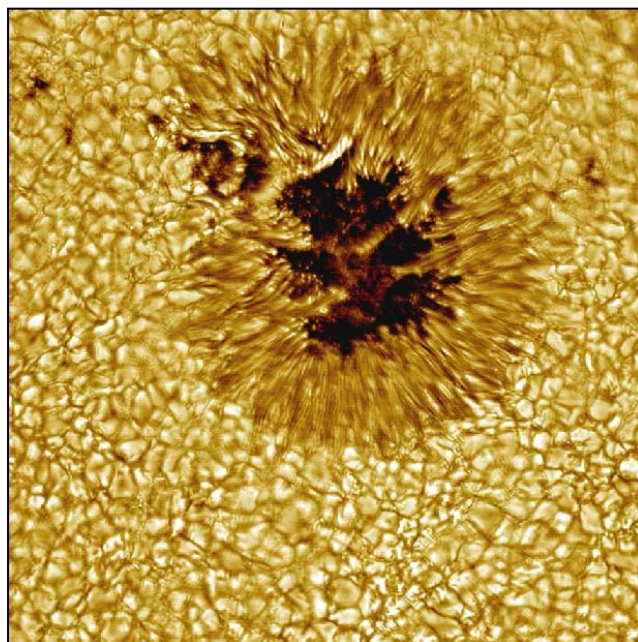


### 6.1. Anatomie hvězdy

**H**vězdy jsou gravitačně vázané objekty, složené z vysokoteplotního plazmatu. Už z toho je zřejmé, že se s pojmem *plazma* musíme seznámit důkladněji <sup>1)</sup>. 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 *řidké*, 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).



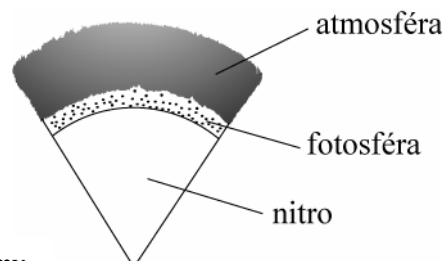
Malá část sluneční fotosféry se skvrnou na snímku, který byl pořízen vakuovým věžovým teleskopem observatoře Sacramento Peak (foto: T. Rimmele, M. Hanna/AURA/NOAO/NSF).

<sup>1)</sup> Několik informací k původu slova *plazma*: pochází z řečtiny, kde plasma je tvoření, výtvar, 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).

## 6. Ze života hvězd

### 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:

	<i>tloušťka:</i>	<i>hustota:</i>
Slunce	200 km	$3 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} *$
bílí trpaslíci	řádově metry	$100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
obří a veleobří	řádově poloměry Slunce	neobyčejně nízká

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

### Chemické složení Slunce

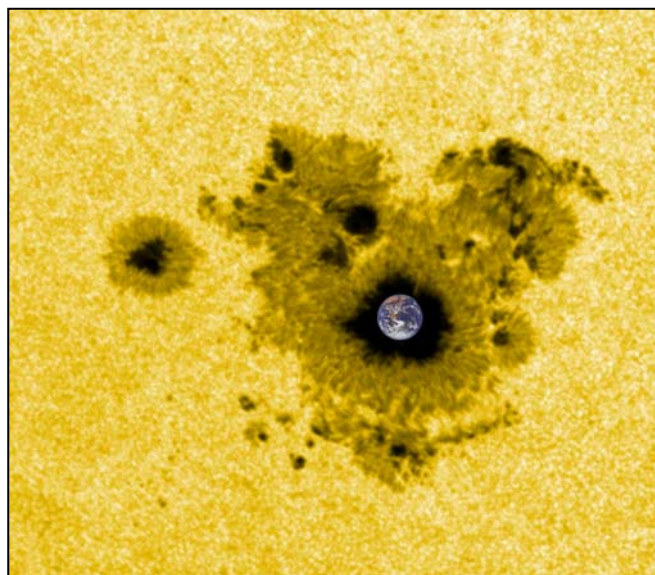
Chemické složení Slunce můžeme považovat na typické pro naprostou většinu hvězd. Zde uvádíme, kolik atomů příslušného prvku připadá na jeden milion atomů vodíku. Toto chemické složení je charakteristické pro téměř celou hvězdu s výjimkou nevelké oblasti kolem středu, která je dotčena probíhajícími jadernými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

<i>Prvek:</i>	<i>Množství:</i>
vodík	1 000 000
helium	85 000
kyslík	660
uhlík	330
dušík	91
neon	83
železo	40
křemík	33

### Anatomie Slunce

#### *Skvrny pouhýma očima*

Běžnými dalekohledy, vybavenými filtry, projekčním zařízením nebo speciálním okulem 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*

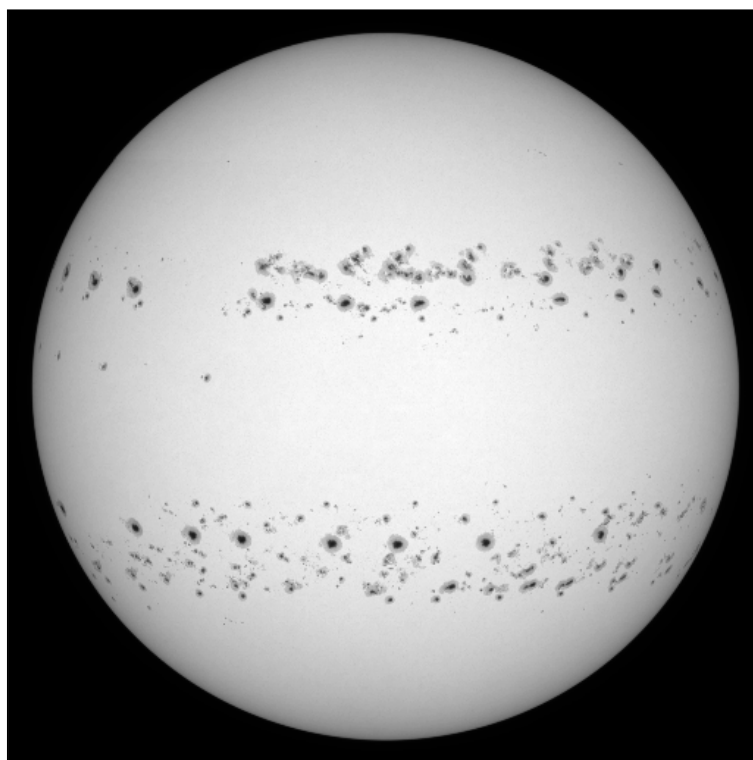
V mnoha náboženstvích starověku představovalo Slunce nejvyššího boha. Byl to symbol života, síly a dokonalosti. Není možné, aby takto pojatý symbol vykazoval vady, a tmavé sluneční skvrny by takovými vadami bezpochyby byly. Víme však, že sluneční skvrny můžeme spatřit i bez dalekohledu. Cožpak si jich 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 nevyšloval), 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***

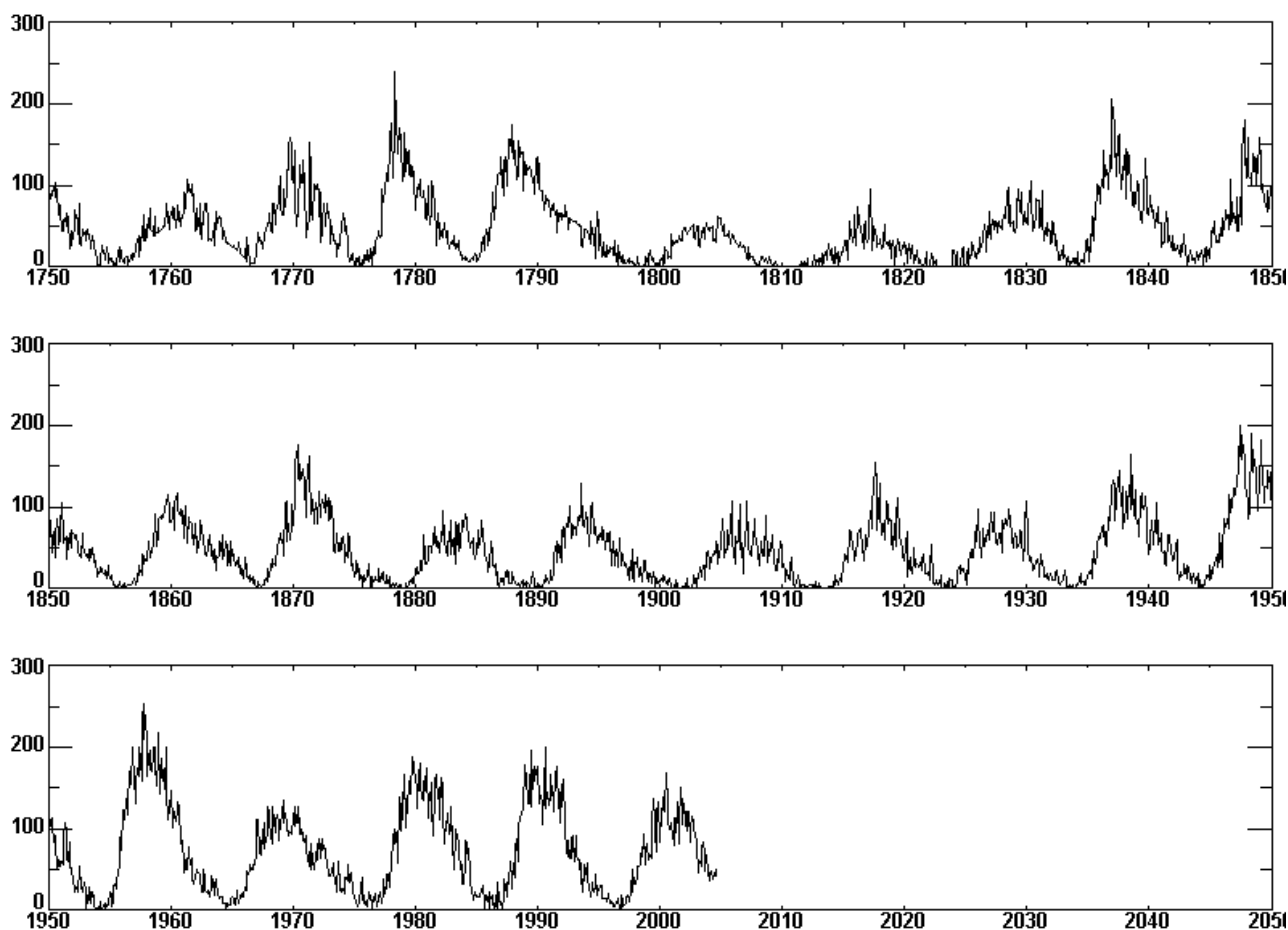
Případy, kdy na Slunci nespatříme ani jedinou skvrnu, jsou poměrně vzácné i v dobách, kdy skvrn na Slunci bývá poskrovnu. Nicméně na konci 19. století upozornili německý astronom Gustav Spörer a anglický sluneční fyzik Edward Maunder, že do roku 1700 se vyskytla údobí trvající desetiletí, kdy v literatuře 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

## 6. Ze života hvězd

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**

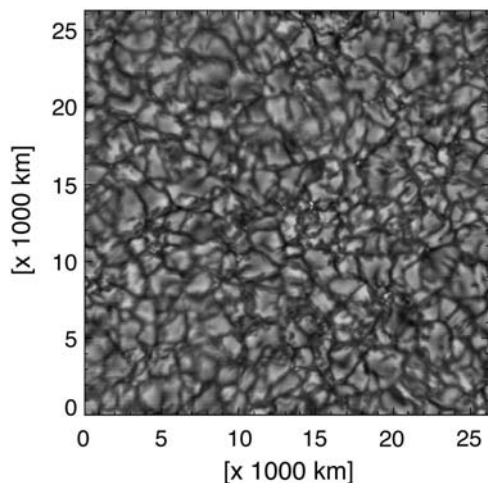
O okrajovém ztemnění hvězd jsme se zmínili již v kapitole 4.2. Zde si tento jev znovu připomeňme – je nápadný, takže už při letném pohledu do dalekohledu a na každém snímku Slunce si ho jistě povšimnete. Sluneční disk je na okrajích ztemnělý proto, že se na okrajích díváme do menší hloubky než ve středu 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 vzešlých 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

## 6. Ze života hvězd

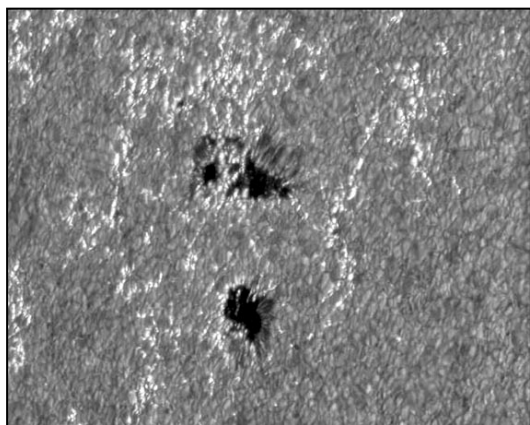
směrem k nitru Slunce. Sluneční fotosféra se tedy neustále proměňuje, životnost takové jedné granule bývá 6 až 8 minut.



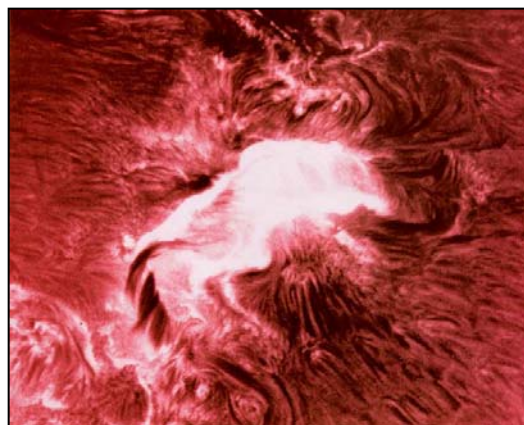
Sluneční granulace i s uvedením měřítka. Foto: T. Rimmele (NSO/AURA/NSF).

### **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 pochoděň.



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-

## 6. Ze života hvězd

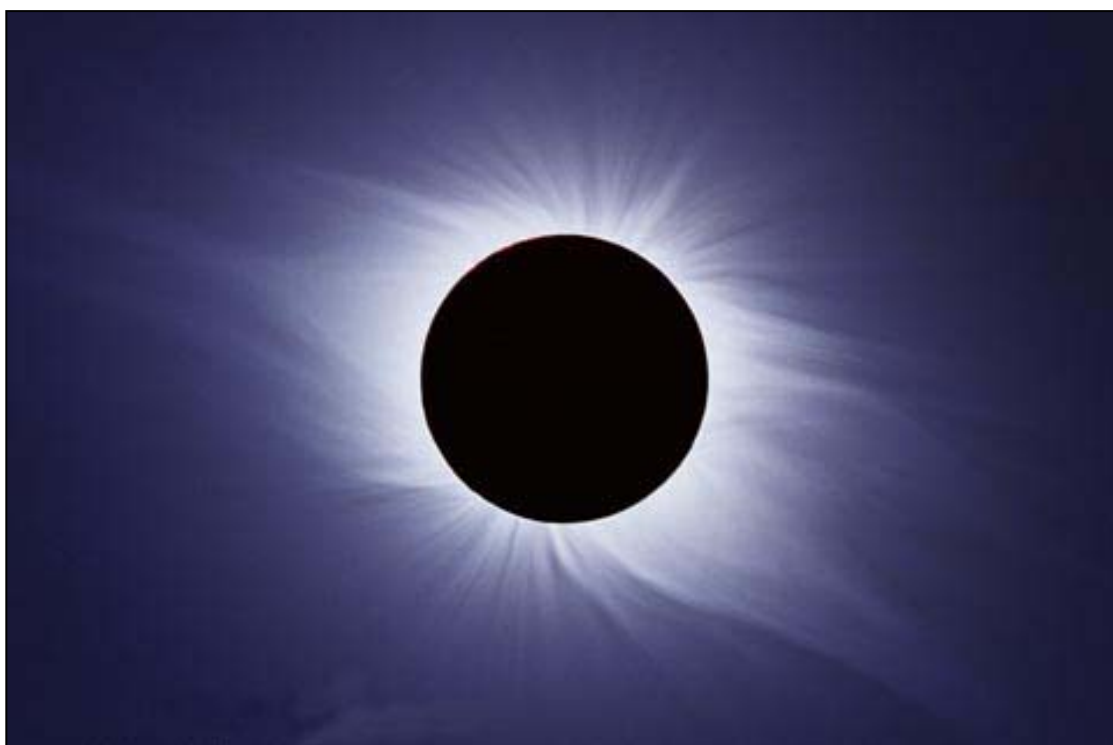
---

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 směřované, 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“.

## 6. Ze života hvězd

### Co je to model?

Toto slovo přírodovědci používají velmi často, a vůbec tím nemyslí něco jako plastickou 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.

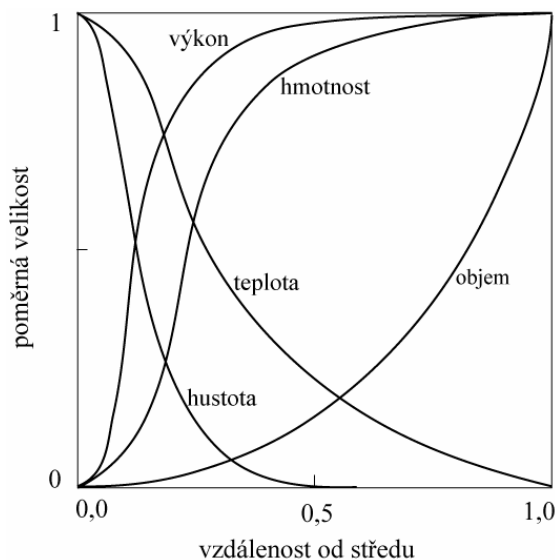
A k čemu je takové modelování dobré? Model může naznačit jevy, vlastnosti i souvislosti, které přímo z pozorování neplynou. To jistě ovlivní další strategii výzkumu; uvědomme si však, že ve všech případech nakonec rozhodující slovo mají *fakta*, odvozená z pozorování nebo experimentu.

### Proč se hvězdy nezhroutí?

Jednotlivé částice tvořící hvězdu na sebe působí gravitační silou. *Gravitace* vytváří z hvězdy jednotlý 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 *vztakovou*<sup>2)</sup>.

*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).



<sup>2)</sup> Obvyklá školácká chyba: hvězdy se nezhroutí proto, že proti gravitační síle působí *tlak* (plynu). Hloupost! Nejde o tlak, ale o rozdíl (gradient) tlaků, *vztakovou 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*.

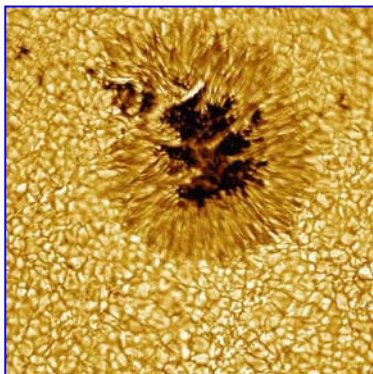
Dodejme, že v některých fázích vývoje hvězd se hustota látky zvětší natolik, že částice spolu začnou významně interagovat i v době mezi vzájemnými srážkami významně se přitom uplatní efekty plynoucí z fyziky subnukleárních částic. Říkáme, že taková látka *degeneruje*<sup>3)</sup>. Elektronově degenerovaný 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.

---

<sup>3)</sup> 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  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

**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?

## 6. Ze života hvězd

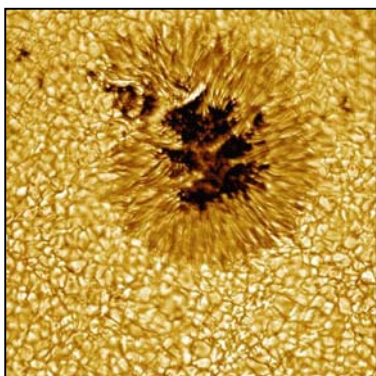
---

**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.

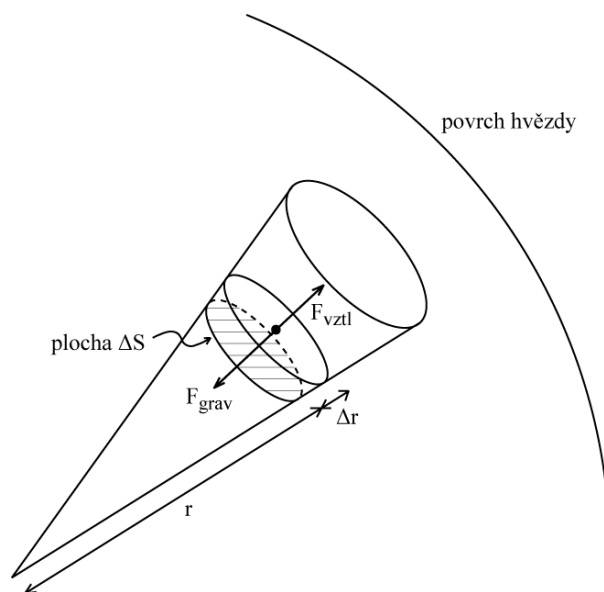


doplňěk

### 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  $\rho(r)$ <sup>1)</sup>, 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

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

<sup>1)</sup> Tímto zápisem naznačujeme, že hustota  $\rho$  je funkcí vzdálenosti  $r$ , tedy mění se v závislosti na velikosti  $r$ .

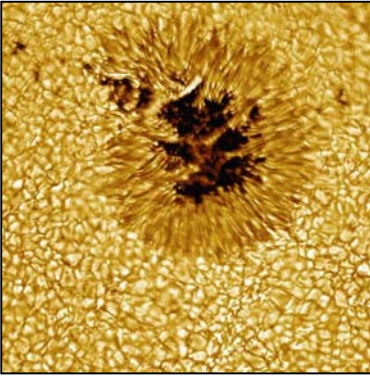
## 6. Ze života hvězd

---

(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 <sup>1)</sup>

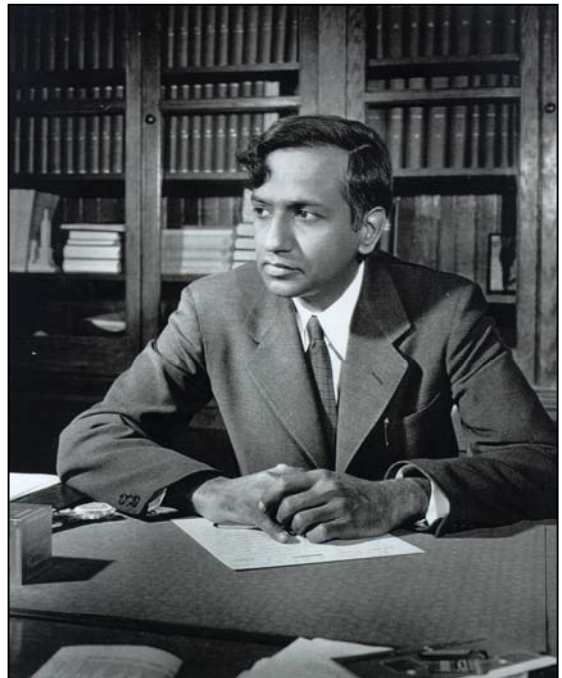
(19. 10. 1910 – 21. 8. 1995)

Vážený přítelé, dovoluji 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. Eddingtonovy argumenty týkající se konečného stadia hvězd nezahrnovaly výsledky speciální teorie relativity a kvantové mechaniky (v té době se překotně rozvíjející).



---

<sup>1)</sup> Čti: čandrasek(h)ar.

## 6. Ze života hvězd

---

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.

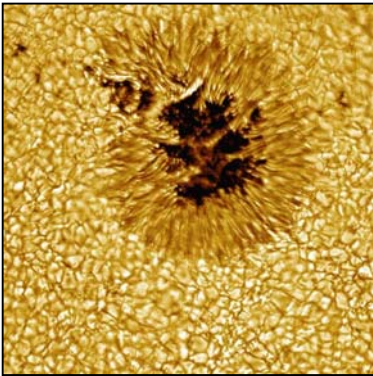
Chandrasekhar během své dlouhé a plodné vědecké kariéry několikrát opustil svůj původní obor, aby se mohl věnovat i jiným oblastem astronomie. Svědčí o tom monografie, které stále slouží jako základní učebnice v oboru: o přenosu energie v nitrech hvězd, o dynamice uvnitř hvězdokup (pohyb hvězd uvnitř 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. Ze života hvězd

---



---

### výsledky

---

K otázce 6.1.1.: b

K otázce 6.1.2.: a

K otázce 6.1.3.: Je to obdoba problému, řešeného v úloze k zamyšlení *Pád až do Slunce* v kapitole 2.5.: podle třetího Keplerova zákona je  $(t/T)^2 = (a/r)^3$ , kde  $t$  a  $a$  jsou oběžná doba a velká poloosa trajektorie nějakého tělesa obíhajícího kolem Slunce,  $T$  a  $r$  je totéž pro Zemi. Doba pádu  $t_p = t/2$ . Číselně:  $a = R_S/2 = 3,5 \cdot 10^8$  m,  $r = 1$  AU =  $1,5 \cdot 10^{11}$  m,  $T = 1$  rok =  $3,2 \cdot 10^7$  s, takže  $t_p = 1800$  s = 0,5 h.

K otázce 6.1.4.: a) ve vzdálenosti asi 0,10 až 0,15  $R_S$ ; klesá velice rychle, takže hvězdy jsou téměř „hmotné body“; b) ve vzdálenosti asi 0,3  $R_S$ , což odpovídá asi 3 % celkového objemu Slunce.

K otázce 6.1.5.: Gravitační zrychlení se bude postupně zmenšovat, v samém středu bude nulové.

K otázce 6.1.6.: b

K otázce 6.1.7.: a

K otázce 6.1.8. Svědčilo by to o vzrůstu teploty ve fotosféře s rostoucí výškou.

K otázce 6.1.9.: Považujme teplotu na „povrchu“ Slunce (ve fotosféře) za nulovou, neboť je mnoho řádů menší než centrální teplota. Poloměr Slunce činí  $7 \cdot 10^8$  m, takže na vzdálenosti 1 m se teplota změní o  $1,5 \cdot 10^7 / (7 \cdot 10^8) = 0,02$  K. Takto nepatrný rozdíl teploty je v pozemských laboratořích jen stěží realizovatelný.

K otázce 6.1.10.: Ano: veličiny  $\kappa$ ,  $M(r)$ ,  $\rho(r)$  a  $r^2$  jsou vždy kladné.

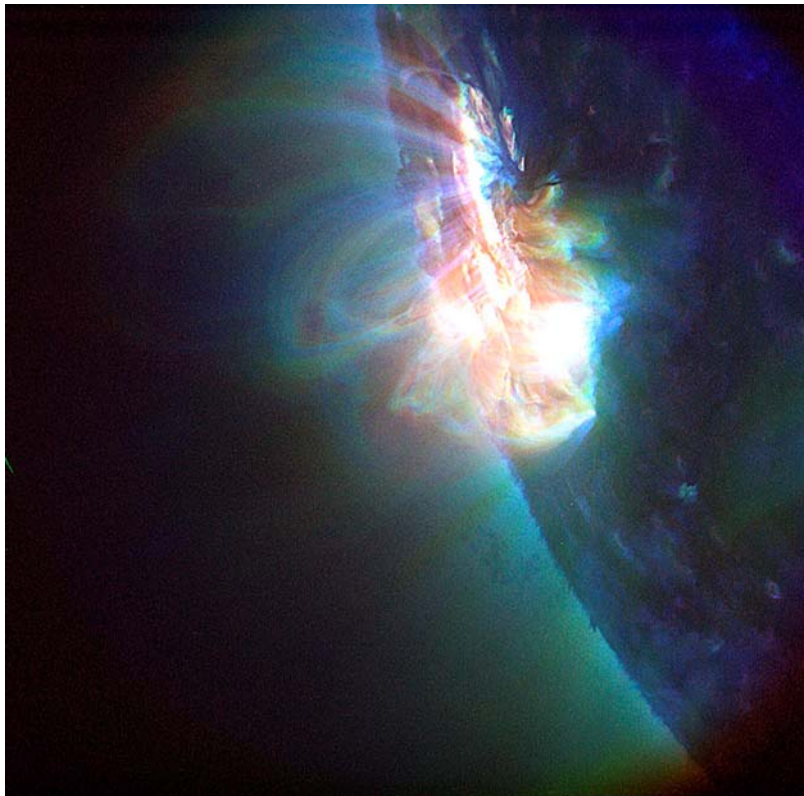
K otázce 6.1.11.: klesá, rostoucím *nebo* roste, klesajícím; největší.

K otázce 6.1.12.: Protože  $1'' = 2\pi / (360 \cdot 60 \cdot 60)$  rad =  $4,85 \cdot 10^{-6}$  rad, vidíme granule pod úhlem přibližně  $6 \cdot 10^{-6}$  rad. Při vzdálenosti 1 AU =  $1,5 \cdot 10^8$  km mají tedy granule velikost přibližně  $6 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^8 = 900$  (po zaokrouhlení jeden tisíc) km.



### 6.2. Proč hvězdy září?

**H**vězdy září proto, že jejich fotosféry jsou zahřáty na poměrně vysokou teplotu tisíců až deseti-tisíců 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.



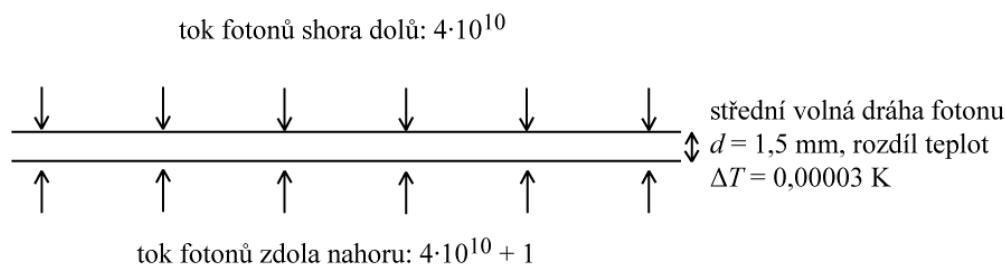
Poté, co se fotony dostanou do fotosféry, jsou vyzářeny a pak už se víceméně volně pohybují směrem od Slunce (na snímku je aktivní oblast na Slunci 25. 4. 1998, družice TRACE, Alan Title).

### Když fotony přenášejí teplo

Teplo se může přenášet třemi způsoby: zářením, prouděním (konvekci) 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).

příklad: nitro Slunce, vzdálenost  $r = 0,5 R_{\odot}$ , teplota  $T = 3,5 \cdot 10^6$  K



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 opětovným 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

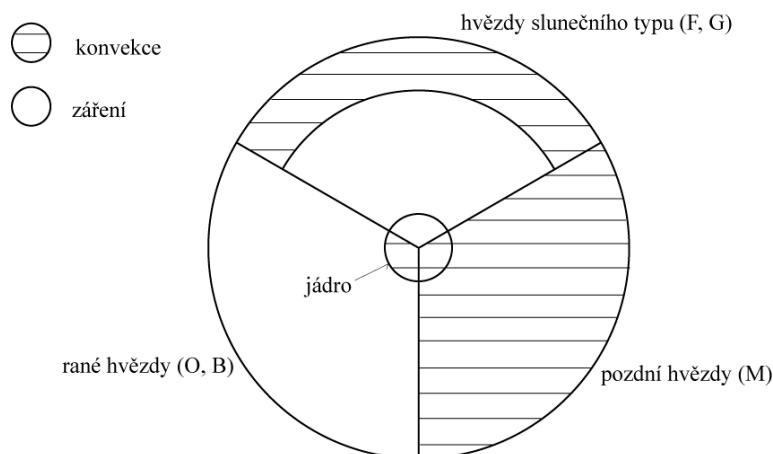
Jestliže je hvězdný materiál příliš neprůhledný, nebo jsou-li zdroje energie silně koncentrované (tedy v samém centru hvězdy existuje prudký spád teploty), není možné přenést všechno teplo zářením. Nastupuje proto účinnější přenos tepla *konvekci* čili *prouděním*: rozsáhlé proudy teplé látky stoupají 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*<sup>1)</sup>.

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 vyhřátá 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.

<sup>1)</sup> K původu slova *konvekce*: latinské *convehere* znamená dovážet, svážet, *convectio* pak přívod. A slovo *granulace*? Pochází z latinského *granum* – zrna (zdrobnělina *granulum* – zrnko).

## 6. Ze života hvězd

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 nejučinnější.



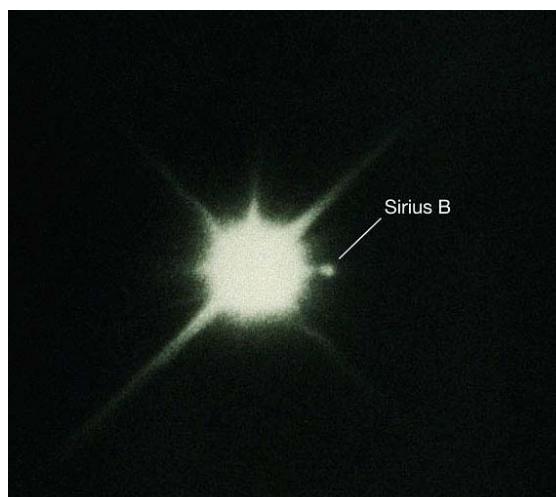
Tepelná výměna ve hvězdách.

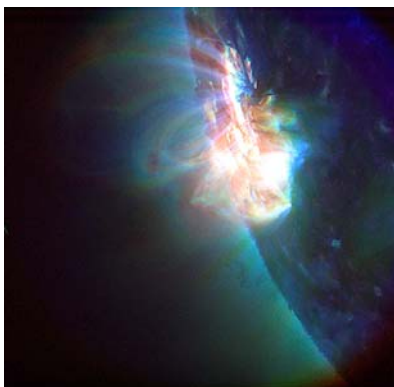
### Proč září bílí trpaslíci?

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 termojaderné reakce v těchto hvězdách již neprobíhají, a smršťovat se bílí trpaslíci také nemohou – tomu brání stav látky, z níž jsou složeni.

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

**S**těny 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 pohltní 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.

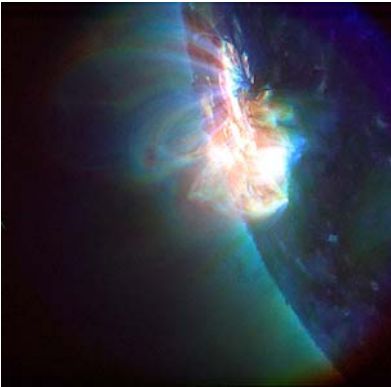
Představte si stavbu s podavači cihel, seřazenými podle výkonu; čím dál v řadě podavač stojí, tím méně cihel je schopný podat svému sousedovi za jednotku času. Nechť každý podavač háže polovinu cihel sousedovi vpravo a polovinu sousedovi vlevo. Tento způsob podávání je sice značně neefektivní, ale cihly 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)

---

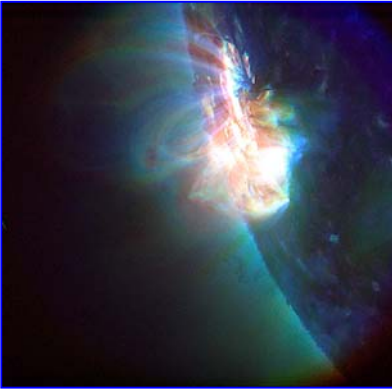
### otázky a příklady

---

**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.



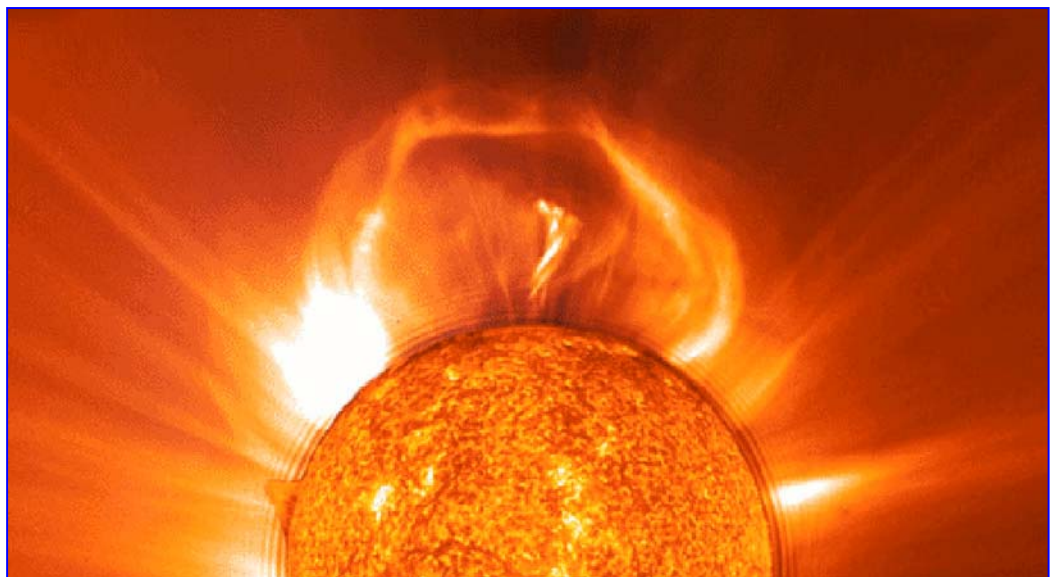
---

úloha k zamyšlení

---

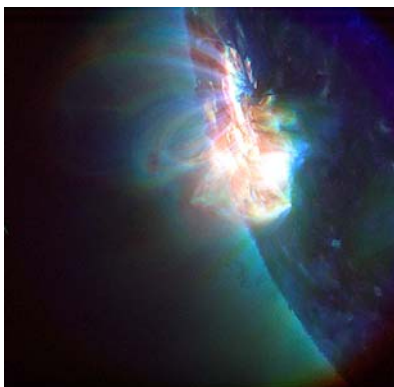
### Sluneční vítr

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  $1 \text{ cm}^3$ . Protony se pohybují střední rychlostí  $320 \text{ km/s}$ . 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. Ze života hvězd

---



---

### výsledky

---

K otázce 6.2.1.: gama; energie  $E \sim \nu \sim 1/\lambda$ , kde  $\nu$  je kmitočet,  $\lambda$  je vlnová délka. Poměr  $E_1/E_2 = \lambda_2/\lambda_1$  (index 1 se vztahuje k nitru, index 2 k fotosféře). Číselně:  $300/0,3 = 1000$ .

K otázce 6.2.2.: Varianta a; granulace a sluneční vítr jsou bezprostředními projevy podfotosférické konvekce.

K otázce 6.2.3.: Hlavní rozdíly: rychlost pohybu částic (u slunečního větru vyšší); hustota částic – v případě pozemského větru mnohem větší; pozemský vítr je elektricky neutrální, zatímco sluneční nikoli – jde o proud elektricky nabitých částic. Rozdílné jsou též důvody, proč oba větry vznikají.

**Úloha k zamyšlení – Sluneční vítr:** K výpočtu úbytku hmotnosti  $\Delta m$  za časovou jednotku musíme nejdříve určit objem slupky obepínající kouli o poloměru  $R = 1 \text{ AU} (= 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m})$ , která má tloušťku  $\Delta R$  číselně rovnou střední rychlosti  $v$  proudění slunečního větru ve vzdálenosti  $R$ :

$$V = 4\pi R^2 \Delta R.$$

V tomto objemu se nachází  $nV$  protonů ( $n = 8 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}$  je pozorovaná koncentrace protonů). Úbytek hmotnosti  $\Delta m$  za časovou jednotku je tudíž roven

$$\Delta m = n v m_p,$$

kde  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  je hmotnost protonu. Číselně:  $\Delta m = 4\pi (1,5 \cdot 10^{11})^2 \cdot 3,2 \cdot 10^5 \cdot 8 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^{-27} = 1,23 \cdot 10^9 \text{ kg}$ . Jakkoli se nám tento úbytek hmotnosti Slunce za 1 sekundu zdá velký (posuzováno pozemskými měřítky), je ve srovnání s hodnotou dnešní hmotnosti Slunce ( $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ) mizivě malý. Malá je i roční ztráta hmotnosti Slunce (řádově  $10^{16} \text{ kg}$ ), ba i za celou dobu existence Slunce: kdyby se množství unikajících částic s časem podstatně neměnilo, Slunce by takto ztratilo jen (řádově)  $10^{26} \text{ kg}$  látky – tedy pouhou desetinu promile!

### 6.3. Zdroje energie ve hvězdách

**K**aždé 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.



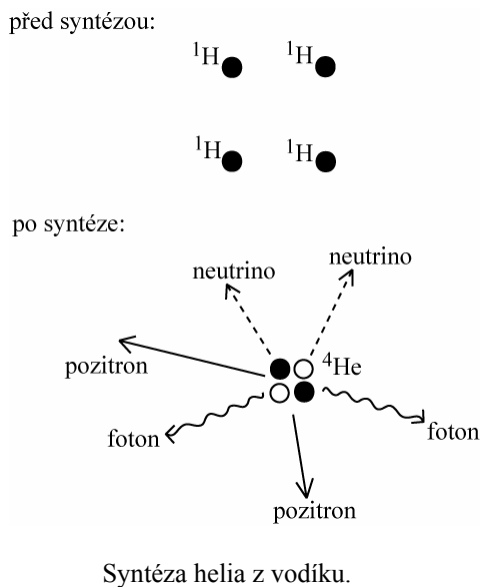
## 6. Ze života hvězd

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 smrští a rychlost reakcí se uvede zase zpět do správných mezí. Tak se udržuje teplota uvnitř hvězd s přesností na tisíce 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<sup>1)</sup>. Tento řetězec reakcí je nejučinnější při teplotách do 20 milionů kelvinů.



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,

<sup>1)</sup> 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.

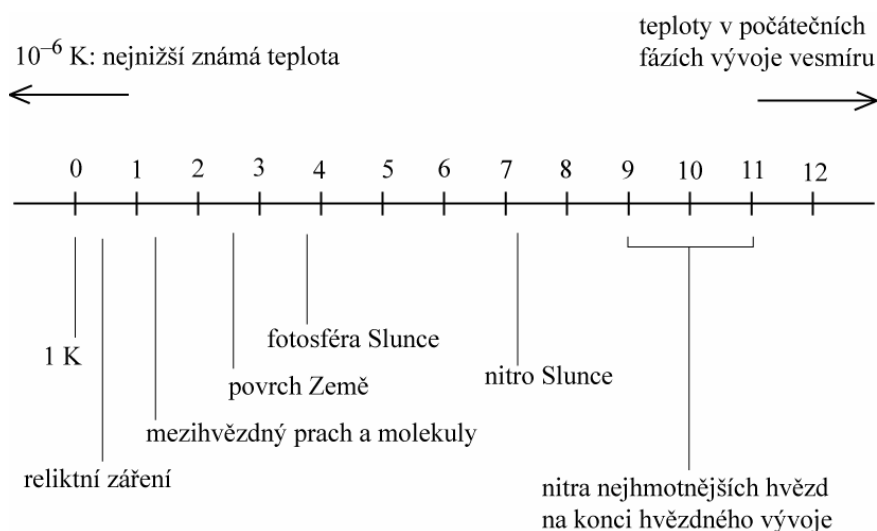
## 6. Ze života hvězd

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 neúčinnější 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

**A**stronomie 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<sup>1)</sup>.

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.

---

<sup>1)</sup> 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 nádhru – zůstaly jen odporými 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 vyvěřela z nějaké zapomenuté hvězdy, z takové, které i dnes vybuchují kdesi v dále. 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.



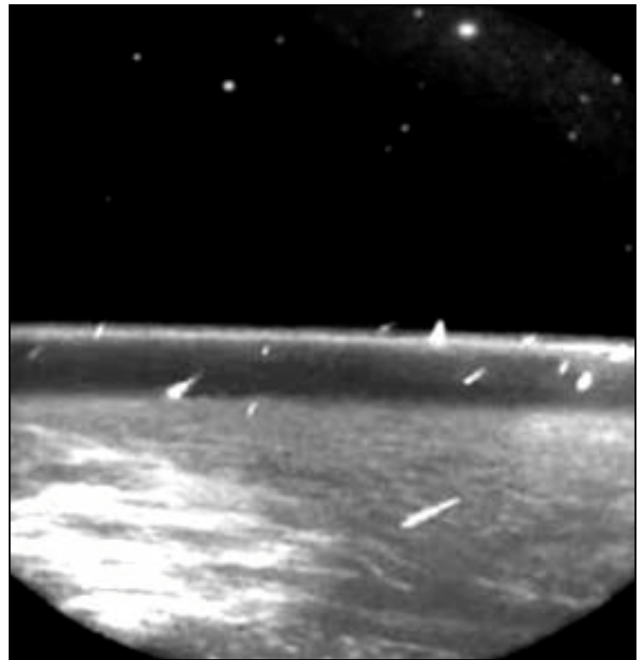
---

### 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.



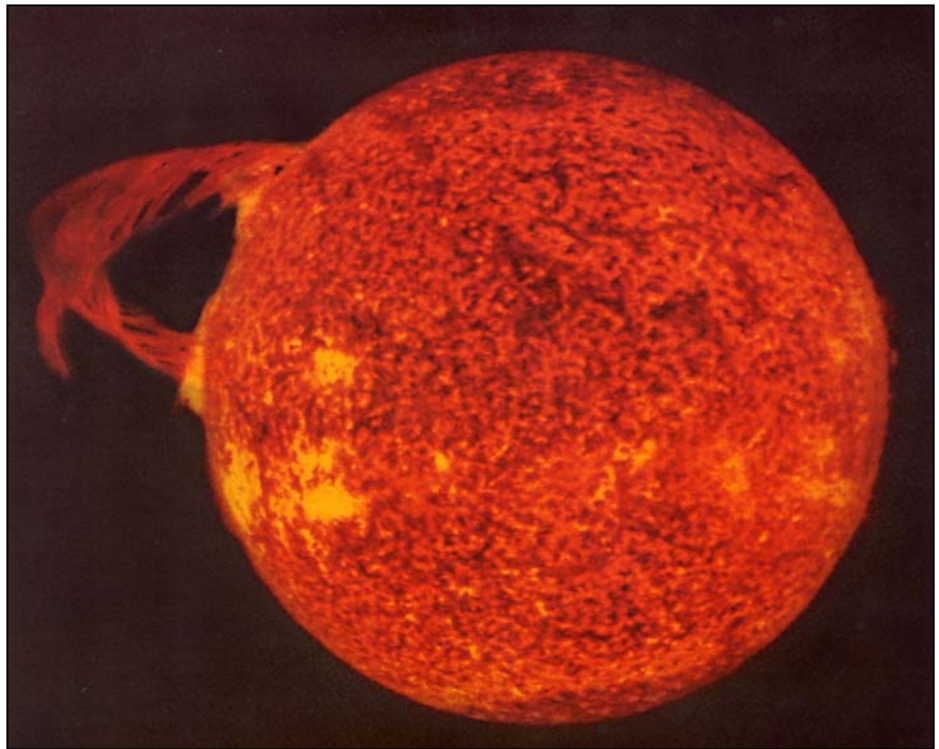
---

### úloha k zamyšlení

---

### Jaderné reakce ve hvězdách

Sluneční „konstanta“  $k$  je rovna přibližně  $1,4 \text{ kW/m}^2$ . 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 neutrinami zanedbejte.) Je to mnoho či málo ve srovnání s celkovou hmotností Slunce?



Snímek Slunce v extrémní ultrafialové oblasti, v čáře ionizovaného hélia o vlnové délce  $30,4 \text{ nm}$  (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 nabitá 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,

## 6. Ze života hvězd

---

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 záhadných 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.

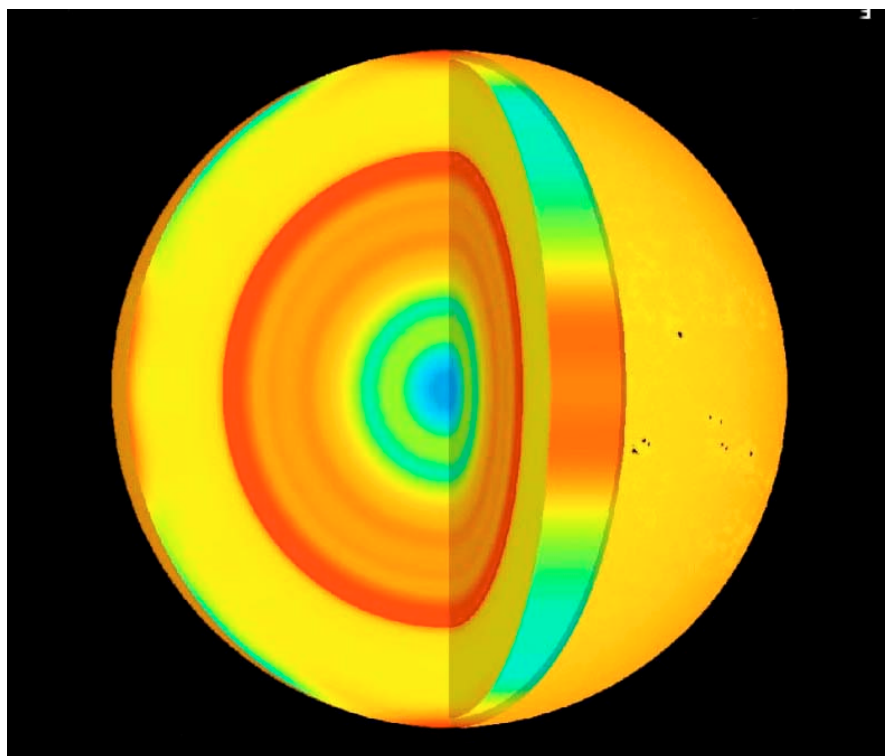
Výkon hvězdného reaktoru bude záležet též na rychlosti, s níž se v něm reakce uskutečňují. A tempo termonukleárních reakcí, jak známo, velice silně závisí na pracovní teplotě reaktoru. Teď už se zdá, že jsme na správné stopě. Ukazuje se totiž, že v nitru hmotných hvězd panuje vyšší teplota než ve hvězdách 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.

## 6. Ze života hvězd

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 hmotností 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 zvrát



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 záhadných 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 z paměti, 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 nabitě 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?

## 6. Ze života hvězd

---

**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  $4,2 \cdot 10^{-12}$  J. Vypočítejte tok slunečních neutrin (počet neutrin procházejících čtverečním metrem za sekundu) ve vzdálenosti 1 AU od Slunce.



