto jsou skutečné důkazy, že jsme navštěvováni mimozemšťany!*

Pozor: zde je ostrý logický skok! V pěti procentech případů UFO nevíme, oč jde. Z celé škály možných (ale nedokázaných) vysvětlení vybíráme ihned pouze jediné, kterému *chceme věřit* – jde o mimozemšťany. Proč právě tento výběr? Cožpak jiná možnost již *doopravdy* není?

Kenneth Arnold za onoho červnového letu pozoroval úkaz, pro který neměl pohotové vysvětlení. Popsal jej, jak nejlépe dovedl. Teprve pak přišly spekulace. Co tedy můžeme v tuto chvíli každému doporučit? Sledujte pozorně svět kolem sebe, pozorování neobvyklých úkazů na nebi za to jistě stojí. Až jednou zase uvidíte *pravé UFO* a nikdo vám nevysvětlí, oč šlo, jistě si můžete pohrávat také s myšlenkou, že vás sledovala bytost ze vzdáleného vesmíru. Jen si prosím nemyslete, že je to jediné či nejpravděpodobnější vysvětlení a že právě vaše pozorování je oním tak potřebným důkazem.

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

[1]) Čti: *ánidentifájd flajing obdžikts*.

čítanka

# Steven Weinberg: Náš vesmír?

Lidé nemohou odolat pokušení věřit, že lidský život není víceméně směšný výsledek řetězce náhod sahajícího zpět až k velkému třesku, ale že jsme byli nějak do vesmíru zahrnuti od počátku. Když jsem toto psal, byl jsem v letadle deset kilometrů nad zemí nad Wyomingem a vracel jsem se domů ze San Franciska do Bostonu. Země dole vypadala velmi mírně a klidně – tu a tam načechrané mraky, sníh zrůžovělý od západu Slunce, silnice táhnoucí se krajinou od jednoho města ke druhému. Je velice těžké si uvědomit, že toto všechno je jen malá část ohromně nepřátelského vesmíru. Je dokonce ještě těžší si uvědomit, že tento současný vesmír se vyvinul z nepopsatelně neobvyklých podmínek v minulosti a směřuje k zániku nekonečnou zimou nebo nesnesitelným teplem v budoucnosti. Čím více vesmíru rozumíme, tím se nám zdá nesmyslnější.

Jestliže ale není žádná útěcha v plodech našeho výzkumu, je přinejmenším nějaká útěcha ve výzkumu samém. Muži a ženy nejsou spokojeni s pohádkami o bozích a obrech a nechtějí omezit svoje myšlení pouze na běžné denní záležitosti. Staví také dalekohledy, družice a urychlovače, nekonečné hodiny vysedávají za svými stoly a hledají smysl v údajích, které nashromáždili. Úsilí pochopit vesmír je jednou z velmi mála věcí, která zvedá lidský život trochu nad úroveň frašky a dává mu něco z krásy tragédie.

Z knihy *První tři minuty* (Mladá fronta, Praha 1983, str. 128). Překlad: Michal Horák.

# 10.4. Hvězdářovy jistoty a otazníky

Na závěr se pokusme o jisté ohlédnutí zpět a shrňme do pár bodů, co astronomové již poznali a čemu dobře rozumějí. Současně alespoň stručně uveďme dosud nevyřešené problémy, jež se jistě stanou v nedaleké budoucnosti předmětem intenzivního výzkumu. Astronomové, podobně jako všichni ostatní přírodovědci, určitě nemohou tvrdit, že vše podstatné o našem vesmíru již znají. Ostatně z našeho výčtu budoucích úkolů jasně vyplyne, že o důležité, dosud nevyřešené problémy nouze nebude.

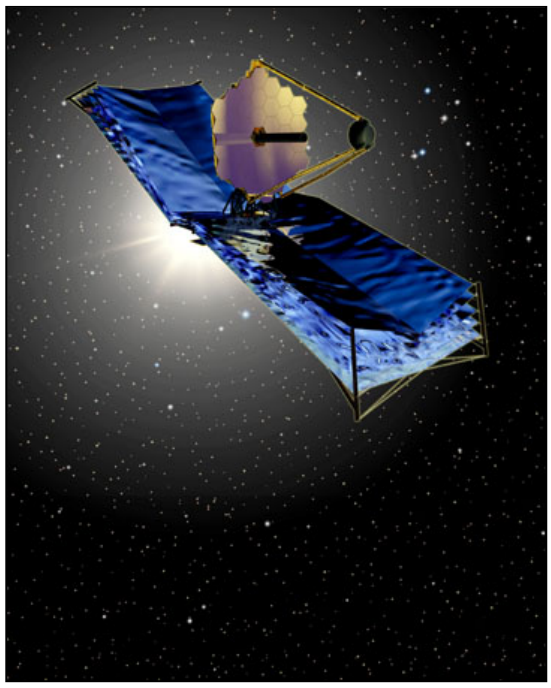
Většina zásadních astronomických objevů přišla ve 20. století [1]). Tehdy také nastaly jisté okolnosti, jež mohou přijít pouze jednou. Především: astronomie se stala tak říkajíc *„vševlnovou“*. Studium kosmických objektů ve všech oborech elektromagnetického spektra nám dává šanci mnohem přesněji a rychleji pochopit, co se v daném místě vesmíru odehrává. Možnost prozkoumat záření