---

medailon

---

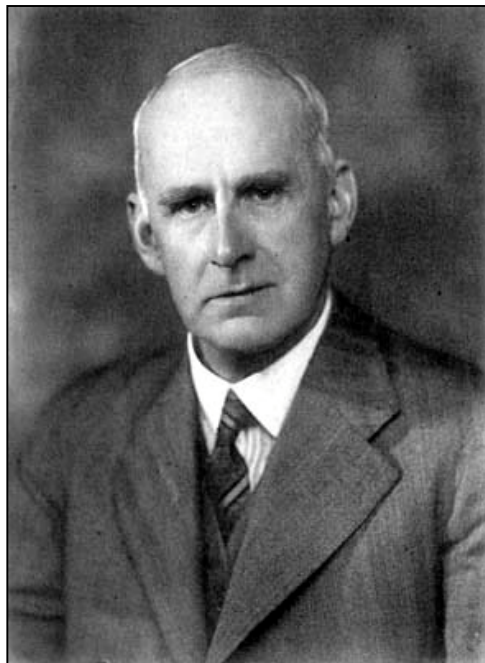
### Arthur Eddington

(28. 12. 1882 – 22. 11. 1944)

**A**nglický badatel Sir Arthur Eddington patřil v první polovině našeho století k průkopníkům nové vědní disciplíny – astrofyziky. Měl vynikající teoretickou přípravu 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.

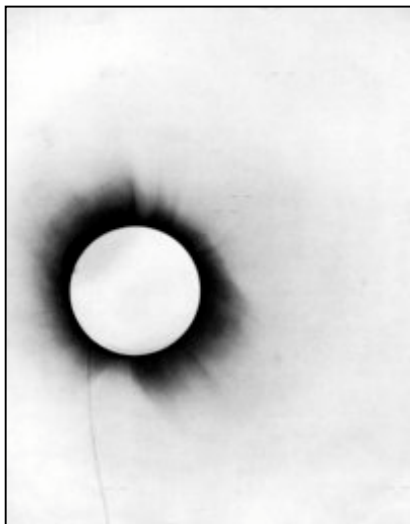
Eddingtonovým stěžejním dílem bylo vybudování teorie vnitřní stavby hvězd v době, kdy ještě nikdo neměl tušení o termojaderných reakcích jaderného slučování. Předjal tak celou řadu výsledků, jež se později objevily v jaderné fyzice. Eddingtonův znamenitý pokračovatel Sir Fred Hoyle o něm napsal: „Je 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!



## 6. Ze života hvězd

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 ( $1,6'' \pm 0,3''$ ), 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, nepřímou 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 neubráníl kardinálním omylům. V roce 1930 přijel do britské Cambridge, kde byl Eddington profesorem, nadaný indický student Subrahmanyan Chandrasekhar s relativistickou teorií stavby zhroutěných hvězd, jimž říkáme bílé 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 zhroutění velmi hmotných hvězd do černé díry, prohlásil: „Potřebujeme přírodní zákon, který zabráni hvězdám vyvádět takové hlouposti.“ Prání 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 vyjíždkách, 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

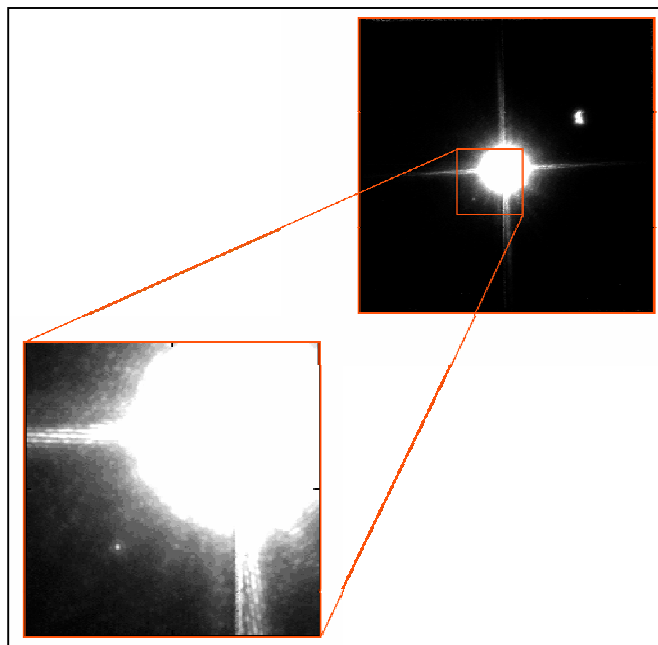
---

## Arthur Eddington: Příběh Siriova průvodce

**T**ítulek tohoto detektivního příběhu by mohl být „Nesmyslná zpráva“. Sirius je nejjasnější hvězdou na nebi. Pochopitelně byl odpradáвна 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 našel 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 tabulí „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-



## 6. Ze života hvězd

nitě 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 Siroiova průvodce, když byla dekodována, 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 zápa-  
lek.“ 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 Siroiova 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 „bílé 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. Ze života hvězd

---



---

### výsledky

---

K otázce 6.3.1.: Slunce: hmotnost centrální oblasti (kde probíhají reakce)  $10^{29}$  kg, výkon  $10^{26}$  W; elektrická kamínka: hmotnost spirály 1 kg, výkon  $10^3$  W. Poměr hmotnost/výkon u Slunce  $10^{-3}$ , u kamínek  $10^3$ , rozdíl 6 řádů.

K otázce 6.3.2.: Ve hvězdách je uranu relativně velmi málo, podobně jako na Zemi či jinde ve vesmíru. Zvýšená koncentrace uranu v některých místech zemské kůry (v ložiscích, kde se těží) je výsledkem řady geochemických procesů, které ve hvězdách určitě nenastávají.

K otázce 6.3.3.: a

K otázce 6.3.4.: Při p-p řetězci vzroste měrný výkon asi  $2^5$  až  $2^6 = (30 \text{ až } 60)$ krát, u cyklu CNO přinejmenším 30 000krát, a u reakcí 3 alfa částic dokonce miliardkrát!

K otázce 6.3.5.: Asi polovina; za  $10^{10}$  let se srazí již téměř každý proton s nějakým jiným protonem.

K otázce 6.3.6.: b

K otázce 6.3.7.: Fotony ve Slunci jsou nesčíslněkrát pohlceny při srážkách s atomy, opět vyzářeny, opět pohlceny, vyzářeny ..., což trvá řádově statisíce roků. **Foton je takto řádově  $10^{25}$ krát pohlcen a opět vyzářen.**

K otázce 6.3.8.: Jádra těžších prvků než vodík mají větší kladný náboj, takže k překonání potenciálové bariéry a ke splnutí jader je zapotřebí vyšší energie než v případě vodíku.

K otázce 6.3.9.: c

K otázce 6.3.10.: a

K otázce 6.3.11.: c

K otázce 6.3.12.: Ano: ihned by přestal existovat tok neutrin, které přicházejí z nitra Slunce. Tato neutrina jsou slunečním materiálem jen velmi málo pohlcována (obdobně obtížná registrace je i na Zemi, ale přesto možná je). Zářivý výkon Slunce by se však ještě po dlouhé období neměnil, neboť fotony (na rozdíl od neutrin) se dostávají od místa jaderné reakce k povrchu jen pomalu. Naše každodenní zkušenost, opírající se o lidské smysly, by nám v tomto případě nebyla nic platná.

K otázce 6.3.13.: Při výkonu Slunce  $3,8 \cdot 10^{26}$  W a energii  $4,3 \cdot 10^{-12}$  J získané jednou reakcí čtyř jader vodíku je třeba, aby takových reakcí proběhlo každou sekundu přibližně  $9 \cdot 10^{37}$ . Při každé vzniknou dvě neutrina. Tok neutrin, který projde jednotkovou plochou za 1 s ve vzdálenosti 1 AU od středu Slunce vypočítáme jako podíl počtu vzniklých neutrin a plochy povrchu koule o poloměru  $R = 1$  AU, tedy  $9 \cdot 10^{37} / [4 \cdot \pi (1,5 \cdot 10^{11})^2] = 3 \cdot 10^{14}$ .

**Úloha k zamyšlení** – *Slunce zahřívají meteorická těliska*: Vyzařováním fotonů ztratí Slunce za 1 sekundu hmotnost  $m_t = E/c^2$ , kde  $E$  je zářivý výkon Slunce a  $c$  je velikost rychlosti světla ve vakuu. Kdyby Slunce zářilo v důsledku dopa-

## 6. Ze života hvězd

dů meteorických částic, byl by zářivý výkon  $E = mv^2/2$ , kde  $m$  je hmotnost dopadající meteorických tělísek,  $v$  jejich rychlost (jde o výraz pro kinetickou energii). Hledáme poměr hmotností  $p = m/m_f$ . Abychom jej mohli určit, potřebujeme znát rychlost dopadu  $v$  (částice padají na Slunce z nekonečna volným pádem). Jde vlastně o určení tzv. *únikové rychlosti* z povrchu Slunce. Pro soustavu Slunce + částice platí:

$$\text{kinetická energie Slunce} + \text{kinetická energie částice} + \text{potenciální energie soustavy Slunce a částice} = 0.$$

Kinetická energie Slunce je nepatrná, prakticky rovna nule. Předchozí rovnici lze tedy psát ve tvaru

$$mv^2/2 - \kappa m M_S/R_S = 0,$$

kde  $\kappa$  je gravitační konstanta,  $M_S$  a  $R_S$  hmotnost a poloměr Slunce. První člen je výraz pro kinetickou energii částice, druhý pro potenciální energii soustavy Slunce + částice. Úpravou této rovnice získáme hledanou rychlost  $v$

$$v = \sqrt{(2\kappa M_S/R_S)}.$$

Hmotnost meteorických částic  $m$  je pak rovna

$$m = 2E/v^2 = E R_S/(\kappa M_S).$$

Hledaný poměr hmotností  $p$  se rovná

$$p = m/m_f = c^2 R_S/(\kappa M_S).$$

*Číselně:*  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $R_S = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$ ,  $\kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ . Po dosazení  $p = 4,7 \cdot 10^5$ . Hmotnost meteorických částic, dopadajících na Slunce, by musela být o více než 5 řádů vyšší než hmotnost fotonů, ztracených vyzařováním, což je zajisté nereálný předpoklad.

**Úloha k zamyšlení – Jaderné reakce ve hvězdách:** Známe-li hodnotu sluneční konstanty, můžeme zjistit celkový zářivý výkon Slunce  $L = 4\pi r^2 k$ , kde  $r$  je střední vzdálenost Země–Slunce. Tím tedy známe celkovou energii  $E$  uvolněnou na Slunci za 1 s. Energii  $E$  odpovídá hmotnost  $m = E/c^2$ , kde  $c$  je velikost rychlosti šíření světla ve vakuu. V nitru Slunce probíhají termonukleární reakce, kdy se ze čtyř jader atomu vodíku vytváří jedno jádro atomu helia. Část hmotnosti se mění na energii. Tato část  $p$  je rovna

$$p = (4m_H - m_{He})/(4m_H),$$

kde  $m_H$  a  $m_{He}$  jsou relativní atomové hmotnosti vodíku a helia. Za 1 s tedy „shoří“ na Slunci vodík o hmotnosti  $M$

$$M = m/p = E/(pc^2).$$

*Číselně:*  $r = 1 \text{ AU} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ;  $k = 1,4 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $L = 4\pi (1,5 \cdot 10^{11})^2 \cdot 1,4 \cdot 10^3 = 4,0 \cdot 10^{26} \text{ W}$ , tedy  $E = 4,0 \cdot 10^{26} \text{ J}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $m = 4,0 \cdot 10^{26}/(3 \cdot 10^8)^2 = 4,4 \cdot 10^9 \text{ kg}$ ;  $m_H = 1,0079$ ;  $m_{He} = 4,0026$ ;  $p = (4 \cdot 1,0079 - 4,0026)/(4 \cdot 1,0079) = 7,2 \cdot 10^{-3}$ ;  $M = 4,0 \cdot 10^{26}/(7,2 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{16}) = 6 \cdot 10^{11} \text{ kg}$ .

Jak je vidět, tento úbytek vodíku je zanedbatelně malý ve srovnání s celkovou hmotností Slunce  $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ . Je nevelký i z hlediska úbytku hmotnosti Slunce za celou dobu existence hvězdy (odhad: při přibližném stáří Slunce 5 miliard roků dosahuje celkový úbytek vodíku za předpokladu stálého zářivého výkonu  $M = 6 \cdot 10^{11} \cdot 5 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^7 = 10^{29} \text{ kg}$ ).

### 6.4. Jak hvězdy vznikají?

**A**ž 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 znepríjemnit 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.

## 6. Ze života hvězd

---

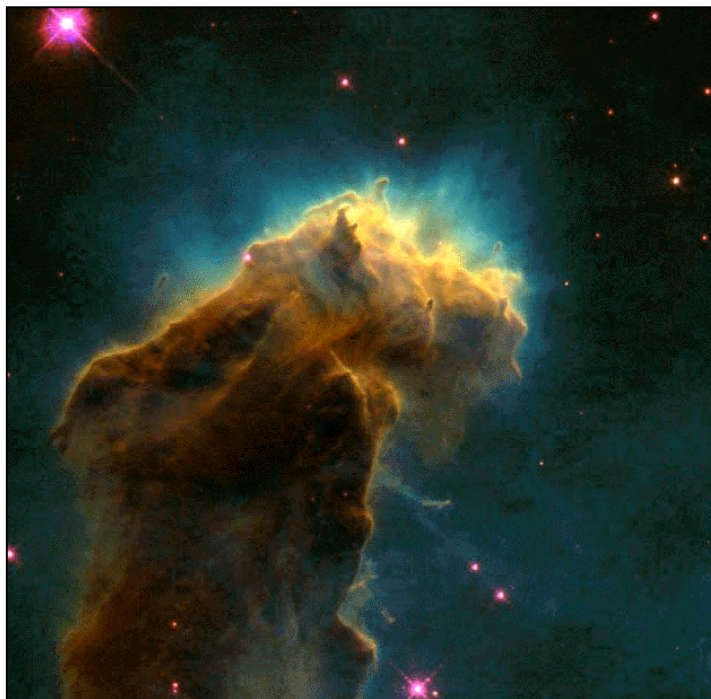
Místa, kde vznikají zárodečné mlhoviny budoucích hvězd, můžeme pozorovat jako *globule*<sup>1)</sup>: jeví se jako temné oválné útvary na svítícím pozadí. Jsou to již poněkud hustší oblasti mezihvězdného plynu a prachu, ve kterých se při dalším stlačování tvoří kulové zárodky nových hvězd – tzv. *protohvězdy*.

### Ejhle hvězda!

Gravitační smršťování protohvězd je zpočátku velmi rychlé – hvězdný zárodek se hroučí 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 term nukleární 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 Hubbleův kosmický dalekohled: část mlhoviny M 16, přezdívané Orli. Zejména v horní části tmavého sloupce jsou dobře vidět jednotlivé globule, které uvnitř skrývají právě vznikající hvězdy.

---

<sup>1)</sup> 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 prosvítily 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...

Pomalou se i mezi astronomy probíjela 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

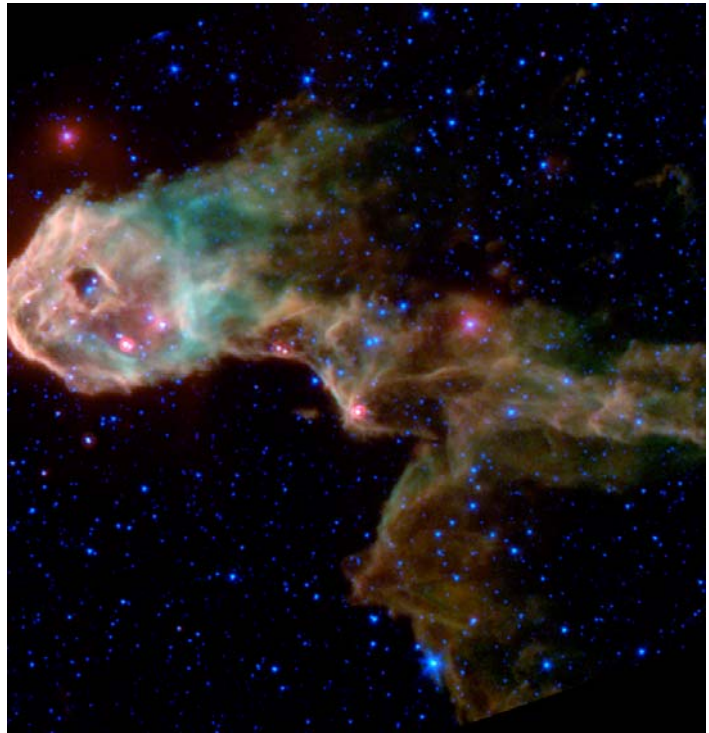
## 6. Ze života hvězd

---

musí energii vyrábět a že zářivá energie vzniká jen přeměnou energie jiné, je nám jasno, že největší 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

**N**ejhmotnějšími 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.

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.



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

## 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. Ze života hvězd

---



---

### výsledky

---

K otázce 6.4.1.: Extinkce v molekulových oblacích, která je způsobena především mezihvězdným prachem, je větší ve viditelném oboru spektra než v oboru infračerveném a rádiovém. Zkrátka v těchto spektrálních oborech „dohlédneme“ dál než ve viditelném světle.

K otázce 6.4.2.: Kolaps protohvězdy zastaví vzrůst teploty a tlaku v kolabující části oblaku; zde se ustaví přibližná hydrostatická rovnováha a rychlý kolaps se zpomalí až zastaví.

K otázce 6.4.3.: Existence osamocených hvězd je většinou důsledkem rozpadu gravitačně slabě vázaných skupin hvězd, nebo gravitačních poruch způsobených blízkými hvězdami (ty vyženou hvězdu mimo skupinu, v níž vznikla).

K otázce 6.4.4.: a

### 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.

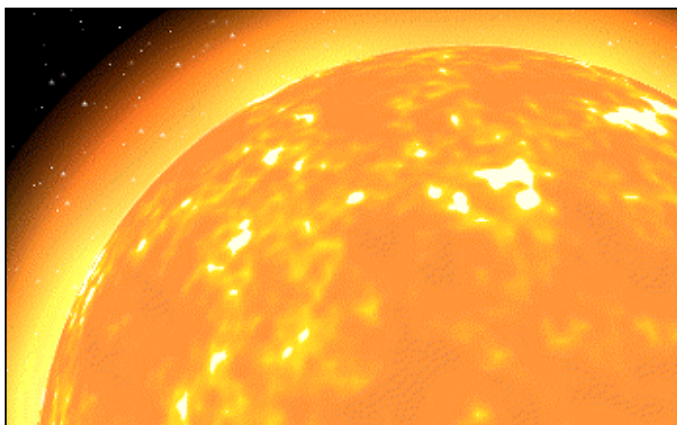
veličiny									jednotky	
$T_{ef}$	30	20	15	10	8	6	5	4	kK	
spekt	O5	B0	B5	A0	F0	G0	K0	M0		
$M_V$	-4	-2	0	2	4	6	8		mag	
$M_b$	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	mag
$L$	E5	E4	E3	E2	10			E-1	$L_S$	
$M$	30	20	10	5	3	2		0,6	$M_S$	
$R$	15	10	5	3,5	2			0,8	$R_S$	
$\rho$	0,02		0,1		0,3	0,5	1	2	$t \cdot m^{-3}$	
$\tau$	E6	E7	E8		E9		E10		E11	rok
$(B-V)$	-0,3		-0,2		0,0	0,2	0,5	1,0		mag

*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  $\rho$ , doba setrvání na hlavní posloupnosti  $\tau$  a barevný index  $(B-V)$ .

## 6. Ze života hvězd

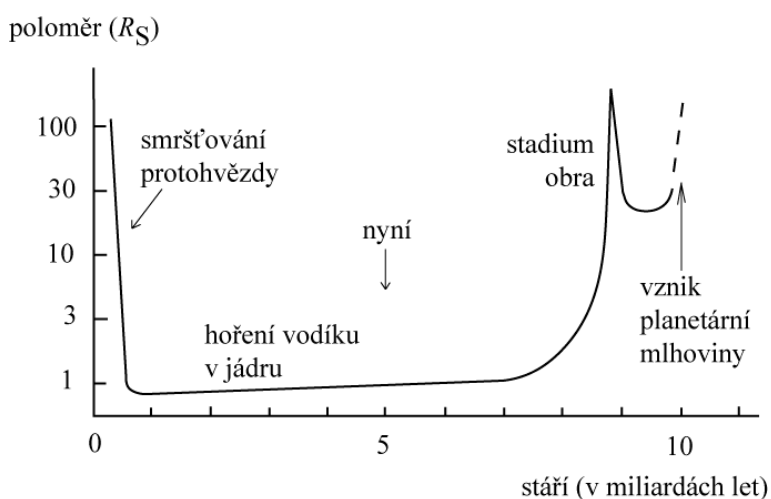
### Je čas k proměně

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 Hubbleovým 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.

## 6. Ze života hvězd

veličiny											jednotky
$T_{ef}$	30	20	15	10	8	6	5	4			kK
spekt	O5	B0	B5	A0	F0	G0	K0	M0			
$M_V$	-4	-2	0	2	4	6	8				mag
$M_b$	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8		mag
$L$	E5	E4	E3	E2	10			E-1	L-S		
$M$	30	20	10	5	3	2		0,6	$M_S$		
$R$	15	10	5	3,5	2	1		0,8	$R_S$		
$\rho$	0,02		0,1	0,3	0,5	1		2	$t \cdot m^{-3}$		
$\tau$	E6	E7	E8	E9	E10	E11			rok		
$(B-V)$	-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,5	1,0			mag		

### 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 vynesena 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

## 6. Ze života hvězd

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 запиšte 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

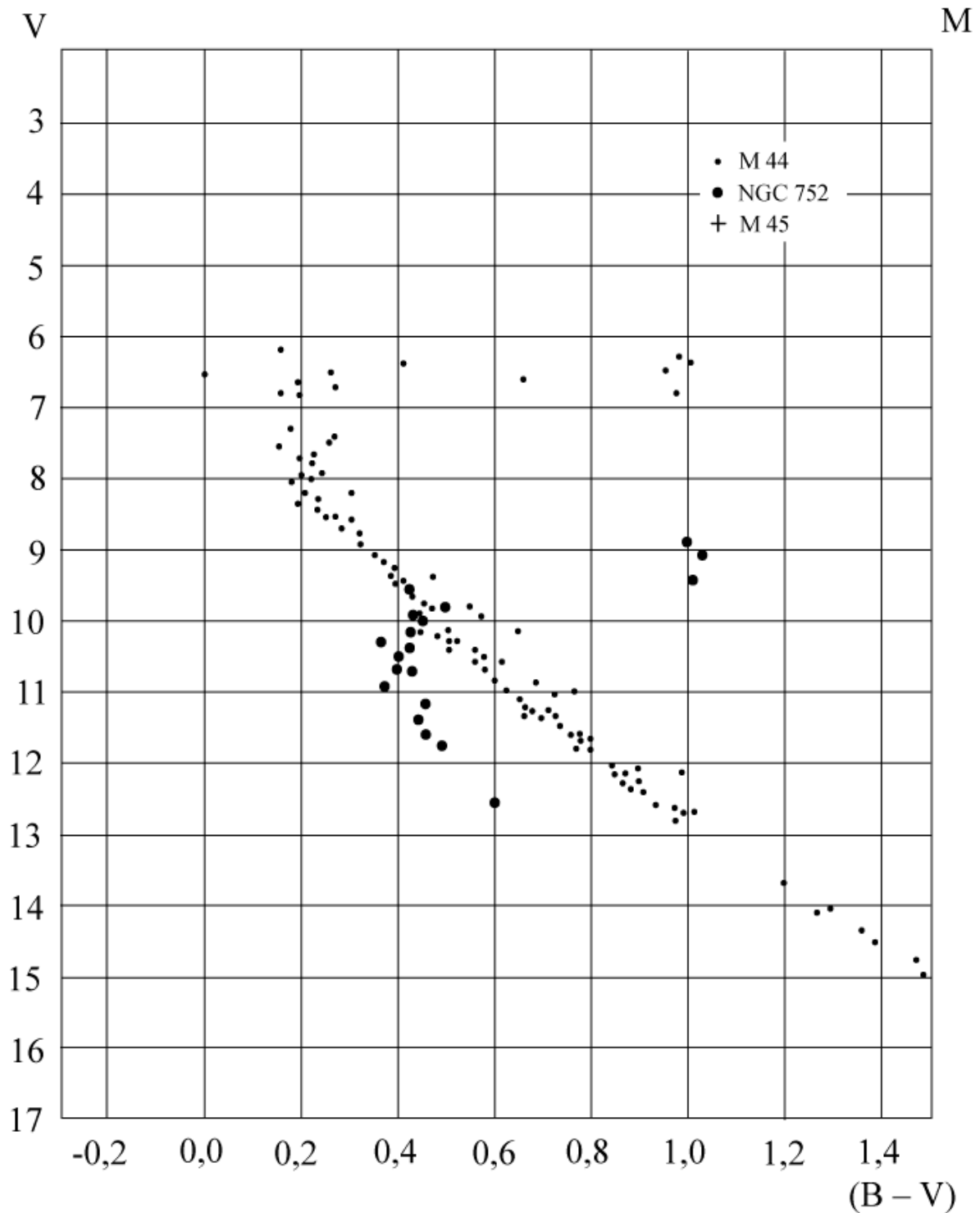
Modul vzdálenosti Plejád činí

$$m - M = 5 \log r - 5 = \underline{\hspace{2cm}} .$$

**Tabulka 2.**

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

## 6. Ze života hvězd



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).



## 6. Ze života hvězd

---

**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.**

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

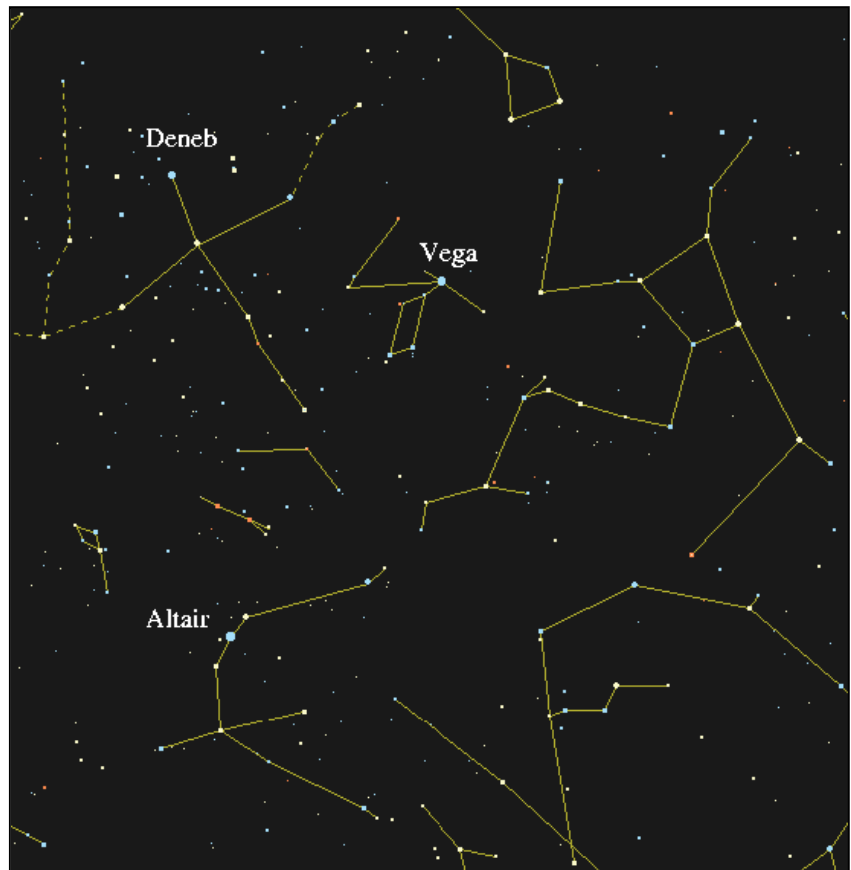
## 6. Ze života hvězd

	veličiny										jednotky	
$T_{ef}$	30	20	15	10	8	6	5	4			kK	
spekt	O5	B0	B5	A0	F0	G0	K0	M0				
$M_V$	-4	-2	0	2	4	6	8				mag	
$M_b$	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8		mag	
$L$	E5	E4	E3	E2	10			E-1	L <sub>S</sub>			
$M$	30	20	10	5	3	2		0,6	M <sub>S</sub>			
$R$	15	10	5	3,5	2			0,8	R <sub>S</sub>			
$\rho$	0,02		0,1		0,3	0,5			2		t·m <sup>-3</sup>	
$\tau$	E6	E7	E8		E9		E10		E11		rok	
$(B-V)$		-0,3	-0,2		0,0	0,2	0,5		1,0		mag	

### úloha k zamyšlení

### Proč se změní jasnost Vegy?

Celá naše sluneční soustava se přibližuje k jasné hvězdě  $\alpha$  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  $\pi = 0,129''$ .)



## 6. Ze života hvězd

---

veličiny											jednotky
$T_{ef}$	30	20	15	10	8	6	5	4			kK
spekt	O5	B0	B5	A0	F0	G0	K0	M0			
$M_V$	-4	-2	0	2	4	6	8				mag
$M_b$	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8		mag
$L$	E5	E4	E3	E2	10			E-1	L <sub>S</sub>		
$M$	30	20	10	5	3	2		0,6	M <sub>S</sub>		
$R$	1,5	10	5	3,5	2			0,8	R <sub>S</sub>		
$\rho$	0,02		0,1		0,3	0,5	1	2			t·m <sup>-3</sup>
$\tau$	E6	E7	E8	E9	E10	E11					rok
$(B-V)$		-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,5	1,0				mag

*Učili jsme se ledabyle,  
stačili málo poznati:  
tak lze nám bez přílišné píce  
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 vytvořily 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?

## 6. Ze života hvězd

---

**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 hvězdokupa **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 dosud 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.

## 6. Ze života hvězd

veličiny											jednotky
$T_{ef}$	30	20	15	10	8	6	5	4			kK
spekt	O5	B0	B5	A0	F0	G0	K0	M0			
$M_V$	-4	-2	0	2	4	6	8				mag
$M_b$	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8		mag
$L$	E5	E4	E3	E2	10			E-1	L <sub>S</sub>		
$M$	30	20	10	5	3	2		0,6	M <sub>S</sub>		
$R$	15	10	5	3,5	2	1		0,8	R <sub>S</sub>		
$\rho$	0,02		0,1		0,3	0,5	1	2			t·m <sup>-3</sup>
$\tau$	E6	E7	E8		E9	E10		E11			rok
$(B-V)$	-0,3		-0,2		0,0	0,2	0,5	1,0			mag

### čítanka

## Miroslav Plavec: Červený trpaslík vám vydrží

**S**voji 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 pětinasobné hmotnosti Země, obíhající kolem červeného trpaslíka (kresba: ESO).

## 6. Ze života hvězd

---

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 docílí 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 jaderného 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. Ze života hvězd

veličiny											jednotky
$T_{ef}$	30	20	15	10	8	6	5	4			kK
spekt	O5	B0	B5	A0	F0	G0	K0	M0			
$M_V$	-4	-2	0	2	4	6	8				mag
$M_b$	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8		mag
$L$	E5	E4	E3	E2	10			E-1	L-S		
$M$	30	20	10	5	3	2		0,6	$M_S$		
$R$	15	10	5	3,5	2			0,8	$R_S$		
$\rho$	0,02		0,1		0,3	0,5	1		2		$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$
$\tau$	E6	E7	E8		E9		E10		E11		rok
$(B-V)$	-0,3		-0,2		0,0	0,2	0,5		1,0		mag

### výsledky

K otázce 6.5.1.: Hmotnější hvězdy mají podstatně kratší „dobu života“ než hvězdy méně hmotné.

K otázce 6.5.2.: Podstatné je, že u hmotnějších hvězd je vyšší centrální teplota; víme, že produkce energie velmi citlivě závisí na teplotě. Různé množství vodíku není v tomto případě podstatné.

K otázce 6.5.3.: Chemické složení látky, vyvolané termonukleárními reakcemi, se mění jen v nitru hvězdy. Látka z nitra na povrch hvězdy neproniká, protože neexistuje konvekce zasahující současně jádro i povrch hvězdy.

K otázce 6.5.4.: Ve středových oblastech hvězdy probíhá slučování vodíkových jader na héliová.

K otázce 6.5.5.: Další vývoj obou hvězd bude identický.

K otázce 6.5.6.: d

K otázce 6.5.7.: Hvězdokupa **Y**.

K otázce 6.5.8.: b

K otázce 6.5.9.: a

**Úloha k zamyšlení** – *Proč se změní jasnost Vegy?*: Změně hvězdné velikosti  $\Delta m = 0,1$  mag odpovídá podle Pogsonovy rovnice poměr jasností

$$j_1/j_2 = 10^{0,4 \Delta m}$$

(index „1“ označuje situaci nyní, index „2“ za dobu  $t$ , kterou hledáme). Protože  $j_1/j_2 = (r_2/r_1)^2$ , přičemž  $r_1, r_2$  jsou vzdálenosti Vegy – pro indexy platí totéž co u jasností – je

$$r_2 = r_1 \sqrt{(10^{0,4 \Delta m})}.$$

Zvětšení vzdálenosti je rovno

$$\Delta r = r_2 - r_1 = r_1 [\sqrt{(10^{0,4 \Delta m})} - 1] = [\sqrt{(10^{0,4 \Delta m})} - 1]/\pi$$

a vychází v parsecích, je-li paralaxa  $\pi$  uvedena v úhlových vteřinách. Při rychlosti přibližování  $v$  je hledaná doba  $t$  rovna  $t = \Delta r/v$ .

*Číselně:*  $\Delta r = 0,365$  pc =  $1,13 \cdot 10^{13}$  km;  $t = 1,13 \cdot 10^{13}/14 = 8,0 \cdot 10^{11}$  s = 25 000 let. Z výsledku vyplývá, že u hvězdy Vegy se jasnost mění vlivem změn vzdálenosti natolik málo, že tyto změny nelze za dobu, kdy jsou k dispozici spolehlivá fotometrická data o hvězdách, vůbec zjistit. Vidíme také, že vývojové efekty za tak krátkou dobu nehrají žádnou roli.

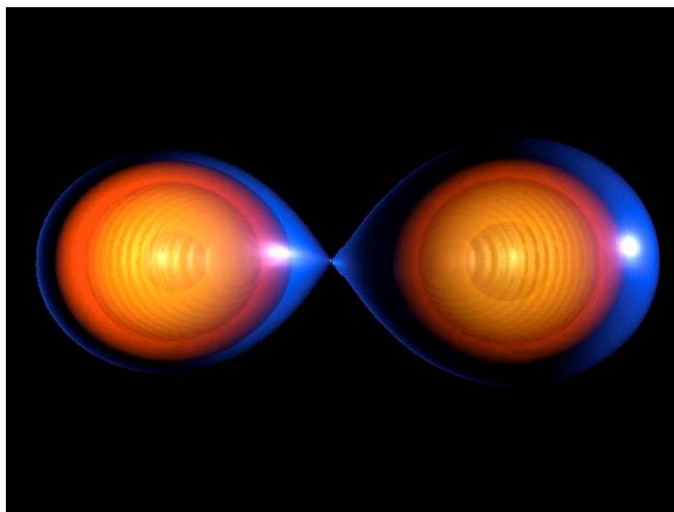
### 6.6. Zvláštnosti vývoje těsných dvojhvězd

**A**lgol 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<sup>1)</sup>. 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 požívá psa

Pod tímto názvem je mezi astronomy známa hypotéza Johna Crawforda a Freda Hoyla<sup>2)</sup>, 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<sup>3)</sup> (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.



---

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> Čti: *džona króforda a freda hojla*.

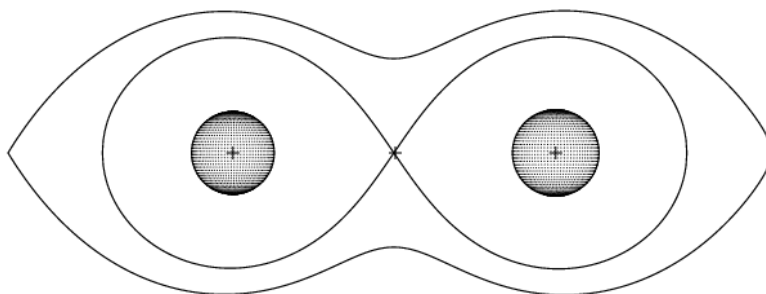
<sup>3)</sup> Čti: *rošeův*.



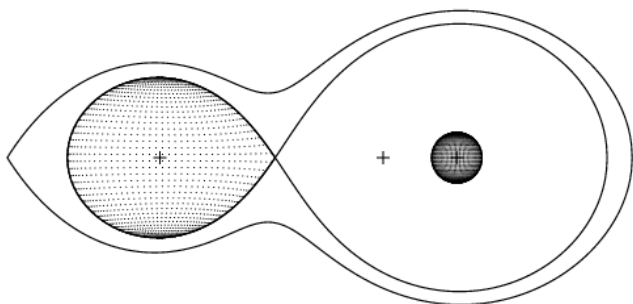
## 6. Ze života hvězd

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 nabyt, 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.

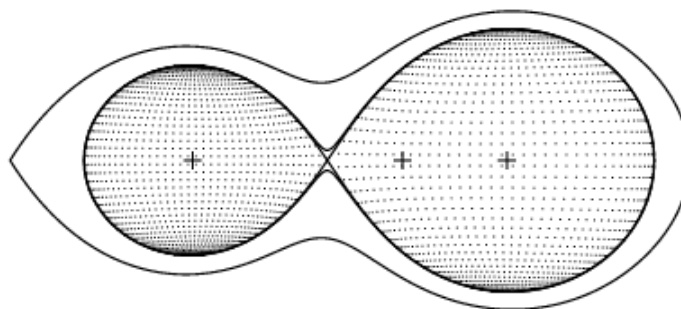


Model proměnné hvězdy KP Aql, která tvoří tzv. *oddělenou soustavu*: obě hvězdy se nacházejí uvnitř Rocheova laloku. →



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. →



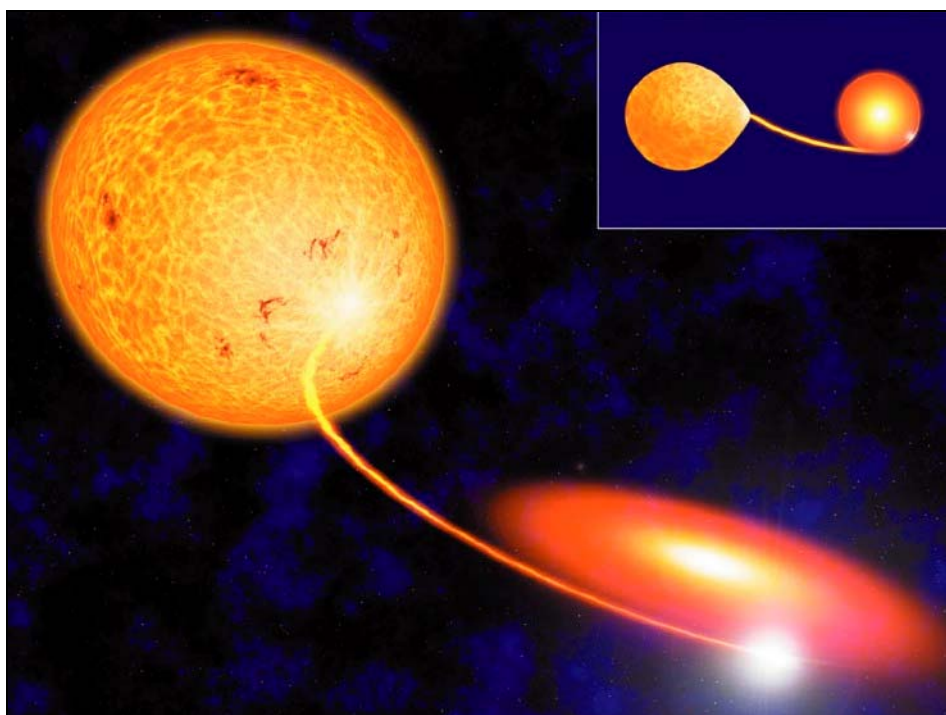
### Za vším hledej dvojhvězdu

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.

## 6. Ze života hvězd

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 obtačí 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*<sup>4)</sup>.



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-

<sup>4)</sup> 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.“

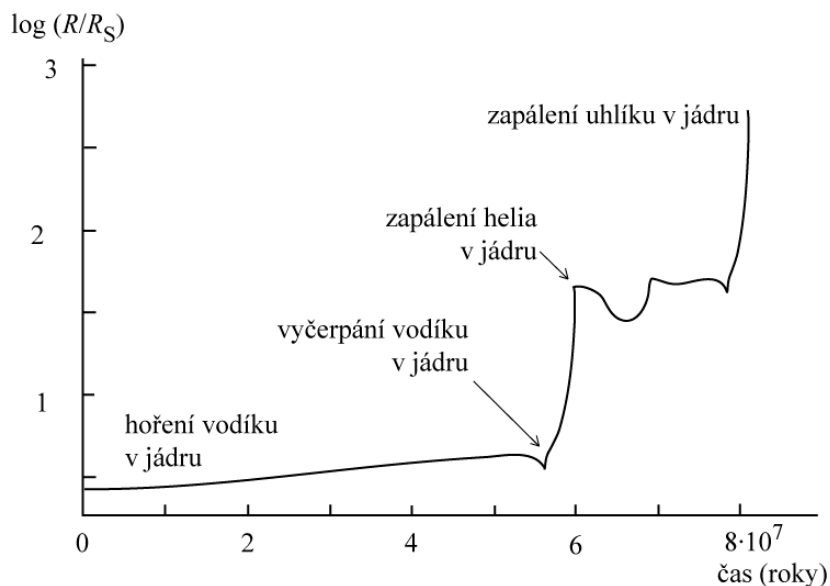
## 6. Ze života hvězd

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*.

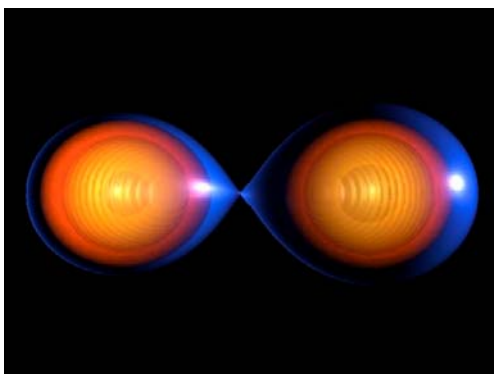
Do seznamu objektů, které jsou těsnými dvojhvězdami a kde mezi hvězdami dochází k výměně látky, patří také mnohé další objekty. Crawfordova myšlenka se ukázala jako velmi podnětná.



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.

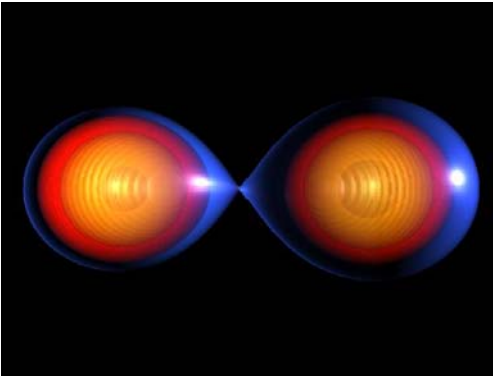
**Otázka 6.6.3.** Zvýší-li se jasnost novy o 15 magnitud (i takové případy byly pozorovány), odpovídá to zvýšení zářivého výkonu a) milionkrát; b) tisíckrát; c) 15krát.

**Otázka 6.6.4.** Které z uvedených hodnot fyzikálních veličin jsou pro bílého trpaslíka typické? a) střední hustota látky  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ; b) povrchová teplota  $15\,000 \text{ K}$ ; c) průměr řádově  $10^4 \text{ km}$ ; 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 (uved'te 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.

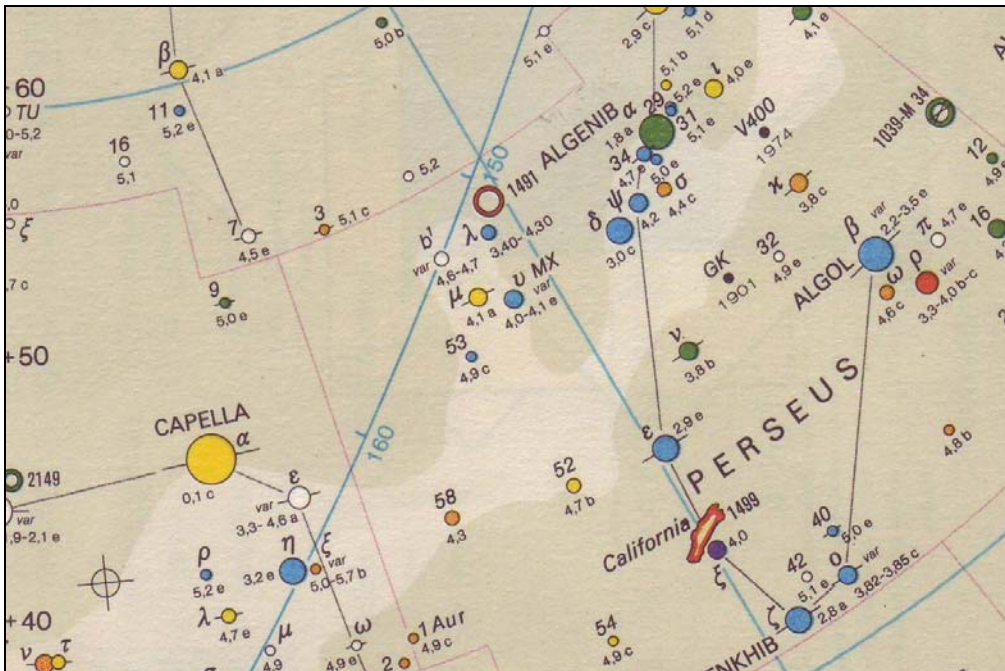
## 6. Ze života hvězd



čítanka

### John Goodricke: Výklad proměnnosti Algolu

Nedávná pozorování poukazují na pravidelné a periodické změny v jasnosti hvězdy Algol, neboli  $\beta$  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)

## 6. Ze života hvězd

---

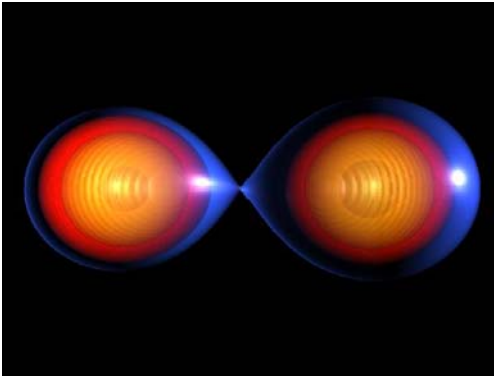
Ze všech jednotlivých pozorování vyplývá zaprvé, že tato hvězda se mění ze 2. do 4. velikosti během tří a půl hodiny, a potom za stejný čas se zjasní na hvězdu 2. velikosti. Zadruhé – tyto změny se pravděpodobně opakují každé 2 dny a 21 hodin.

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 Algotu 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. Ze života hvězd

---



---

### výsledky

K otázce 6.6.1.: b

K otázce 6.6.2.: a

K otázce 6.6.3.: a

K otázce 6.6.4.: b, c

K otázce 6.6.5.: c

K otázce 6.6.6.: a, b, c

### 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*<sup>1)</sup>.

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.

---

<sup>1)</sup> 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.

## 6. Ze života hvězd

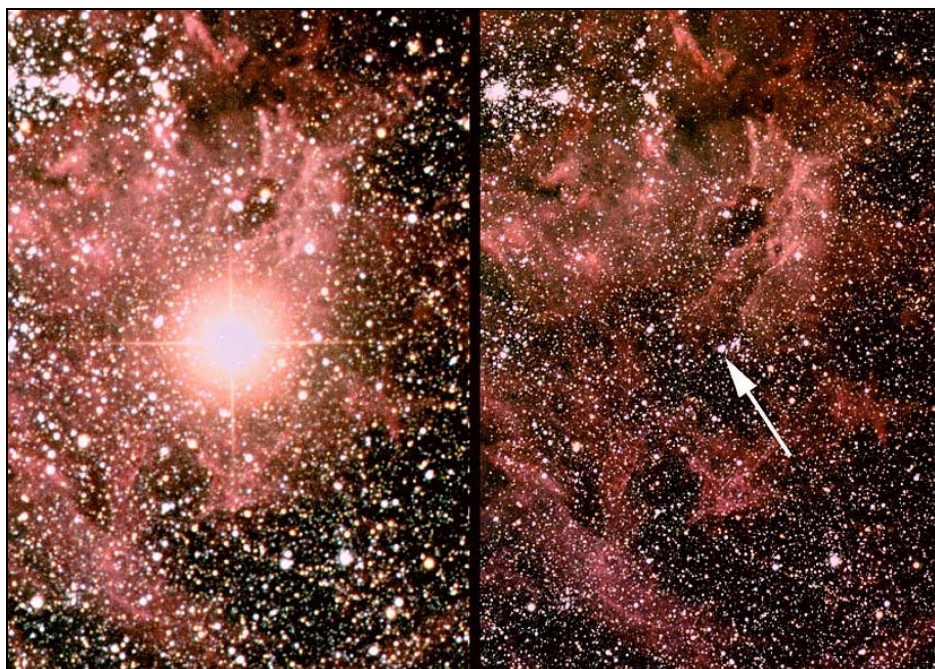
Jakmile se hvězdný obal rozptýlí, můžeme poprvé zaregistrovat neutronovou hvězdu. Ta se obvykle projeví jako *pulsar* – zdroj záření zejména v rádiovém oboru spektra, který se vyznačuje krátkými, ale přísně periodickými impulsy.

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<sup>-3</sup>. 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 pouhými očima, i když nešlo o výbuch supernovy přímo v naší Galaxii.