Square Kilometre Array – projekt radioteleskopu na ploše 1 km$^2$ v Austrálii, začátek stavby 2010.

[1]) Ani v tomto směru nebyla astronomie výjimkou mezi ostatními přírodními vědami.

všech frekvencí – od záření gama až po rádiové – byla ovšem podmíněna dalším neopakovatelným zvratem, ke kterému došlo ve druhé polovině 20. století: *nástupem kosmonautiky*. Nezapomeňme však na ještě jednu událost, která natrvalo poznamenala astronomický výzkum (a samozřejmě nejen astronomický): je to *rozvoj počítačů*, vznik a masové rozšíření počítačové sítě Internet. Příklady netřeba uvádět, vidíme je doslova na každém kroku. Ve 21. století se nepochybně dočkáme toho, že Internet přestane být výlučně pozemskou záležitostí, ale zahrne též Měsíc, Mars...

Soudobý astronomický výzkum neustále potvrzuje zkušenost, kterou mají přírodovědci již po generace: nové, převratné výsledky jsou podmíněny novou technikou a novými postupy. Ani sebedelší disputace, vedené třeba i nejvěhlasnějšími odborníky, nepřinesou nové poznatky, nemají-li oporu v pozorování nebo experimentu. Velké objevy přicházejí vždy krátce poté, kdy byl provozu uveden nějaký nový a výkonný přístroj. Co všechno astronomové objeví pomocí tohoto skvělého zařízení? Tak nějak se v roce 1948 při slavnostním zahájení provozu pětimetrového dalekohledu na Mount Palomaru, tehdy největšího na světě, zeptali novináři proslulého amerického astronoma Edwina Hubbla. Ten jim pohotově odpověděl: „Očekáváme, že nalezneme něco, co jsme vůbec neočekávali.“



Kosmický dalekohled budoucí generace.

V současné době můžeme do seznamu, označujícího dobře prozkoumané astronomické problémy, zařadit určitě tyto:

*– struktura vesmíru v našem bezprostředním okolí (sluneční soustava, Galaxie, místní skupina galaxií, blízké kupy galaxií – rozložení objektů, dynamické vlastnosti soustav);*
*– podstata většiny jevů ve vesmíru, které lze sledovat běžnými astronomickými přístroji;*
*– zákonitosti vývoje hvězd a případně i planet;*
*– obecné zákonitosti vývoje našeho vesmíru od velkého třesku do přítomnosti i budoucnosti.*

Nikdo nepředpokládá, že by se tyto astronomické poznatky proměnily *zásadním způsobem* (i když korektury „v detailech“ probíhají neustále), takže rychle pronikají až do učebnic a určitě není ztrátou času se s nimi důkladně seznámit. Na druhé straně existuje i soupis otevřených astronomických problémů, dosud spolehlivě nevyřešených, často jen povrchně pojmenovaných. Zde jsou některé z nich:

*– Jaká je detailní struktura a historie vývoje těles sluneční soustavy? Jak to souvisí s našimi poznatky o cizích planetárních soustavách? Odpovědi musí být založené na výzkumu „na místě samém“ (ve sluneční soustavě) a studiu exoplanet;*
*– Jsme ve vesmíru doopravdy sami? Nadále se musí hledat mimozemský život (byť ten nejjednodušší možný), ale i nezvratné důkazy, jež by potvrdily nebo vyvrátily existenci mimozemské inteligence;*
*– Jaký byl náš vesmír těsně po velkém třesku? Proč vůbec k němu došlo? Co určilo vlastnosti vesmíru, který se z něj zrodil? Byl velký třesk opravdu počátkem vesmíru? A když ne, co bylo předtím?*
*– Z čeho se skládá temná hmota a temná energie, jež tvoří převážnou část našeho vesmíru?*

Oba seznamy jsou z pochopitelných důvodů neúplné a jen heslovité. Nic ovšem nebrání tomu, aby si každý sestavil „svůj“ soupis již vyřešených i dosud zcela neobjasněných astronomických problémů. Taková námaha není samoúčelná: získáváme tím tolik potřebný nadhled nad věcí i inspiraci pro další studium.