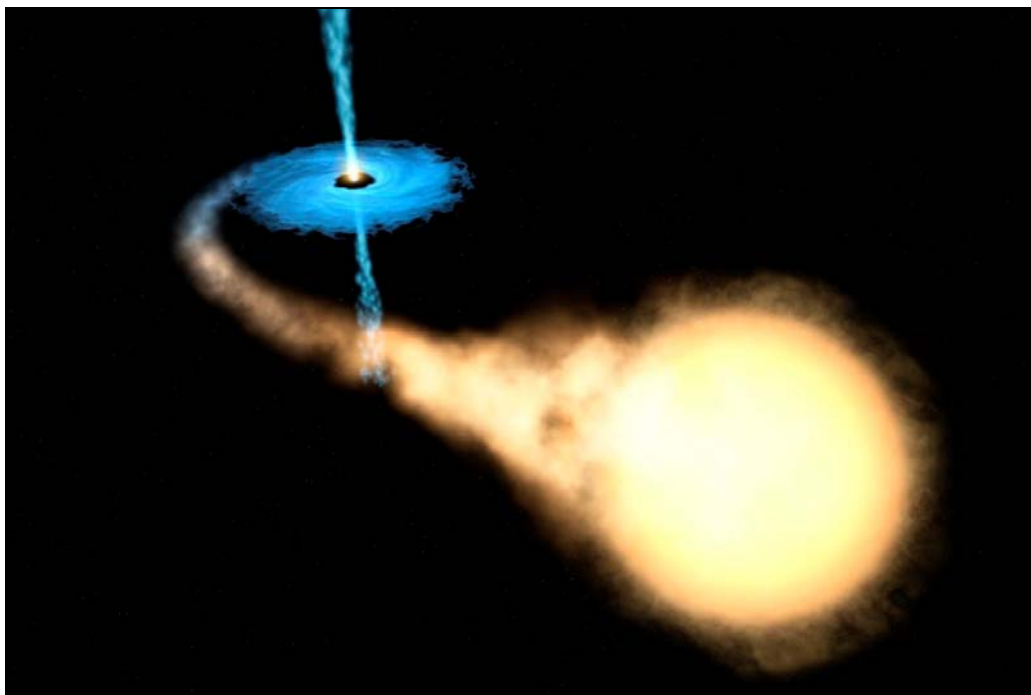


Supernova z února 1987, která vzplála ve Velkém Magellanově oblaku (vpravo je snímek téže oblasti před výbuchem).  
Foto: Anglo-Australian Observatory.

Zbývá jen odpovědět na všetečnou otázku: kdy vybuchne další supernova, kterou uvidíme pouhými očima? Podle všech statistik již nyní čekáme déle, než činí střední doba mezi dvěma takovými úkazy. Tak se tedy zvědavě rozhlízejme 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 hroučící 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 hroučení 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 zhroučené hvězdy, jež se stává černou dírou, se vytvořil akreční disk. Část látky z disku je namísto pádu do černé díry vyvržena ze soustavy.

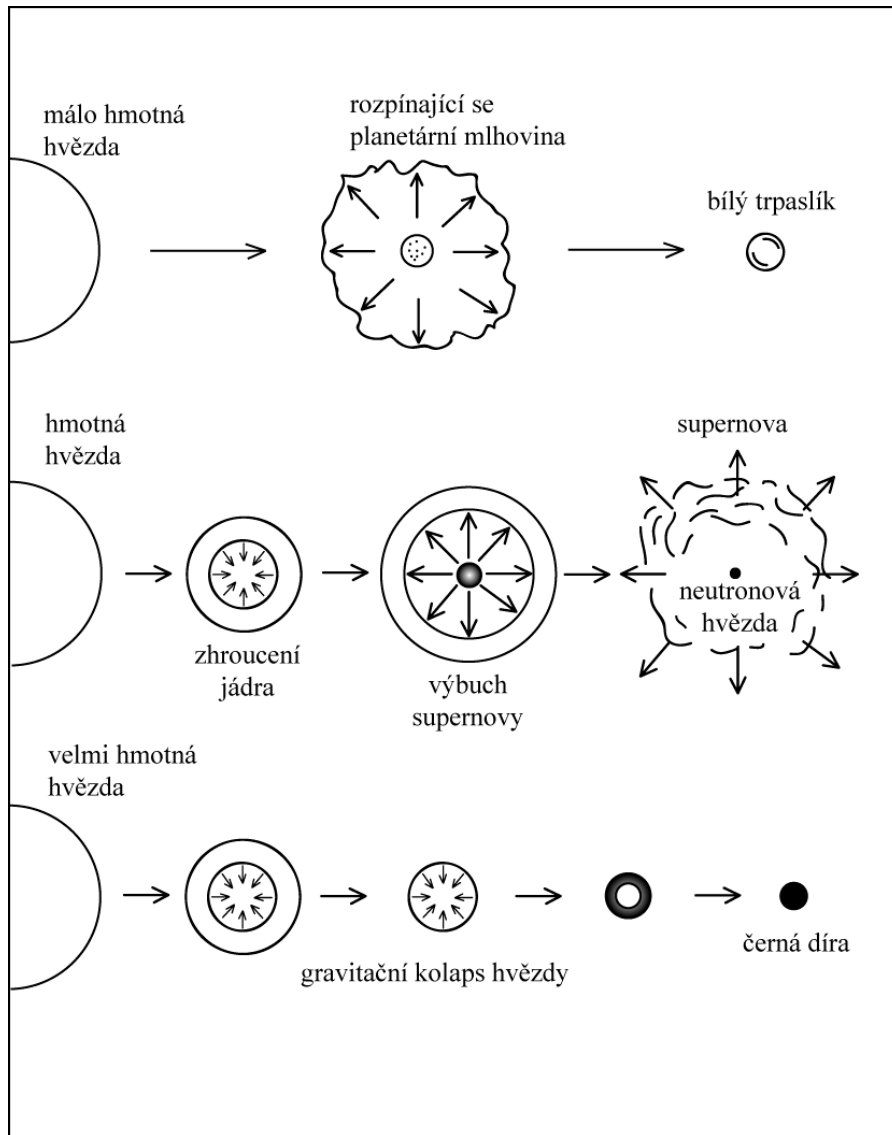
### Je načase rekapitulovat

Pokusme se shrnout do několika vět, co plyne ze studia vývoje hvězd. Především – je to děj *nevratný*. Ze zhroučených 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.

## 6. Ze života hvězd



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 učením Brunovském toho víme velmi málo – vlastně všechno, co známe, pochází právě od Keplera. Brunovský byl zaměstnán u císařského vicekancléře Korraducia jako „meteoroscopus“, jako pozorovatel jevů v povětrí. 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 neobvyklou 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 Schöler.

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.

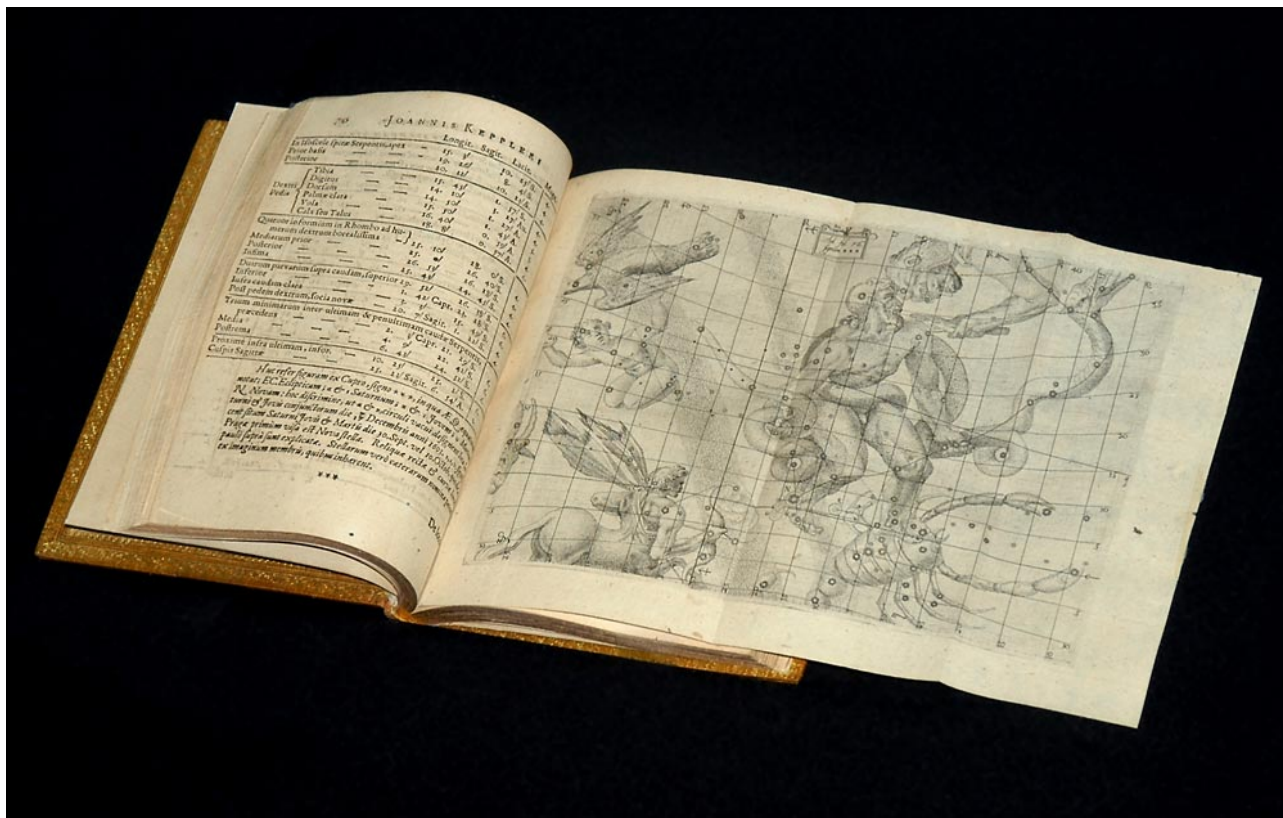
Každopádně byla příroda k astronomům mimořádně štědrá, když tak vzácné jevy, jako jsou pouhým okem nápadně pozorovatelné supernovy, prozíravě zařadila právě do doby, která horlivě přetřásala základní otázky o stavbě vesmíru. Příroda tehdy řekla své slovo v této diskusi právě včas. Po supernově v Kasiopeji 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

## 6. Ze života hvězd

v Evropě objevena první proměnná hvězda, která dostala přiléhavý název Mira – „Podivuhodná“. I Kepler sám už v roce 1600 našel „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 Hadoňoši, 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 Hadoňoši 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 nepopíratelně dokazuje vznikání a zanikání, je aristotelická 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 nespolehejte 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?

## 6. Ze života hvězd

---

**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 vakuu? (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 zřítíla 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.** Explosivní 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?



## 6. Ze života hvězd

---

**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 pouhým okem. 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 z paměti.)

**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

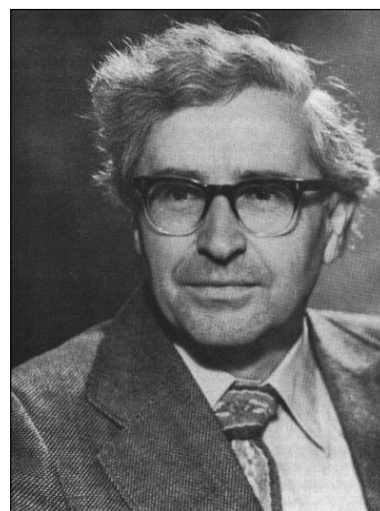
**R**adioteleskop v Cambridge – to představovalo 16 řad po 128 dipólových anténách. Dipóly byly zavěšeny na více než tisíce třímetrových dřevěných tyčí. Vše bylo propleteno téměř 200 kilometry drátů, kabelů a stíněných spojů. Bylo tam i 200 transformátorů, 350 konektorů a 24 tisíc izolátorů. To vše sloužilo 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<sup>1)</sup>. Soustředil kolem sebe několik mladých lidí, většinou čerstvých absolventů univerzity. Patřila mezi ně i tehdy čtyřiatřicetiletá 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 pásy, 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-

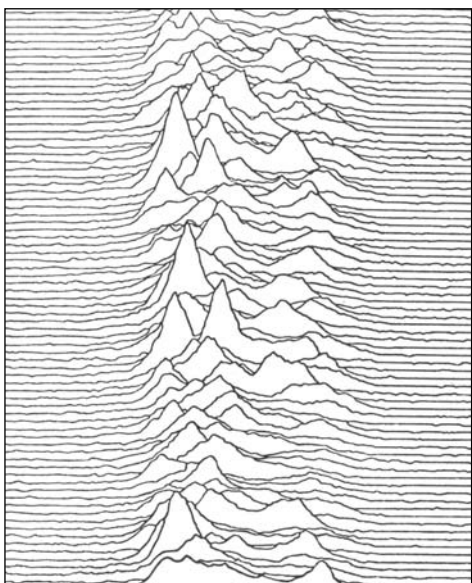


---

<sup>1)</sup> Čti: *hjúúš*.

## 6. Ze života hvězd

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 pozdrzení 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* – mimozemšťáci, 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).





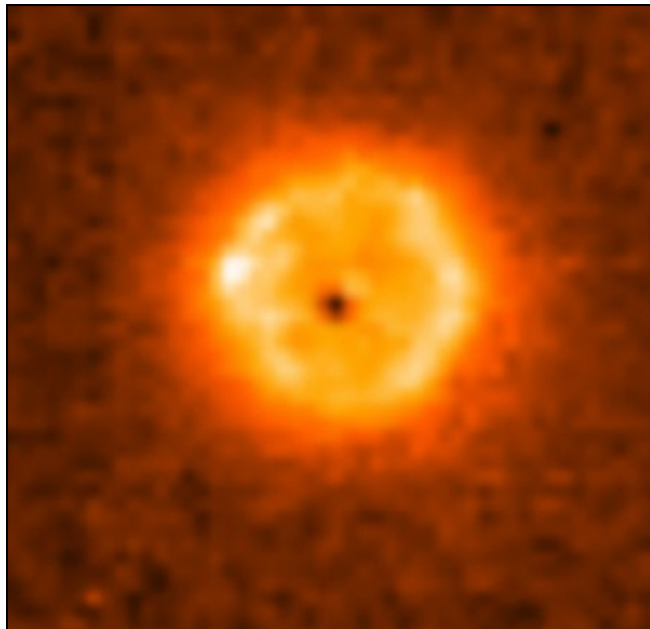
---

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).



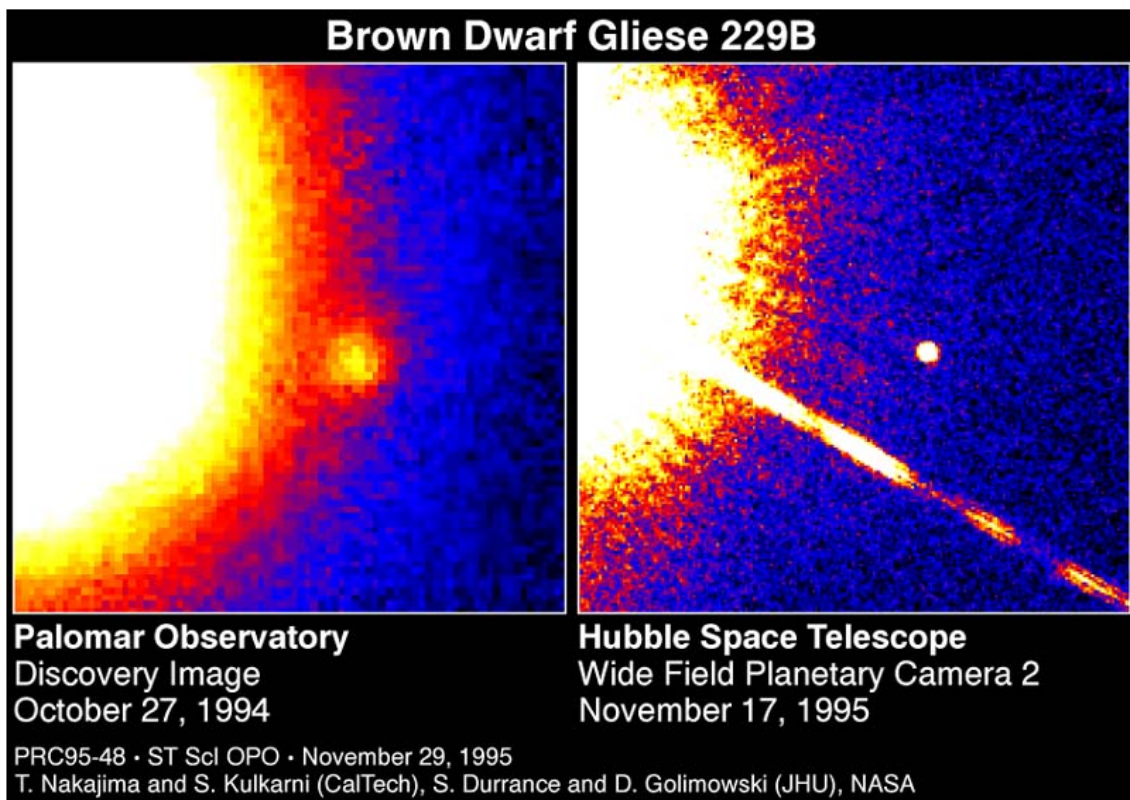
---

čítanka

---

### Zdeněk Pokorný: Na scénu přichází hnědý trpaslík

**P**o těchto hvězdách se pátralo již dlouho – řeč bude o hnědých trpaslicích. 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-



## 6. Ze života hvězd

---

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 „ne-standardně“. 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“ (uvovzovky jsou tu namísto – 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 – řekněme 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 indiští 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 čtème...

„...v bance se volně vznášela sametově černá koule velikosti jablka... Užaslý bráhmaň 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 dalo 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 ústřížky papíru, rukavice, dámské závoje – to všechno



## 6. Ze života hvězd

---

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 upláca 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 zařátými 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 nabitě 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 převedte 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 *neměřte* 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 *opakuji* se stejnou periodou na různých frekvencích, ale přicházejí k nám se zpožděním závislejícím na frekvenci (pro nižší frekvence je zpoždění větší). Příčinou zpoždění je

## 6. Ze života hvězd

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<sup>1)</sup>.

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

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

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

Na obr. 1 změřte zpoždění  $\Delta t$  v milimetrech, převed'te 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  $3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-3}$  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:**

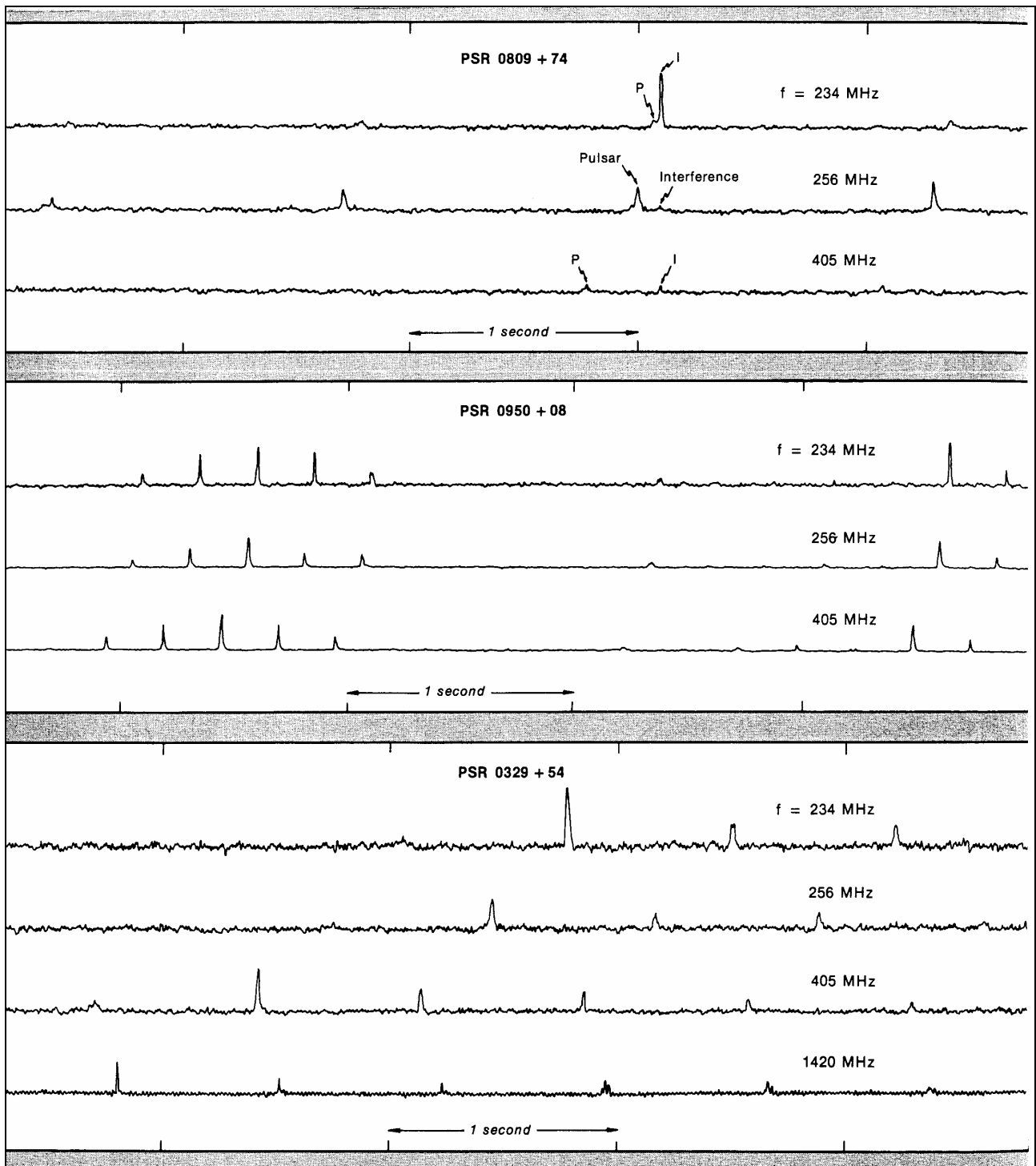
**Tabulka 1**

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

Měřítka: 1 s odpovídá \_\_\_\_ mm.

<sup>1)</sup> Disperze signálů z pulsaru nám umožňuje snadno odlišit impulsy pulsaru od pozemního rušení, které samozřejmě žádné zpoždění nevykazuje.

## 6. Ze života hvězd



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

## 6. Ze života hvězd

---

**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

**E**rnst 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.



## 6. Ze života hvězd

---

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 nepozoroval. A teď se uprostřed mlhoviny nacházela hvězda, která byla tak jasná, že by ji snad bylo možné spatřit pouhými očima! Je-li tento jev reálný, pak jde o senzaci, o které by se měl co nejdříve 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 lodí, 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.



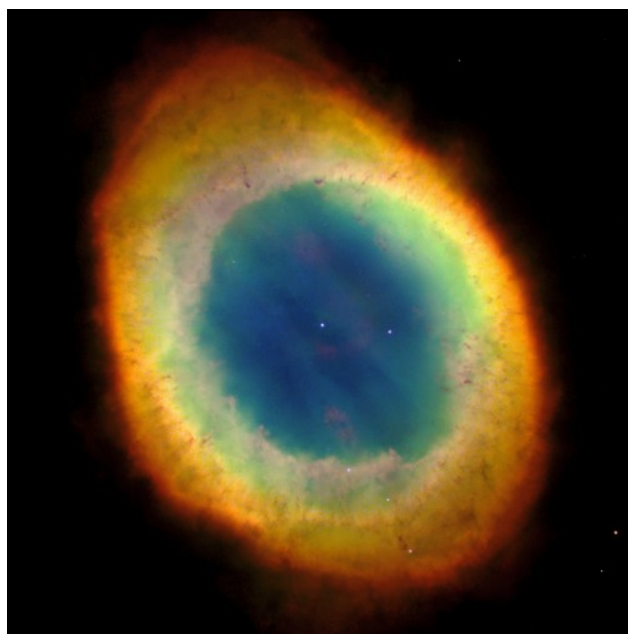
---

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? Srovnajte tuto hodnotu se vzdálenostmi nejbližších hvězd od nás.



## 6. Ze života hvězd

---



---

„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	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>V</b>	<b>A</b>	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 přečtete následující věty. Popisují určitou skutečnost, vždy je tam uvedeno jméno některého významného 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 významných astronomů – Tycho Brahe a Johannes Kepler.



### 7.1. Inventura ve sluneční soustavě

**K**aždého 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 <sup>1)</sup> (zbytek připadá především na planety a jejich družice).

Pozorný pozorovatel také zaznamená, že ve sluneční soustavě existuje řada velice rozmanitých těles. Nicméně lze je roztrdit přinejmenším na dvě rozdílné skupiny těles – tělesa menších rozměrů, s relativně vysokou hustotou, která najdeme blíže ke Slunci, a tělesa rozměrnější, menší hustoty, nacházející 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.



---

<sup>1)</sup> 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 osy 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.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

### 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<sup>2)</sup>. 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 *obři* (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<sup>3)</sup>), 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.

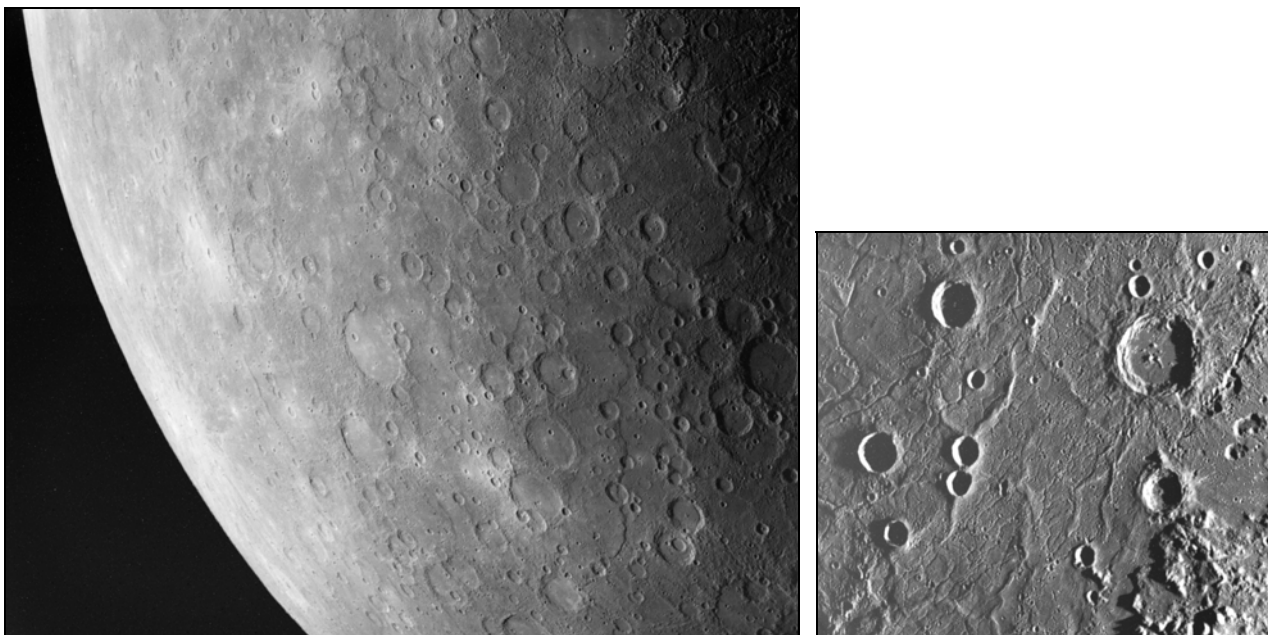
Na Merkuru je nejzajímavější pánev *Caloris* (v překladu Pánev horka). Obklopuje ji šest prstenčových valů, z nichž nejvýraznější má průměr 1340 km. Dno pánve je unikátní: najdeme tu spoustu prasklin a horských hřbetů, které buď vybíhají ze středu, nebo tvoří soustředné prstence.

---

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

<sup>3)</sup> 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*).

## 7. Zrození v chladu a ohni



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

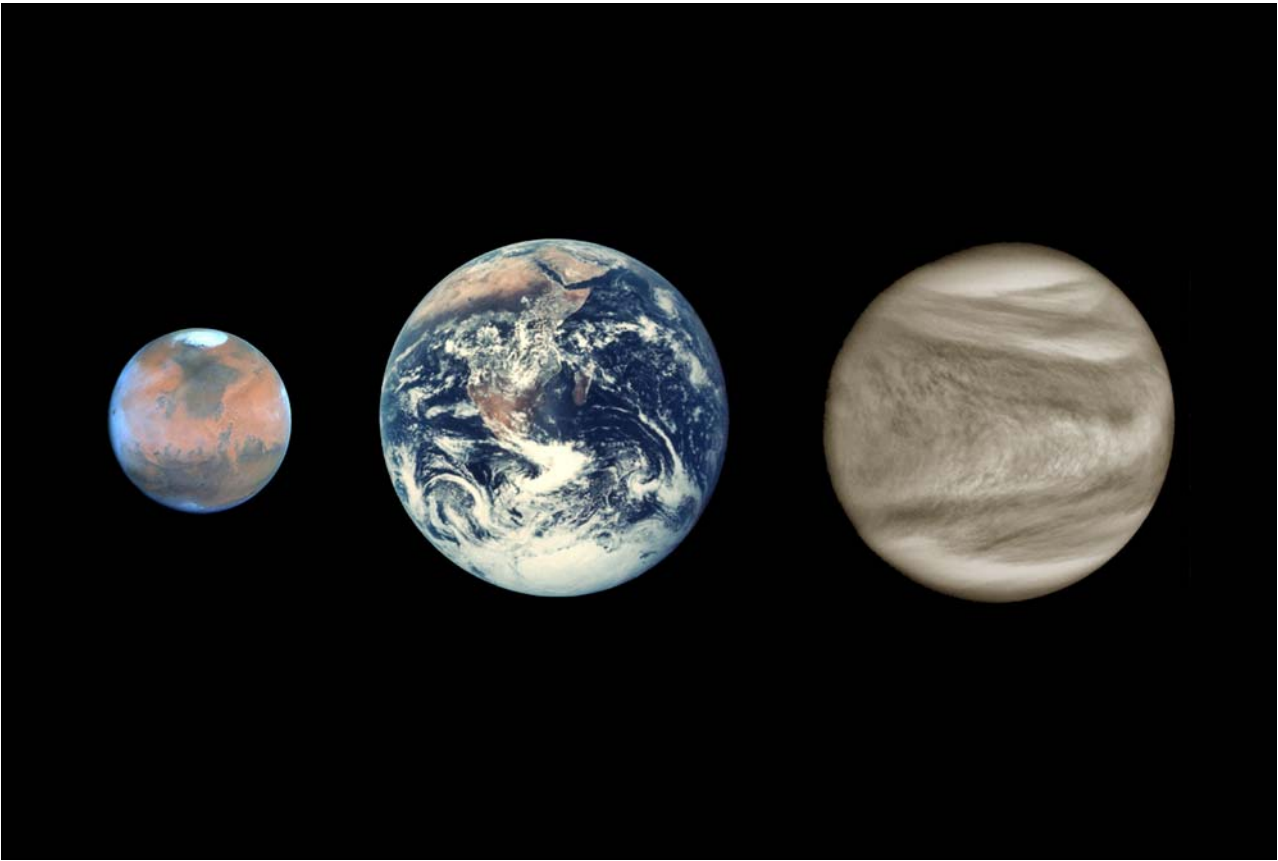
Rotační osa Merkuru je téměř kolmá k oběžné rovině a **doba rotace** planety je přesně  $2/3$  oběžné periody. Tedy za dva oběhy kolem Slunce se planeta vůči němu třikrát otočí. To znamená, že když je planeta například v přísluní, míří ke Slunci právě jeden ze dvou poledníků, lišících se navzájem o 180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

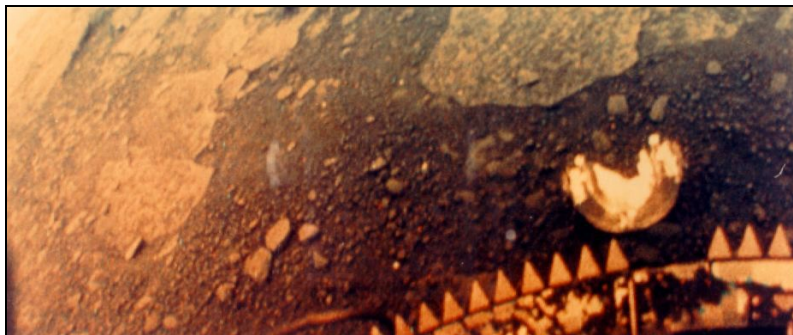
V atmosféře Venuše se uplatňuje silný **skleníkový jev** (viz doplněk v této kapitole). V důsledku tohoto jevu dosahuje teplota na povrchu 490 °C, tlak na povrchu převyšuje pozemský asi 90násobně. Samotný povrch Venuše můžeme studovat jen velmi obtížně. Hustá atmosféra nám nedovoluje uvidět ze Země anebo 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: tvárnost 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.

## 7. Zrození v chladu a ohni



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 *drs- nému* povrchu, *tmavší* povrchu *hladšímu*. Vše je ale komplikováno konkrétním sklonem odražející 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 nejobtějšími 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, klíš'ata 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-



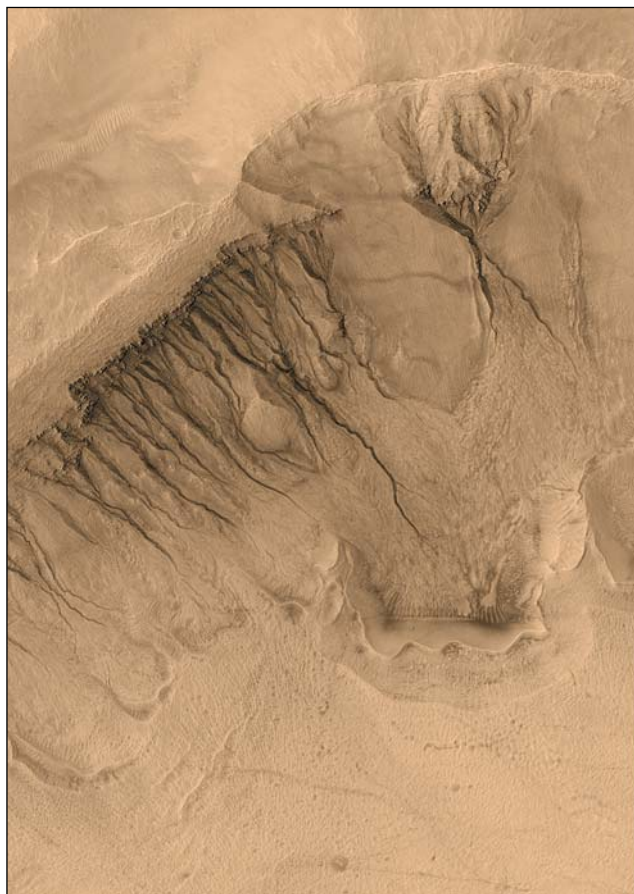
## 7. Zrození v chladu a ohni

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*.

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 drobných prachových částic o průměru jen několika tisícín 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 letném 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 zarovnávané a vyhlazovány usazováním prachu na jejich dna či borcením svahů. Na Marsu nalezneme i několik obrovských pánví – rozsáhlých, zhruba kruhových plošin. Největší je pojmenována

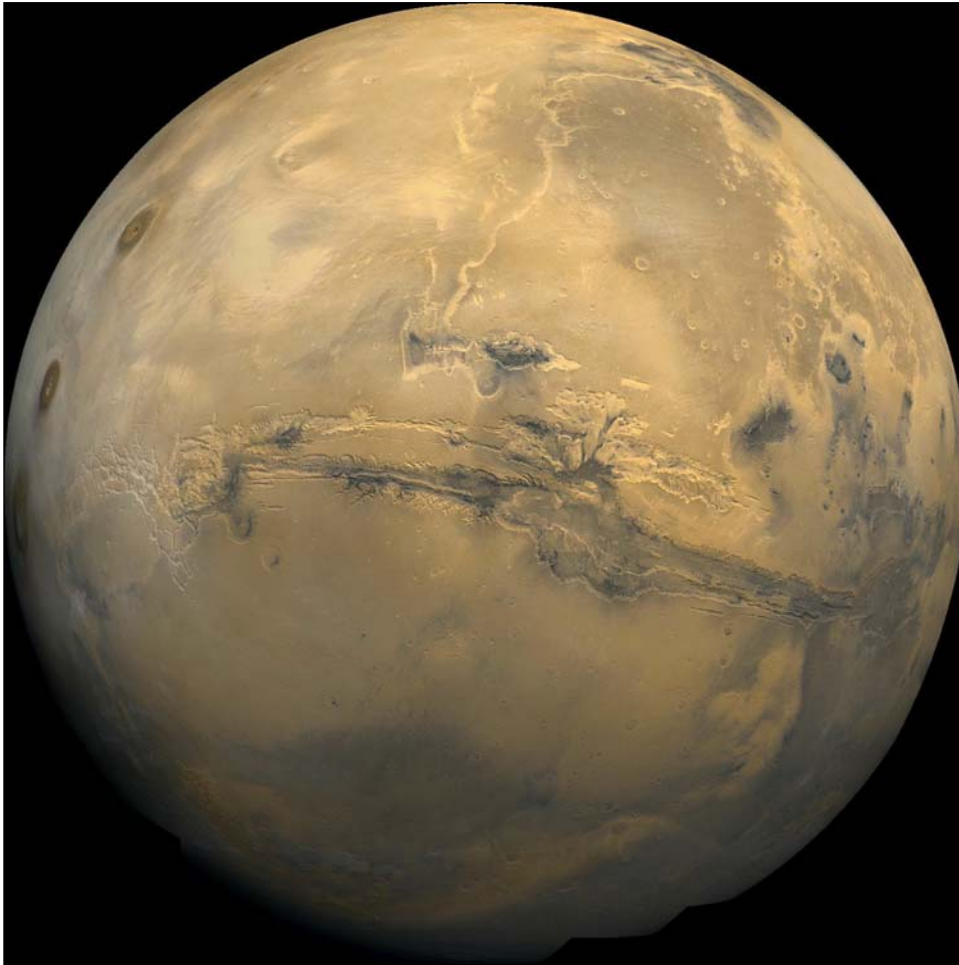


Stružky na svahu kráteru, které vznikly nedávno zřejmě výronem vody a bahna ze stěny.

*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 zářívá 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 těžavější) součást polární čepičky.



Valles Marineris.

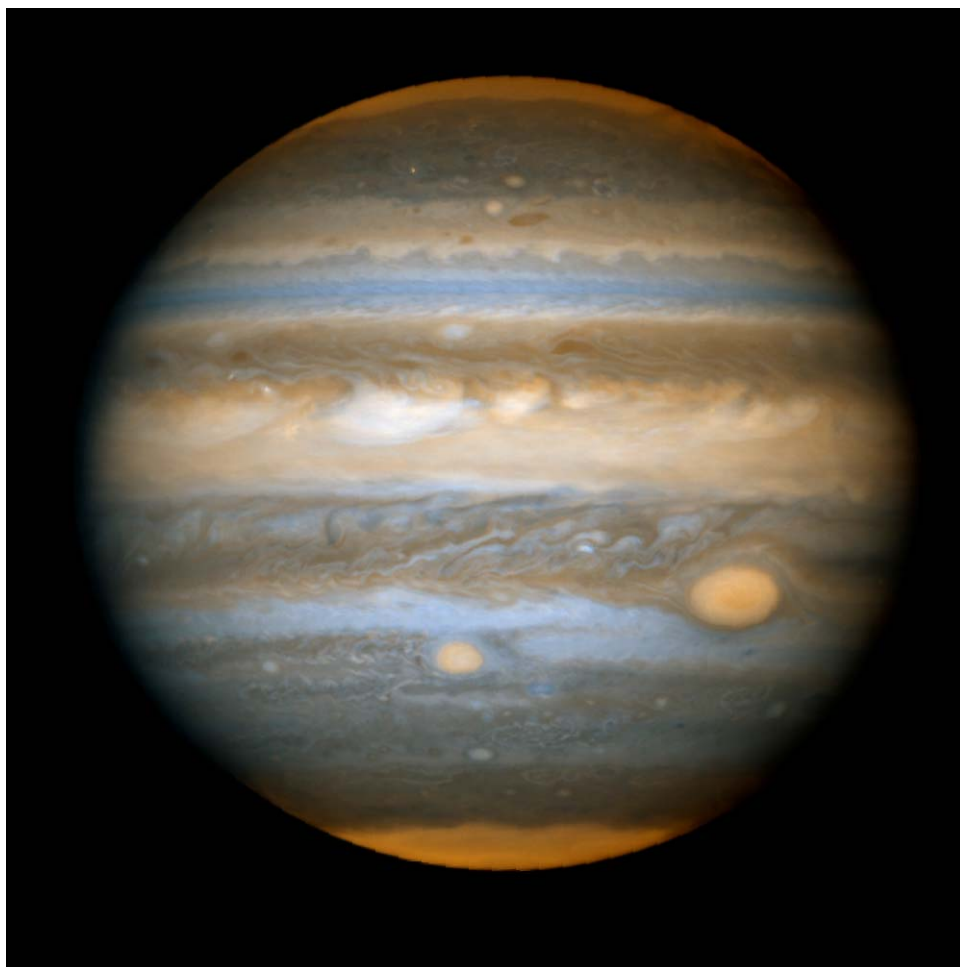
A jak je to s **životem** na Marsu? Přímé důkazy o existenci života na této planetě zatím neexistují; je však jasné, že pokud tu živá hmota bude nalezena, půjde jen o drobné mikroorganismy.

### ***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 (řeceno 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 Hubbleovým 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***

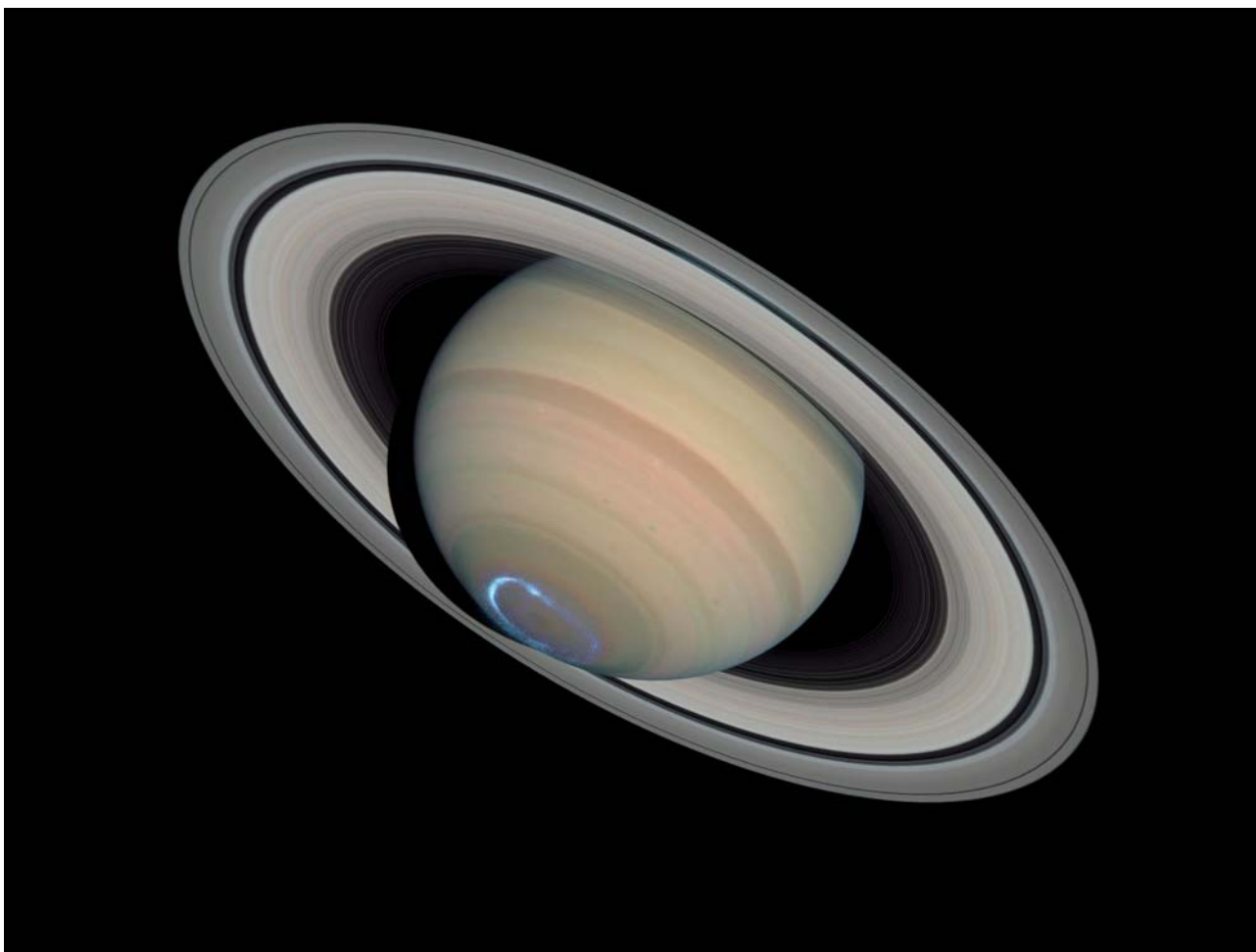
Saturn se svými **prstenci** je zajisté symbolem hvězdářství. I když to není jediná planeta s prsteny, jak dnes víme, jsou její prstence určitě nejkrásnější, ačkoli pouhýma očima je nespátříme. Samotná planeta Saturn bývá často pokládána za poněkud bezbarvou kopii Jupiteru, kopii, která má všeho „trochu 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

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

ještě do detailů nerozumíme. Zdá se, že vidíme jen několik jasných prstenců, 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).

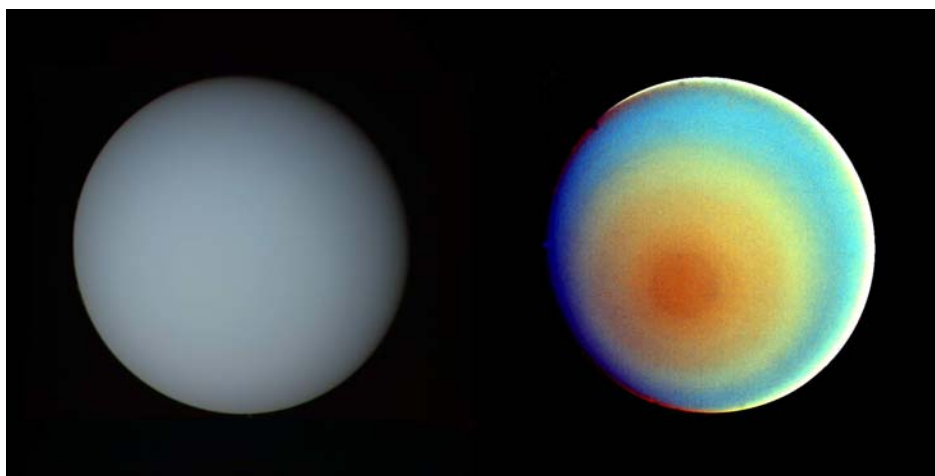
Prstence nejsou v dalekohledu vždy pozorovatelné. V některých údobích spatříme jen mírně zploštělý nažloutlý kotouč bez prstenců! Vada na Saturnově kráse je to podstatná, ale naštěstí odstranitelná, stačí jen počkat – pravda, pár let. Celý úkaz zmizení je způsoben tím, že prstence jsou velmi tenké, takže 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).

## 7. Zrození v chladu a ohni

### *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.



## 7. Zrození v chladu a ohni

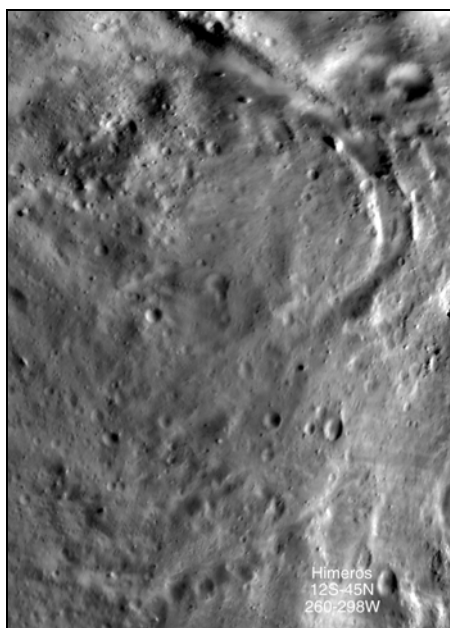
### Pluto

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*<sup>4)</sup> 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 po držela 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<sup>5)</sup>. 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

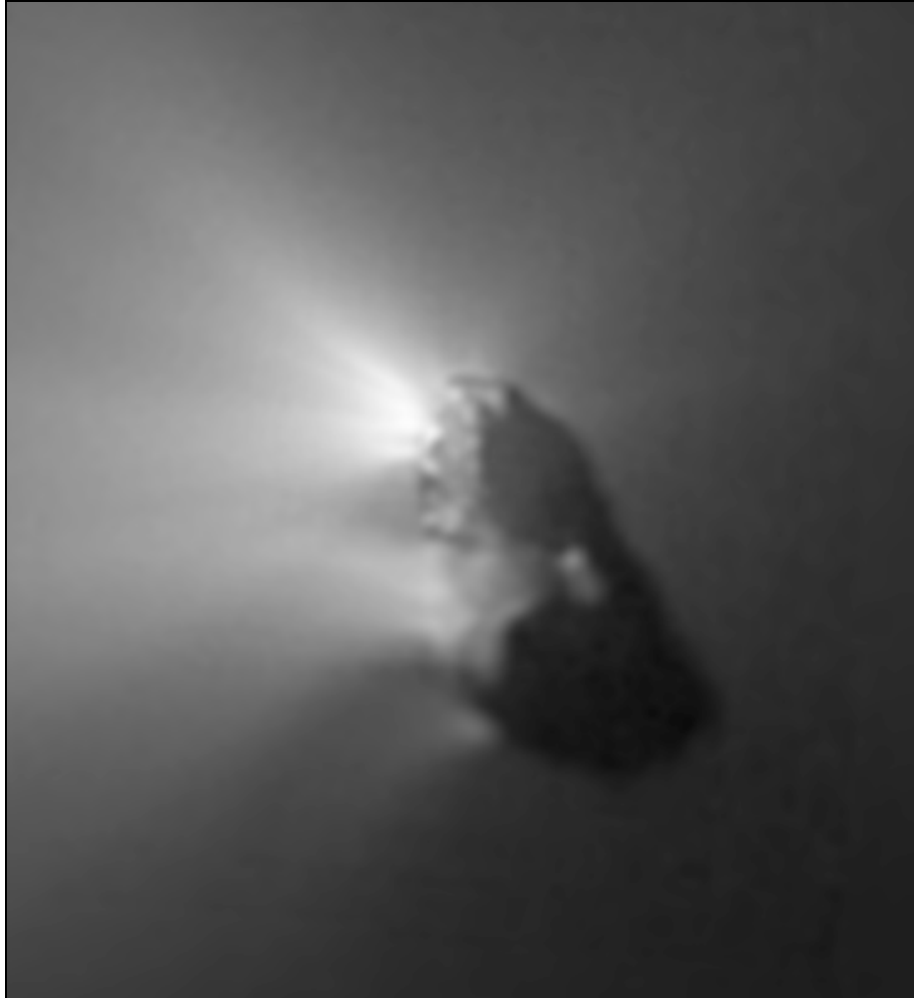
<sup>4)</sup> Čti: *k(h)ajprova*.