Na úplný závěr kurzu ***Váš průvodce vesmírem*** poznamenejme, že pro astronomii je typická ještě jedna pozoruhodná okolnost: astronomický výzkum není vyhrazen pouze profesionálům, ale též amatérům a studentům. Mám na mysli ty, kteří po vyškolení dobrovolně a seriózně shromažďují data o těch kosmických objektech či jevech, jež jsou početné (nebo naopak velmi vzácné), aby po prvotních náznacích, že se jedná o zajímavý případ, se na jejich sledování mohli zaměřit ti, kteří disponují přístroji a technikami, jež amatéři nemají. Věřme, že tento atribut zůstane astronomii zachován i nadále.

čítanka

# Timothy Ferris: Co je a co není věda

Věda není statický soubor dogmat, kde by odchýlení od některého z nich vedlo k ceremoniální ztrátě epolet před nastoupenou jednotkou vědců. Je to systém výzkumných činností se zabudovanou pozitivní zpětnou vazbou, v němž chyby – kterých se vyskytne, pochopitelně, velmi mnoho – jsou dříve nebo později identifikovány vhodnými experimenty nebo vhodnější analýzou. Věda se rovněž buduje „odspoda nahoru", takže k důležitým výrokům se nedospívá *sui generis*, ale na základě dedukce z mnoha dílčích případů. V důsledku toho je věda nejen únavně detailní, ale také velmi tvárná. Vědecké poznatky, dokonce i ty nejimpozantnější, obvykle klopýtají do světa obtíženy omyly, kterých se musí pracně zbavit, než se mohou doopravdy vznést. Postrádají chlácholivou jistotu jakoby zjevených náboženských a pseudovědeckých výroků, které nepřipouštějí žádných omylů. Ale jsou živé a uchřadnutí jedné větve nějaké teorie ještě neznamená ohrožení teorie jako celku.

Z knihy *Zpráva o stavu vesmíru* (Aurora, Praha 2000), přeložili Jiří Adam a Dagmar Adamová.

# 10. Vesmír plný otazníků

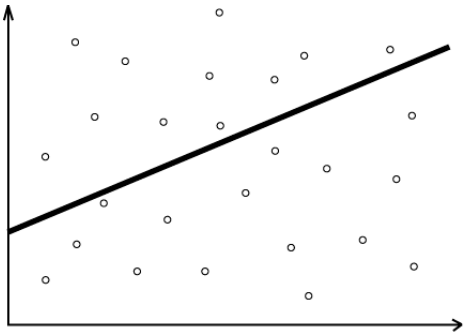
## citát

***Nejzávažnější úlohy v astrofyzice***

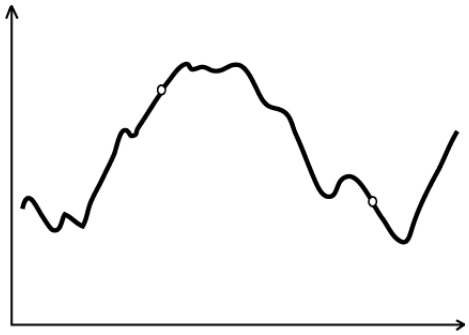
*Podle význačného francouzského astronoma Jean-Claude Peckera spočívá astrofyzikální výzkum v podstatě v řešení dvou základních úloh, a to:*

*1. Jak proložit teoreticky odvozenou lineární závislost shlukem rovnoměrně rozložených bodů, které jsme získali jako výsledek pozorování (obr. 1).*

*2. Jak vést složitou teoreticky odvozenou křivku tak, aby vyhovovala jediným dvěma bodům, jež nám poskytuje pozorování (obr. 2).*



Obr. 1.



Obr. 2.