<sup>5)</sup> 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.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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

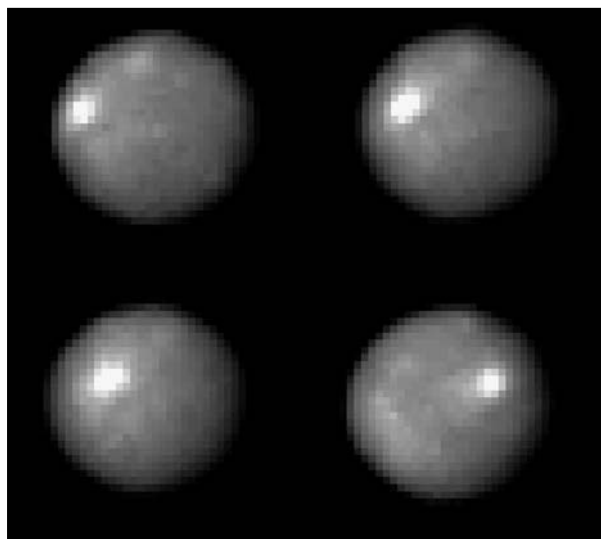
---

## Zdeněk Pokorný: Chybějící planeta?

**P**rvního 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“.

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 mezera měla zaplnit nějaká dosud neznámá planeta. Astronomové dokonce podnikli pokus zorganizovat hledání nové planety – 21. září 1800 se v domě významného astronoma-amatéra Johanna



Snímky planety Ceres pořídil na přelomu let 2003 a 2004 Hubbleův kosmický dalekohled (rozlišení na snímcích je asi 30 km). Dobře je zachycena rotace planety.

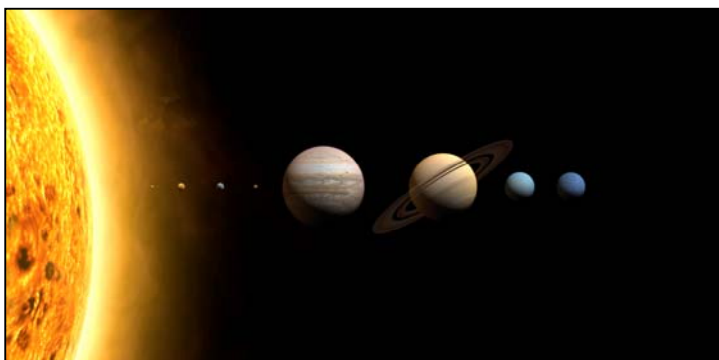
## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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 (naš 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).



---

doplňěk

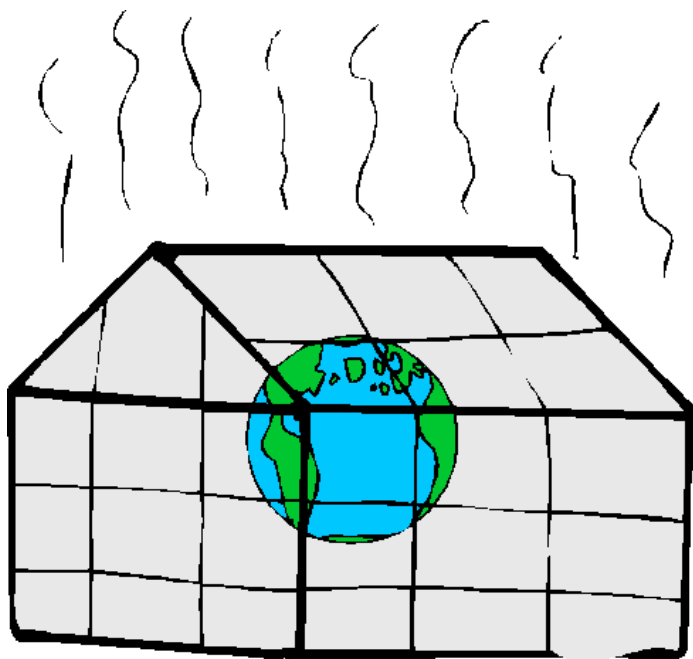
---

### 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-





## 7. Zrození v chladu a ohni

---

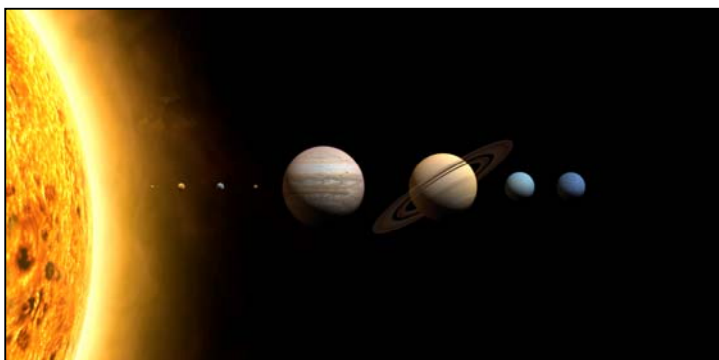
vanou z horních vrstev atmosféry v infračerveném oboru spektra zpět do meziplanetárního prostoru. V tu chvíli je ovšem teplota povrchu a spodní atmosféry vyšší než efektivní teplota planety<sup>1)</sup>.

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*.

---

<sup>1)</sup> 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

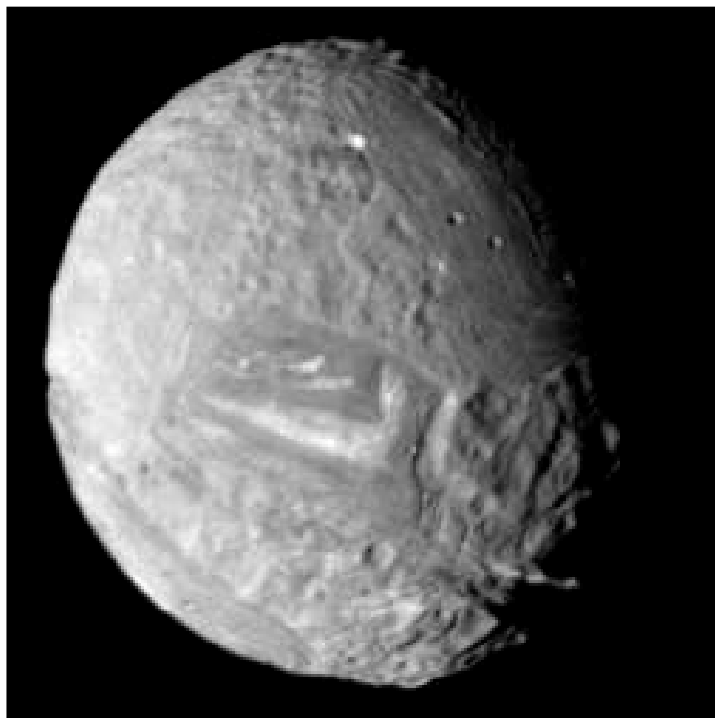
---

## Zdeněk Pokorný: Miranda

**P**řenesme 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.

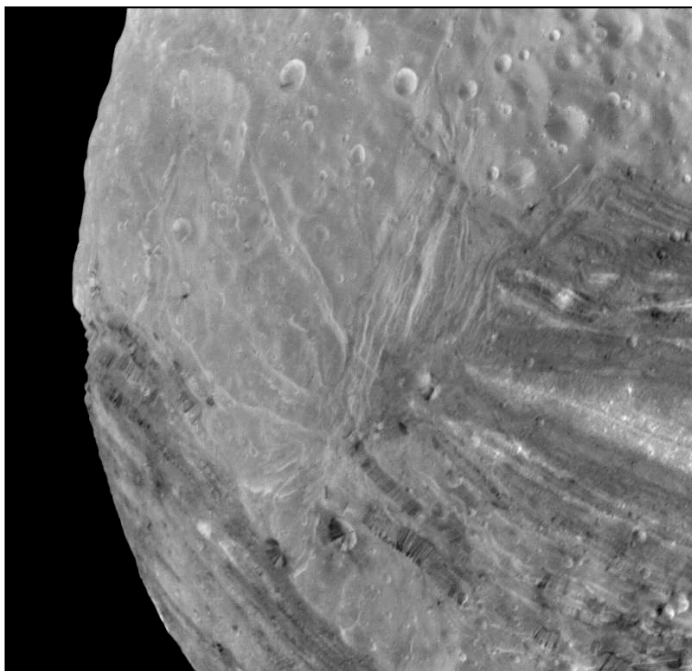


## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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 našťastí 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 nenesla?

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 přiletu 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 veřejností nevzrušují, ledaže by se jednalo o něco mimořádného. A právě 30. srpna 1992 k takovému zvláštnímu objevu došlo: David Jewitt a Jane Luuová našli 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).

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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.

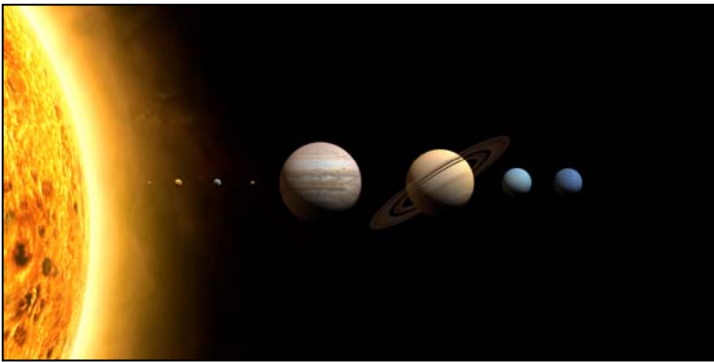
Z knihy *Kalendárium – astronomie* (CP Books, Brno 2006).



Srovnání velikostí (odleva) Pluta, planetky Quaoar, Měsíce a Země.

## 7. Zrození 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.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

**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 odrazil 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 Hubbleova 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 <sup>1)</sup>

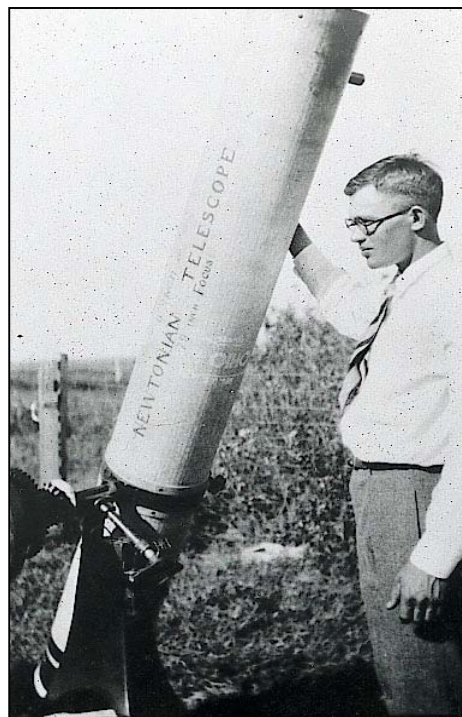
(4. 2. 1906 – 17. 1. 1997)

**D**o 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 stálícím 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 pravoúhloú clonku, aby se člověk v tom labyrintu hvězd vyznal. Proto také rychlost prohlížení desek poklesla a práce s blinkmikroskopem se oproti fotografování zpožďovala.“



---

<sup>1)</sup> Čti: klajd tombó.



## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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 našel 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 Tombaughy.

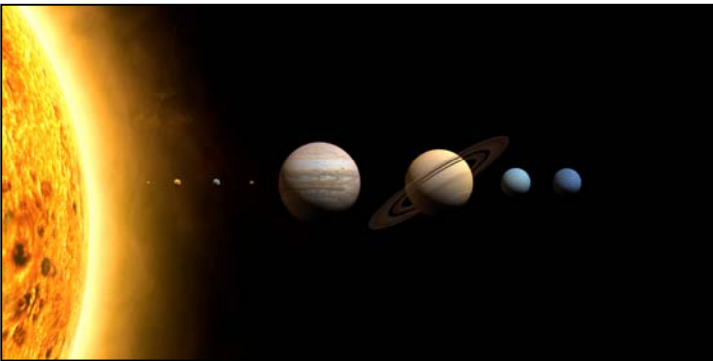
Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný.



Clyde Tombaugh na Lowellově observatoři ve Flagstaffu.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---



---

### „luštěniny“

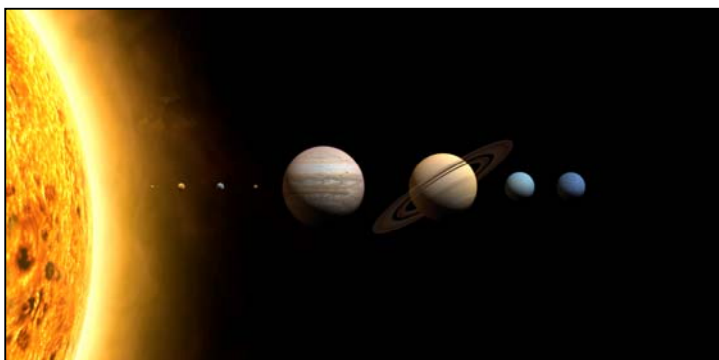
---

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 významného 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. Zrození v chladu a ohni

---



---

### výsledky

---

K otázce 7.1.1.: d

K otázce 7.1.2.: b

K otázce 7.1.3.: a

K otázce 7.1.4.: b

K otázce 7.1.5.: Merkur má relativně objemnější jádro, složené z těžších prvků, než má Měsíc.

K otázce 7.1.6.: Snadněji se prokazují plyny, které v zemské atmosféře *nejsou* zastoupeny (nebo jen málo). Abychom odlišili plyn v zemské atmosféře od cizího planetárního, musíme pořizovat spektra vysoko v horách, kde je zemská atmosféra již řídká, nebo planetu pozorujeme v dobách, kdy její radiální rychlost vůči Zemi je nenulová (pak planetární spektrální čáry budou vůči pozemským dopplerovsky posunuté).

K otázce 7.1.7.: Povrchový atmosférický tlak na Venuši je asi 9 MPa, což odpovídá hloubce v oceánu  $10 \cdot 90 = 900$  m.

K otázce 7.1.8.: a

K otázce 7.1.9.: b

K otázce 7.1.10.: c

K otázce 7.1.11.: Prstence jsou velmi tenké a jsou skloněny k ekliptice. V určitých pozicích Saturnu vůči Zemi na ně hledíme přímo z boku, a tehdy jsou jen obtížně pozorovatelné.

K otázce 7.1.12.: a

K otázce 7.1.13.: d

**„Luštěniny“:** dvojice pojmů: konjunkce – opozice, okulár – objektiv, Castor – Pollux, popelavý svit – Měsíc, pulsar – neutronová hvězda, Alcor – Mizar; tajenka: TYCHO BRAHE.

### 7.2. Exoplanety

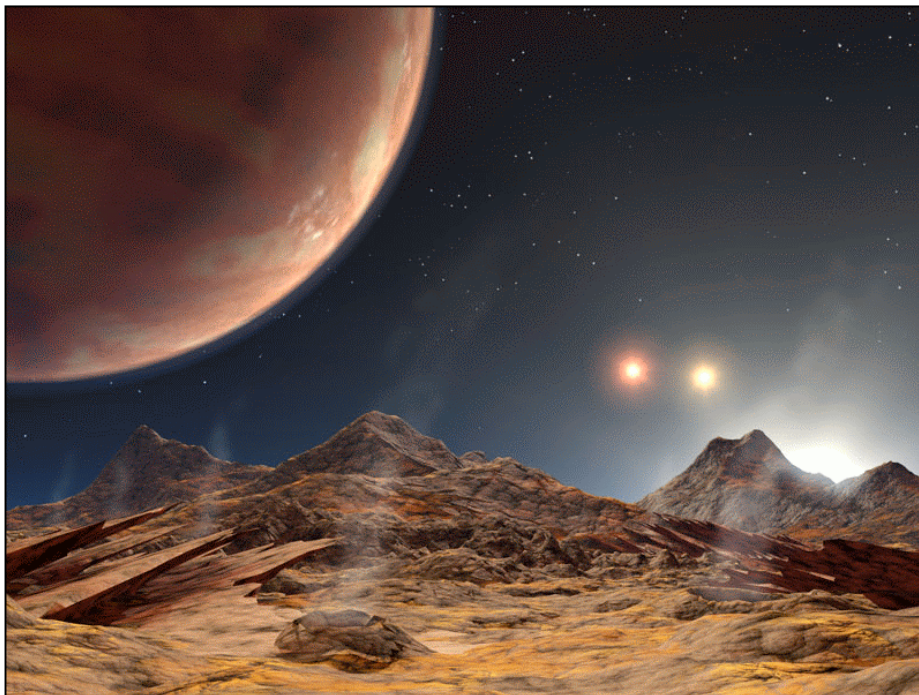
**E**xistují planety také kolem jiných hvězd než Slunce? Tuto otázku si kladli všichni zvědaví odborníci i laici přinejmenším od doby, kdy se Země definitivně vřadila mezi planety a kdy bylo jisté, že planety (a nikoli hvězdy) jsou jediným vhodným domovem živých organismů.

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. Není divu, 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.



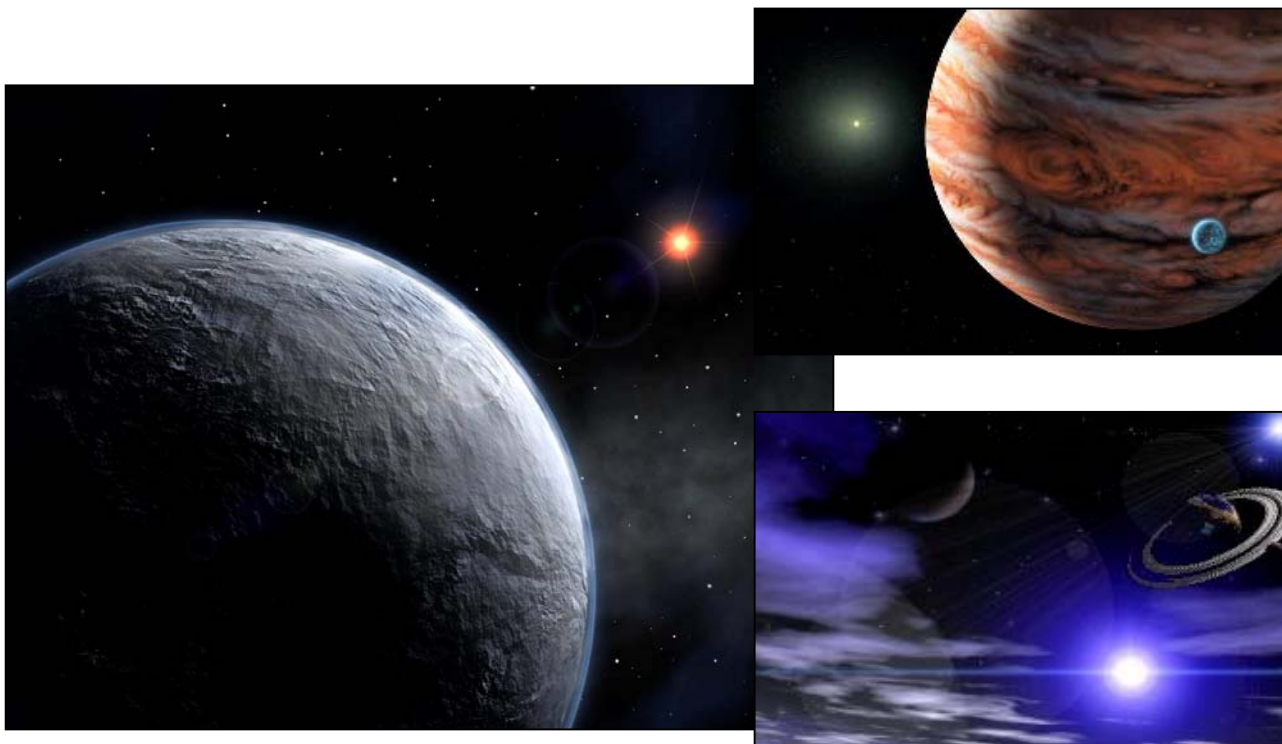
## 7. Zrození v chladu a ohni

Největší nadějí 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 přečtete v čítance.

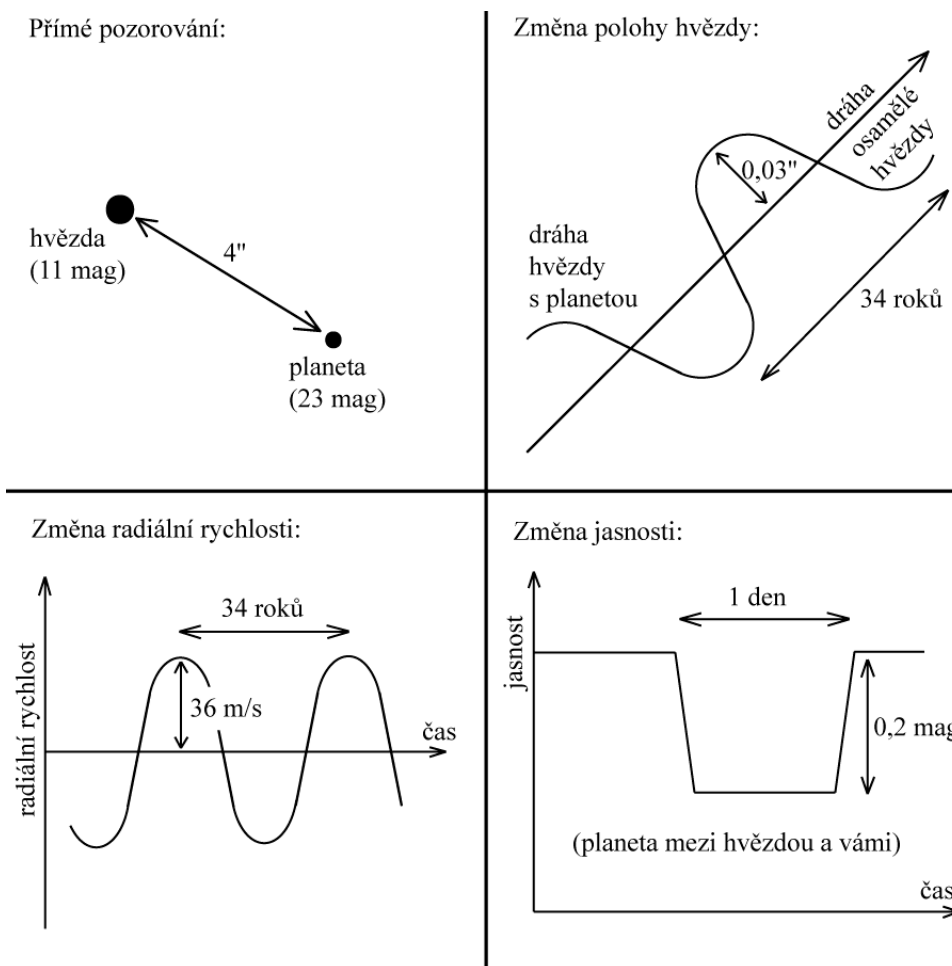


Dokud neznáme přesné parametry exoplanet, mohou jejich nákresy vypadat všelijak. Nicméně všimněte si, jak jsou kreslíři inspirováni planetami z naší sluneční soustavy.

## 7. Zrození v chladu a ohni

### 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 termojaderné 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 rozehtřívát 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 „exo-jupitery“: jsou to tělesa s velice protáhlou dráhou, která spíše při-

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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 těleších 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.

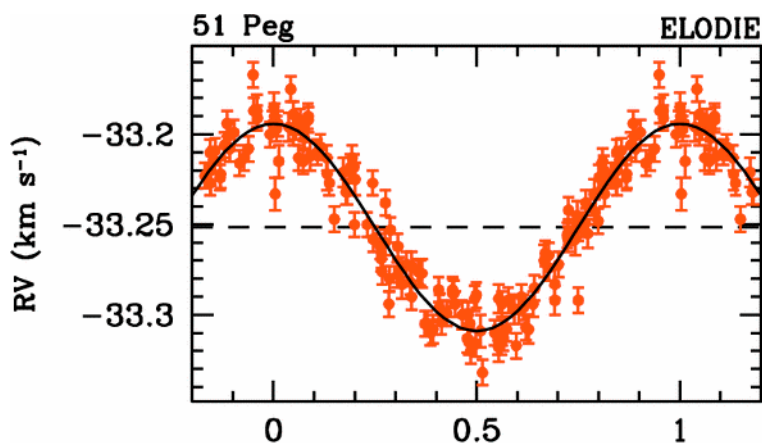
Není sporu o tom, že zkoumání exoplanet bude jeden z významných směrů výzkumu vesmíru na počátku 21. století. Hlavním výsledkem dosavadního bádání je poznatek, jak hluboce jsme se mýlili, když jsme soudili, že kolem hvězd slunečního typu musí být planetární soustavy taktéž slunečního typu. Nyní to ale vypadá právě naopak: co planetární soustava, to nezaměnitelný originál.



### čítanka

## Zdeněk Pokorný: Závod vyhráli outsideri

**N**a pracovním semináři o tzv. chladných hvězdách v italské Florencii oznámil 6. října 1995 Michel Mayor z ženevské observatoře, že s kolegou Didierem Quelozem <sup>1)</sup>, 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 <sup>2)</sup>. 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 bezzbytků vyhnout jen málokdo. Marcy sice měl hvězdu 51 Pegasi zanesenu do svého katalogu, ale domní-

<sup>1)</sup> Čti: *dydié(r)em kelozem*.

<sup>2)</sup> Čti: *mársy, batler*.



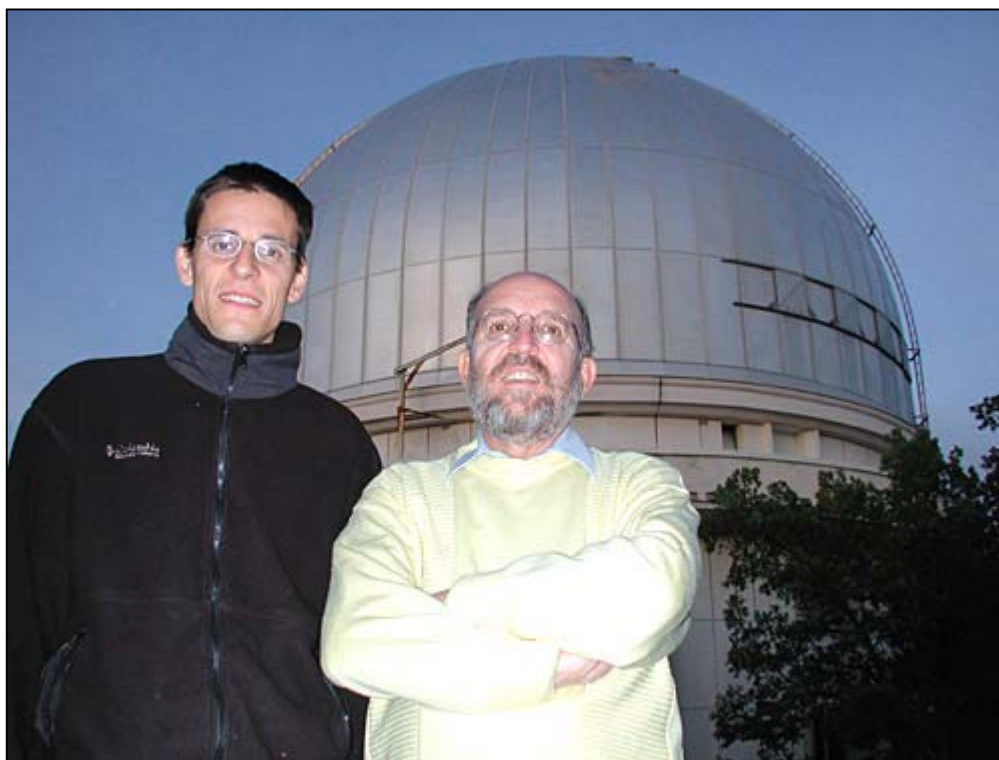
## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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<sup>3)</sup>, 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.

---

<sup>3)</sup> 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 – trpasličí 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*? Zářící 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.



## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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 termionukleární 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. Zrození 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<sup>1)</sup>. Jsou tvořeny převážně neutrálním vodíkem; průměrná hustota oblaku činí  $10^{-20}$  kg·m<sup>-3</sup>, teplota 50 až 100 K.

Dojde-li ke stlačení takového oblaku (např. vzájemnou srážkou dvou oblaků, rázovou vlnou při výbuchu blízké supernovy...), hustota se zvýší o 2 až 4 řády (dosáhne  $10^{-18}$  až  $10^{-16}$  kg·m<sup>-3</sup>). 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 Verschate.

---

<sup>1)</sup> Typickou plynnoprachovou mlhovinu tvoří převážně *plyn*, kterým je vodík. Jen asi jedno procento (podle hmotnosti) připadá na *prach* v podobě zrnků velikých jednu desetinu mikrometru až jeden mikrometr.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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  $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 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 (přínejmenším v jeho středových částech) vypařily všechny prachové částice.



Toto je pochopitelně jen kresba, ale nějak takto mohla naše zárodečná mlhovina skutečně vypadat.

### Deset nejčtetnějších 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.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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 vyzářováním navenek. Jak teplota klesala, začala se v mlhovině zase objevovat prachová zrna. Opětná *kondenzace*<sup>2)</sup> – 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

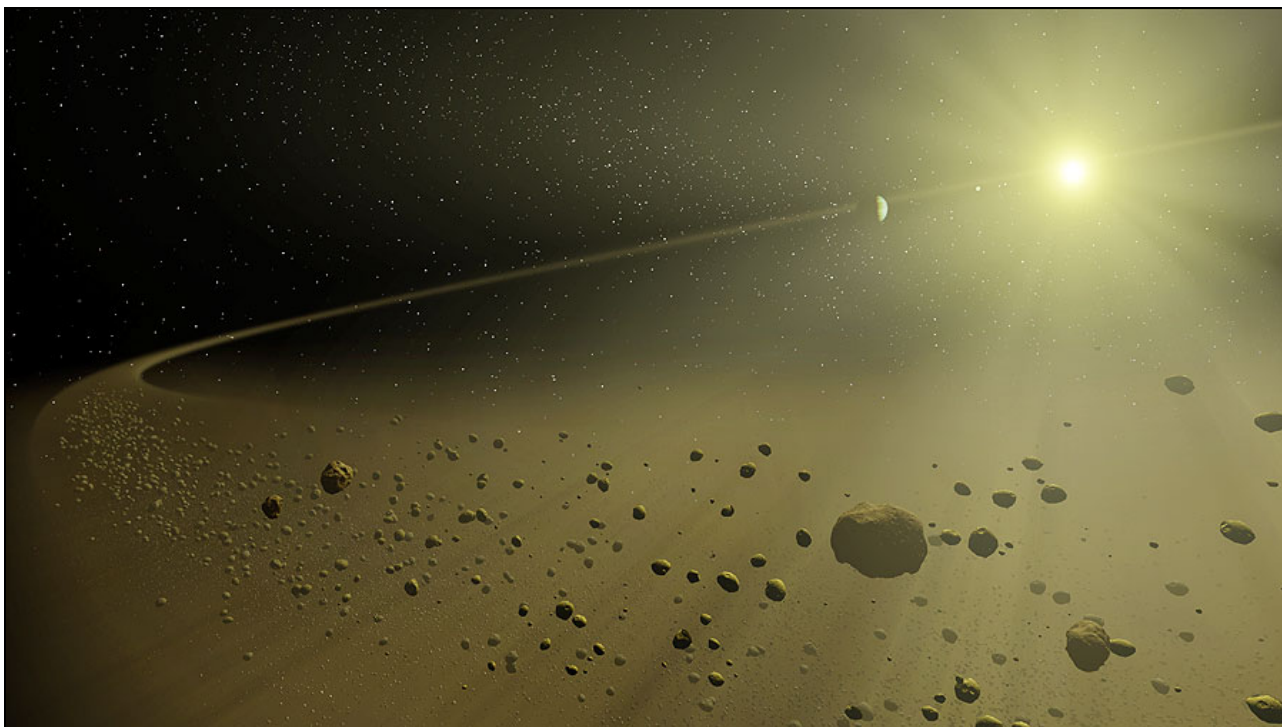
Zárodečná mlhovina byla zpočátku tvořena plynem a prachem, ať již původním mezihvězdným nebo znovu zkondenzovaným. Tehdy ještě nedošlo k formování zárodků planet. Nejprve musela prachová zrna klesnout po spirálovitě stočených drahách do centrální roviny, kolmé k rotační ose mlhoviny (touto centrální 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 rozbíjení, 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*<sup>3)</sup>). Jak ukázaly modelové výpočty, spojování našťestí převládalo nad tříštěním. Vše probíhalo dosti rychle, takže už za pár tisíc (!) let zrna narostla do centimetrových rozměrů a zaplnila centrální rovinu.

---

<sup>2)</sup> Latinsky *condensus* znamená zhuštěný, stěsnaný.

<sup>3)</sup> 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 záraz, někde se mohly opožďovat. Neberte právě popsaný scénář vzniku planet jako definitivně platný!



## 7. Zrození 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  $\text{cm}^3$ ?

**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. Zrození v chladu a ohni

---



---

### výsledky

---

K otázce 7.3.1.: Při hustotě  $10 \text{ atomů/cm}^3$  je objem koule  $10^{56} \text{ cm}^3 = 10^{41} \text{ km}^3$ . Poloměr koule je pak řádově  $R = \sqrt[3]{(10^{41})} = 10^{13} \text{ km} = 10^5 \text{ AU}$ , tedy řádově parseky.

K otázce 7.3.2.: Hmotnost; hvězdy hmotnější než asi 1,3 hmotnosti Slunce existují kratší dobu (na hlavní posloupnosti, než dospějí do stadia obra) než oněch potřebných 5 miliard roků.

K otázce 7.3.3.: Síla směřující kolmo od rotační osy (odstředivá síla setrvačná) je vyrovnávána silou gravitační, mířící hlavně ke hmotnému středu oblaku. Gravitační síla směřující podél rotační osy směrem ke středu oblaku takto vyrovnávána není a proto se oblak v tomto směru smrští.

K otázce 7.3.4.: Musí se zachovat moment hybnosti soustavy.

K otázce 7.3.5.: ekliptice.

K otázce 7.3.6.: Počet malých těles o poloměru  $r$  je  $n$ . Tedy  $r = 0,5 \text{ km}$ ;  $n r^3 = R^3$ , kde  $R = 6300 \text{ km}$  je dnešní poloměr Země. Tedy  $n = (R/r)^3 = 2 \cdot 10^{12}$ , takže je zapotřebí řádově  $10^{12}$  až  $10^{13}$  kilometrových těles.

K otázce 7.3.7.: vnějších, menší.

K otázce 7.3.8.: hustší, chladnější.

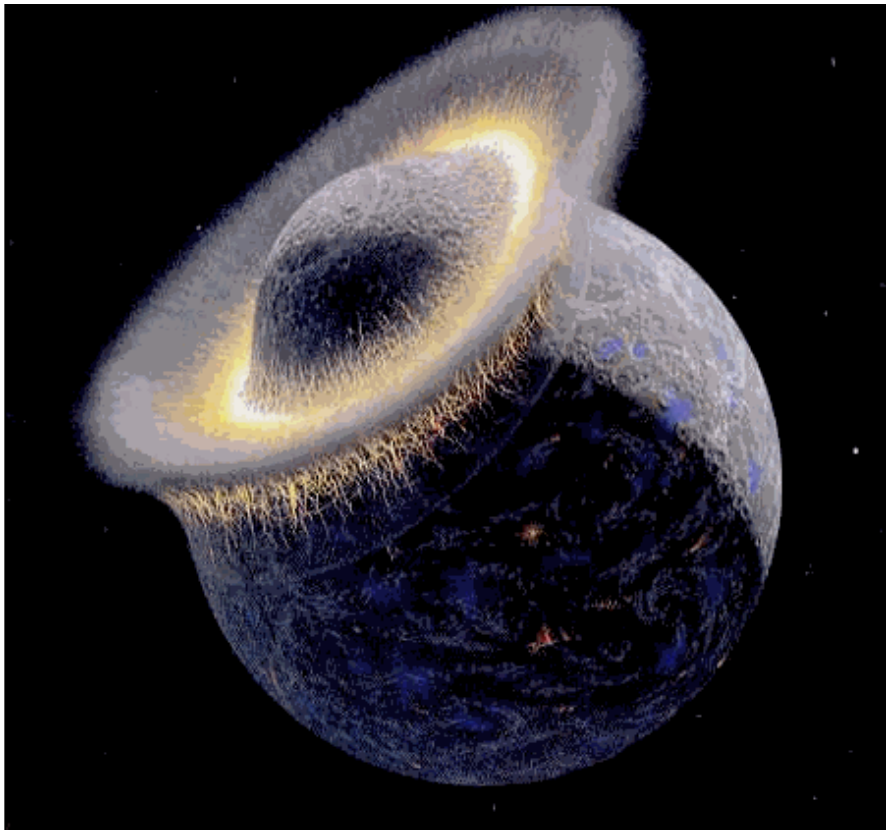
K otázce 7.3.9.: c

### 7.4. Vznik Měsíce a dalších drobných těles

**P**řenesme 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

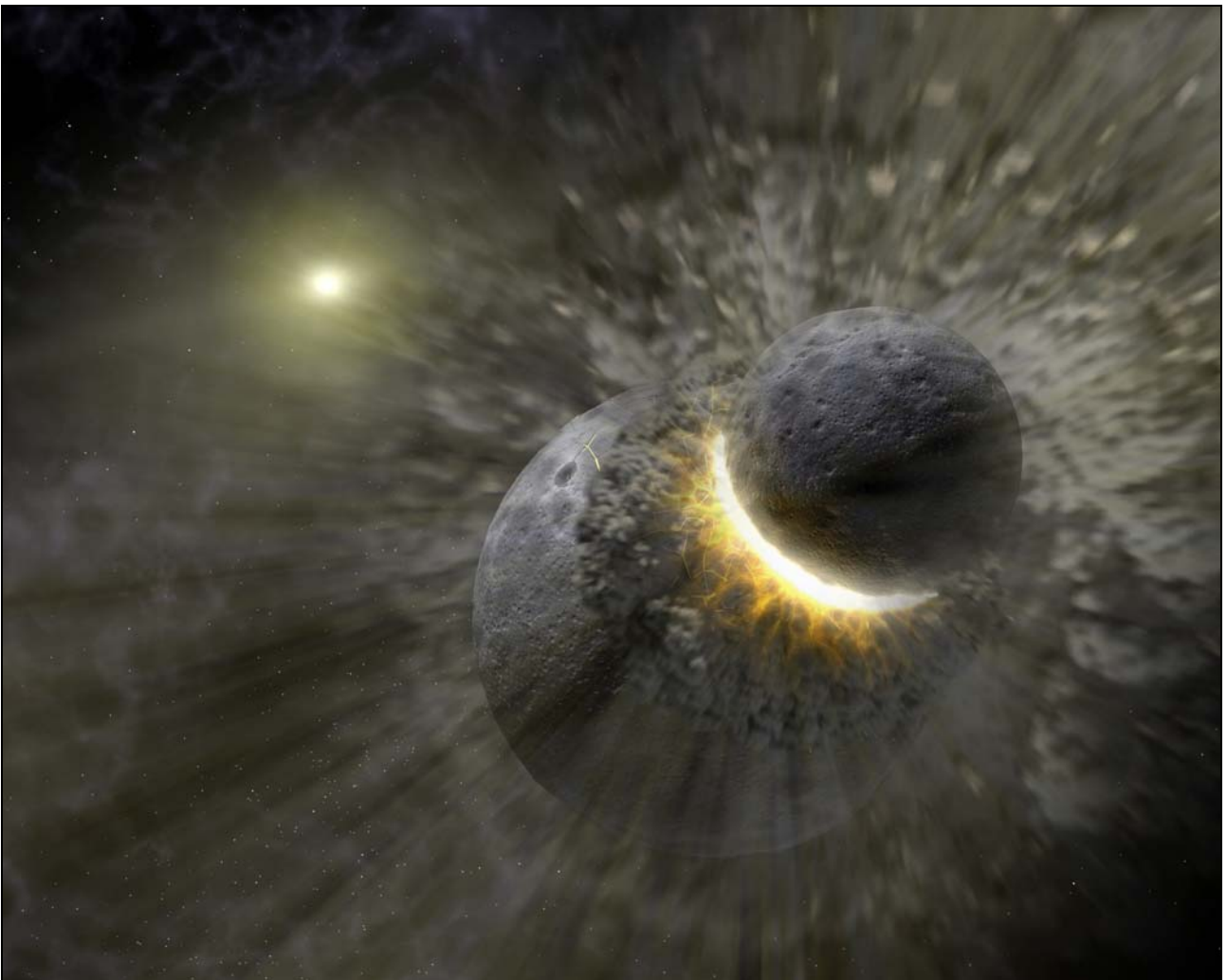
Právě těmito dvěma slovy můžeme nejuvstíženěji popsat domněnku o vzniku Měsíce. Slunce existuje již asi 50 milionů roků a do současnosti zbývá bezmála 4,6 miliardy let. Planety jsou zhruba ve stejných pozicích jako dnes, také jejich velikosti se již blíží současným. Přesto bychom je poznávali s obtížemi. 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 vytvoření planetárních zárodků. Na ten největší zásah však Země teprve čeká...



## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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

## 7. Zrození v chladu a ohni

kilometrů. Na Měsíc přitom stále dopadaly velké kusy materiálu; tyto *impakty*<sup>1)</sup> ještě delší dobu udržovaly měsíční těleso ve zcela roztaveném stavu<sup>2)</sup>.

### 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.

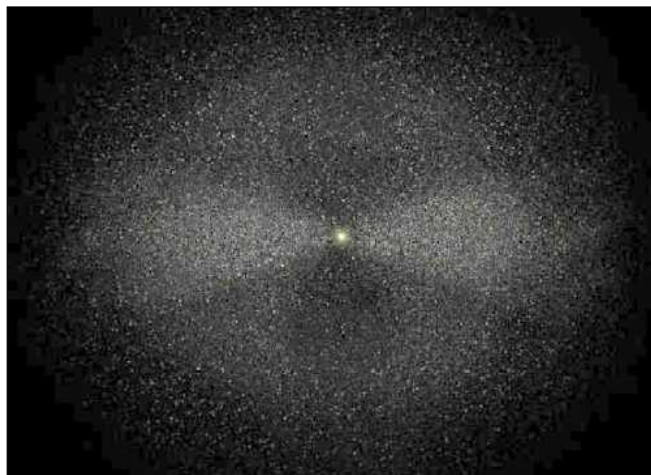
Když se Jupiter v zárodečném oblaku rychle smršťoval, na krátký čas zvýšil svůj zářivý výkon možná až na tisícinu dnešního výkonu Slunce. To zanechalo své stopy na galileovských satelitech, které právě vznikaly. Prudké zvýšení teploty způsobilo, že družice blíže ke středu mlhoviny ztratily těkavé látky a skládají se jen z pevných, těžko se vypařujících látek, zatímco objekty vzdálenější obsahují i lehčí a těkavější látky (např. ve formě ledu)<sup>3)</sup>. 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.

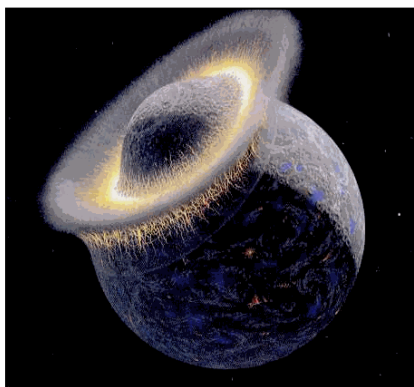


Představa Oortova oblaku komet.

<sup>1)</sup> 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“.

<sup>2)</sup> Je zajímavé, že tato hypotéza o původu Měsíce spatřila světlo světa až dvanáct let po odletu posledního Apolla z měsíčního povrchu. Zazněla na vědecké konferenci, konané v roce 1984 v městečku Kona na Havajských ostrovech.

<sup>3)</sup> U Saturnu k tak velkému zahřátí planety při smršťování nedošlo, takže i blízké ledové satelity tuto fázi přečkaly.



---

### čítanka

---

#### Petr Jakeš: Hypotéza jako vtíp

Seděl jsem v pracovním 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 Novozélandčan, syn farmáře, a také tak trochu 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 pře-psal 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 vtíp 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 vtípu, tak jako na každém vtípu, 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 pracovním 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.

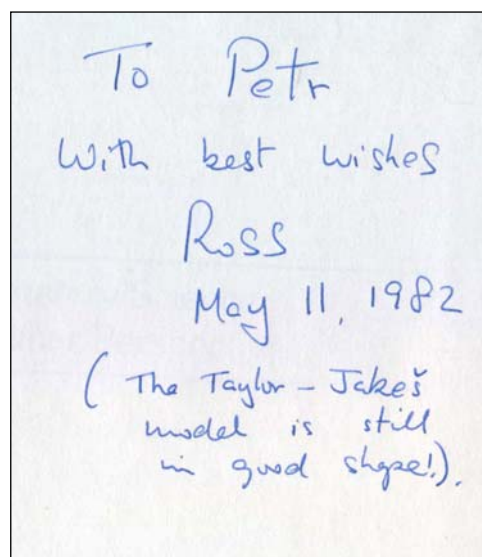
## 7. Zrození v chladu a ohni



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 večere 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 obvykle 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 obvykle 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 připsí „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).

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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.

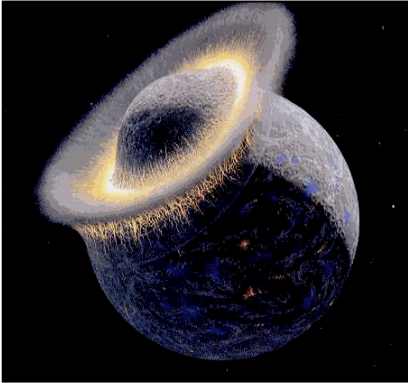
Pak už následovaly běžné kroky. Otištění článku v odborném tisku – jednou anglicky a jednou rusky. Nakonec něco, co jsme nečekali. Ohlas. Vyjádřili se nejen ti, kteří nám fandili, ale i ti, které jsme neznali, anebo i ti, kteří nám nebyli nakloněni. Vyjádřili se vesměs pozitivně. Ale to už není téma pro autora jedné z mnoha hypotéz o vzniku a historii Měsíce.

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



## 7. Zrození v chladu a ohni

---



*Je příjemné si na pravém místě zablázniti.*

Quintus Flaccus Horatius, básník (65 – 8 př. n. l.)

---

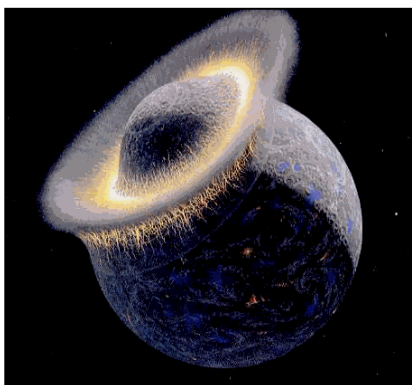
### otázky a příklady

---

**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**

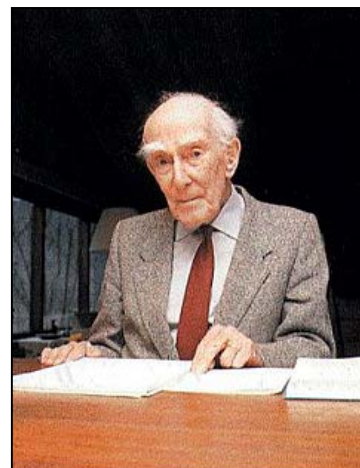
**P**rofesor Oort patří k nejvýznamnějším astronomům 20. století. Narodil se ve Franekeru v holandské provincii Frísko (Friesland) a již ve svých 17 letech se stal studentem univerzity v Groningenu. Byl žákem proslulého holandského astronoma Jacoba Kapteyna (1851–1922), průkopníka ve výzkumu stavby Mléčné 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.

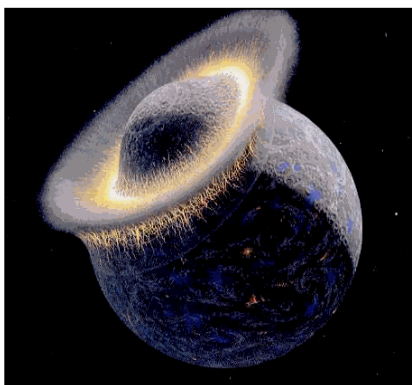
Zásluhou Jana Oorta, jenž od roku 1924 až do své smrti pracoval na slavné hvězdárně v Leidenu, jsme získali již v roce 1927 správnou představu o rotaci Galaxie a o celkové stavbě soustavy, v níž se sami nacházíme. Jeho mnohostranná výzkumná a organizační činnost byla přerušena nacistickou okupací Holandska, 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.





---

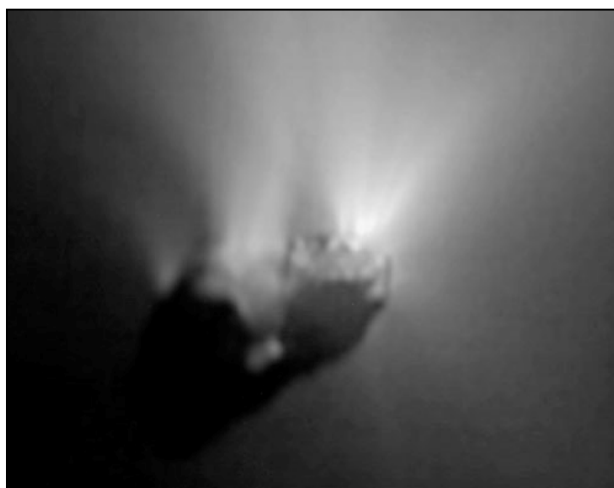
### čítanka

---

## 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 <sup>1)</sup> nedlouho před startem Apolla 11. Do-mníval se, že na měsíčním povrchu zůstala konzervována původní nepřetavená látka sluneční soustavy. Ast-ronauti 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 učenici nervy. Vztyčil se ze svého křesla a na vzdálenost přes 380 000 kilometrů zařval: „Tak už, sakra, nešaškej 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 meteoric-kým bombardováním.