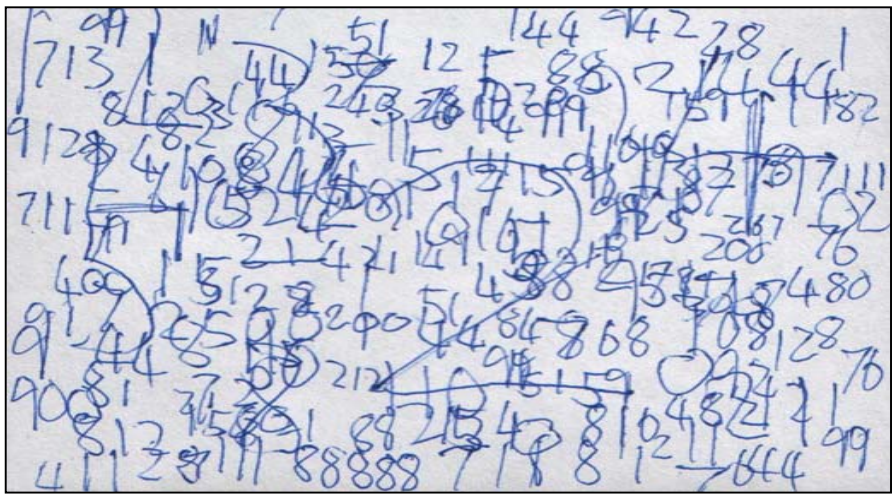
Uveřejněno v Kosmických rozhledech 1971, str. 73–74.

speciální otázka

# Ne „přesná čísla“, ale správný odhad!

Mnohem důležitější než znát nazpaměť „přesné“ hodnoty různých veličin je umět si v paměti vybavit jejich řádovou velikost (tedy stovky, tisíce, miliony, desetiny ... samozřejmě vždy s uvedením nějaké jednotky). Nyní si ještě jednou ověřte, zda jste si během našeho astronomického kursu tuto schopnost dostatečně natrénovali. Na otázky odpovídejte tak, že uvedete vždy řádový výsledek (např. $10^{-2}$ m, $10^{6}$ let, ...). Zmýlit se můžete nanejvýš o jeden řád.

1. Jak mnoho (v procentech) se mění vzdálenost Země od Slunce během roku?
2. Jak mnoho (v procentech) se mění vzdálenost Měsíce od Země během jedné lunace, tedy např. od jednoho novu k následujícímu?
3. Kolik hvězd lze spatřit na temné bezměsíčné obloze pouhýma očima?
4. Kolik atomů vodíku tvoří naše Slunce?
5. Kolik roků trvalo (nanejvýš) utváření planet z prachových zárodků až po tělesa dnešních rozměrů?
6. Jaký je rozměr jádra (v metrech) běžné komety?
7. Jakou rychlostí (v km/s) se obvykle střetávají malá meteorická tělíska se Zemí?
8. Jaká je hustota látky (v kg/m$^3$) v bílém trpaslíku?
9. Jaký průměr (v mm) mají objektivy největších dodnes používaných astronomických refraktorů?
10. Hoření vodíku v jádru je nejdelší fází ve vývoji každé hvězdy (nepočítáme-li pak již „neaktivní“ vývojovou fázi bílého trpaslíka, která postihne většinu hvězd). Nicméně její délka závisí silně na hmotnosti hvězdy. O kolik řádů rychleji probíhá u hvězd o hmotnosti 5 slunečních hmotností oproti hvězdám, které jsou stejně hmotné jako Slunce?



speciální otázka

# Listujeme v astronomické encyklopedii

Otevřeli jsme jeden z mnoha výkladových astronomických slovníků hned na první straně a začetli jsme se do prvních hesel:

*aberace, absorpce, afel, akrece, anihilace, apastron, apogeum, apsidy, aspekt, astronomická jednotka, azimut ...*

Kromě toho, že všechna hesla začínají na písmeno **a**, spojuje *čtyři* z nich přece jen hlubší souvislost. Najdete tato hesla? A co je vlastně spojuje?

## čítanka

*Úvodem této čítanky drobné doplnění: zprávu mimozemšťanům o nás, že tu jsme, jací jsme, co umíme a oč usilujeme, můžeme zaslat kupříkladu na rádiových vlnách formou číslic ve dvojkové soustavě (taková zpráva, která byla ovšem míněna jako happening při příležitosti oslav dokončení rekonstrukce radioteleskopu v Arecibu, byla odeslána v listopadu 1974 směrem ke kulové hvězdokupě v Herkulu). Nabízí se též možnost odeslat poselství v podobě důmyslného piktogramu, který s sebou ponesou kosmické sondy, opouštějící sluneční soustavu. Takové sondy byly zatím čtyři: Pioneer 10 a 11 a Voyager 1 a 2. Právě o těch posledních je naše čítanka.*

# Zdeněk Pokorný: Poselství pozemšťanů(m)

Člověk se rád předvádí, chvástá a chlubí, velice rád se chlubí. Je to snad vlastní každému živému tvorovi. Chlouba lidstva je i v poselství, které dvě kosmické sondy Voyager nesou s sebou v podobě pozlacených měděných disků, jež jsou vlastně unikátními gramofonovými deskami. Na deskách je zachyceno opravdu to nejlepší, čím se tato civilizace může honosit: jsou tu úryvky z Beethovenovy Osudové symfonie, hudba geniálního Bacha, Mozarta, Stravinského, folklorní písně z Peru, Austrálie, Bulharska i Senegalu, melodie rokenrolové i džezové.