Podobně jsou důkazy pečlivě odstraněny i na velkých tělesech sluneční soustavy, na planetách. Po více než čtyři miliardy let, které následovaly po je-jich vzniku, procházely přece složitým vývojem. Radioaktivní prvky zevnitř rozehtřívaly jejich nitra, do takto vzniklého tekutého jádra se ponořovaly těž-ší prvky a lehčí naopak vyplouvaly na povrch, aby utvořily planetární kůry. Povrch planet byl mnoho-krát zryt meteorickým bombardováním, leckde se přidala sopečná činnost, která to všechno zalila lá-



Jádro Halleyovy komety na záběrech sondy Giotto, která proletěla kolem komety 13. března 1986.

---

<sup>1)</sup> Čti: *uri*.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

vou. Tepelný brain-washing <sup>2)</sup> 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“, nepostížené 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.

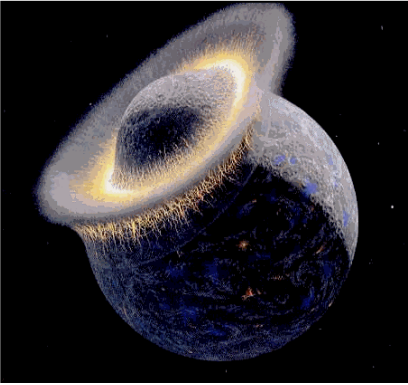
Úryvek z knihy *Návraty první dámy* (Panorama, Praha 1985).

---

<sup>2)</sup> Čti: *brejn-vošing* (vymývání mozku), zde použito jako metafora.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---



---

### výsledky

---

K otázce 7.4.1.: b

K otázce 7.4.2.: c

K otázce 7.4.3.: Jestliže těleso přilétá k planetě z velké vzdálenosti („z nekonečna“), jeho celková energie (kinetická + potenciální) stačí k tomu, aby po průletu od planety opět odletělo „do nekonečna“. Jen v případě, že část své energie předá nějakému jinému tělesu, srážkou přemění v teplo apod., nebude jí mít dost na to, aby se mohlo vzdálit libovolně daleko, ale bude nuceno obíhat kolem planety (případně na ni vzápětí dopadne).

### 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.

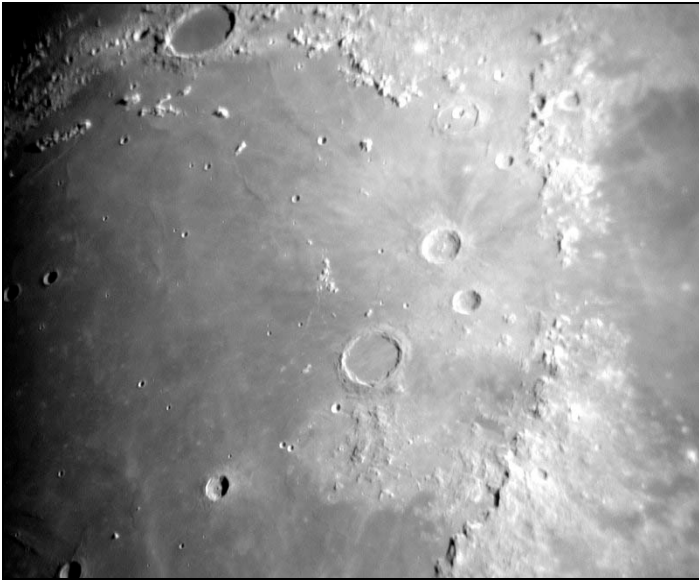
#### Velké bombardování

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.



## 7. Zrození v chladu a ohni

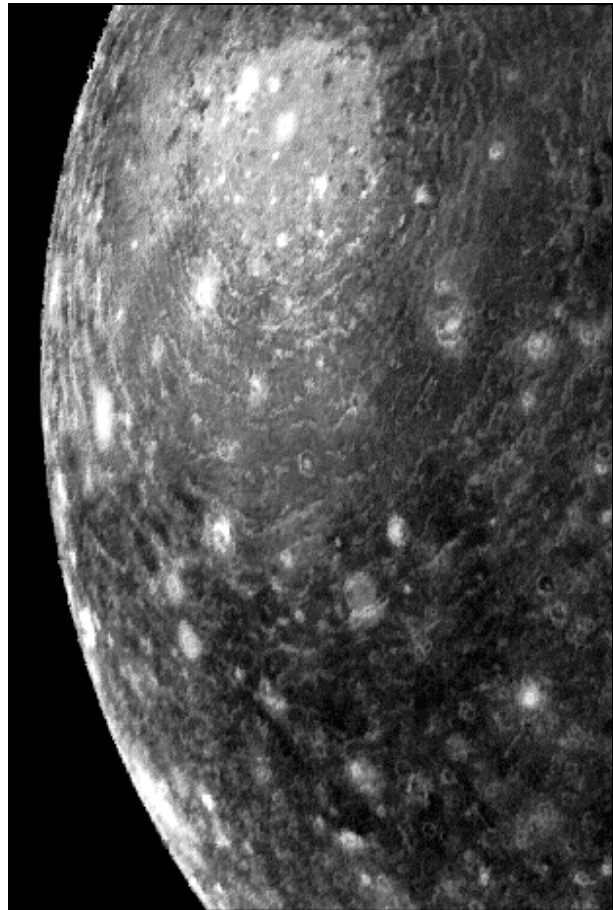
---



Mare Imbrium na Měsíci (foto: Wilfried Langer).



Caloris Planitia na Merkuru.



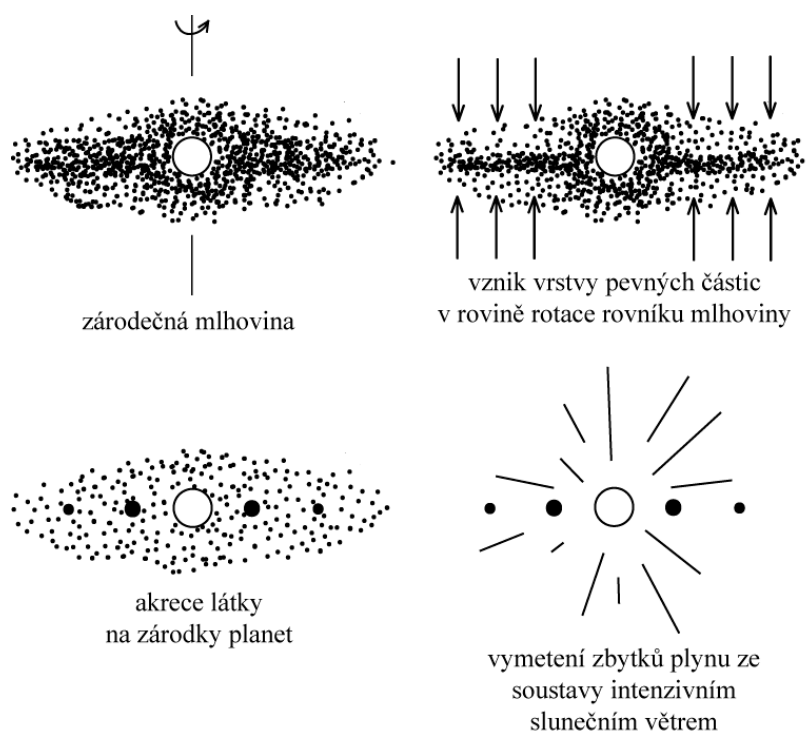
Pánev Valhalla (Jupiterova družice Kallistó).

## 7. Zrození v chladu a ohni

### 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?

**P**ři 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 dopadnutým tělesem a podkladovými



## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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 zpěvračené 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 nevyhovává vůbec nic.

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



---

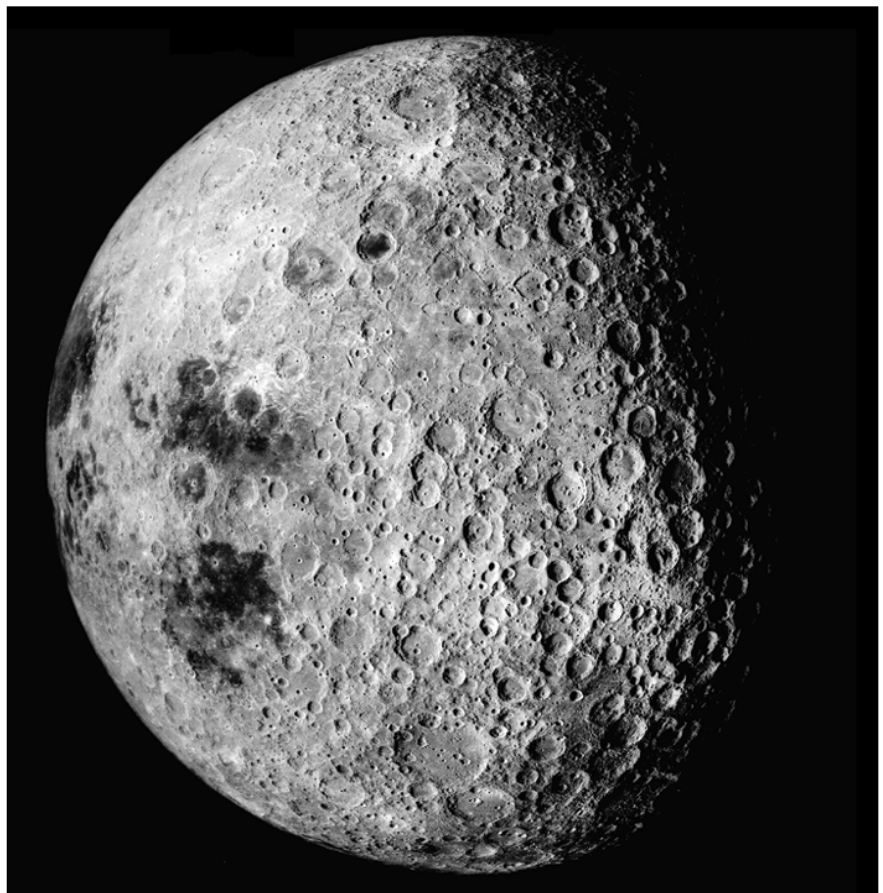
### čítanka

---

## Norman Mailer: Strana přivrácená a strana odvrácená

**S**trana 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 vystávalo jen několik obrovských kráterů – mohutný kráter s velikým vrcholkem uprostřed a s velmi tmavým měsíčním dnem byl poprvé spatřen Lunikem 3, první sovětskou nepilotovanou kosmickou lodí, která obkroužila satelit, a byl ihned pojmeno-



## 7. Zrození v chladu a ohni

---

ván kráter Ciolkovskij po otcí 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 beztvářá 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 vyvířít 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, podřobaných, 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 zívá 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. Zrození 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?

## 7. Zrození v chladu a ohni

---



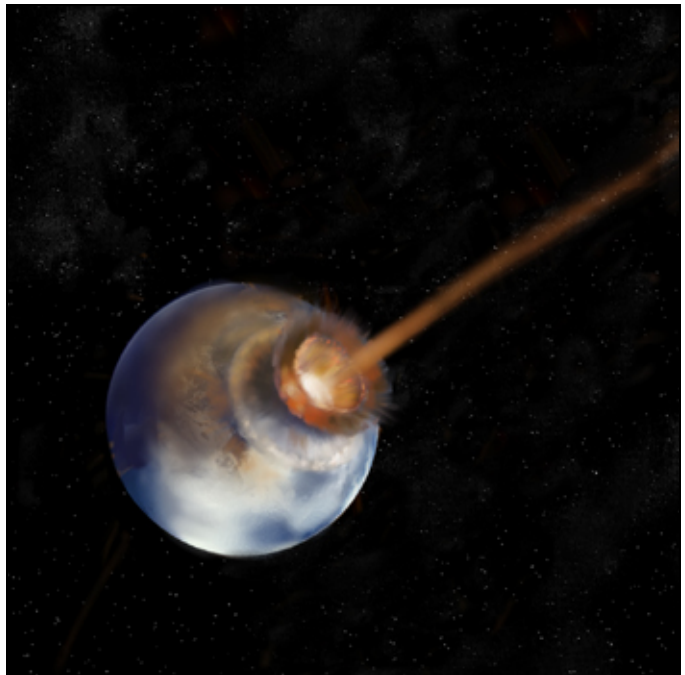
---

úloha k zamyšlení

---

### Velké bombardování

V raných stádiích 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  $\rho = 2 \text{ Mg/m}^3$ , který se srazí s planetou relativní rychlostí  $v = 10$  km/s. Srovnajte ji například se zářivou energií, kterou v současné době Slunce uvolňuje do okolního prostoru.



## 7. Zrození v chladu a ohni

---



---

### výsledky

---

K otázce 7.5.1.: současný zářivý výkon Slunce činí  $4 \cdot 10^{26}$  W, takže rané Slunce mohlo dosahovat výkonu  $2 \cdot 10^{29}$  W.

K otázce 7.5.2.: b

K otázce 7.5.3.: a

K otázce 7.5.4.: Přiletí-li těleso k planetě z velké vzdálenosti, má dostatečnou celkovou energii (kinetickou + potenciální) k tomu, aby od ní mohlo zase do stejné vzdálenosti odletět. Jen když část své energie předá (např. srážkou) jinému tělesu, nebude jí mít dostatek k tomu, aby se mohlo libovolně vzdálit, a stane se satelitem planety.

K otázce 7.5.5.: Těleso chladne tím, že teplo uniká povrchem tělesa pryč. Protože všechna větší planetární tělesa mají tvar koule, je množství zahřáté látky úměrné objemu koule (a ten závisí na třetí mocnině poloměru), zatímco únik tepla na velikosti povrchu koule (a tudíž pouze na druhé mocnině poloměru koule). Z dvakrát větší koule sice unikne 4krát více tepla, ale tepelná kapacita je 8krát větší než u koule polovičního rozměru.

**Úloha k zamyšlení – Velké bombardování:** K výpočtu kinetické energie je zapotřebí znát hmotnost  $m$  projektilu:

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho (d/2)^3 = \pi \rho d^3/6.$$

Kinetická energie projektilu  $E_k = m v^2/2$ .

*Číselně:*  $\rho = 2 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $d = 10^5 \text{ m}$ ;  $m = \pi \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot (10^5)^3/6 = 1,05 \cdot 10^{18} \text{ kg}$ ;  $E_k = 1,05 \cdot 10^{18} (10^4)^2/2 = 5,2 \cdot 10^{25} \text{ J}$ . Kinetická energie projektilu je tedy jen asi o řád menší než zářivá energie uvolňovaná Sluncem za 1 s (ta je – jak známo – rovna  $3,8 \cdot 10^{26} \text{ J}$ ).

### 7.6. Na čem závisí další vývoj planet?

**S**luneční 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).

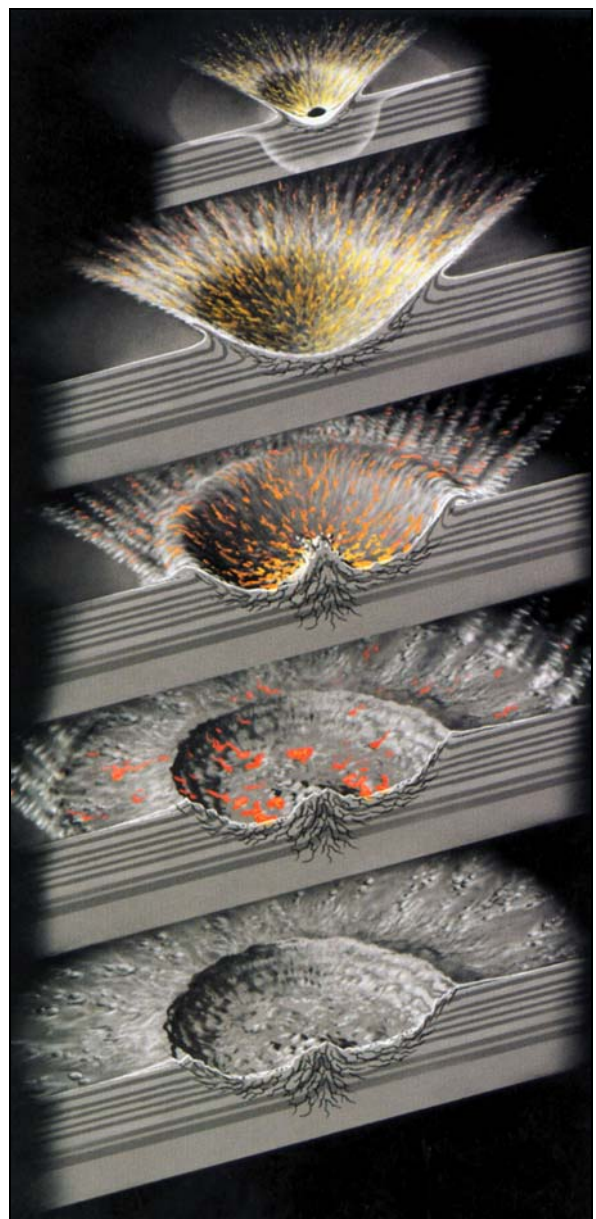
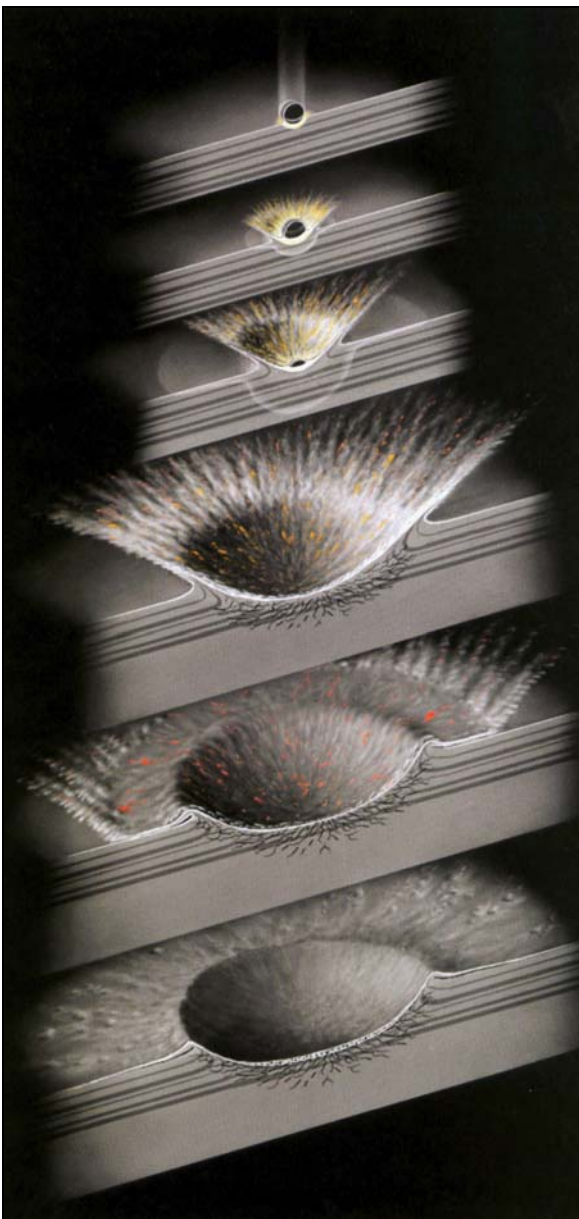


## 7. Zrození v chladu a ohni

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

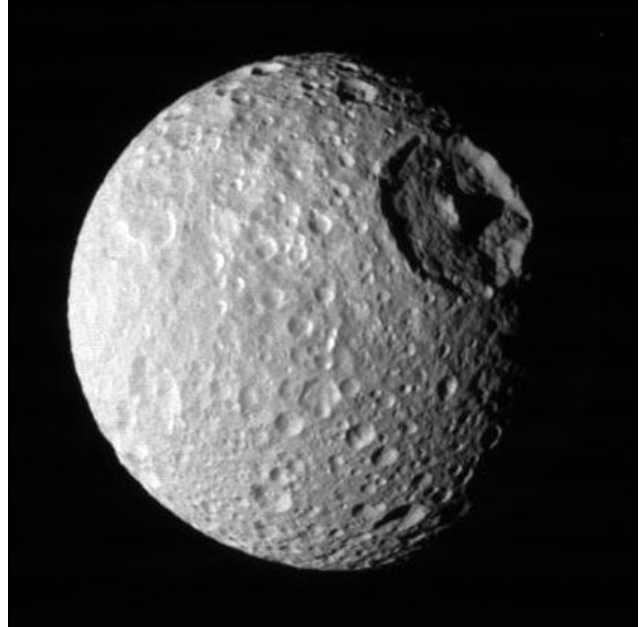
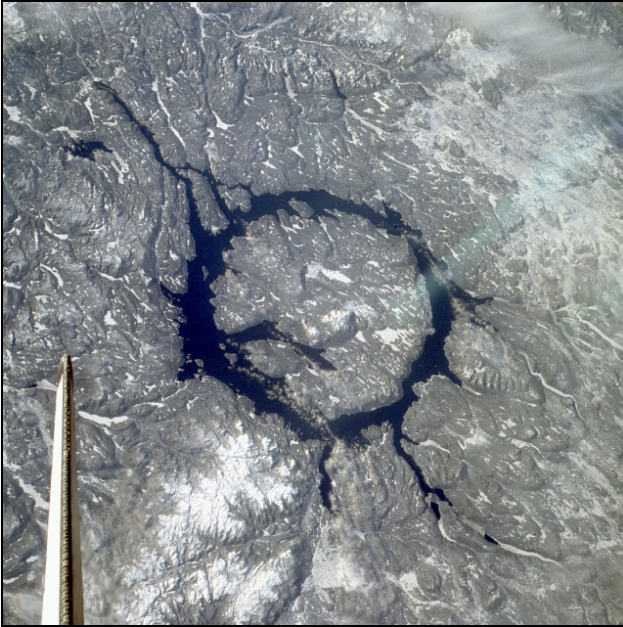
Krátery, vytvořené po střetu s cizím tělesem, najdeme na všech planetách a jejich družicích. V historii sluneční soustavy ale *impaktní krátery* nevznikaly rovnoměrně. Před čtyřmi miliardami let – v době těžkého bombardování – byly dopady těles stokrát až tisíckrát četnější než jsou dnes. Pak se tok dopadajících těles ustálil a po dobu nejméně tří miliard let byl téměř shodný s dnešním.



Vznik jednoduchého a komplexního impaktního kráteru.

## 7. Zrození v chladu a ohni

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.



## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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 pouštinou, 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. Zrození 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“ stářím 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 blíže 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)

**T**ento 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 vytvoření planet.

Seznam úspěchů na poli ryze vědeckém doplníme 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 nejdříve 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.



Gerard P. Kuiper

## 7. Zrození v chladu a ohni

---



---

### výsledky

---

K otázce 7.6.1.: Pohyb atomů je pohybem v krystalové mřížce takové zkameněliny. Teprve zvýšením teploty se tato mřížka naruší a pevné těleso – zkamenělina – roztaje.

K otázce 7.6.2.: Na Marsu, protože je tam menší tíhové zrychlení a stejně veliká a hmotná sopka jako na Zemi tam méně váží.

K otázce 7.6.3.: Na Zemi existuje silná eroze (vodní, větrná...) a desková tektonika; oba procesy proměňují zemský povrch v časovém měřítku řádově stovek milionů roků.

K otázce 7.6.4.: a

K otázce 7.6.5.: c

### 7.7. Život na stárnoucí Zemi

**V**e 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 tisícinašobek současné hodnoty, později bude ještě pětikrát 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.



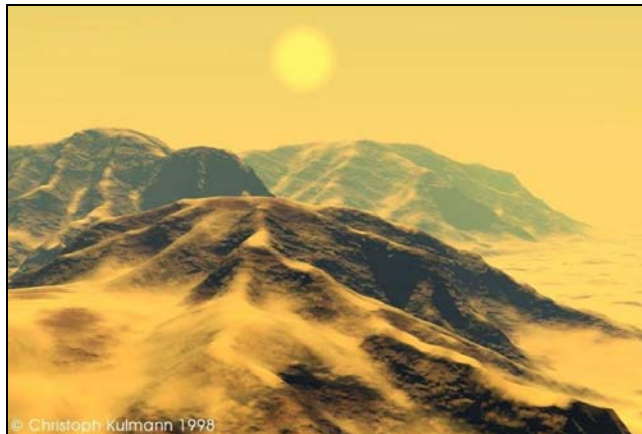
Země je v současnosti planetou s mírným podnebím, „zelenou“ a s dostatkem vody. Život překypuje na pevnině i v mořích. Všechny kresby v této kapitole: Christoph Kulmann.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---



Země za 700 milionů roků: výkon Slunce vzrostl o téměř 10 %, oceány se vypařují; celá Země pokryta oblaky; větší oslunění a silnější skleníkový efekt ( $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  rozvinul překotný skleníkový jev; atmosférický tlak je 60krát vyšší než dnes, teplota přes 200 °C; Země je mrtvou planetou.

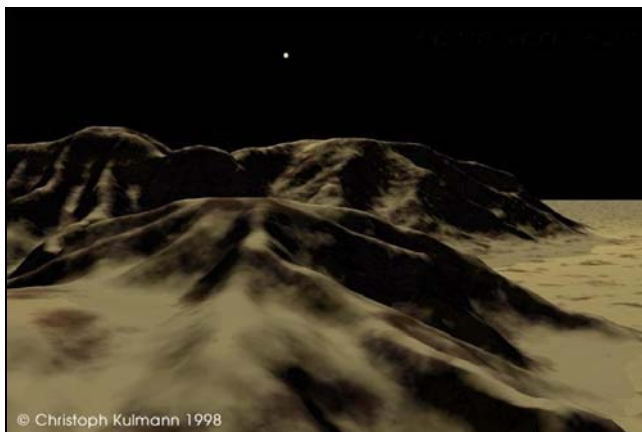


Země za 7 miliard roků: Slunce se stalo červeným obrem a rozeplulo se do vzdálenosti 1 AU; je tisíckrát zářivější než nyní; povrch Země se taví, planeta již pozbyla svou atmosféru; také obří planety a jejich ledové družice se výrazně mění.



## 7. Zrození v chladu a ohni

---



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 existence 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.



---

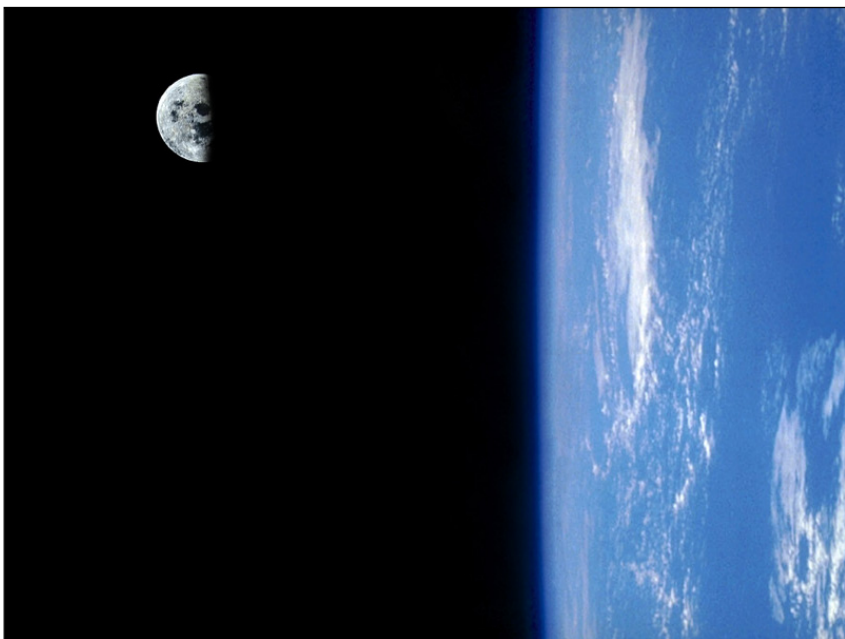
### čítanka

---

## Zdeněk Pokorný: Exkurze do budoucna

**C**hceme-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 exploze, 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 Himálaj se budou zvyšovat, dokud je unese podloží.



Změní se i délka dne – den bude delší. V současnosti se prodlužuje o dvě tisíce sekund 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

## 7. Zrození v chladu a ohni

---

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. Zrození 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.)

## 7. Zrození v chladu a ohni

---



*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; poznáte 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 marsového 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 stouletou 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.

## 7. Zrození v chladu a ohni

---



---

### výsledky

---

K otázce 7.7.1.: Není. Předcházející fáze hvězdného vývoje (stadium obra zakončené rozepnutím planetární mlhoviny) musely zlikvidovat blízké planety (a samozřejmě také život na nich, pokud tam nějaký byl). Vytvoření blízké planety *poté* si podle současných představ o vývoji planetární soustavy neumíme vysvětlit (nicméně u několika pulsarů, které jsou pozůstatkem po výbuchu supernovy, byla zaznamenána obíhající tělesa planetární hmotnosti).

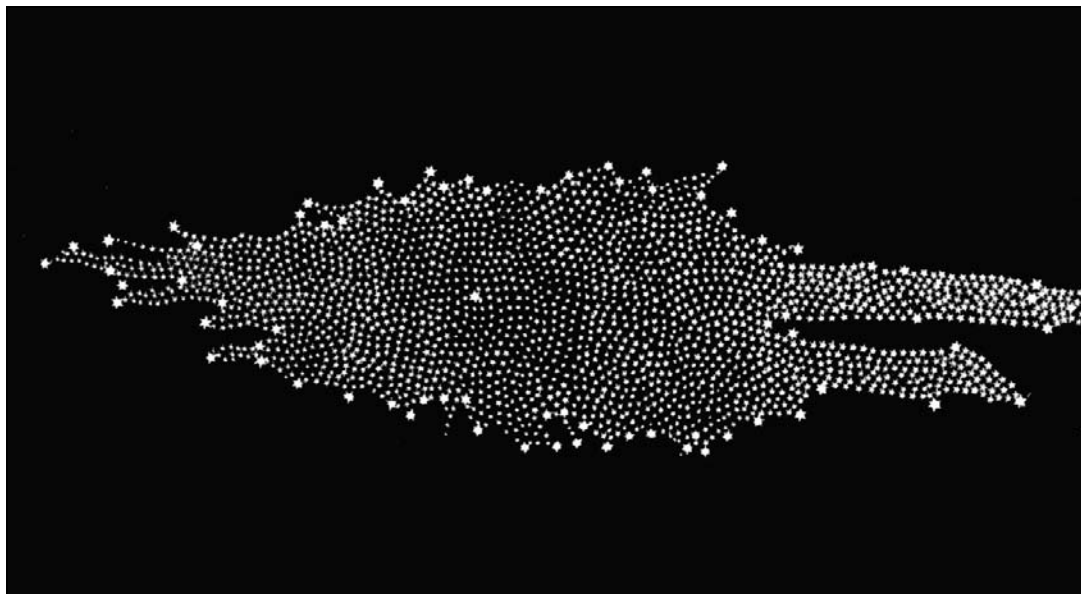
K otázce 7.7.2.: c

K otázce 7.7.3.: Šířka Atlantského oceánu je přibližně 4000 km, takže jeho stáří činí asi  $4 \cdot 10^8 / 2 = 2 \cdot 10^8$  let. To je pouhých několik procent celkového stáří Země ( $2 \cdot 10^8 / 4,6 \cdot 10^9 \cdot 100 = 4 \%$ ).

**Speciální otázky:** 1. tvrzení: vypadá to na záměnu pojmů opozice a konjunkce. Při konjunkci jsou stejné rektascenze dvou těles – proč by taková situace nemohla nastat i v případě Venuše a Jupiteru?; 2. a 3. tvrzení jsou správná; 4. tvrzení: není pravda, že absolutně černé těleso nezáří; platí též, že hvězdy v prvním přiblížení září jako absolutně černá tělesa; 5. tvrzení: rozdíly v osvětlení zvládá lidské oko především změnou citlivosti sítnice: za denního osvětlení jsou aktivní tzv. čípky, za nočního tzv. tyčinky.

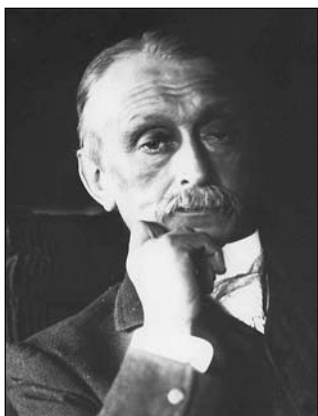
### 8.1. Naše Galaxie je složitý systém

**K**dyž 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.



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.

Jacobus Kapteyn.

### 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 <sup>1)</sup>. Od základního směru se určuje *galaktická délka*  $l$  ( $0^\circ$  až  $360^\circ$ ), od galaktického rovníku *galaktická šířka*  $b$  ( $0^\circ$  až  $\pm 90^\circ$ ). Souřadnicová soustava je pravotočivá.

### Mezihvězdný plyn a prach

Nebýt zeslabování světla mezihvězdnou látkou, byla by struktura Galaxie mnohem patrnější <sup>2)</sup>. 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



Foto: Wade B. Clark, Jr.

<sup>1)</sup> Podle rezoluce přijaté Mezinárodní astronomickou unií v roce 1959 má základní směr galaktické souřadnicové soustavy rovníkové souřadnice (vztažené k roku 1950,0)  $\alpha = 17^{\text{h}} 42^{\text{m}} 29,3^{\text{s}}$ ,  $\delta = -28^\circ 59' 18''$ . Sklon galaktického a světového rovníku činí  $62^\circ 36,0'$ .

<sup>2)</sup> 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.



## 8. Hvězdné ostrovy

---

1 až 10 atomů·cm<sup>-3</sup>. 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, přezdíváné Omega. Foto: Martin Altmann a Jürgen Schmolli.

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. Nej hustší 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

## 8. Hvězdné ostrovy

tlustý jen 1 kpc. Slunce leží téměř v galaktické rovině (pouze asi 15 parseků od ní), od středu je dělí vzdálenost 8,0 kpc<sup>3</sup>).

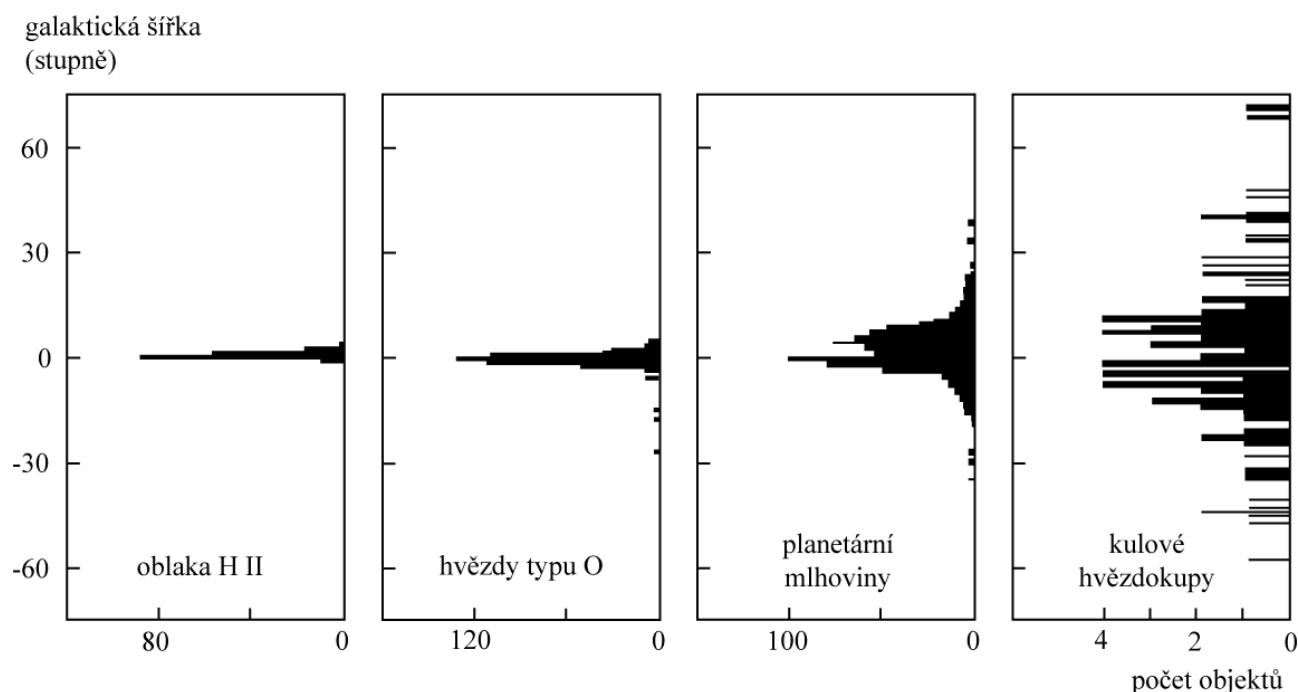
### Anatomie naší Galaxie

Galaxii si můžeme rozdělit na několik částí, jejichž tvary a umístění ve hvězdné soustavě jsou patrné již z názvů.

*Kulová složka* čili tzv. *halo*<sup>4</sup>): 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

<sup>3</sup>) 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.

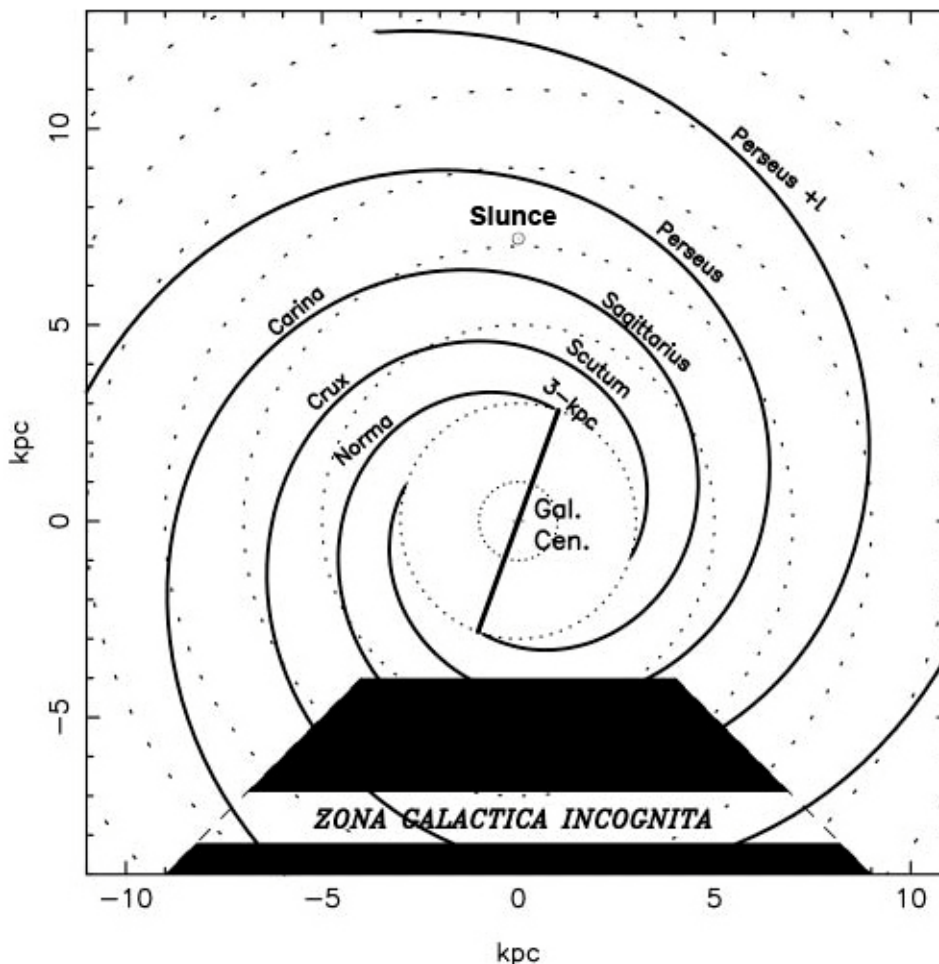
<sup>4</sup>) Řecké *halos* znamená okraj štítu, také kruh kolem Slunce nebo Měsíce.

## 8. Hvězdné ostrovy

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 vyběhají 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 galaktickém jádrem, není pro nás pozorovatelná.

## 8. Hvězdné ostrovy

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.

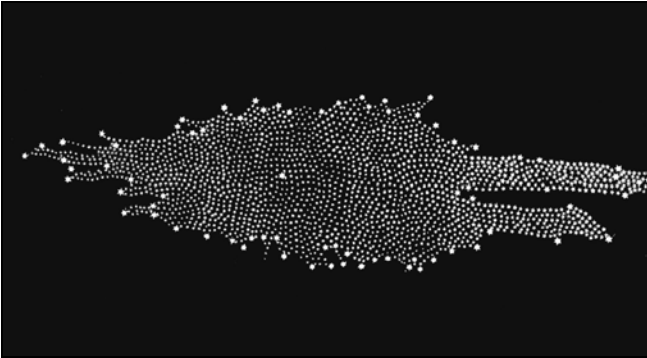
### Základní čísla o naší Galaxii

*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.  $7,7 \cdot 10^{36} \text{ W}$ )

*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

**N**a sklonku roku 1919 navrhl George Hale <sup>1)</sup> – 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.



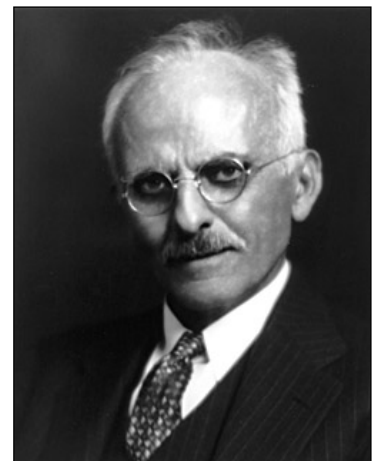
Harlow Shapley.

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 „Měřítka vesmíru“.

Prvním z oslovených byl Harlow Shapley <sup>2)</sup>, který pozvání ihned přijal. Druhým debatujícím měl být Heber Curtis <sup>3)</sup> – 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 →



---

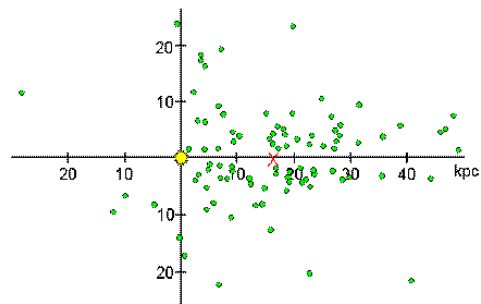
<sup>1)</sup> Čti: *džórdž hejl*.

<sup>2)</sup> Čti: *hárlou š(h)epli*.

<sup>3)</sup> 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.



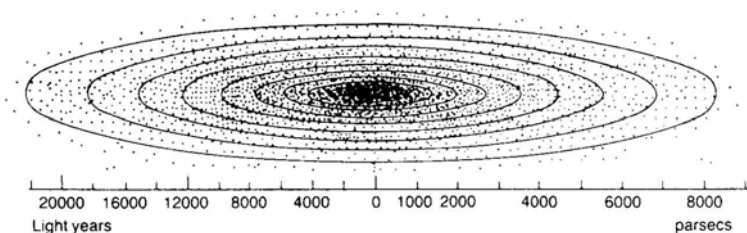
Kulová hvězdokupa M 15 a Shapleyho graf rozložení kulových hvězdokup v Galaxii (viz též praktikum „Vzdálenost středu Galaxie“).

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.

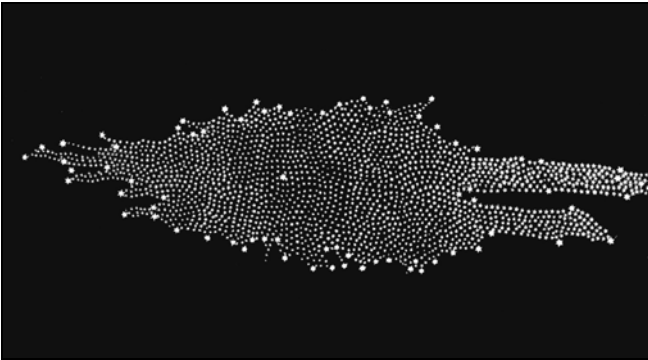
Po debatě oba diskutující zveřejnili své argumenty i v písemné podobě, a přípravě této práce věnovali nemálo úsilí. Zde se objevila řada důležitých obecných myšlenek, které přímo v diskusi nezazněly. Tak třeba Shapley jasně vyjádřil své přesvědčení, že při jakýchkoli úvahách o vzdáleném vesmíru musíme 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 vynesete do obr. 1. Do stejného obrázku vynesete i polohy 20 jasných hvězd spektrálního typu O a B (tabulka 3; od předchozích hvězd je odlišíte jiným symbolem). Doporučení: galaktickou délku  $l$  vynášejte na vodorovnou osu tak, aby délka  $l = 0^\circ$  byla uprostřed obrázku, nikoli na levém okraji. Diskutujte jejich rozložení v Galaxii.

3. Podobně jako v předchozím bodu vynesete 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 ( $b = -23^\circ$ )?

## 8. Hvězdné ostrovy

---

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	$l$ (°)	$b$ (°)
$\alpha$ Tau		181	-20
$\alpha$ Aur		163	5
$\beta$ Ori		209	-25
$\alpha$ Car		261	-25
$\alpha$ CMa		228	-8
$\alpha$ Cru		300	-1
$\alpha$ Vir		317	50
$\alpha$ Boo		15	69
$\alpha$ Cen		316	-1
$\alpha$ Lyr		68	19

### Tabulka 3. Dvacet jasných hvězd spektrálního typu O a B

Označení	$l$ (°)	$b$ (°)	Označení	$l$ (°)	$b$ (°)
$\gamma$ Cas	124	-2	$\beta$ Cru	303	3
$\delta$ Ori	204	-17	$\epsilon$ Cen	311	8
$\epsilon$ Ori	205	-17	$\zeta$ Cen	315	14
$\zeta$ Ori	207	-16	$\beta$ Cen	312	1
$\kappa$ Ori	215	-18	$\eta$ Cen	323	16
$\beta$ CMa	226	-14	$\delta$ Sco	350	22
$\epsilon$ CMa	240	-11	$\beta$ Sco	353	23
$\eta$ CMa	243	-6	$\zeta$ Oph	7	23
$\zeta$ Pup	256	-4	$\lambda$ Sco	352	-3
$\kappa$ Vel	276	-4	$\kappa$ Sco	351	-5



## 8. Hvězdné ostrovy

---

**Tabulka 4. Třicet nejjasnějších kulových hvězdokup**

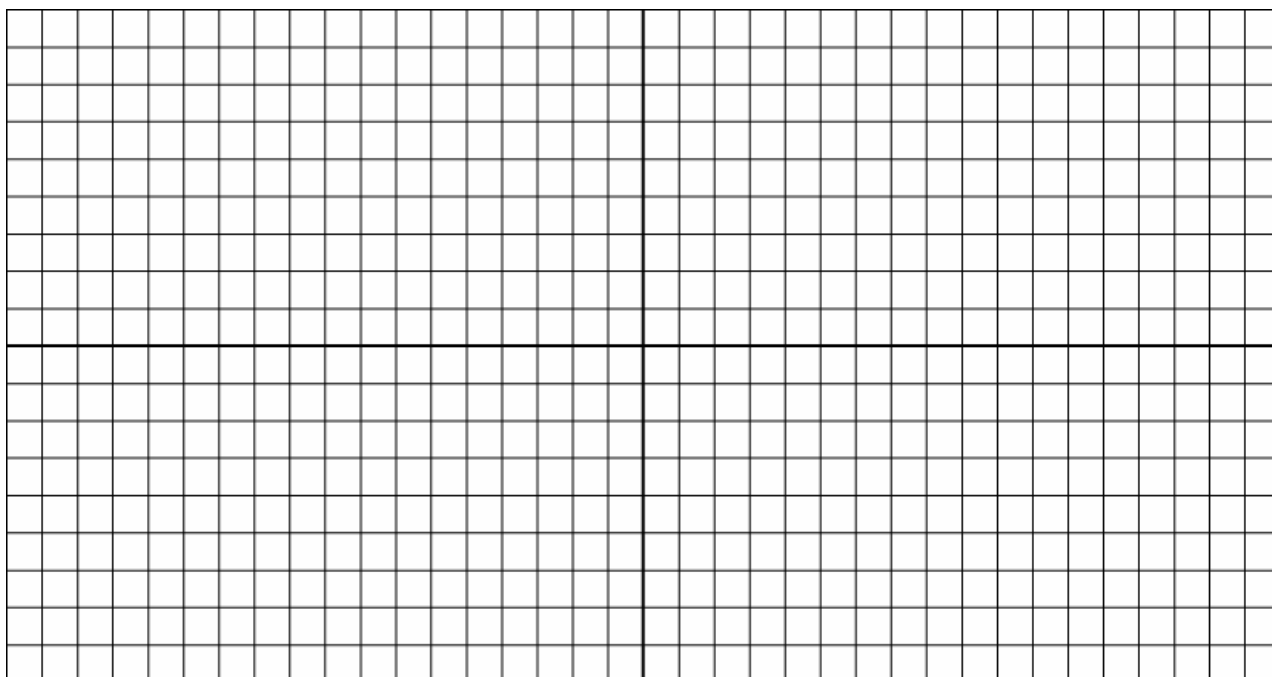
<i>Označení</i>	<i>l</i> (°)	<i>b</i> (°)	<i>Označení</i>	<i>l</i> (°)	<i>b</i> (°)
NGC 104 (47 Tuc)	306	-45	M 62	354	7
NGC 1851	244	-35	M 19	357	9
NGC 2808	282	-11	M 92	68	35
NGC 3201	278	9	NGC 6352	342	-8
NGC 4833	304	-8	NGC 6388	346	-7
NGC 5139 ( $\omega$ Cen)	310	-50	NGC 6397	338	-13
M 3	41	78	NGC 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)**

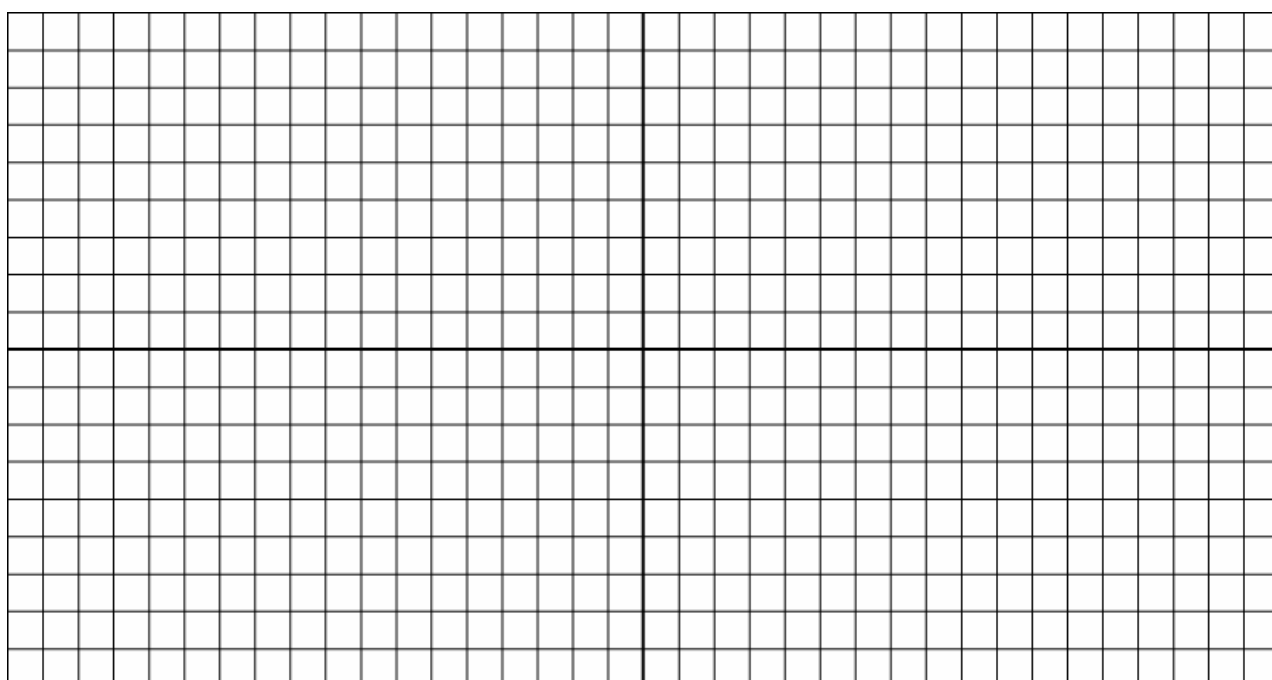
<i>Označení</i>	<i>l</i> (°)	<i>b</i> (°)	<i>Označení</i>	<i>l</i> (°)	<i>b</i> (°)
M 103	128	-1	NGC 2362	238	-6
NGC 869 (h Per)	135	-3	IC 2391	271	-7
NGC 884 ( $\chi$ Per)	134	-3	IC 2602	290	-5
Mel 20 (Perseus)	147	-7	NGC 4755	304	2
M 45 (Plejády)	167	-23	M 21	8	-1
M 38	173	1	M 16	17	0
M 36	175	2	M 11	28	-3
NGC 2264	203	3	M 39	93	-2

## 8. Hvězdné ostrovy

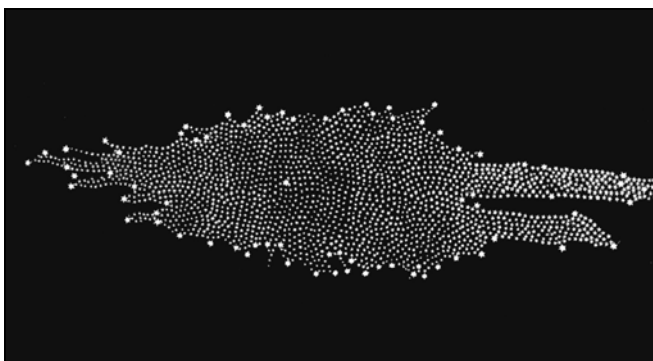
---



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 Hado-noše; 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 kapitulu 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



## 8. Hvězdné ostrovy

---

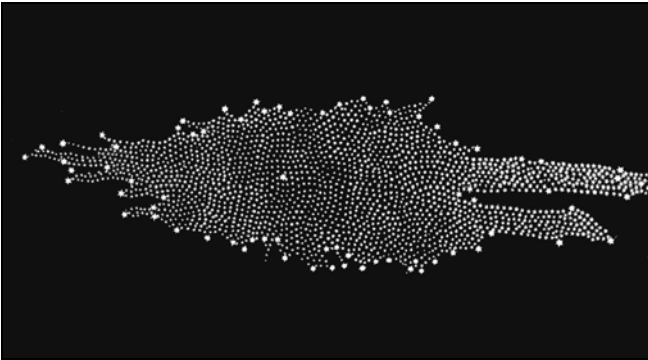
možnost mapovat jeho rozložení kolem nás, zkrátka „viděli“ bychom, jak vypadá naše Galaxie i ve velkých vzdálenostech od nás.