Do digitální podoby je zakódováno též 116 obrázků a fotografií. Jsou zde snímky neporušené přírody i podivuhodných architektonických výtvorů člověka, záběry lidí při práci a odpočinku. Klid a mír dýchá z těchto obrázků.

Proč ale na deskách chybí lomoz bitev, exploze bomb, staccato kulometů a sténání vražděných? Proč tu nejsou obrázky s pověstným atomovým hřibem, s mrtvou „měsíční“ krajinou v místech, kde ještě nedávno existovala svěží příroda? Proč tu nejsou záběry z úděsné likvidace tropických pralesů? Nebo pohledy na bombami rozbité historické stavby a hromady mrtvol v koncentrácích? Vždyť i to je (bohužel) obraz naší planety a svědectví činnosti lidí.

Chápu – člověk se chce ukázat v nejlepším světle. Nechce vystupovat jako barbar. Vždyť hledá své sousedy. Ale možná zatím poznává jenom sám sebe.

Z knihy *Příběh nesmrtelných poutníků* (Rovnost, Brno 1995).

speciální otázka na závěr

# Velké astronomické události

Není snadné vyznat se v dějinách natolik dobře, abychom vždy a za všech okolností správně zařadili nějakou historickou událost do souvislostí. Často žasneme, že některé – podle nás už dávné – objevy či události jsou záležitostí velice mladou (a nebo zase naopak). Zkrátka: co jsme nezažili sami, zařazujeme na časovou osu obtížně, je to mnohdy jen záležitost paměti. A tak si ji vyzkoušejme!

V levém sloupci je uvedeno deset velkých astronomických událostí, v pravém jsou pak uvedena očíslovaná data, seřazená chronologicky. Každé datum odpovídá nějaké události z levého sloupce. Vaším úkolem je provést správné datování. Přečtěte si proto, o jakou astronomickou událost se jedná; z druhého sloupce vyberte vhodný časový údaj (datum) a pořadové číslo, které je uvedeno u tohoto data, zapište do čtverečku.

| | | | |
|---|---|---|---|
| ☐ | byly objeveny kvasary | 1. | 1.století n.l. |
| ☐ | změřeny první paralaxy hvězd | 2. | 1602–1618 |
| ☐ | bylo objeveno reliktní záření | 3. | 1663 |
| ☐ | objevena první exoplaneta, obíhající kolem hvězdy slunečního typu | 4. | 1837–1839 |
| ☐ | první doložený popis zrcadlového dalekohledu (reflektoru) | 5. | 1918–1924 |
| ☐ | první úspěšná radiolokace Měsíce | 6. | 1929 |
| ☐ | uveřejněna první práce o „úprku galaxií“ (rozpínání vesmíru) | 7. | 1946 |
| ☐ | Johannes Kepler formuluje zákony pohybu planet | 8. | 1963 |
| ☐ | zveřejněna učebnice astronomie, nazývaná často *Almagest* | 9. | 1965 |
| ☐ | vychází první moderní katalog spekter hvězd *The Henry Draper Catalogue* | 10. | 1995 |

Poté, co jste takto zařadil(a) k datům všechny události, proveďte vyhodnocení. Správné pořadí je uvedeno na konci této kapitoly. Pokud jste přiřadili k dané události správný časový údaj, je vše v pořádku – nedostáváte žádný trestný bod. Pokud jste se spletl(a) o jeden řádek (dopředu nebo dozadu v čase), dostáváte 1 trestný bod, omyl o dva řádky znamená 2 trestné body atd. Sečtěte všechny body.

Zde je celkové hodnocení:

*0 až 3 trestné body:* Skvělý výsledek! Spolehlivě víte, kdy se co v astronomii událo.

*4 až 6 trestných bodů:* Máte docela správný přehled o tom, co se kdy v astronomii stalo.

*7 a více trestných bodů:* Tento výsledek příliš dobrý není. Buďto jste se párkrát spletl(a) pořádně, nebo jste jen hádal(a) a prohádal(a). Můžete to ale snadno napravit: vyhledejte si kapitolu 1.1. a začněte znovu, pěkně od začátku....