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. Přejedem 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  $10^{-21}$   $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Kolik atomů vodíku se nachází (řádově) v  $1 \text{ cm}^3$ ?

**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 (H II); d) hvězdy spektrálních typů O a B.

## 8. Hvězdné ostrovy

---

**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).

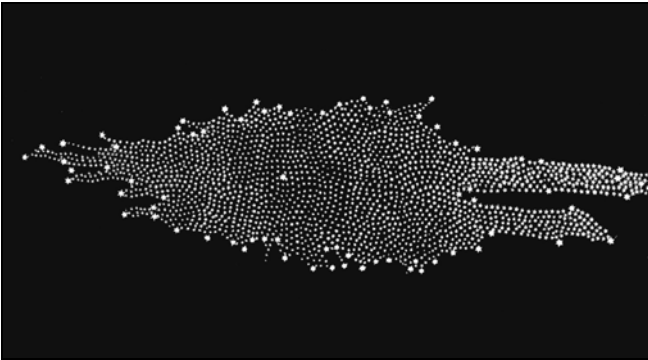
**Otázka 8.1.14.** Do třetice otevřené a kulové hvězdokupy: které jsou nejpodstatnější rozdíly mezi otevřenými a kulovými hvězdokupami?

**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

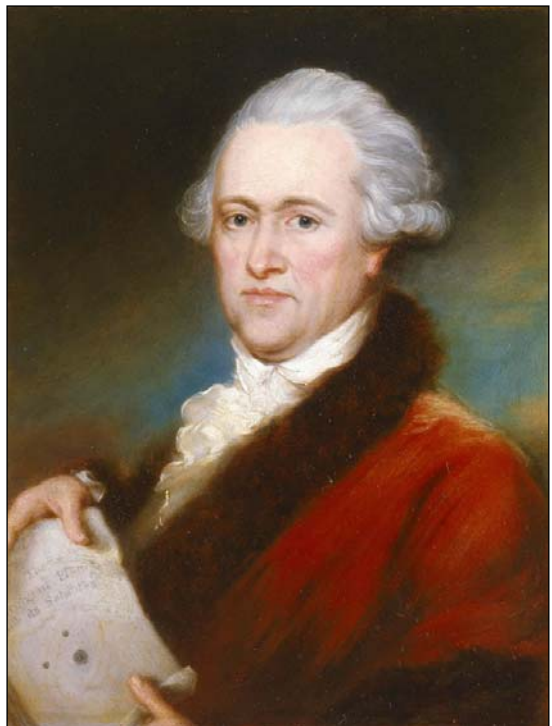
(15. 11. 1738 – 25. 8. 1822)

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 svobodomyšlnějšího 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 jídelnem 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 našla celkem 8 komet, což je dodnes naprosto mimořádný výkon.

Herschel sám se proslavil roku 1781, když při prohlídce oblohy našel 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



## 8. Hvězdné ostrovy

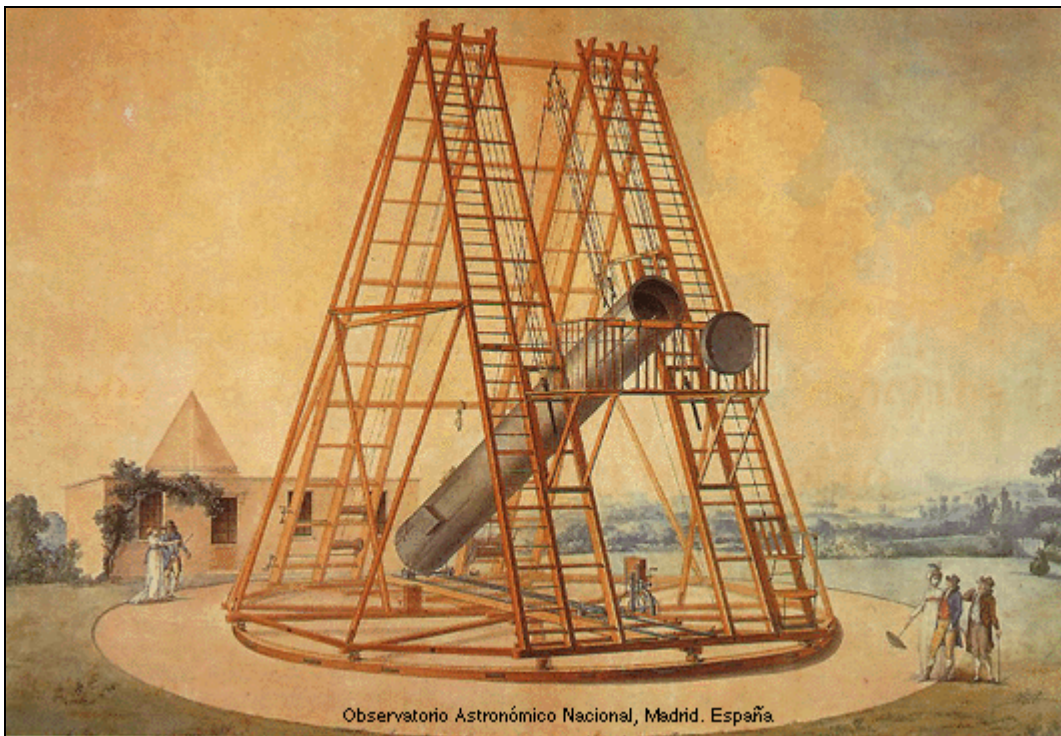
---

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 kráčet 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.

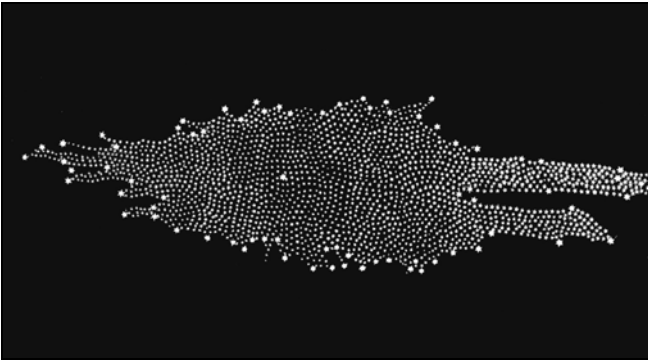
Autorem medailonu je Jiří Grygar.





## 8. Hvězdné ostrovy

---



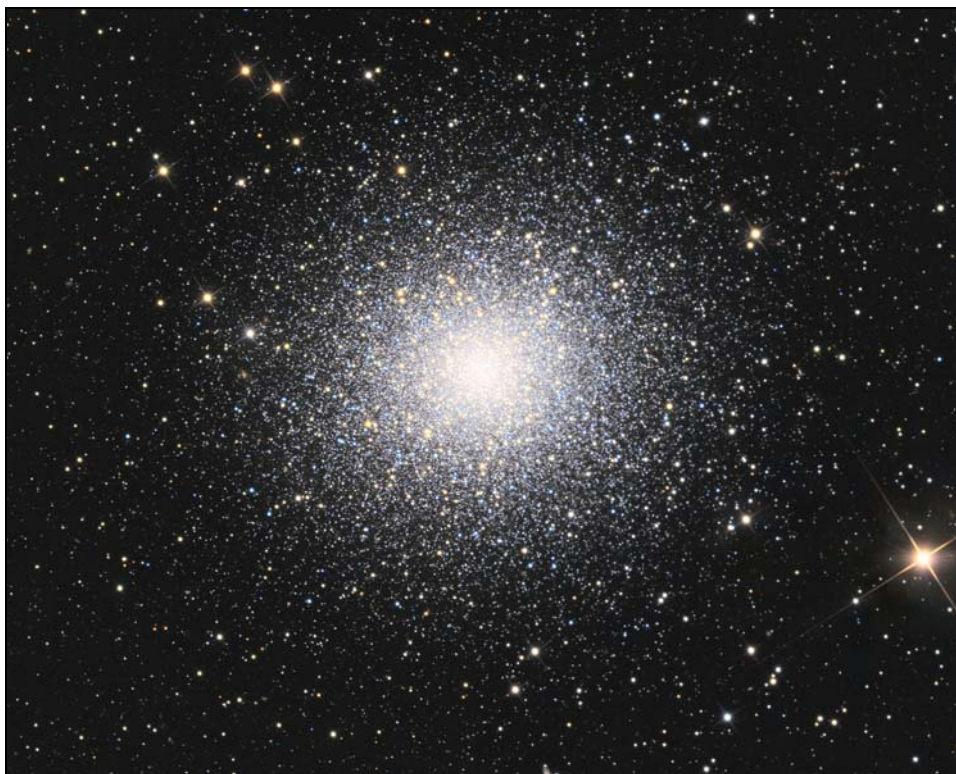
---

úloha k zamyšlení

---

### Uvidíme hvězdy v kulové hvězdokupě?

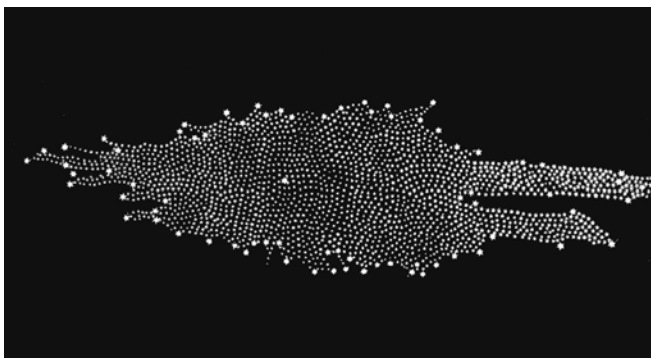
Známa kulová hvězdokupa M 13 v souhvězdí Herkula se jeví jako mlhavý obláček o celkové hvězdné velikosti  $a = 5,9$  mag. Jaká je střední hvězdná velikost jednotlivých hvězd, předpokládáme-li, že ve hvězdokupě M 13 je jich asi půl milionu? Výsledek srovnajte se skutečností (jak známo, za dobrých pozorovacích 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. Hvězdné ostrovy

---



---

### výsledky

---

K otázce 8.1.1.: na jaře.

K otázce 8.1.2.: b, c

K otázce 8.1.3.: Energie  $E = hc/\lambda$  ( $\lambda$  je hledaná vlnová délka fotonu), takže  $\lambda = hc/E$ . Je třeba přepočítat  $E$  z elektronvoltů na jouly:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , Planckova konstanta  $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ , velikost rychlosti šíření světla  $c = 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Po dosazení:  $\lambda = 90 \text{ nm}$  (případně kratší), což je ultrafialový obor spektra. Horké hvězdy mají dostatek těchto fotonů.

K otázce 8.1.4.: řidší a teplejší

K otázce 8.1.5.: Jde o vodík. Hmotnost protonu  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Při hustotách  $10^{-20} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $10^{-21}$ ) je koncentrace protonů  $10^{-20}/1,7 \cdot 10^{-27} \text{ atomu}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $10^{-21}/\dots$ ), což je  $10^{-7}$  ( $10^{-6}$ )  $\text{atomu}\cdot\text{m}^{-3} = 10$  (1)  $\text{atomů}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

K otázce 8.1.6.: c

K otázce 8.1.7.: b

K otázce 8.1.8.: a

K otázce 8.1.9.: b

K otázce 8.1.10.: a

K otázce 8.1.11.: b

K otázce 8.1.12.: a

K otázce 8.1.13.: a

K otázce 8.1.14.: Rozdílné je jejich stáří (a z toho plynoucí rozdíly v chemickém složení hvězd) a poloha v Galaxii.

K otázce 8.1.15.: Zdržují se nejdéle v místech, která jsou nejvíce vzdálena od centra, protože jde v podstatě o keplerovský pohyb.

K otázce 8.1.16.: Hvězdy kulové složky jsou relativně staré. V průběhu doby supernovy obohacují mezihvězdný materiál, z něhož vznikají hvězdy dalších generací, těžšími prvky. Proto mladší hvězdy např. ploché složky Galaxie jich obsahují větší množství než hvězdy starší.

K otázce 8.1.17.: c

K otázce 8.1.18.: c

## 8. Hvězdné ostrovy

---

**Úloha k zamyšlení** – Uvidíme hvězdy v kulové hvězdokupě?: Jasnost jedné hvězdy hvězdokupy označme  $j$ . Takových hvězd je celkem  $n = 5 \cdot 10^5$  (předpokládejme, že všechny hvězdy jsou stejné). Pro celkovou hvězdnou velikost hvězdokupy platí podle Pogsonovy rovnice

$$a = -2,5 \log (nj/j_0),$$

kde  $j_0$  je jasnost hvězdy, která má nulovou hvězdnou velikost. Pro hvězdnou velikost  $m$  jednotlivé hvězdy platí obdobně

$$m = -2,5 \log (j/j_0).$$

Právě tuto veličinu chceme zjistit. Úpravou první rovnice dostáváme

$$\log (nj/j_0) = a/(-2,5),$$

$$j/j_0 = 10^{a/(-2,5)}/n$$

a po dosazení do druhé rovnice je

$$m = -2,5 \log (10^{a/(-2,5)}/n).$$

*Číselně:*

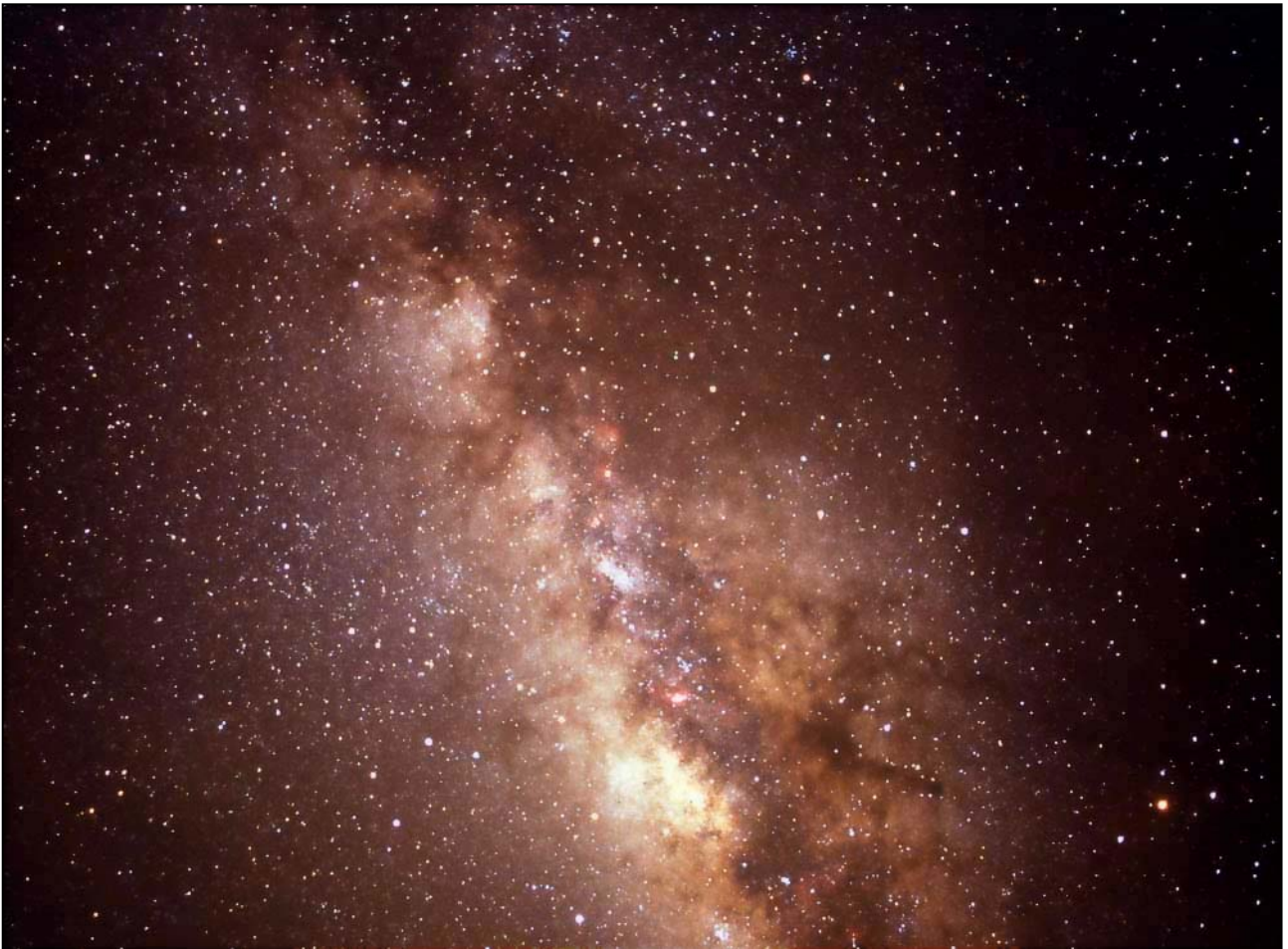
$$a = 5,9 \text{ mag}$$

$$m = -2,5 \log (10^{-5,9/2,5}/5 \cdot 10^5) = 20 \text{ mag}.$$

Přestože střední hvězdná velikost jednotlivých hvězd ve hvězdokupě je  $m = 20$  mag, můžeme za dobrých pozorovacích podmínek spatřit jednotlivé hvězdy na okraji hvězdokupy i středně velkým dalekohledem. To neznamená, že výpočet či vstupní data jsou chybné, jen jeden předpoklad není zcela splněn: *všechny hvězdy nejsou stejné*. Výpočet udává *střední* hvězdnou velikost hvězd, zatímco dalekohledem pozorujeme jako jednotlivé kusy hvězdy *nadprůměrně* jasné.

### 8.2. Co se skrývá uprostřed Galaxie?

**P**ozorujeme-li hvězdnou oblohu mezi gamou Štělce a thétou Hadonoše, díváme se přímo do centra naší Galaxie. Ani velkými dalekohledy tu ovšem nespátříme 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 Štělce, kde se našim pohledům ukrývá centrální část Galaxie.

## 8. Hvězdné ostrovy

### Skryté jádro

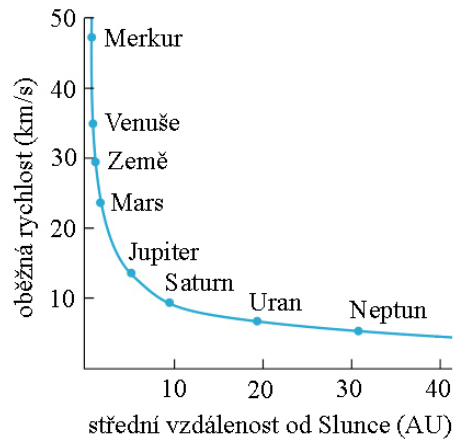
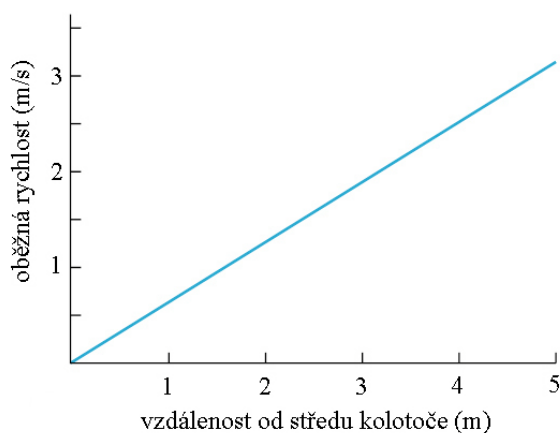
Jádrem Galaxie je patrně obrovská, mírně zploštělá kulová hvězdokupa o rozměrech  $3 \times 5$  kpc. Má hmotnost asi 10 bilionů Sluncí, přičemž nejčetnější jsou v ní slabí červení trpaslíci. Celé jádro obklopuje hustý prstenec mezihvězdné látky, jenž dokonale znemožňuje průzkum jádra ve vizuálním oboru spektra. Koncentrace hvězd směrem ke středu prudce narůstá, rychle se zvyšuje pravděpodobnost blízkých setkání hvězd.

V samém centru je galaktické jádro 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 jádra.

### Rotace Galaxie

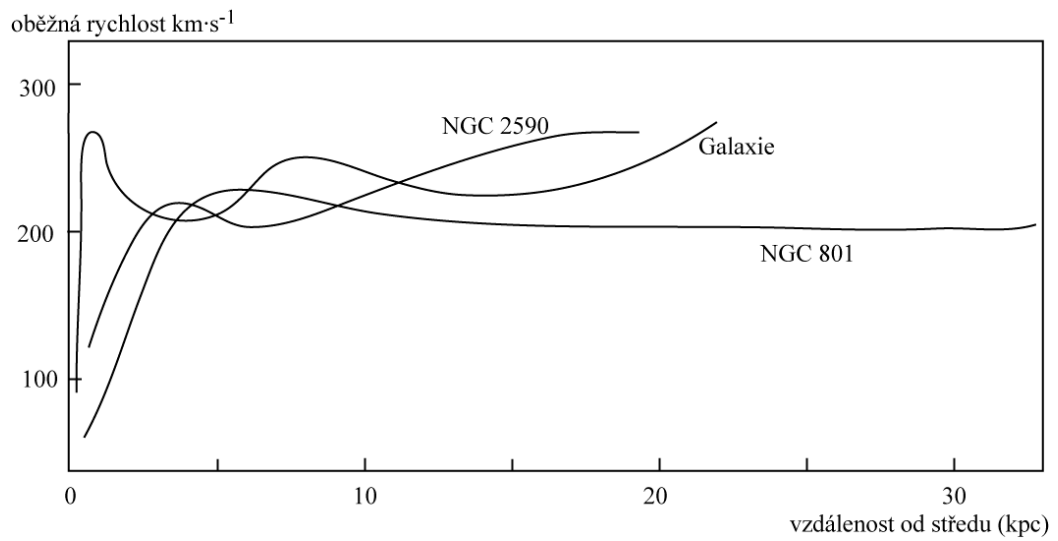
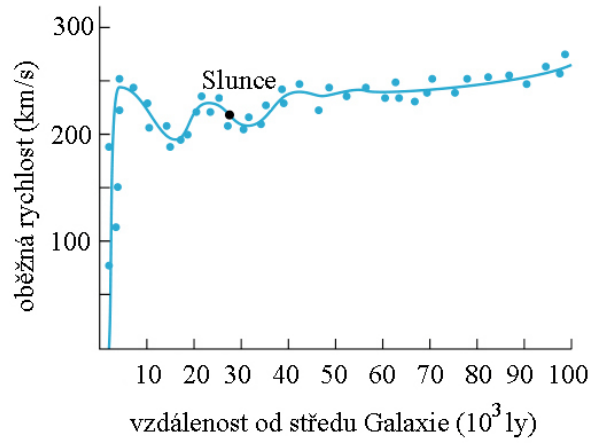
Nacházíme se uvnitř Galaxie, a přesto (či právě proto) není snadné stanovit, jak rotuje celá hvězdná soustava. Měřením radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd v širokém okolí Slunce zjišťujeme, že tyto objekty obíhají kolem centra Galaxie rychlostmi, jež závisejí na vzdálenosti od středu Galaxie.

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.

## 8. Hvězdné ostrovy



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 čtvrt hodině 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 zvíř. 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 nezapomenou na dojem, který to ve mně tehdy vyvolalo. Zde ležel muž, jenž před pětadvá-



Foto: Roger Groom

## 8. Hvězdné ostrovy

---

ceťi 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.

## 8. Hvězdné ostrovy

---



---

### 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 byt' 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

## 8. Hvězdné ostrovy

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.

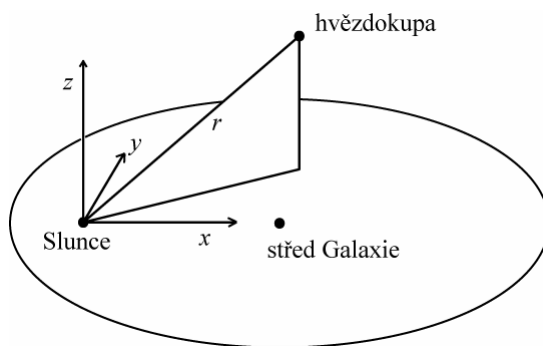
3. Z galaktických souřadnic  $l$ ,  $b$  a vzdálenosti  $r$  vypočítejte pravoúhlé souřadnice  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , které budete nadále používat. Potřebné vztahy pro výpočet:

$$x = r \cos l \cos b,$$

$$y = r \sin l \cos b,$$

$$z = r \sin b.$$

Výsledky zapište do tabulky 1.



4. Do řezu v rovině  $x-z$  (obr. 2) vynesete 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 vynesete 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).

## 8. Hvězdné ostrovy

*Vstupní data, výsledky:*

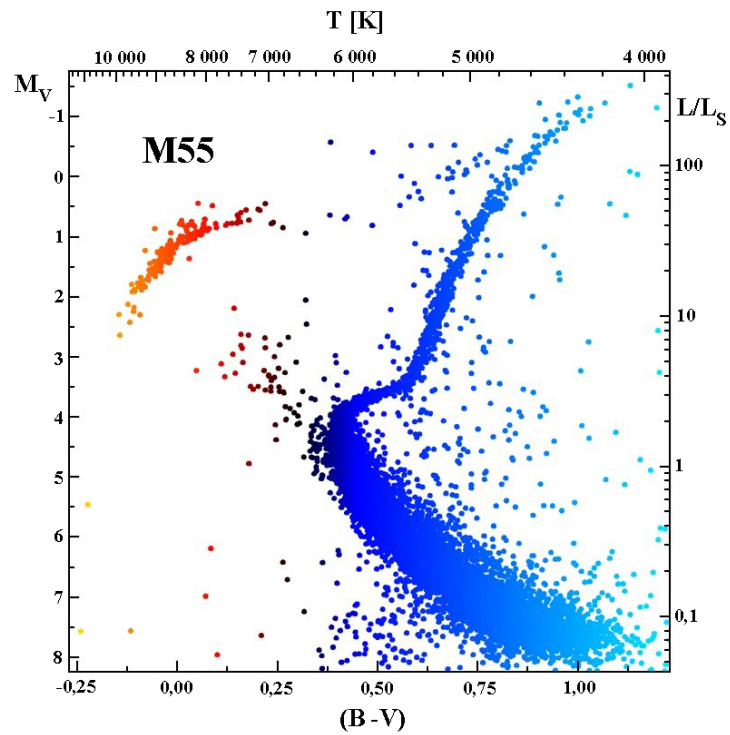
**Tabulka 1**

<i>Hvězdotrupa</i>	<i>Hv. vel. RR Lyr</i>	<i>Extinkce (mag)</i>	<i>Vzdálenost (kpc)</i>	<i>Galakt. souřadnice</i>		<i>Pravouhlé souřadnice</i>		
				<i>l (°)</i>	<i>b (°)</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
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			

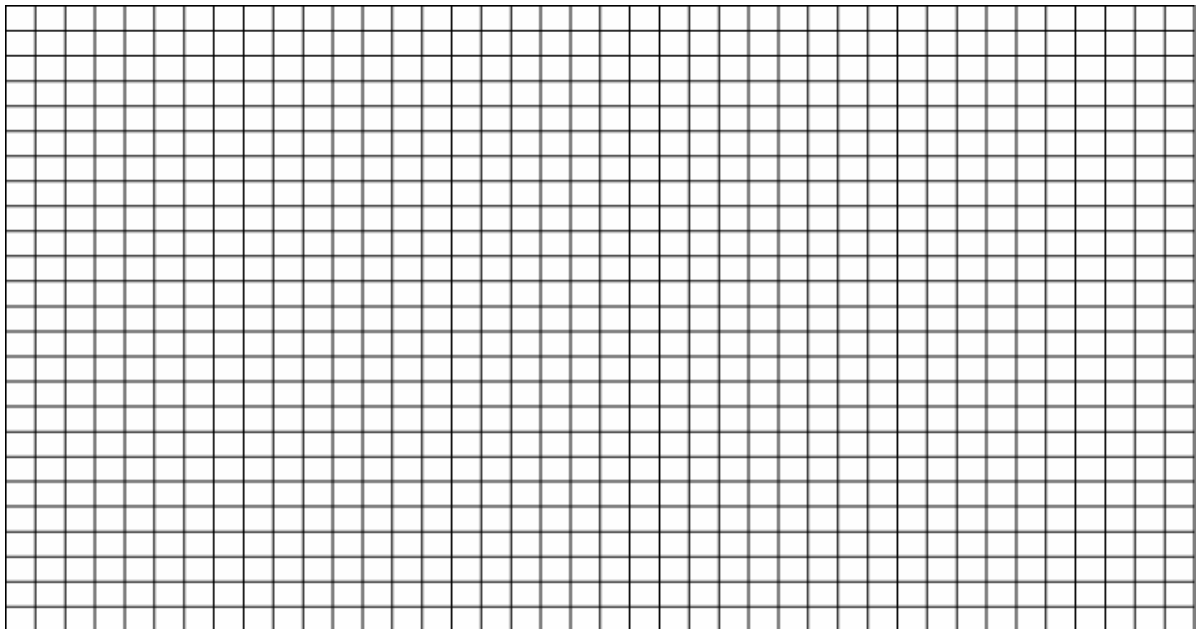
**Tabulka 2. Kulové hvězdotrupy poblíž galaktického rovníku**

<i>Hvězdotrupa</i>	<i>Pravouhlé souřadnice (kpc)</i>		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
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

## 8. Hvězdné ostrovy



Obr. 1. Barevný diagram kulové hvězdokupy (schéma).

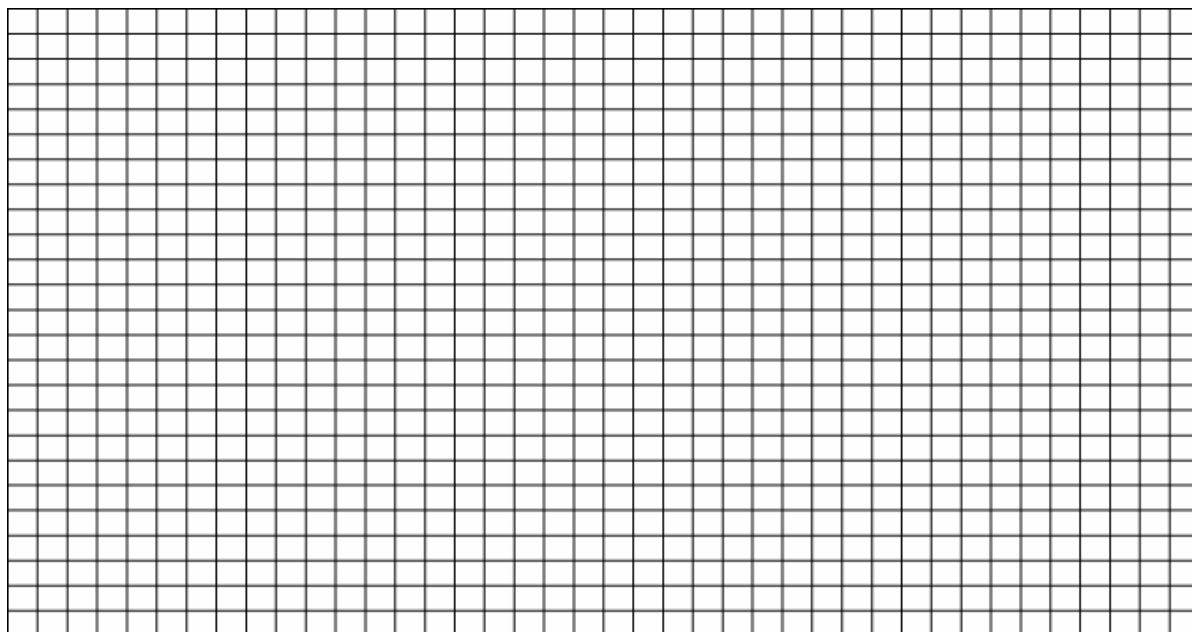


Obr. 2. Řez v rovině x-z.

Vzdálenost Slunce – střed Galaxie: \_\_\_\_\_ (kpc)

## 8. Hvězdné ostrovy

---



Obr. 3. Řez v rovině x-y.

Vzdálenost Slunce – střed Galaxie: \_\_\_\_\_ (kpc)

## 8. Hvězdné ostrovy

---



---

### výsledky

---

K otázce 8.2.1.: Kulové hvězdokupy mají výraznou koncentraci ke *středu* Galaxie. My jsme víceméně na okraji Galaxie. V měsíci únoru je v noci střed Galaxie i s kulovými hvězdokupami skryt pod obzorem.

K otázce 8.2.2.: c

K otázce 8.2.3.: a

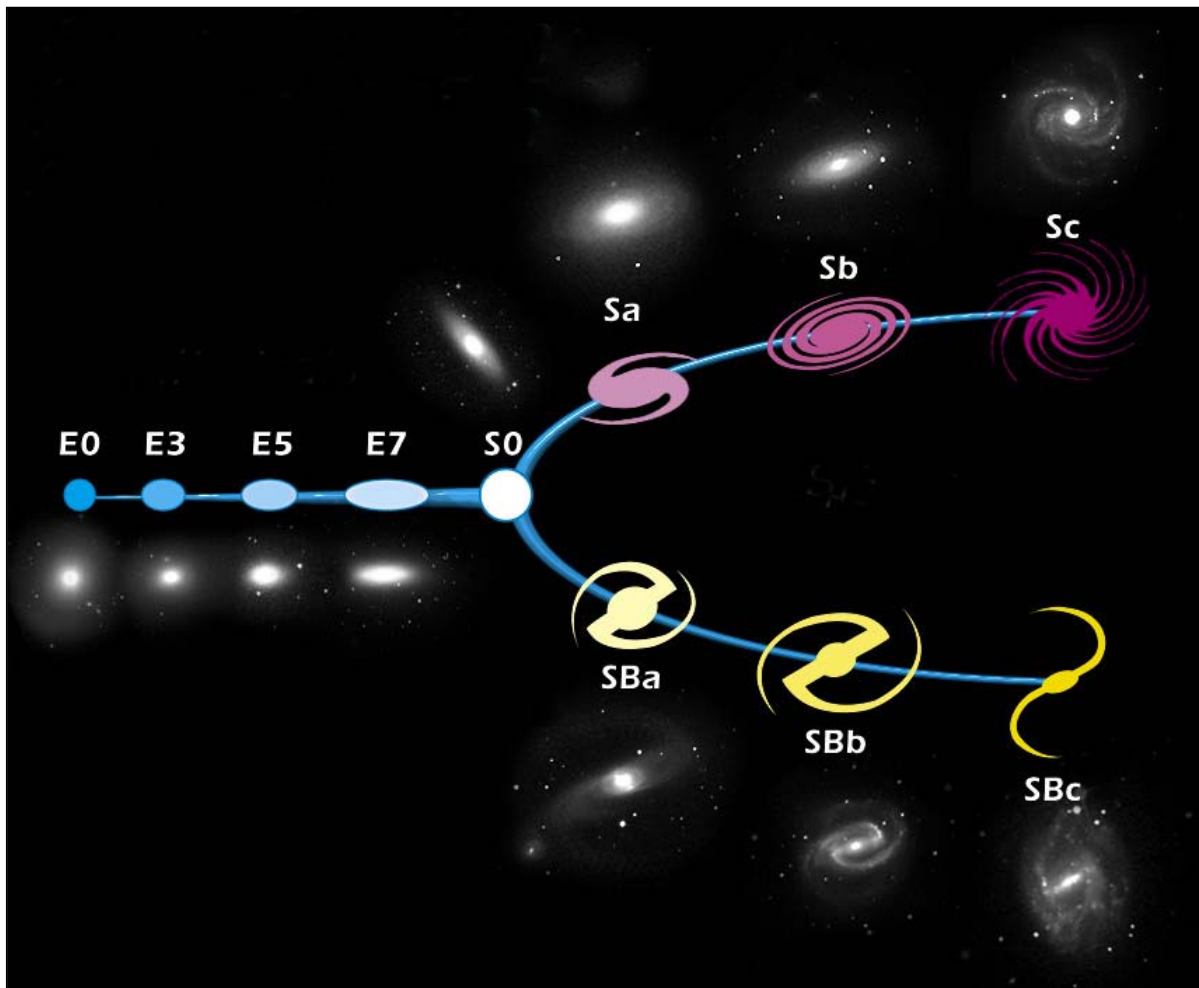
K otázce 8.2.4.: c

K otázce 8.2.5.: b

### 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 roztrídil do několika základních skupin (viz dále), zakreslil je v podobě zvláštního grafu, připomínajícího ladičku zvuku či vidličku.



Hubblova klasifikace galaxií.



## 8. Hvězdné ostrovy

### 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. *Sd* (relativní rozměry jádra vůči ramenům klesají od *Sa*, resp. *SBa* až k *Sd*, resp. *Sd*). 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?

## 8. Hvězdné ostrovy

---

### Eliptické galaxie

Asi čtvrtina pozorovaných hvězdných soustav jsou eliptické galaxie. Mají tvar koule nebo více či méně zploštělého rotačního elipsoidu. Také eliptické galaxie lze roztrždit do několika typů podle pozorovaného tvaru galaxie: za písmenem *E* následuje číslice, jež udává zploštění. Vzoreček pro výpočet číslice zní:  $\text{číslice} = 10[(a - b)/a]$ , 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 hmotnější 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*.

## 8. Hvězdné ostrovy

---



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.

<i>Typ galaxie</i>	<i>Relativní počet (%)</i>
spirální	50
eliptické	25
čočkovité	20
nepravidelné	5

## 8. Hvězdné ostrovy

---

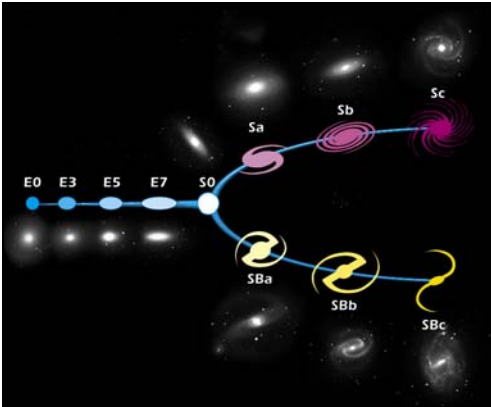
### Falešná představa

Když se ve 30. a 40. letech dvacátého století rozběhl naplno výzkum galaxií, zdálo se, že jejich rozřídění 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).



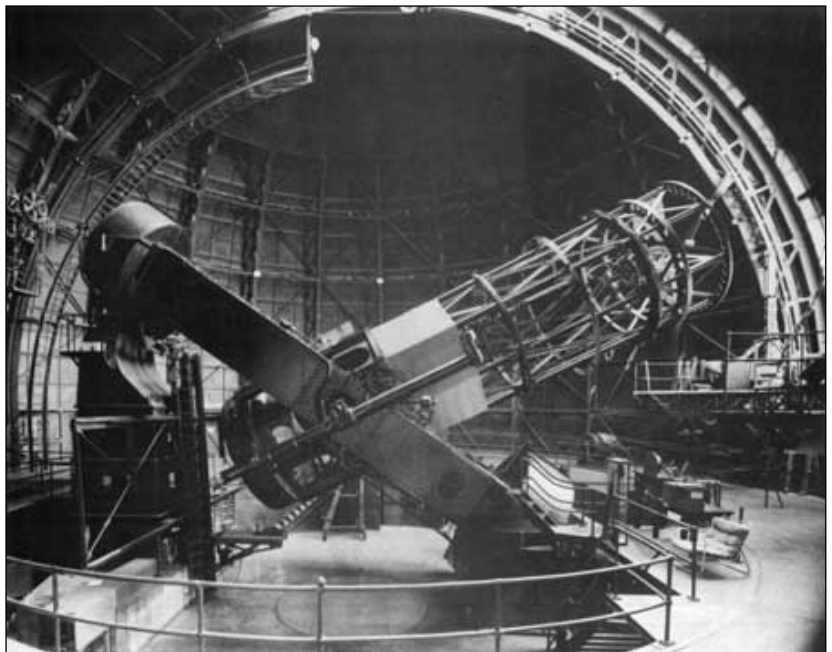
### čítanka

## 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 <sup>1)</sup> (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 pracovat 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



<sup>1)</sup> Čti: *milton hjúmasn*.

## 8. Hvězdné ostrovy

---

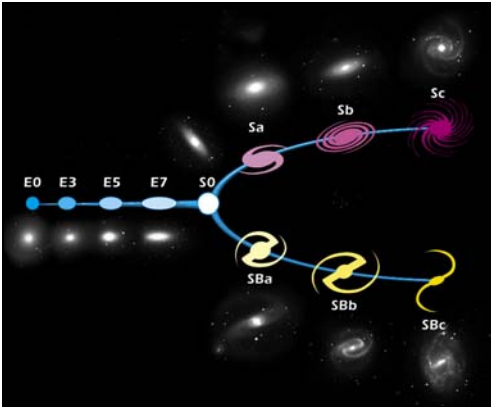


pomocný asistent, oblečen do polárního obleku s vlněnou čapkou a krátkým přiléhavým kabátkem, chránícím ho před zimou v noci, se pohyboval ve výšinách dalekohledu a hlasitě velel mladším nočním asistentům, kteří se nalézali v temnotě nějakých patnáct metrů pod ním.

Z knihy *Men of science in America*, Overseas Editions, Inc., 1944, str. 435.  
Překlad: Zdeněk Pokorný.

Milton Humason.

## 8. Hvězdné ostrovy



*Dvojím způsobem končíva 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.



## 8. Hvězdné ostrovy

---

**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.

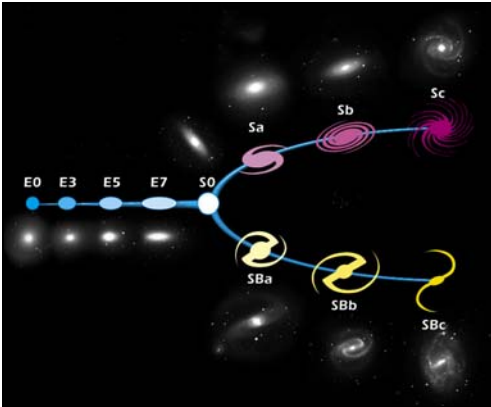
**Otázka 8.3.7.** Můžeme očekávat, že Hertzsprungův-Russellův diagram pro hvězdy eliptické galaxie bude připomínat H-R diagram pro a) zbytky supernov; b) kulové hvězdokupy; c) hvězdy z oblastí, kde vznikají; d) otevřené hvězdokupy.

**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 pestroostí podmínek při jejich vzniku.



## 8. Hvězdné ostrovy



### 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

- dvou galaxií;
- dvou hvězd;
- dvou atomů vodíku.

Srovnajte 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:*

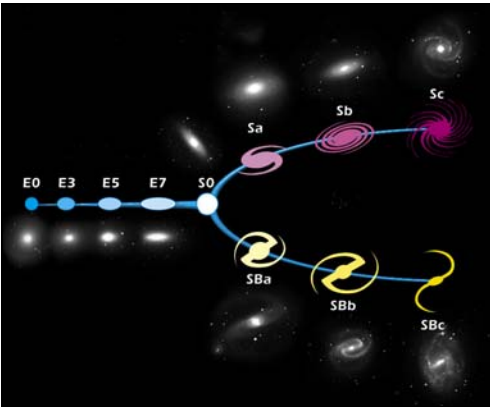
Srážky galaxií: v hustých kupách připadá asi 5000 galaxií na  $1 \text{ Mpc}^3$ , srážkový průřez  $\sigma = 100 \text{ kpc}^2$ .

Srážky hvězd: hustota hvězd činí asi 1 hvězda na  $1 \text{ pc}^3$ ; srážkový průřez  $\sigma = 3 \cdot 10^{11} \text{ km}^2$  odpovídá hvězdě o poloměru  $R = 300\,000 \text{ km}$  (ověřte si!).

Srážky atomů vodíku: hustota mezihvězdného vodíku je asi 1 atom na  $10 \text{ cm}^3$ , srážkový průřez  $\sigma = 10^{-20} \text{ m}^2$ .



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 Hubbleův 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 Hubbleův 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.

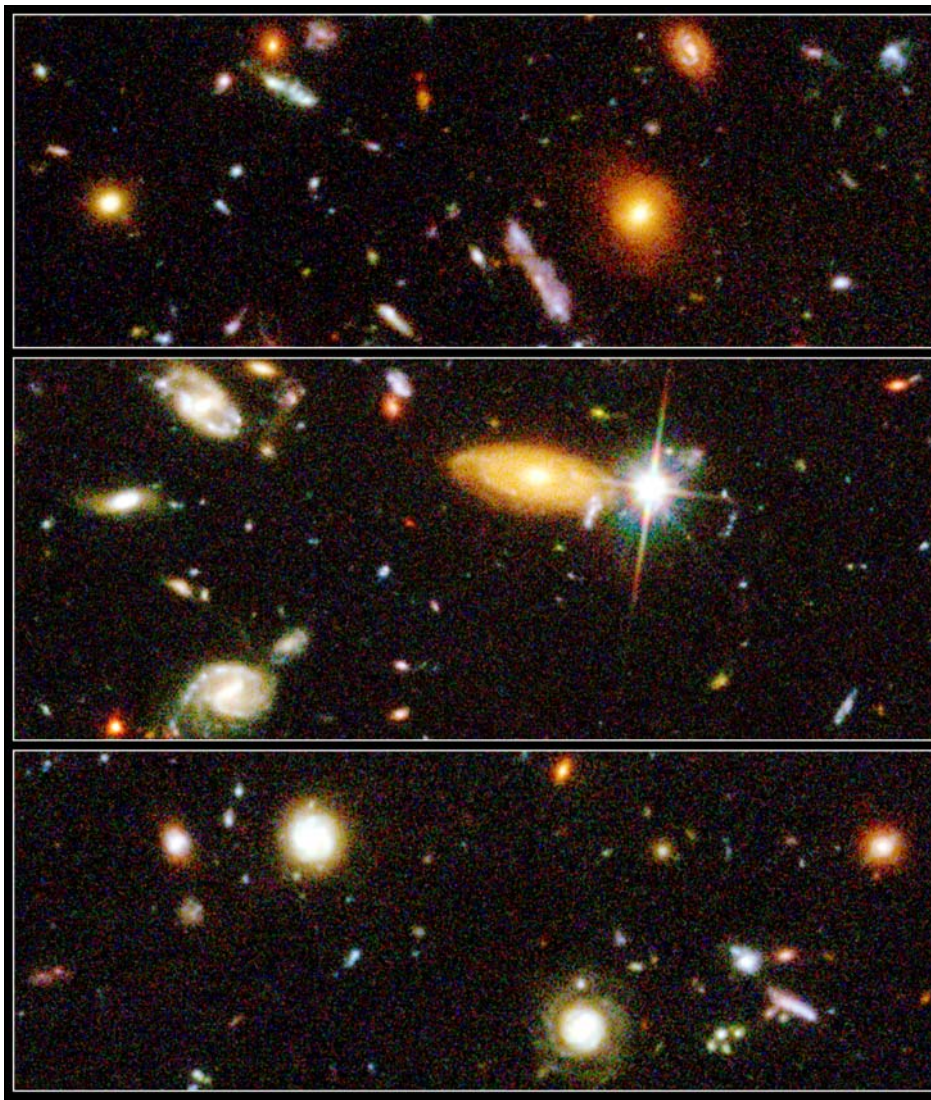
Na vybrané malé ploše je zachyceno pouze 90 hvězd, patřících do naší Galaxie – vše ostatní jsou cizí a daleké galaxie. Celkem je na snímku Hlubokého pole zachyceno více než 3000 objektů. Většinou to jsou ty nejvzdálenější objekty, které známe. Vznikly krátce po velkém třesku, v prvních několika miliardách 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

## 8. Hvězdné ostrovy

---

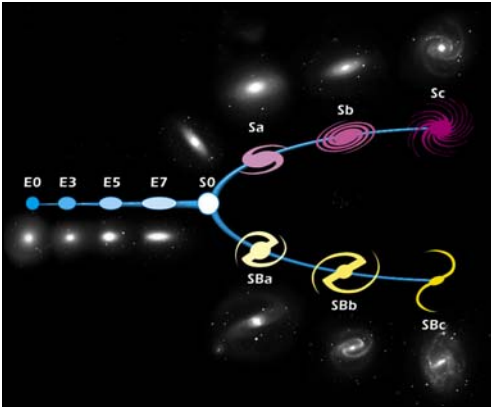
na jižním hvězdném nebi. Volba padla na souhvězdí Tukana. Tentokrát byl do zorného pole zahrnut i jeden jasný kvasar. Snímkování proběhlo od 28. září do 10. října 1998, záběry byly pořízeny v ultrafialovém, viditelném i infračerveném světle. Oba pohledy klíčovou dírkou do raného vesmíru se staly pro 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. Hvězdné ostrovy



### výsledky

K otázce 8.3.1.:  $7 = 10(a - b/a)$ ; odtud  $b = 0,3a$ , tedy  $a/b = 10/3$ .

K otázce 8.3.2.: Velmi hmotné hvězdy se vyvíjejí velmi rychle; při téměř absolutním nedostatku mezihvězdné látky v eliptických galaxiích v současnosti ke tvorbě nových hvězd prakticky nedochází, a dříve vzniklé veleobří hvězdy svůj „aktivní život“ již skončily.

K otázce 8.3.3.: a – nepravidelná galaxie Malý Magellanův oblak je plná mladých hvězd; b – ve spirálních ramenech i příčkách galaxií jsou zejména horké (a zářivé) hvězdy.

K otázce 8.3.4.: Z hlediska vývojového jsou to zejména nepravidelné galaxie – tam je nejvíce mezihvězdné látky pro tvorbu i hmotných hvězd (které pak vybuchnou jako supernovy). Statisticky je jich ale nejvíce ve spirálních galaxiích, protože ty jsou nejpočetnější.

K otázce 8.3.5.: V Mléčné dráze je velká extinkce světla.

K otázce 8.3.6.: b

K otázce 8.3.7.: b

K otázce 8.3.8.: Změna pozorované hvězdné velikosti dvou cefeid, způsobená jejich rozdílnou polohou v galaxii, činí (Pogsonova rovnice)  $5 \log [(l + d)/l]^2 = 0,035 \text{ mag}$  (ano, mohli bychom rozhodnout).

K otázce 8.3.9.: b

**Úloha k zamyšlení – Srážky galaxií:** Hledaná střední doba  $\tau$ , která uplyne mezi dvěma po sobě následujícími srážkami, je obecně rovna  $\tau = l/v = 1/(v\rho\sigma)$ .

*Číselně:*

$v = 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; veličiny  $\rho$  a  $\sigma$  je však mnohdy třeba převést z parseků na metry. Platí:  $1 \text{ pc} = 3\cdot 10^{16} \text{ m}$ .

a) Srážky galaxií:

$$\tau = 1/[10^6 \cdot 5000 \cdot 100 \cdot (3 \cdot 10^{19})^2 / (3 \cdot 10^{22})^3] = 6 \cdot 10^{16} \text{ s} = 2 \cdot 10^9 \text{ let}$$

(neboť  $1 \text{ rok} = 3 \cdot 10^7 \text{ s}$ ). Vidíme tedy, že ke vzájemným srážkám galaxií velmi pravděpodobně, téměř zcela určitě dochází.

b) Srážky hvězd:

Nejdříve si ověříme, zda srážkový průřez  $\sigma$  je uveden správně. Hvězda o poloměru  $R$  má srážkový průřez  $\sigma = \pi R^2$ , tedy  $\sigma = \pi(3 \cdot 10^8)^2 = 3 \cdot 10^{17} \text{ m}^2$  (souhlasí se zadáním). Střední doba

## 8. Hvězdné ostrovy

---

$$\tau = 1/[10^6 \cdot 3 \cdot 10^{17} / (3 \cdot 10^{16})^3] = 9 \cdot 10^{25} \text{ s} = 3 \cdot 10^{18} \text{ let.}$$

Je téměř vyloučeno, aby docházelo ke srážkám hvězd (za hustot hvězd obvyklých např. v okolí Slunce).

c) Srážky atomů vodíku:

Pro ně je střední doba rovna

$$\tau = 1/(10^6 \cdot 10^5 \cdot 10^{-20}) = 10^9 \text{ s} = 30 \text{ let,}$$

takže ke srážkám atomů mezihvězdného vodíku dochází zcela jistě.

### 8.4. Vesmír velkých měřítek

**G**alaxie jen zřídka 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<sup>1)</sup>.

#### 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.



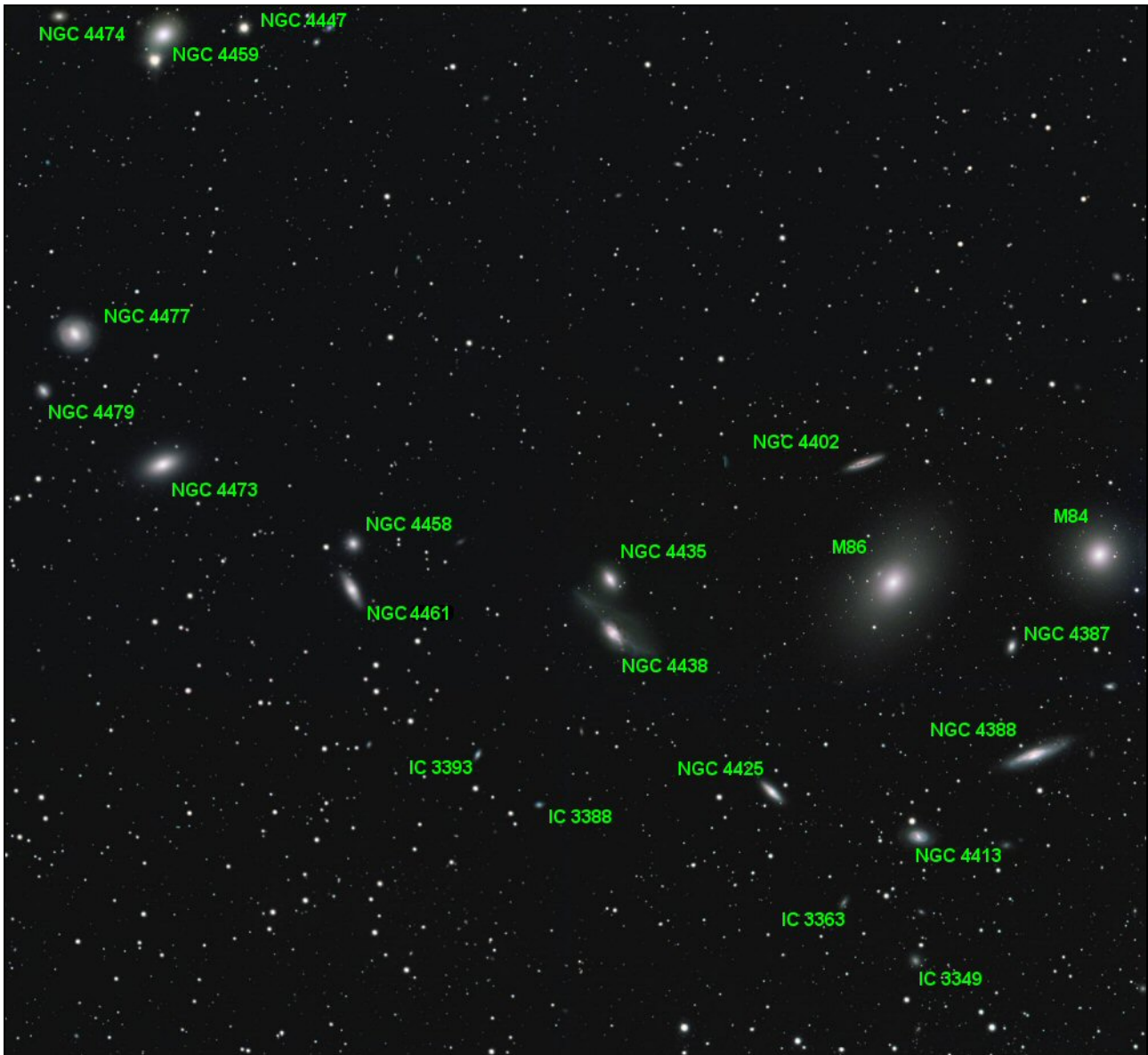
Kupa galaxií Abell 1689.

---

<sup>1)</sup> Budete-li si chtít sestavit 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).

## 8. Hvězdné ostrovy

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).

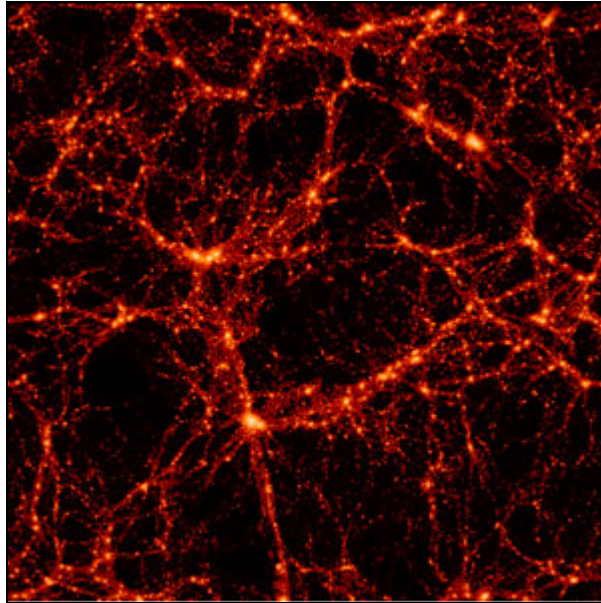
### Kosmická pěna

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.

## 8. Hvězdné ostrovy

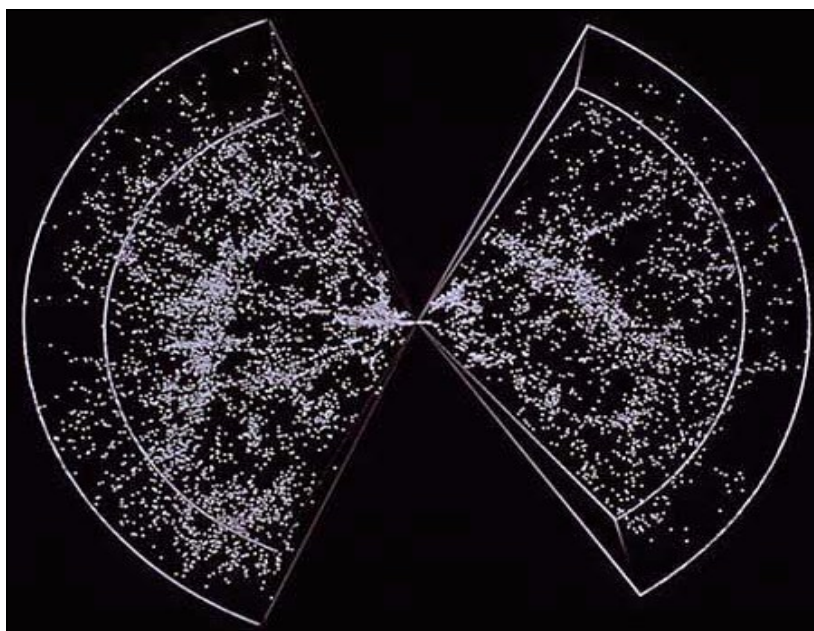
---

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 zjednodušíme. 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 nejužitečnější? a) Galaxie připomínají skupinu velkých námořních lodí v malé mořské zátocce. b) Je to, jako když se rozutečou žáci jedné třídy po velkém lehkotleticím stadionu. Co žák, to jedna galaxie. c) Galaxie jsou jako auta, odstavená na téměř zaplněné ploše velkého parkoviště před supermarketem.

## 8. Hvězdné ostrovy

---



---

### výsledky

---

K otázce 8.4.1.: Z Hubbleova vztahu  $v = H r$  ( $v$  je rychlost vzdalování,  $H$  Hubbleova konstanta,  $r$  je vzdálenost); u blízkých galaxií pomocí cefeid; odhadem podle typu, jasnosti a úhlového průměru galaxie.

K otázce 8.4.2.: Ze závislosti „perioda – zářivý výkon“ pro cefeidy. Vzhledem k poměrně blízkosti těchto galaxií jsou jiné metody nevhodné.

K otázce 8.4.3.: 10

K otázce 8.4.4.: c

K otázce 8.4.5.:  $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ ly}$ , tedy  $310 \text{ Mpc} = 3,1 \cdot 10^8 \cdot 3,26 = 1,0 \cdot 10^9 \text{ ly}$  (vidíme stav před jednou miliardou roků, tj. 1/5 stáří Země).

K otázce 8.4.6.:  $10^7 \text{ ly}$  – nebude, ještě se projeví velkorozměrná struktura vesmíru;  $10^8 \text{ ly}$  – možná ano, možná ne;  $10^9 \text{ ly}$  – výsledek bude stejný a nezávislý na výběru polohy „krychle“.

K otázce 8.4.7.: a

### 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*<sup>1)</sup>; vykazují nejmohutnější aktivitu a řadí se k nejpozoruhodnějším objektům ve vesmíru.

---

<sup>1)</sup> *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).

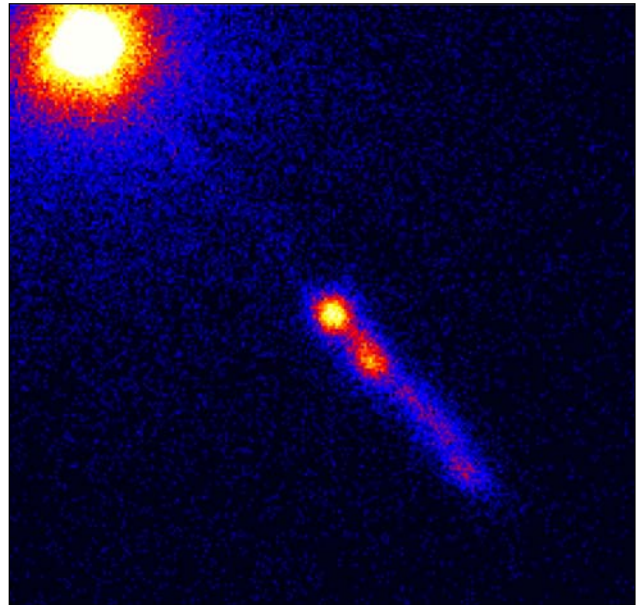
## 8. Hvězdné ostrovy

### Kvasary

Kvasary jsou nejbližšími 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).

## 8. Hvězdné ostrovy

---

Příměr „kanibalismus“ je tedy zcela namístě. Přímá srážka jednotlivých hvězd v galaxiích sice nehrozí<sup>2)</sup>, 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 Hubbleův kosmický dalekohled).

---

<sup>2)</sup> Pokud jste vyřešil(a) úlohu k zamýšlení 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

**B**ěhem 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 odrazily 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 radiového šumu z vesmíru a citlivé přijímače k záznamu poloh kosmických radiových zdrojů na obloze. Co však stačilo k identifikaci letadel, nestačilo astronomům. Nevýhodou prvních radioteleskopů byla malá úhlová rozlišovací schopnost, takže polohy radiových 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 radiového šumu opravdu znamenají.

Teprve v roce 1960 se podařilo astronomům u tehdy největšího dalekohledu světa na Mount Palomaru v Kalifornii ztotožnit radiový zdroj v souhvězdí Trojúhelníku, označený v 3. cambridgeském katalogu radiových 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.

Jasně světlo do celé záležitosti vneslo až pozorování jiného radiového zdroje, označeného 3C-273, nalézajícího se v souhvězdí Panny. Toto souhvězdí je, jak známo, jedním ze zvětrníkových souhvězdí, takže jím

## 8. Hvězdné ostrovy

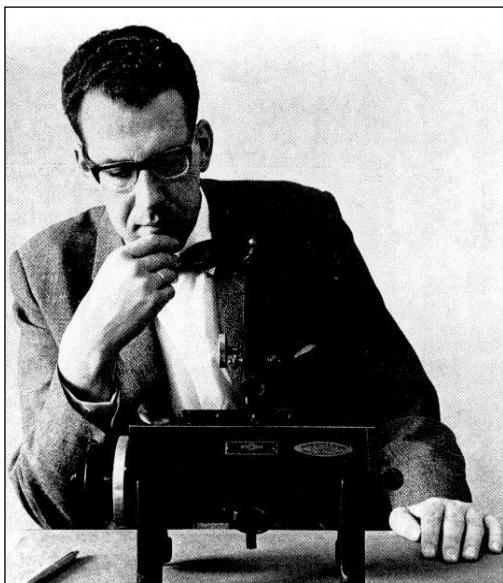
pravidelně prochází Měsíc. Australští radioastronomové z Parkesu odhadli, že na podzim 1962 by mohl Měsíc při svém pohybu uvedeným souhvězdím možná zakrýt rádiový zdroj a tím by se poloha zdroje významně zpřesnila. Dráha Měsíce je totiž velmi přesně známa a jestliže v okamžiku zákrytu rádiový zdroj náhle 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.

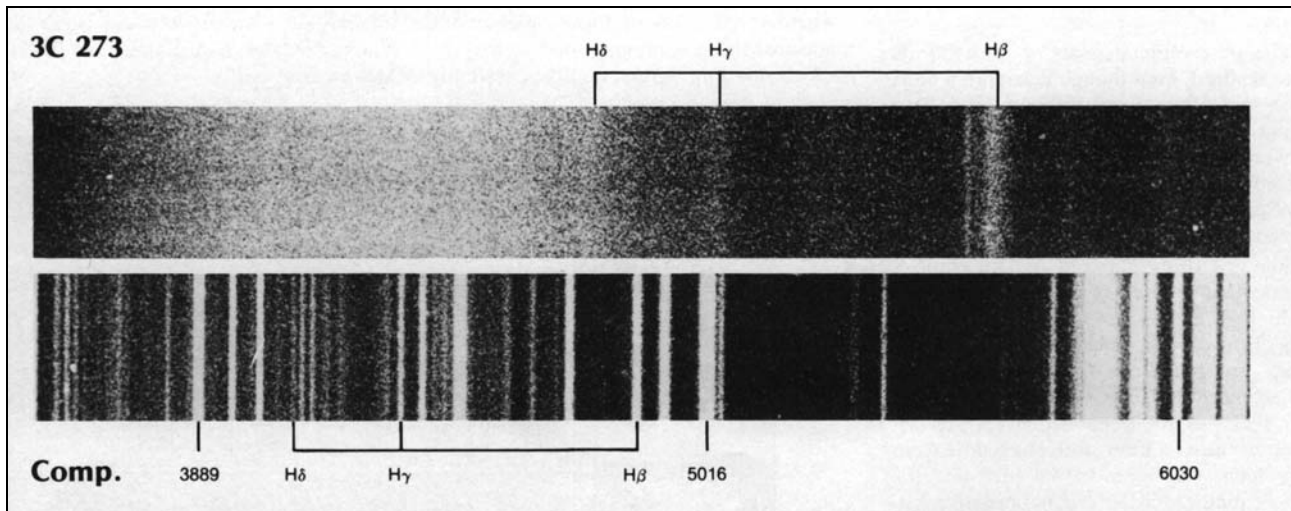


O rozřešení záhady se postaral mladý americko-holandský astronom Maarten Schmidt (nar. 1929), jenž si po mnoha marných pokusech povšiml, že jasné čáry ve spektru „hvězdy“ 3C-273 nejsou rozloženy nahodile, nýbrž jeví jistou povědomou posloupnost poloh. Jejich sled mu připomínal rozložení čar ve spektru nejjednoduššího a také nejhojnějšího prvku ve vesmíru – vodíku. Samotné polohy se ovšem poněkud 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

## 8. Hvězdné ostrovy

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 (nahore) 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 Hubbleova 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 vznikala 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 *kvazitelární 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 řekneme 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.

## 8. Hvězdné ostrovy



*My všichni žijeme pod stejným nebem, ale bohužel všichni nemáme tytéž obzory.*

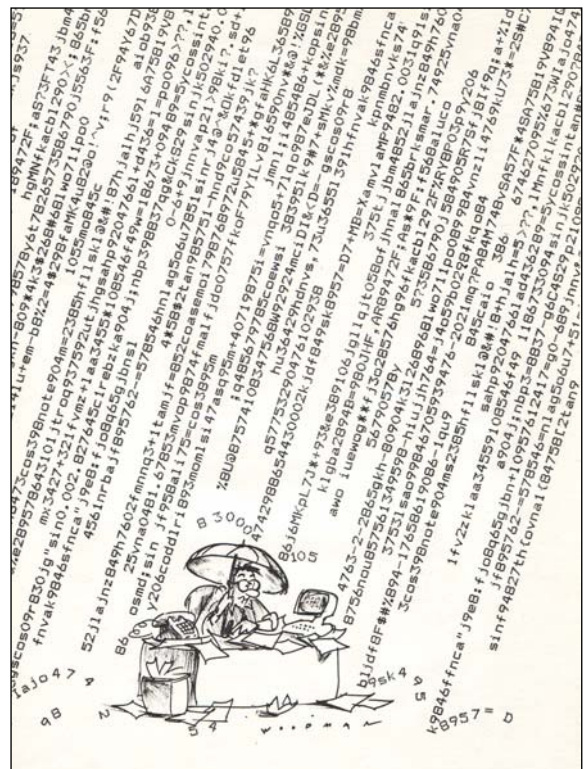
Konrád Adenauer, politik (1876 – 1967)

### 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 chybně.

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.



## 8. Hvězdné ostrovy

---



---

### výsledky

---

K otázce 8.5.1.: b

K otázce 8.5.2.: c

K otázce 8.5.3.: Máme na mysli dopplerovský posuv spektrálních čar směrem k červenému konci spektra, způsobený rozpínáním vesmíru.

K otázce 8.5.4.: c

K otázce 8.5.5.: Rozměr oblasti musí být menší než dráha, kterou světlo urazí za 20 dní, jinak bychom změnu jasnosti nemohli pozorovat, protože by se „rozmyla“. Číselně:  $20 \text{ světelných dní} = 20 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^5$  [přibližný počet sekund za den]  $= 6 \cdot 10^{14} \text{ m} = 0,02 \text{ pc}$ .

K otázce 8.5.6.: c

K otázce 8.5.7.: Při anihilaci se za 1 s uvolní energie  $m c^2 = 5 \cdot 10^{40} \text{ (J)}$ , kde  $c$  je velikost rychlosti šíření světla ve vakuu, z čehož  $m = 5,6 \cdot 10^{23} \text{ kg}$ . Účinnost termonukleárních reakcí dosahuje asi 1 % předchozího procesu, takže v tomto případě je zapotřebí hmotnost asi 100krát větší.

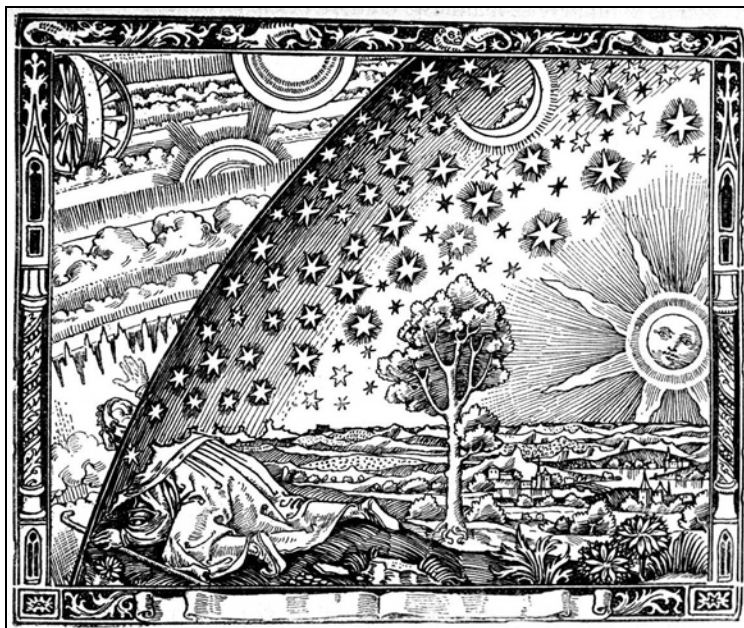
**Speciální otázky:** 1. a 2. tvrzení jsou správná; 3. tvrzení: ne  $12^h$ , ale  $0^h$  (pro konjunkci), uvedené tvrzení platí pro opozici; 4. tvrzení: 61 Cyg je vzdálena ne 300, ale asi 3 a půl pc ( $1/0,3 = 3 \text{ pc}$ ), údaje o paralaxách jsou správné; 5. tvrzení: rozlišovací schopnost je řádově 10krát horší (tj. nanejvýš úhlové vteřiny při předpokládaném průměru objektivu dalekohledu 100 až 150 mm).

### 9.1. Architektura našeho vesmíru

**Z**náme 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 dřevorez fakticky pochází z okruhu od Camille Flammariona, významného 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 sestavují pouze různé *modely vesmíru*, jež pak porovnávají se skutečností.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

### První představy a první paradoxy

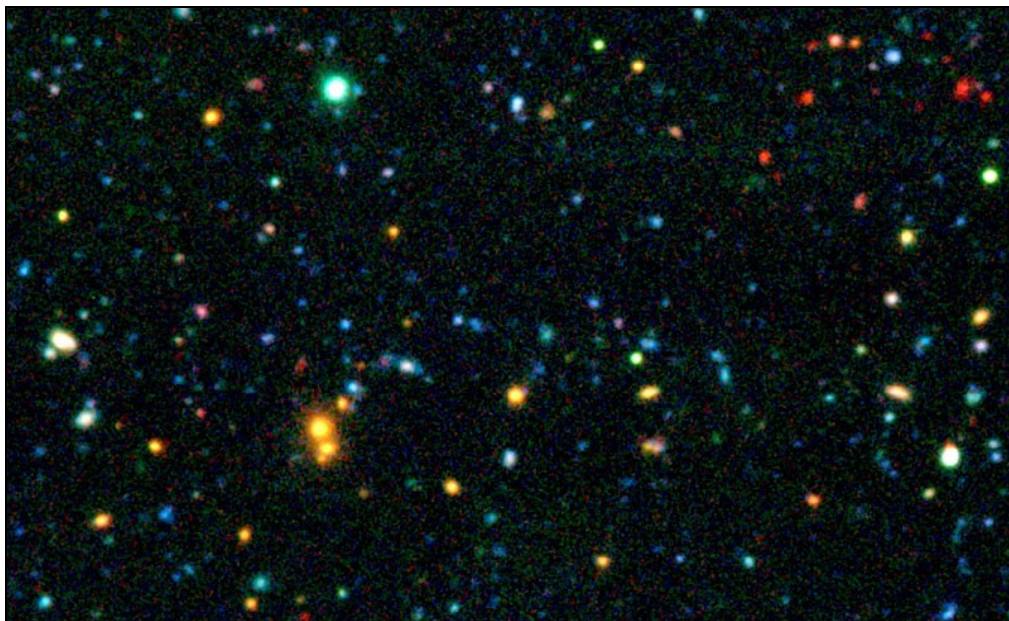
Přeskočíme-li starověkou představu hvězdného vesmíru jako pevné sféry, na níž jsou upevněny všechny hvězdy („stálice“), musíme za první model označit představu Newtonovu: vesmír je nekonečný, rovnoměrně vyplněný hvězdami, které nekonají žádný systematický pohyb.

Tento model, i když se nepříčí „zdravému rozumu“, má ovšem řadu vad, tzv. *kosmologických paradoxů*<sup>1)</sup>, 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<sup>2)</sup>.

### 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*<sup>3)</sup>. 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“<sup>4)</sup>.



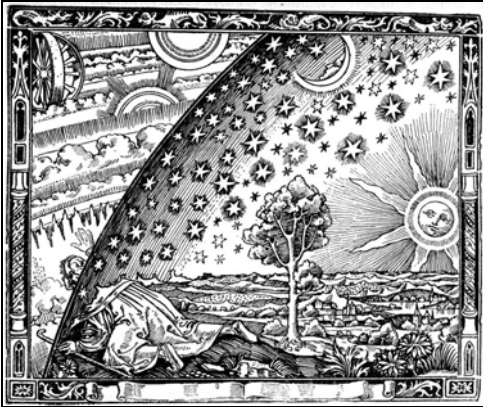
Kus hvězdné oblohy o rozloze  $2 \times 4$  úhlové minuty je vyplněn jen vzdálenými galaxiemi (snímek pořízen v infračerveném oboru na observatoři ESO v La Silla, Chile).

<sup>1)</sup> Řecké *paradoksos* značí mimo jiné nepodobný, podivný, neočekávaný, neuvěřitelný.

<sup>2)</sup> Pokud se vám zdá, že problém je zde jen nakousnut a nedořešen, přečtěte si v čítance článek *V noci musí být tma*.

<sup>3)</sup> Izotropní – řecké *isos* znamená stejný, *tropos* směr („ve všech směrech stejný“); homogenní: z řeckého *homos* – stejný, *genos* – rod, tedy doslova „stejnorodý“.

<sup>4)</sup> Jak víme z pozorování, vesmír velkých měřítek je homogenní a izotropní. Za základ však musíme brát prostor velkým nejméně několik stovek kiloparseků; pak se nám vesmír opravdu jeví jako rovnoměrně vyplněný látkou. Uvedme 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 Islandčanem 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.

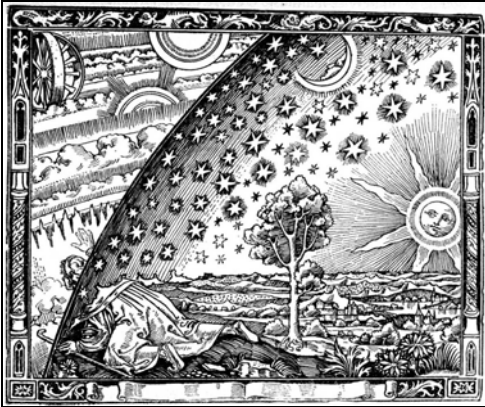
Nechci se dotknout náboženského citění, zejména náboženského citění vikingů, ale troufám si říci, že to není příliš přesvědčivý obraz počátků světa. I když ponecháme stranou všechny námitky proti logice báje, příběh vyvolává tolik otázek, na kolik jich odpovídá, a každá odpověď vyžaduje další komplikace 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

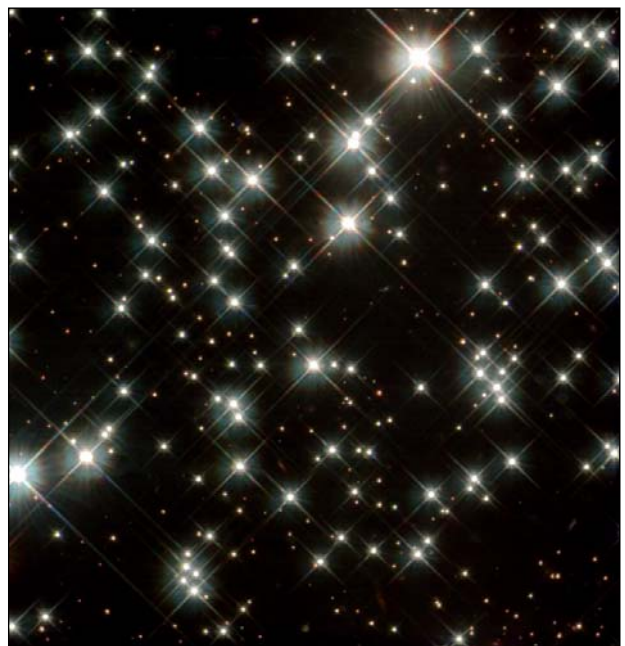
*„Je-li to pravda a jsou-li hvězdy stejné povahy  
jako Slunce, proč tato slunce dohromady  
nepředčí naše Slunce v jeho jasnosti?“*

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 peklu 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.



## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---

*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.

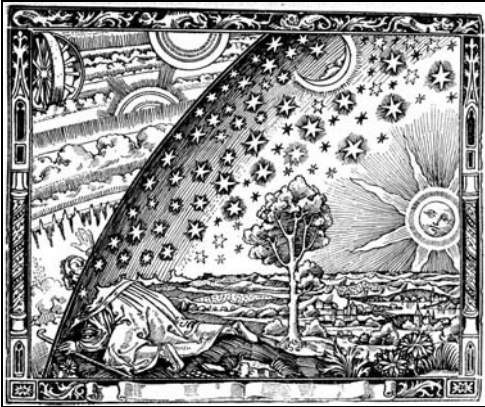
Temnota nočního nebe je dána tím, že vesmír zkrátka neobsahuje dostatek energie k tomu, aby se vytvořila jasně zářící obloha. Světlo všech hvězd je příliš slabé na to, aby „osvětlilo“ temný vesmír.

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

---

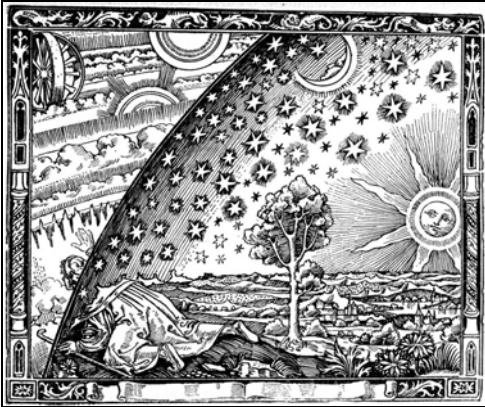
**Otázka 9.1.1.** Představte si, že se zcela náhodně octnete na nějakém místě ve vesmíru, a tam budete porovnávat osvětlení vyvolané kosmickými objekty s tím, co známe ze Země. S největší pravděpodobností zjistíte, že: a) bude mnohem větší než za slunečního dne na Zemi; b) bude srovnatelné s osvětlením v noci za měsíčního úplňku; c) bude srovnatelné s osvětlením za temné bezměsíčné noci; d) bude mnohem menší než osvětlení za nejtmaší 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: seřad'te 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 *nepředstavuje* 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.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



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

---

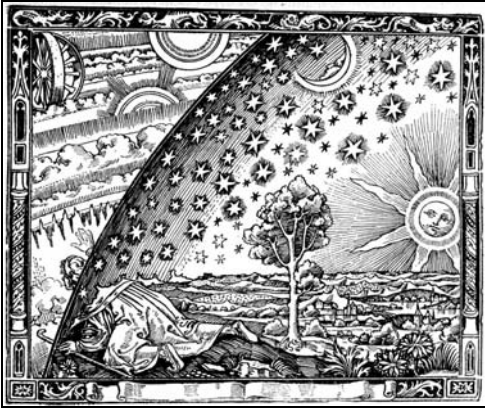
## Řádový odhad je důležitý

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.  $\pm 1$  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 třiedrem?
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 tmou?
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. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



---

### výsledky

---

K otázce 9.1.1.: Varianta d – spolu se Zemí jsme součástí Galaxie, takže při náhodném výběru pozorovacího stanoviště se s největší pravděpodobností budeme nacházet *mimo* nějakou galaxii, budeme ve tmavém mezigalaktickém prostoru.

K otázce 9.1.2.: b d a e c

K otázce 9.1.3.: b

**Speciální otázka** – Řádový odhad je důležitý: ad 1 –  $10^5$  hvězd; ad 2 –  $10^0$  %; ad 3 –  $10^2$  hvězdokup; ad 4 –  $10^6$  hvězd; ad 5 –  $10^0$  pc; ad 6 –  $10^1$  min; ad 7 –  $10^5$  planetek; ad 8 –  $10^{11}$  hvězd; ad 9 –  $10^3$  km; ad 10 –  $10^7$  K.

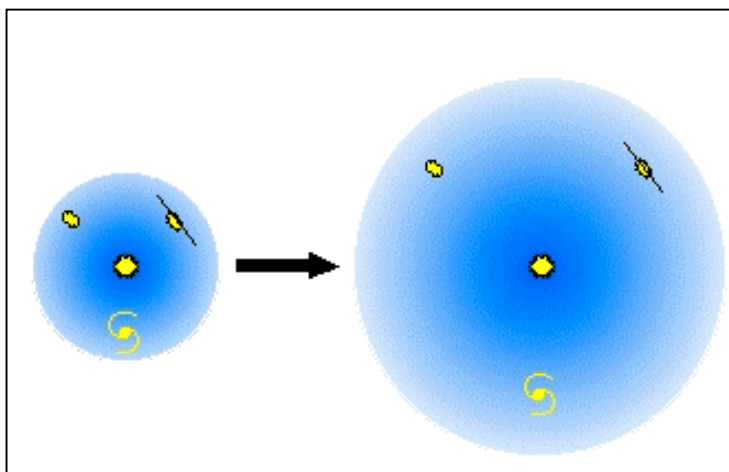
### 9.2. Vesmír se rozpíná

**A**no, 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 <sup>1)</sup>.

#### 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 ročně 0,23 krychlových milimetrů. V naší analogii s gumovou blánou jde o její roztahování. Kdyby to byla

<sup>1)</sup> O tom, že vesmír opravdu *je* dynamický, si přečtete více v čítance v následující kapitole 9.3. (*Vesmír se musí vyvíjet*).

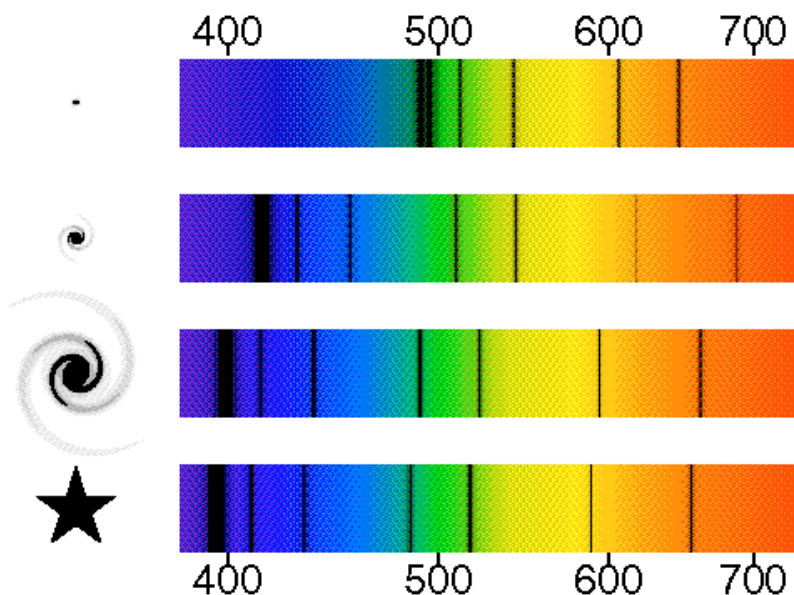
## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

tkanina z pružných vláken, asi bychom řekli, že se roztahuje výplet. Body – kupy galaxií – se napříč blánou prakticky nepohybují.

Matematicky to popíšeme *Hubblovým vztahem*<sup>2)</sup>. 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 je 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.

<sup>2)</sup> Pro připomenutí: o Hubblově vztahu byla zmínka již v kapitole 2.6.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---

### 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 <sup>3)</sup>

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 řídil 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 tehdejší rozdělení látky ve vesmíru.

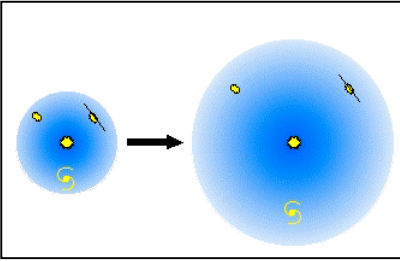
Ke vzniku fotonů reliktního záření došlo několik set tisíc let po velkém třesku. Toto záření je opravdu pozůstatkem (reliktem) dávné doby, po níž fotony reliktního záření již ani nevznikaly, ani nezanikaly, i když některé své původní vlastnosti změnilo. V důsledku rozpínání vesmíru poklesla totiž jejich energie natolik, že v současnosti typická vlnová délka reliktních fotonů činí asi 2 mm (je to tedy mikrovlnné záření).

---

<sup>3)</sup> Latinské *reliquus* je pozůstalý, zbývající.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



---

čítanka

---

### Zdeněk Pokorný: Neodstranitelný šum

**N**a 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. Zvláště ní 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 Penzias 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.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---

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 kilometřů vzdáleném Princetonu budovala skupina astronomů vedená profesorem Robertem Dickeem malou nízkošumovou anténu. Chtěli registrovat záření, které mělo pocházet z horkého raného období našeho vesmíru. To naznačovala řada teoretických prací.

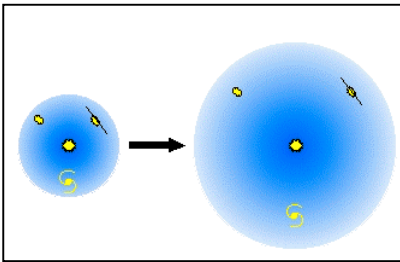
Několik týdnů před tím, než Dickeho skupina zahájila svá pozorování, došlo shodou řady náhod k setkání Penziase a Dickeho. Robert Dicke naznal, že Penzias s Wilsonem již objevili záření, které jeho skupina chtěla vypátrat. Dohodli se, že v prestižním vědeckém časopisu *The Astrophysical Journal* uveřejní 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).



## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

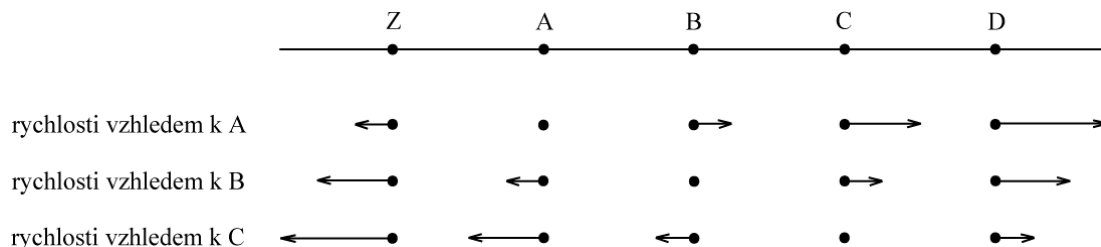


doplňěk

### 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. Příмым 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.



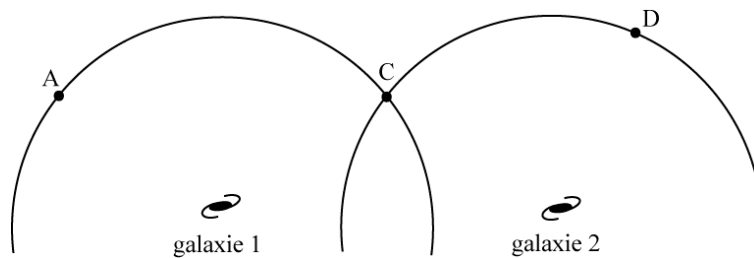
Obr. 1: *Homogenita a Hubbleův zákon.* Na obrázku je nakreslen řetězec navzájem stejně vzdálených galaxií Z, A, B, C ... Jejich rychlosti měřené vzhledem k A, B, C jsou znázorněny šipkami různých délek a směrů. Princip homogenity vyžaduje, aby se rychlost C vzhledem k B rovnala rychlosti B vzhledem k 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 Hubbleův zákon: rychlost libovolné galaxie vzhledem ke kterékoli jiné je 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.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---

Kosmologický princip je experimentálně potvrzován ještě jinak, než měření 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*.

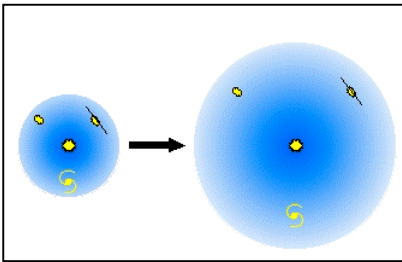


Obr. 2: *Izotropie a homogenita*. Je-li vesmír izotropní kolem galaxie 1 i kolem galaxie 2, pak je homogenní. Abychom ukázali, že podmínky v libovolných dvou bodech A a B jsou stejné, nakreslíme kružnici se středem v galaxii 1, procházející bodem A, a jinou kružnici se středem v galaxii 2, procházející 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

---

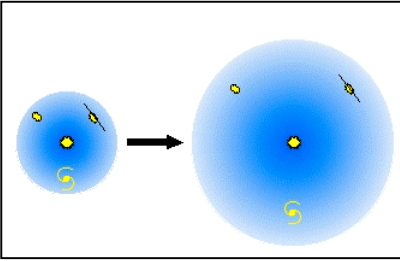
**Otázka 9.2.1.** Můžeme ve spektru hvězdy  $\alpha$  Centauri, což je jak známo jedna z našich nejbližších hvězd, pozorovat červený posuv odpovídající Hubblovu vztahu? Vysvětlete, proč ano nebo ne.

**Otázka 9.2.2.** Jak daleko je galaxie, jestliže vodíková spektrální čára  $H\beta$  je v jejím spektru posunuta k vlnové délce  $\lambda = 500$  nm? (Poznamenejme, že vlnová délka čáry  $H\beta$ , 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.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



---

úloha k zamyšlení

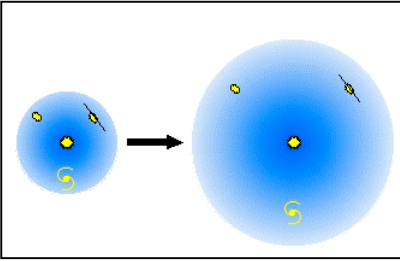
---

### 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  $T$ :  $\lambda_{\max} T = \text{konstanta}$  (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. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

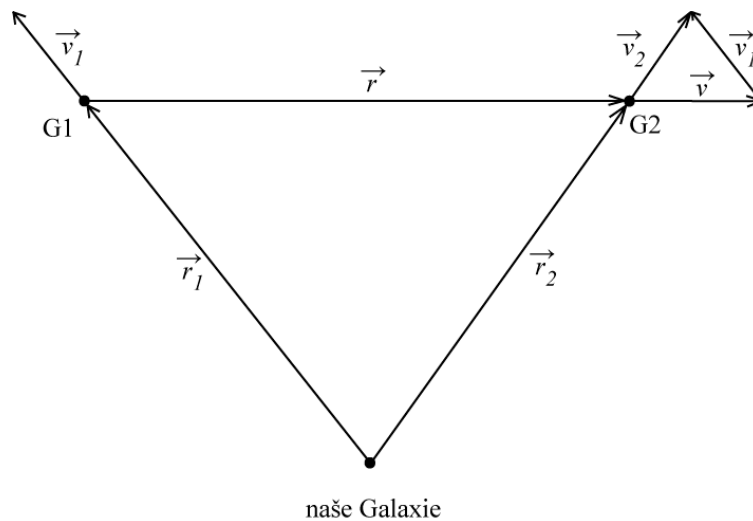


### výsledky

K otázce 9.2.1.: Ne. Kosmologický červený posuv je dán rozpínáním *prostoru* mimo soustavy gravitačně vázané. Toto rozpínání prostoru se tedy v Galaxii, kam Slunce i  $\alpha$  Centauri patří, neprojevuje.

K otázce 9.2.2.: Zvolme Hubblovu konstantu  $H = 70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ . Rychlost  $v_r = c [(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0] = 8650 \text{ km/s}$ . Vzdálenost  $r = v_r/H = 8650/70 = 124 \text{ Mpc}$ . Diskuse: protože  $v_r \ll c$ , má aproximace smysl, a také pojem „vzdálenost“ je ještě smysluplný.

K otázce 9.2.3.: Řešení je v podstatě uvedeno v doplňku v této kapitole. Situace je znázorněna na obrázku:



Dvě libovolné galaxie G1 a G2 jsou od nás vzdáleny  $r_1$  a  $r_2$ , jejich rychlost vzdalování činí  $v_1$  a  $v_2$ . Podle Hubblova vztahu platí:

$$v_1 = H r_1, \text{ resp. } v_2 = H r_2,$$

kde  $H$  je Hubblova konstanta. Chceme dokázat, že také rychlost  $v$ , kterou se galaxie G2 vzdaluje od galaxie G1, je úměrná vzdálenosti  $r$  mezi galaxiemi:

$$v = v_2 - v_1 = H r_2 - H r_1 = H(r_2 - r_1) = H r, \text{ což jsme chtěli dokázat.}$$

**Úloha k zamyšlení – Mikrovlnné reliktní záření:** Hodnotu konstanty  $k$  ve Wienově zákonu posuvu získáme ze současných hodnot  $\lambda_{\text{max}} = 1,1 \text{ mm}$  a  $T = 2,7 \text{ K}$  pro reliktní záření:  $k = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2,7 = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$ . Jelikož na konci éry záření byla teplota  $T = 3000 \text{ K}$ , vychází odtud tehdejší vlnová délka  $\lambda_{\text{max}} = k/T = 3,0 \cdot 10^{-3}/3000 = 10^{-6} \text{ m}$ , což je oblast infračerveného záření. Pro červený posuv  $z$  platí:  $z + 1 = \lambda/\lambda_0$ , kde  $\lambda_0$  je původní vlnová délka,  $\lambda$  současná vlnová délka. Zde

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---

$\lambda_0 = 10^{-6}$  m,  $\lambda = 1,1 \cdot 10^{-3}$  m, takže  $z = \lambda/\lambda_0 - 1 = 1,1 \cdot 10^{-3}/10^{-6} - 1 = 1100$ . Tento červený posuv má nesrovnatelně větší hodnotu než rekordní červený posuv pro kvasary. Pozorováním reliktního záření tedy dohlédneme do hlubin prostoru a času podstatně dál než sledováním všech ostatních astronomických objektů.

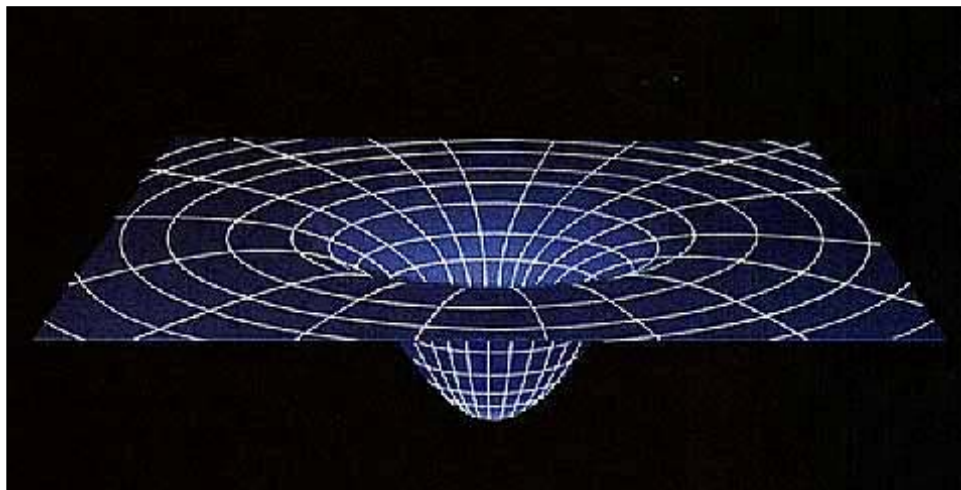
### 9.3. Modely vesmíru

**D**ominující 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

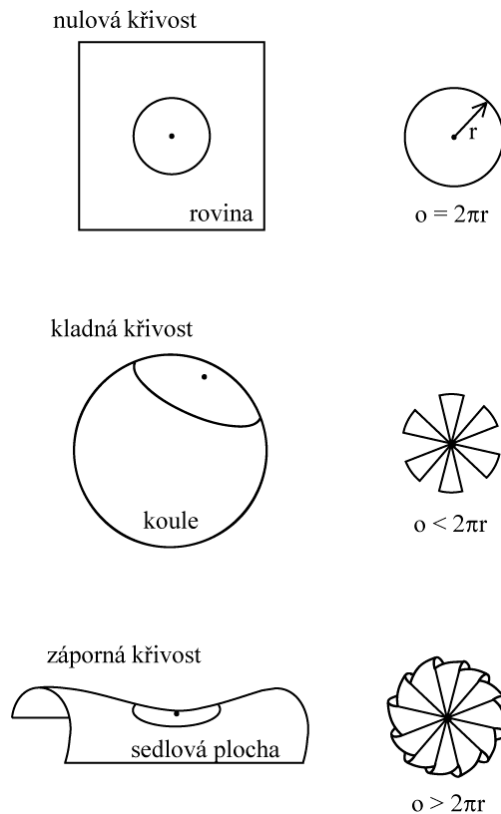
Za předpokladu, že platí kosmologický princip (tedy vesmír je homogenní a izotropní), lze geometrii vesmíru popsat parametrem, nazývaným *křivost prostoru*. Zakřivený trojrozměrný prostor si nedovedeme představit, použijme proto dvojrozměrné analogie. Je-li křivost kladná, má trojrozměrný



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.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie



Dvourozměrné analogie různých prostorů.

### Fridmanovy modely

V roce 1922 našel ruský matematik a meteorolog Alexandr Fridman (1888–1925) 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 Lemaitre <sup>1)</sup> (1894–1966). To bylo stále ještě dva roky před zveřejněním Hubbleovy práce, která rozpínání vesmíru uvedla ve všeobecnou známost.

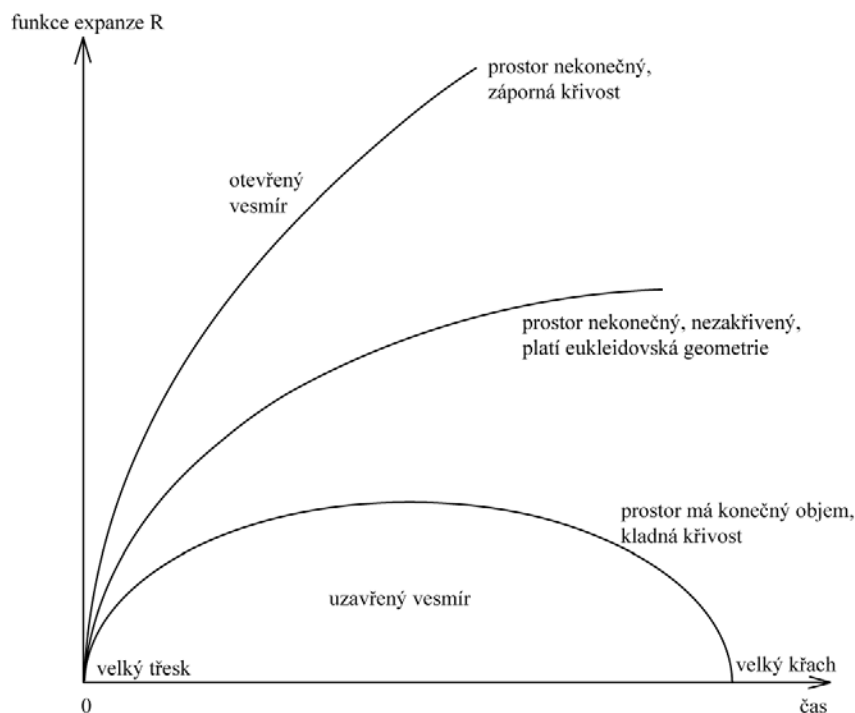
### V jakém vesmíru žijeme?

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.

<sup>1)</sup> Čti: *džórdž lemétr*.



## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie



Vesmír na trojí způsob (o funkci expanze  $R$  viz poznámka pod čarou <sup>2)</sup>).

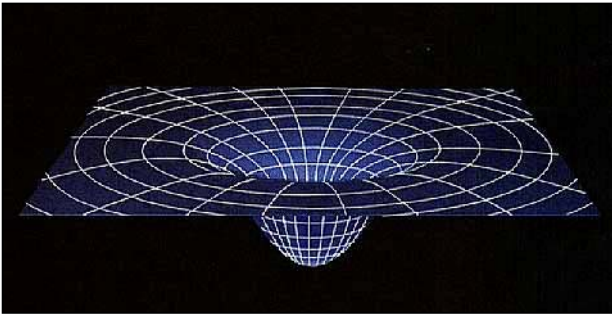
Nabízejí se i jiné metody testování: má-li být vesmír uzavřený, musí být jeho střední hustota látky větší než tzv. *kritická* (ta odpovídá jednomu atomu vodíku asi v jednom litru prostoru). Ovšem ani tato cesta zatím k cíli nevede, protože ve vesmíru registrujeme našimi přístroji jen několik procent hmoty, zbylá část nám zůstává skryta <sup>3)</sup>.

<sup>2)</sup> 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  $R(t_0) = 1$ .

<sup>3)</sup> 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

**S**kutečnost, 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.

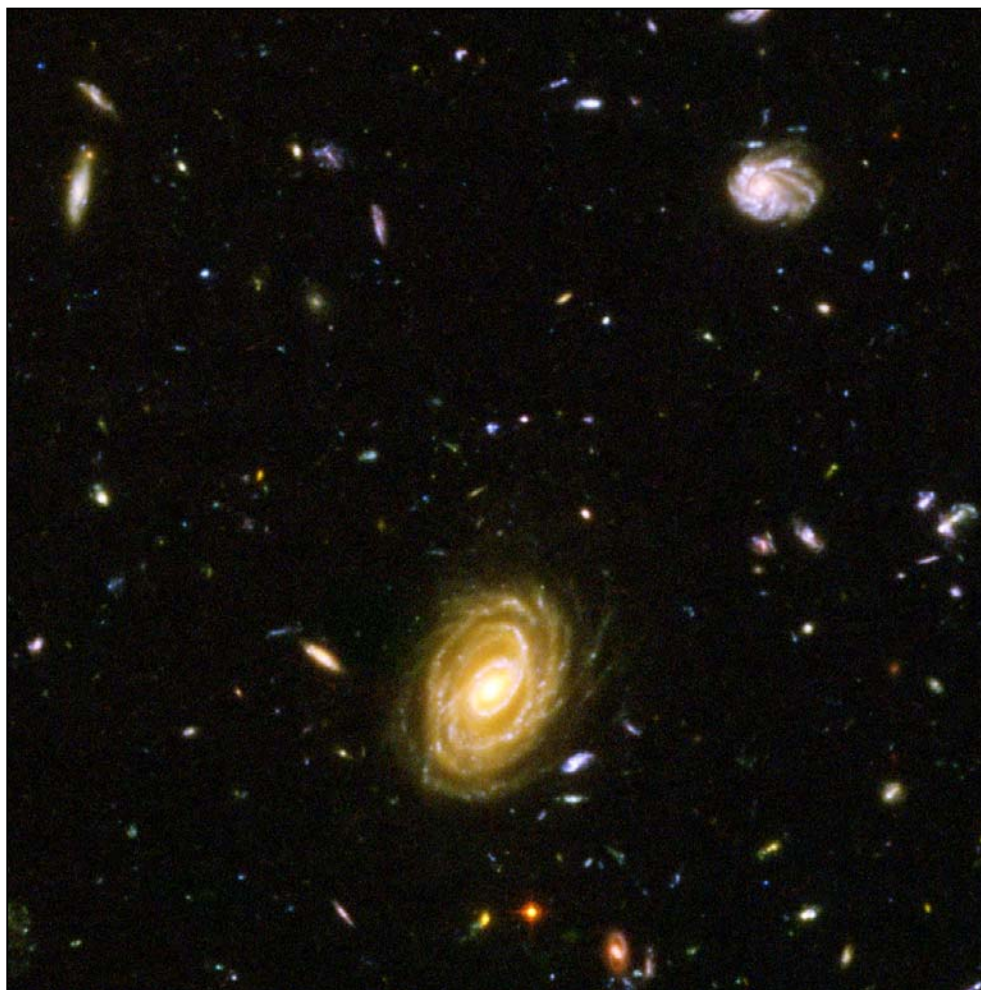
Jednalo se o zcela novou, neobvyklou myšlenku. V průběhu minulých věků vládly ve vědě různé představy o stavbě vesmíru, měly však jedno společné. Všechna (nebo téměř všechna) tato schémata byla náčrty stavby, ne vývoje, tedy přetváření vesmíru, a ve všech byla zabudována představa „neměnného mechanismu 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 nehezku; i řada významných vědců ji těžko a nerada přijímala. Příkladem může být sám Einstein. Tvůrce teorie relativity chápal, jak důležitá pro kosmologii

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---

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 sestrotit 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 Hubbleovým 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 Aristotelés 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,

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---

kteřou 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*:

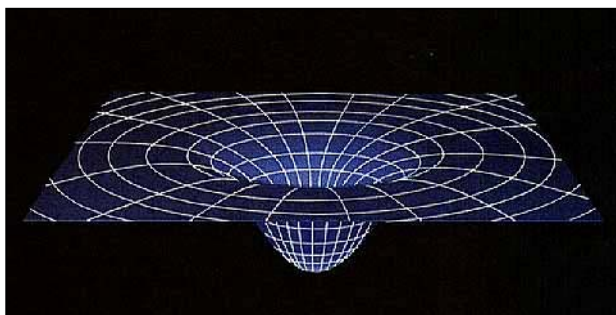
„V předchozí poznámce jsem podrobil kritice výše uvedenou práci. Jak jsem se však přesvědčil z dopisu A. Fridmana, který mi doručil pan Krutkov, zakládala se moje kritika na výpočetní chybě. Výsledky A. Fridmana pokládám za správné a podnětné. Ukazuje se, že rovnice pole připouštějí pro strukturu prostoru 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

---



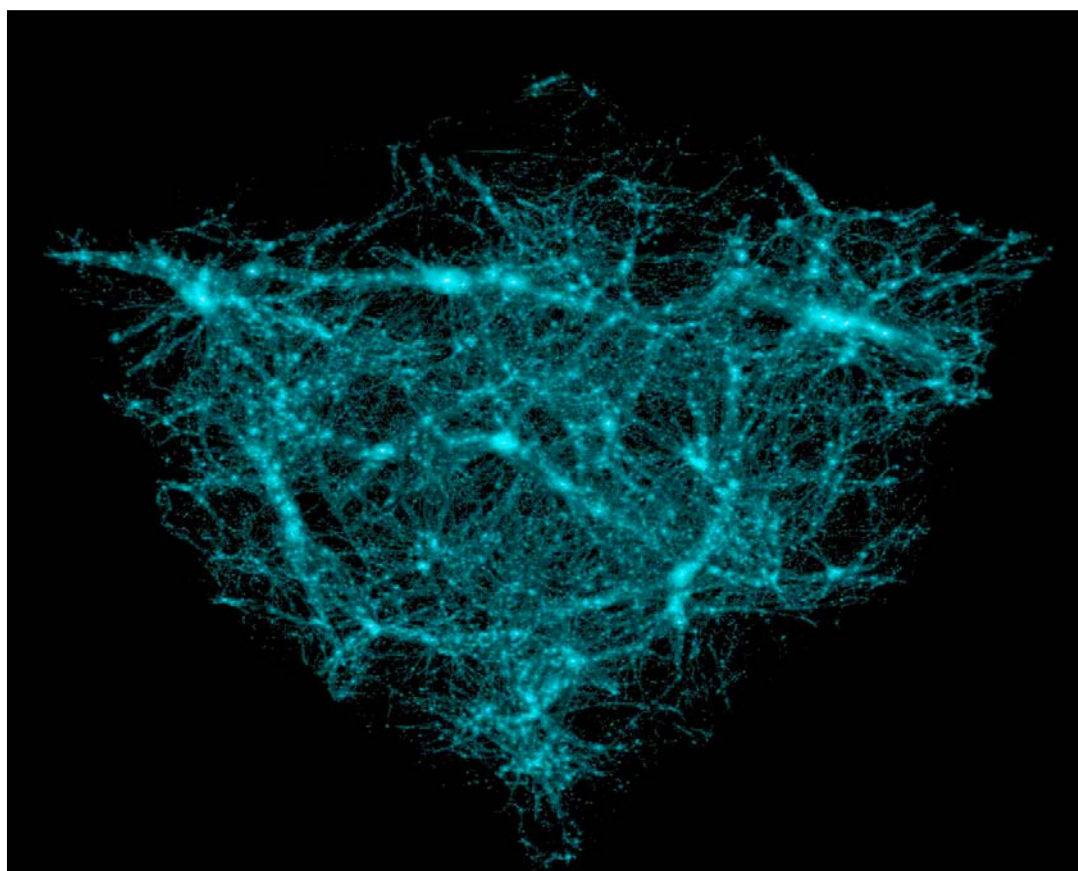
---

citát

---

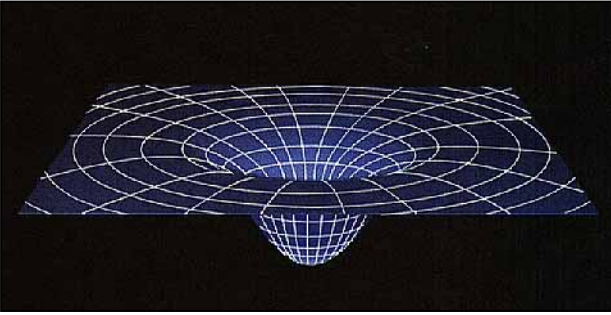
*V každém případě je zřejmé, že větší část hmoty ve vesmíru je neviditelná, takže astronomie je téměř docela teoretickou záležitostí.*

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

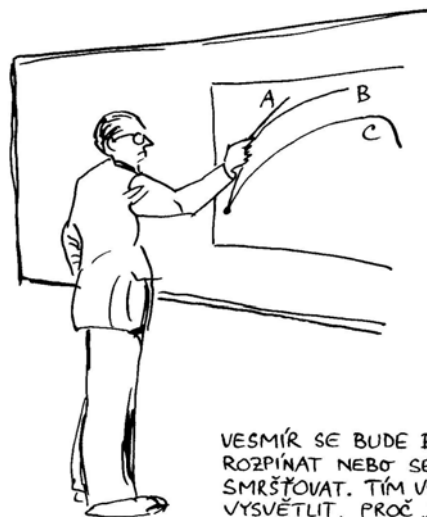
---

**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.

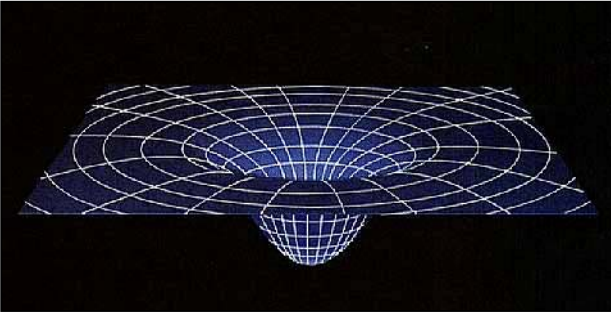
**Otázka 9.3.4.** Jak lze zjistit, zda se bude náš vesmír rozpínat stále?



VESMÍR SE BUDE BUĎTO STÁLE ROZPÍNAT NEBO SE JEDNOU ZAČNE SMRŠŤOVAT. TÍM VŠAK NELZE VYSVĚTLIT, PROČ TRVA NĚKDY CELÝ TÝDĚN, NEŽ DOJDE DOPIS Z PRAHY.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



---

### úloha k zamyšlení

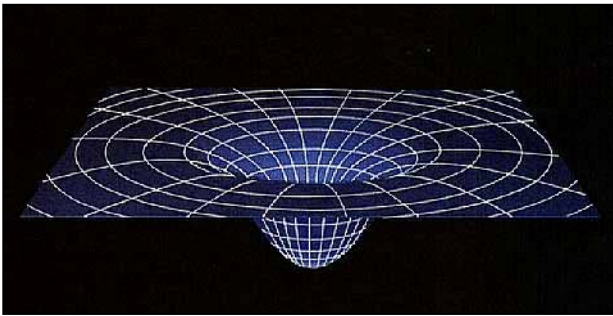
---

### Jak je to s hustotou látky ve vesmíru?

V okolí našeho Slunce připadá jedna hvězda na  $8 \text{ pc}^3$ . 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  $10^6 \text{ atomů/m}^3$ ? Srovnajte 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

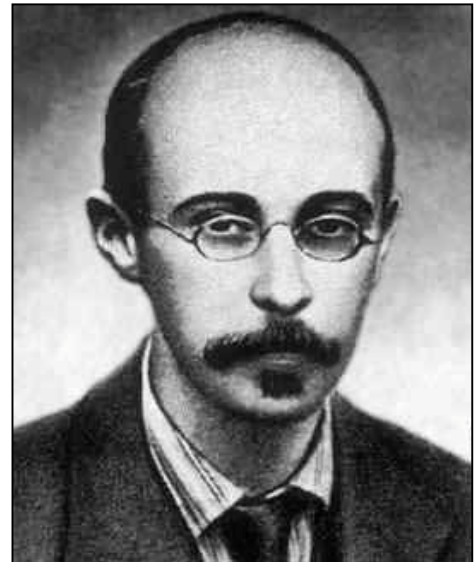
(17.(29.) 6. 1888 – 16. 9. 1925)

**B**yl 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.





## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---

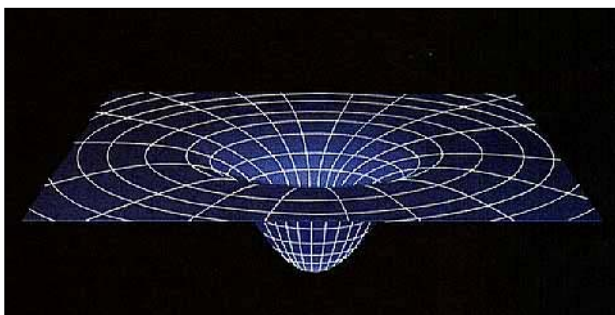
Mezitím se však Fridman věnoval řadě dalších problémů zvláště v aplikované matematice. V červenci 1925 pro změnu ustavil v balonu společně s Fedosejenkem platný světový rekord, když společně dosáhli výšky 7400 metrů. Nikdo netušil, že to je závěr jeho brilantní vědecké dráhy. Koncem srpna se Fridman 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 nejspřávnější.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



---

### výsledky

---

K otázce 9.3.1.: c

K otázce 9.3.2.: a

K otázce 9.3.3.: a

K otázce 9.3.4.: Například zjistíme střední hustotu látky ve vesmíru a porovnáme ji s tzv. kritickou hustotou. Bude-li menší, vesmír se bude stále rozpínat.

**Úloha k zamyšlení** – *Jak je to s hustotou látky ve vesmíru?*: Střední hustota látky  $\rho_1$  v okolí Slunce činí  $\rho_1 = m_1/V_1$ , kde  $m_1 = M_S/6$ ,  $V_1 = 8 \text{ pc}^3$  ( $M_S$  je hmotnost Slunce; číselně:  $M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ,  $1 \text{ pc} = 3,1 \cdot 10^{16} \text{ m}$ ). Střední hustota mezihvězdné látky  $\rho_2 = m_2/V_2$ , kde  $m_2$  je hmotnost  $10^6$  atomů mezihvězdné látky,  $V_2 = 1 \text{ m}^3$ . Protože mezihvězdnou látku tvoří převážně vodík, je  $m_2 = m_p \cdot 10^6$ , přičemž  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  je hmotnost protonu.

Číselně:

$$\rho_1 = 2 \cdot 10^{30} / [6 \cdot 8 (3,1 \cdot 10^{16})^3] = 1,4 \cdot 10^{-21} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3},$$

$$\rho_2 = 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^{-27} / 1 = 1,7 \cdot 10^{-21} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Střední hustota látky v okolí Slunce je *srovnatelná* se střední hustotou mezihvězdné látky. Je tomu tak proto, že se Slunce nachází poblíž roviny Galaxie, v níž je mezihvězdná látka silně koncentrována. Mimo tuto rovinu je podíl mezihvězdné látky na střední hustotě látky mnohonásobně menší (např. kritická hustota látky ve vesmíru je asi o 6 řádů nižší).

### 9.4. Nejdůležitější konstanta

Takovou konstantou v kosmologii je bezesporu Hubbleova 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 Hubbleovy konstanty poněkud podivný tvar:  $\text{km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$ . 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 Hubbleovy 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 Hubbleovy konstanty je tak rovna času, který uplynul od počátku rozpínání.

I když příklad prázdného vesmíru vypadá příliš akademicky, naznačuje nám, že převrácená hodnota Hubbleovy 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 Hubbleovy konstanty <sup>1)</sup>.

#### Strašidlo příliš mladého vesmíru

Známe-li velikost Hubbleovy 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 Hubbleovy konstanty není ani zdaleka jednoduchou záležitostí. V současné době existují dvě podstatně odlišné skupiny výsledků: podle první z nich činí Hubbleova konstanta přibližně

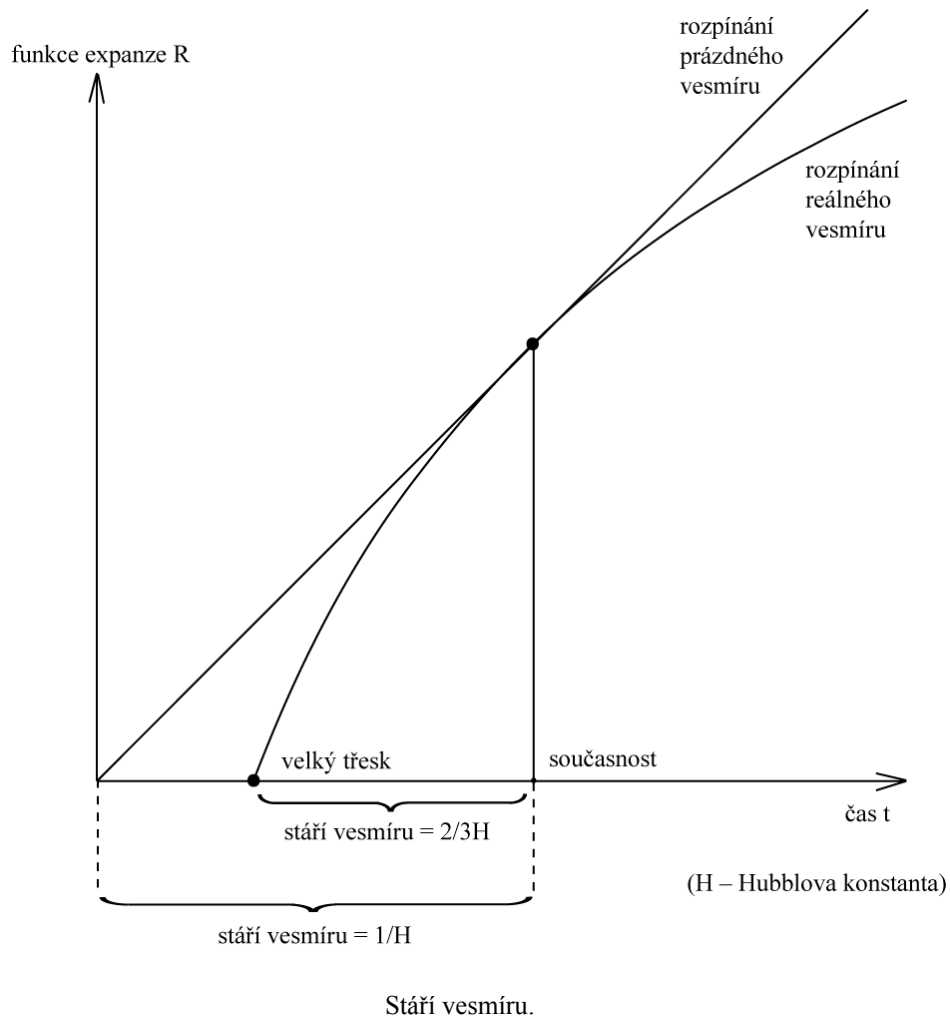


Edwin Hubble (s neodmyslitelnou dýmku, tehdy ještě kouření bylo „in“) při proměřování fotografických desek s galaxiemi.

<sup>1)</sup> Ted' je ta správná chvíle na řešení úlohy k zamyšlení, která je uvedena dál v této kapitole a jmenuje se – *Stáří vesmíru*.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

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 nepříjemně nízké: jen asi 8 miliard roků.



Zjištění hodnoty Hubblové 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.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



---

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 Hubbleovy konstanty  $H$  určete stáří vesmíru a porovnejte s odhady stáří, zjištěnými jinak.



JEDINÉ, CO VE VESMÍRU NEEXPANDUJE,  
JE MŮJ PLAT !

(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)

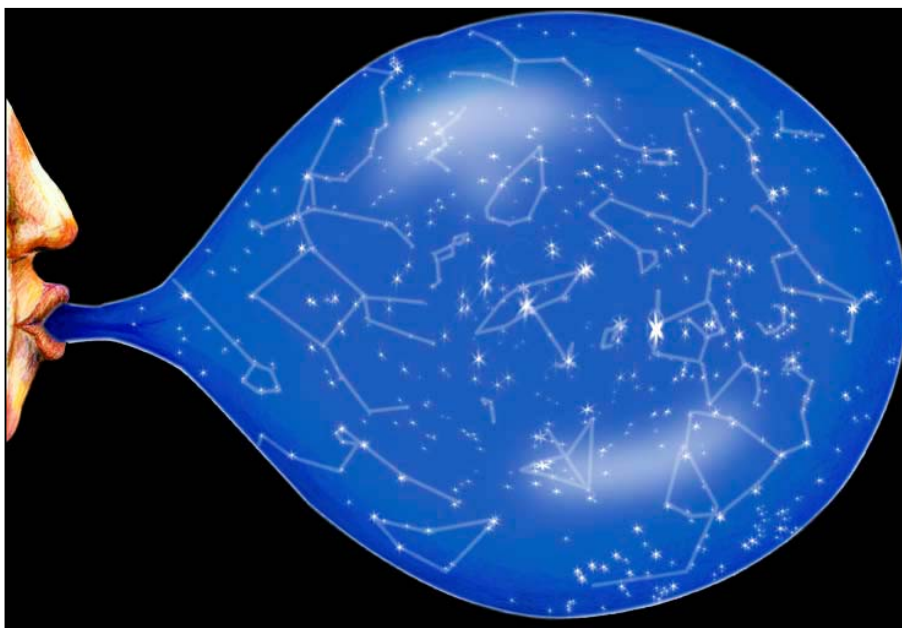
---

### 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 dvou-rozměrný 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?



## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---

**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 Hubbleovy konstanty, rovno skutečnému času, který uplynul od velkého třesku?

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



---

medailon

---

### Edwin Powell Hubble

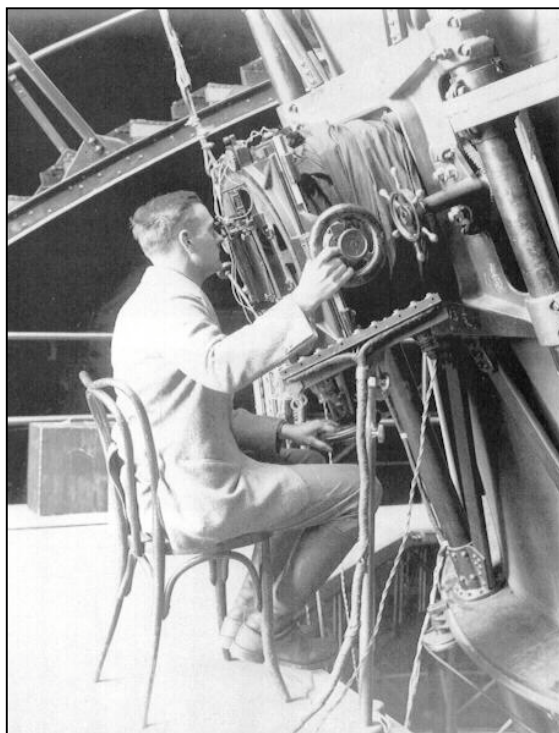
(20. 11. 1889 – 28. 9. 1953)

Nechybělo mnoho a širší veřejnost by Američana Edwina Hubbla, pokud by o něm vůbec věděla, znala jako právníka. V roce 1913 totiž získal právnícký titul na Oxfordské univerzitě. Hubbleovi 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 vši 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. →





## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

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. Hubblemu 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 našel lineární vztah mezi jejich vzdálenostmi a rychlostmi vzdalování. Tento vztah byl prvním experimentálním potvrzením představ o rozpínání vesmíru.

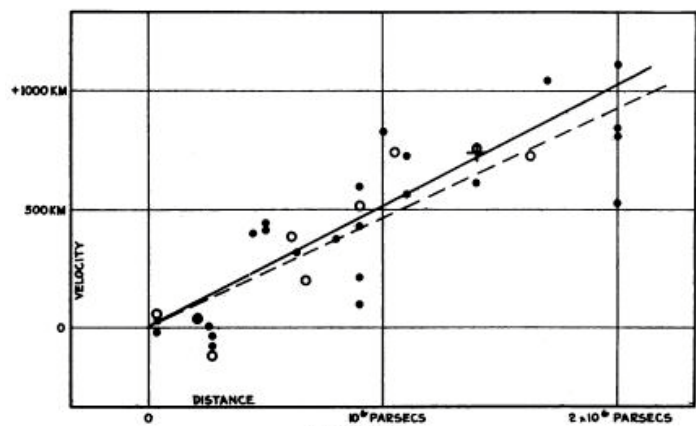


FIGURE 1  
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

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 Hubbleovy práce, uveřejněné  
v roce 1929.

Autorem medailonu je Zdeněk Pokorný (z připravované knihy *Zlaté století astronomie*, Aventinum, Praha).

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



---

### výsledky

---

K otázce 9.4.1.: Je konstantou v tom smyslu, že v daném okamžiku je její hodnota stejná pro všechna místa ve vesmíru. V průběhu času se ovšem její hodnota mění podle toho, jak se mění rychlost rozpínání vesmíru. Ovšem i kdyby rychlost rozpínání vesmíru byla konstantní, s časem se musí měnit (její hodnota klesá), protože konstanta  $H$  je podílem rychlosti a vzdálenosti galaxie (tedy roste-li rychlost  $v$ , klesá  $H$ ).

K otázce 9.4.2.: Na balónku jsou zakresleny hvězdy a souhvězdí (tedy objekty z naší Galaxie), jak se jeví pozorovateli ze Země. Při nafukování se budou tedy měnit jejich vzájemné polohy, k čemuž ovšem při rozpínání vesmíru nedochází. Vzdálenosti v gravitačně vázaných soustavách (galaxiích, planetárních soustavách apod.) nejsou rozpínáním vesmíru dotčeny. Správně by na balónku měly být vyznačeny (jako „hmotné body“) *kupy galaxií*.

K otázce 9.4.3.: Žádný bod na povrchu balónku se neliší od jakéhokoli jiného bodu na tomto povrchu.

K otázce 9.4.4.: Jestliže se rychlost rozpínání vesmíru s časem nemění.

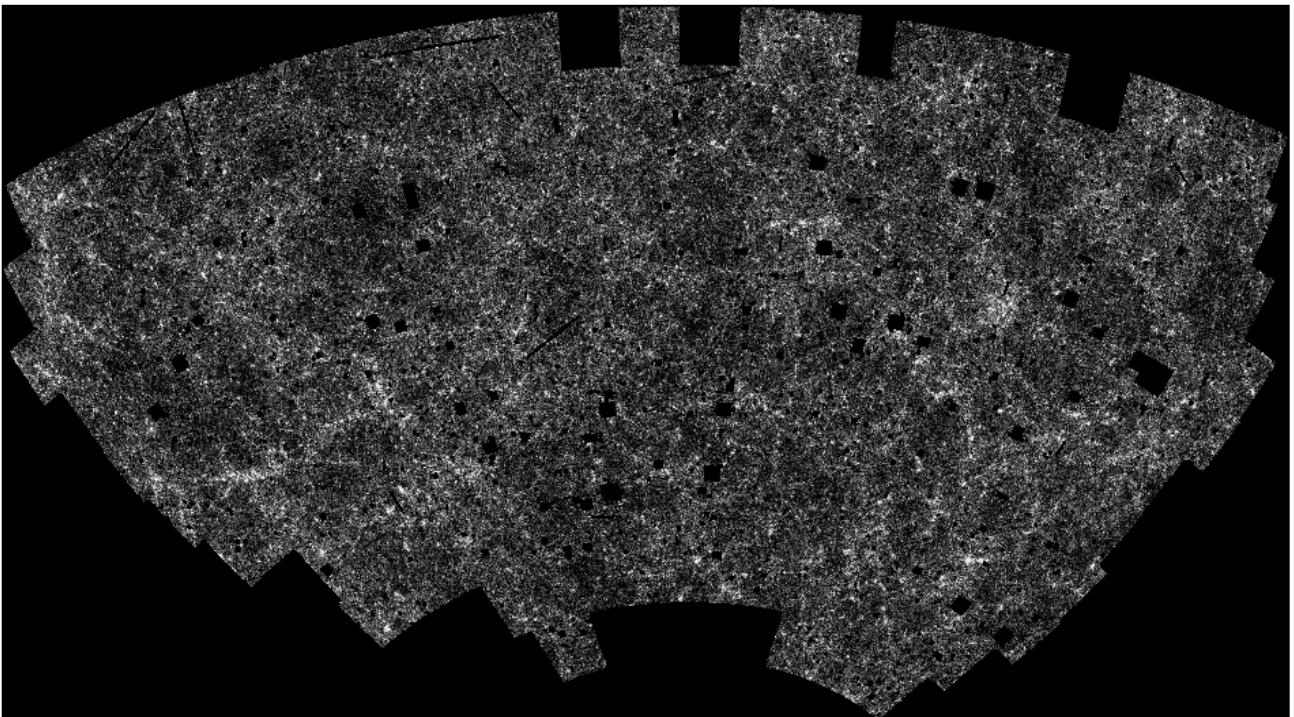
**Úloha k zamyšlení – Stáří vesmíru:** „Stáří vesmíru“ udává převrácená hodnota Hubblové konstanty  $1/H$ . Ačkoli fyzikální rozměr Hubblové konstanty je  $(\text{čas})^{-1}$ , je z historických důvodů tato konstanta udávána v jednotkách  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ . Po převodu těchto jednotek získáme „stáří vesmíru“ v obvyklých časových jednotkách.

Protože  $1 \text{ km} = 10^3 \text{ m}$  a  $1 \text{ Mpc} = 3 \cdot 10^{22} \text{ m}$ , je pro dnes obvykle udávanou hodnotu Hubblové konstanty  $H = 70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$  „stáří vesmíru“  $t = 4,3 \cdot 10^{17} \text{ s} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ let}$ , neboť  $1 \text{ rok} = 3 \cdot 10^7 \text{ s}$ . Zjištěné „stáří vesmíru“ 14 miliard let je větší než maximální stáří hvězd (byť jen nepříliš). Pro  $H = 500 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ , což bylo původní (a jak dnes víme chybné) určení Edwina Hubbla, by nastaly potíže: „stáří vesmíru“ by činilo jen asi 2 miliardy roků, což je v rozporu se stářím samotné Země.

### 9.5. Velký třesk a co bylo poté

**P**ro 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.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

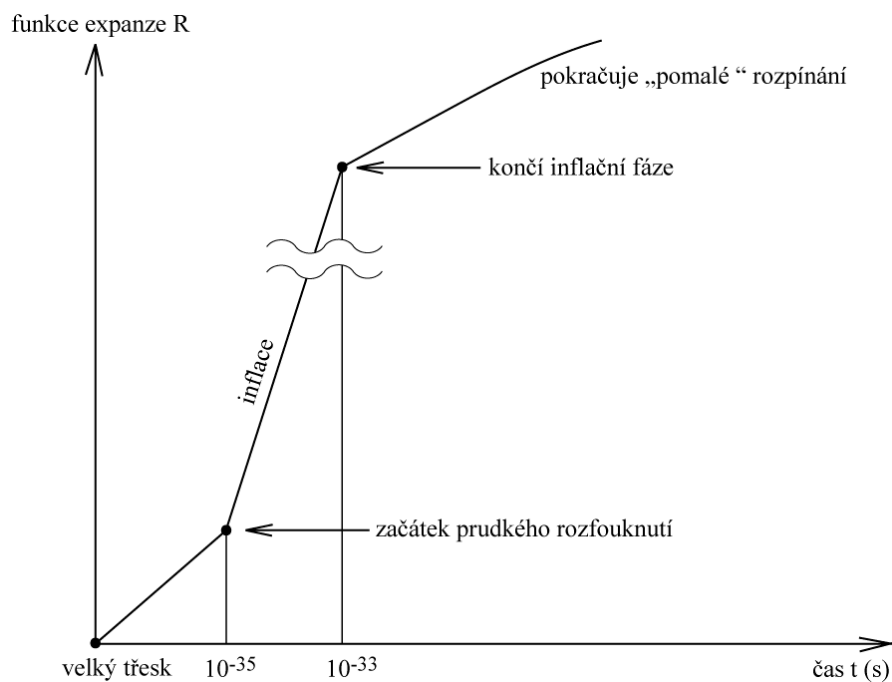
### Antilátka <sup>1)</sup> mizí ze scény

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* <sup>2)</sup>), 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.

<sup>1)</sup> Nebo též *antihmota*; zde fyzikální terminologie není jednotná, ale k omylu určitě nemůže dojít.

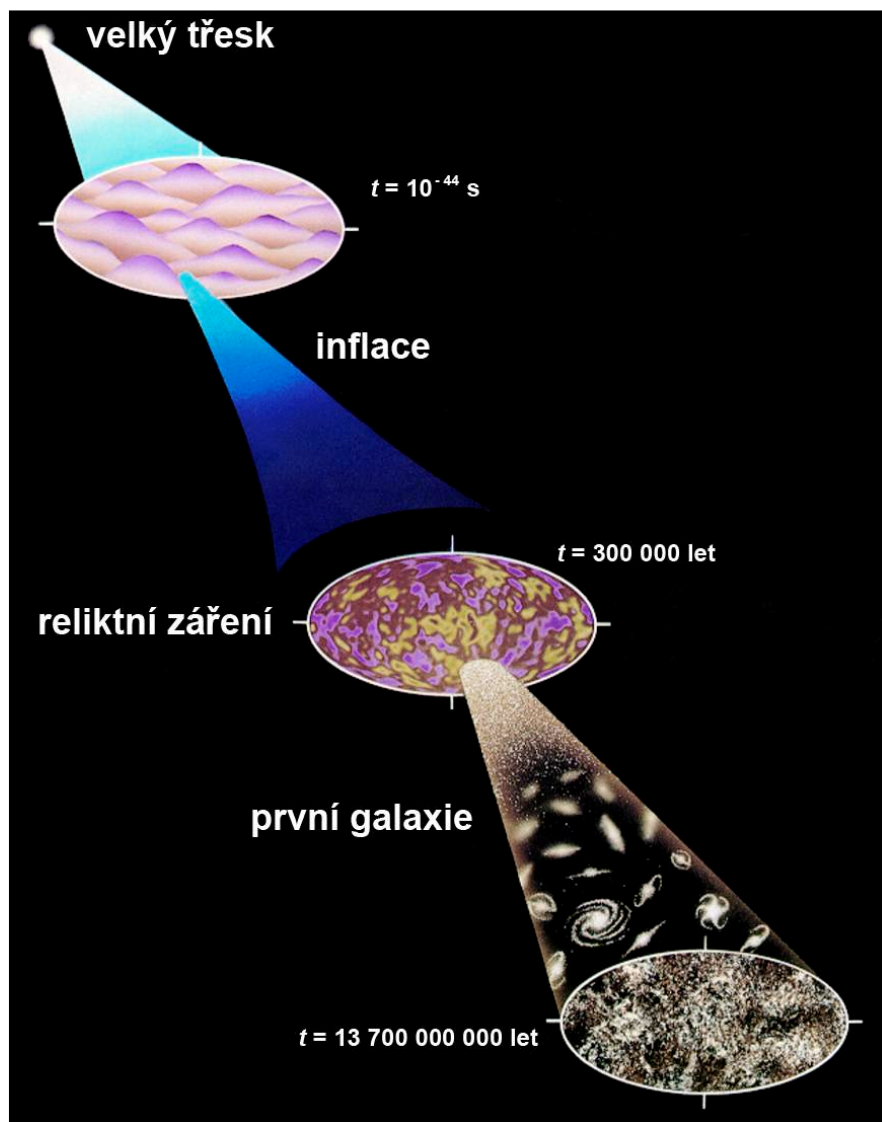
<sup>2)</sup> *Inflace* je enormní nárůst, záplava či zmožení (peněz, titulů, slov...) – z latinského *inflatus*: dutí, nafukování.

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

### 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 řídil 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

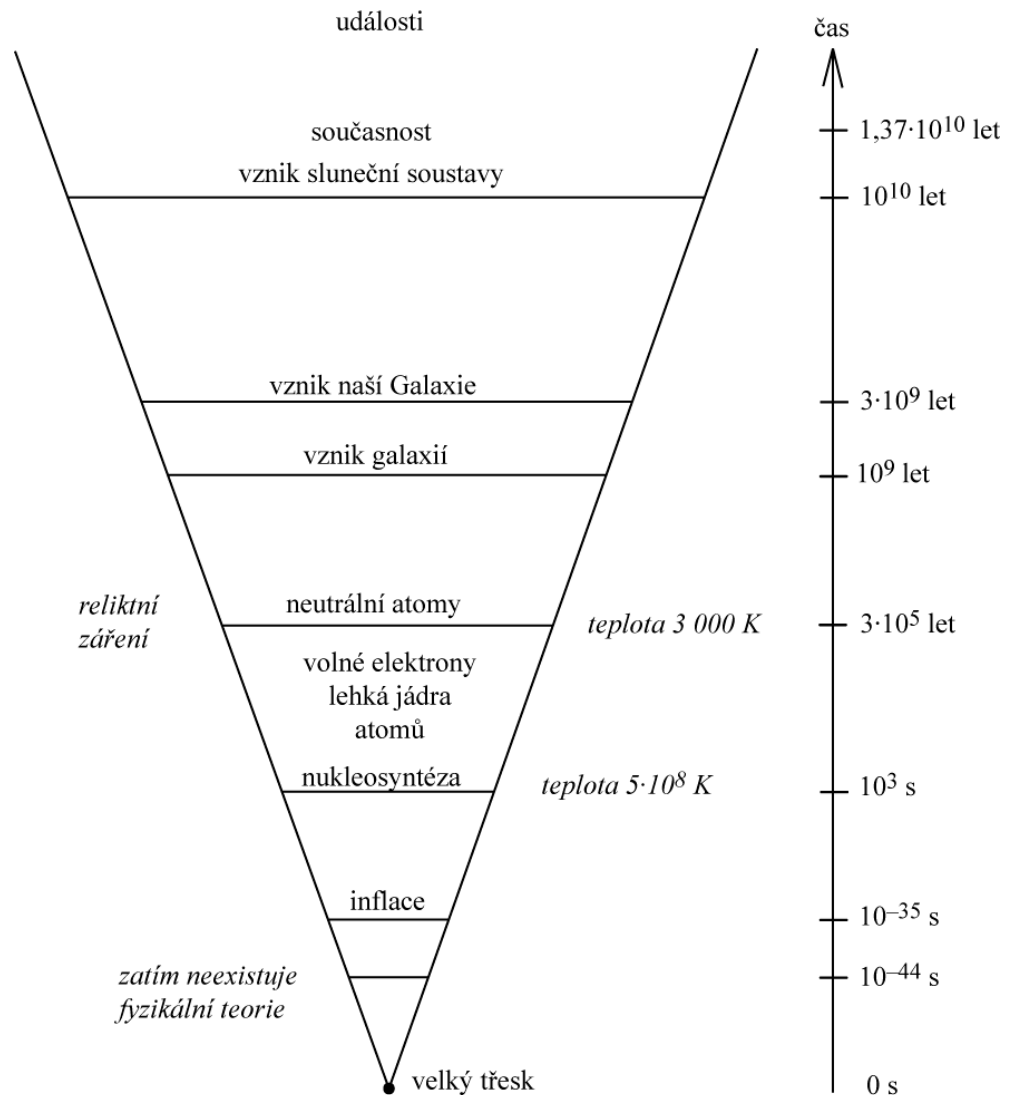
## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

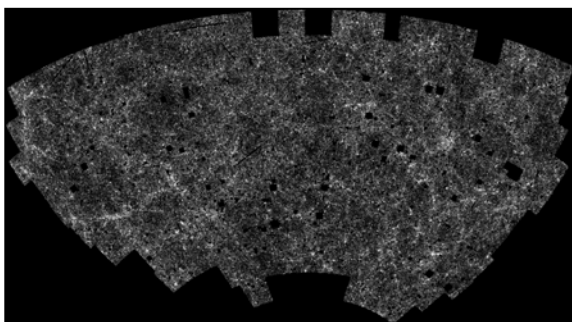
volné elektrony. Fotony, které původně s látkou neustále interagovaly, se od ní oddělily a vyvíjely se už nezávisle na látce. Jak již víme, je to počátek samostatné existence tzv. *reliktního záření*.

### 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, vidíte? Vůbec nemusíme pracně měřit různé fyzikální veličiny a pozorovat, jaký vesmír skutečně je, jen ze samotné naší přítomnosti je můžeme docela dobře odhadnout!

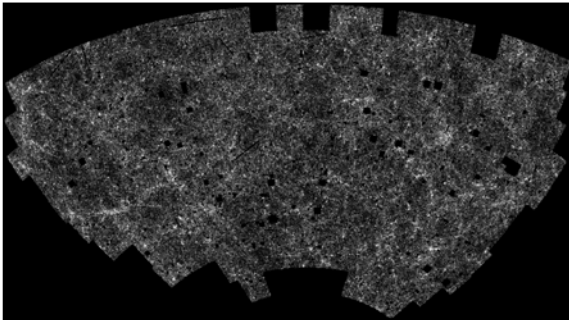
Antropický princip můžeme formulovat nejen tak, že povaha vesmíru je slučitelná s naší existencí, ale i silněji: vesmír musí mít takové vlastnosti, které dovolí životu, aby se v jisté fázi dějin vesmíru vyvinul. To je opravdu kontroverzní tvrzení: vždyť vesmíru vlastně podsouváme určité úmysly. Vesmír 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 nepopíratelná zásluha.

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

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



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 přečtete následující věty. Popisují určitou skutečnost, vždy je tam uvedeno jméno některého významného 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.

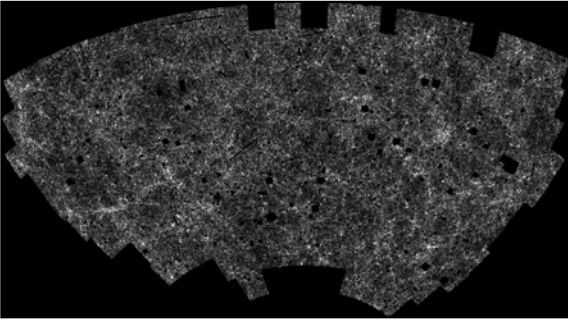
4. Když na přelomu let 1609 a 1610 pohlédl Galileo Galilei svými prvními dalekohledy k Jupiteru, spatřil tam postupně čtyři jeho největší družice. Plným právem je proto dnes označujeme jako družice galileovské.

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

---

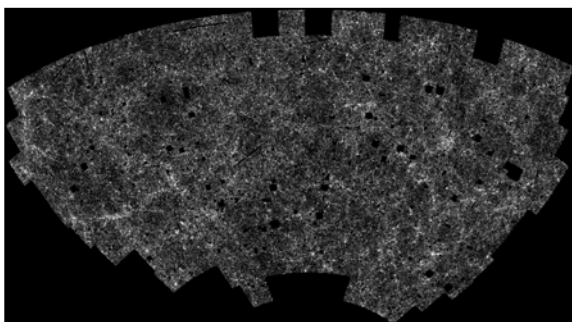
**Otázka 9.5.1.** Většina i velmi starých kosmických objektů obsahuje nezanedbatelné množství helia. Tato skutečnost svědčí o tom, že: a) teorie velkého třesku je pravděpodobně správná; b) gravitaci nelze ničím odstínit; c) ve vesmíru existuje nezanedbatelné množství tzv. skryté látky; d) souvisí to 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. Jdeme 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 listů, 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.



CO MYSLÍŠ, JE ŽIVOT TAKY  
NA JINÝCH STROMECH?

(Podle *Sterne und Weltraum*, 4/1982, 177)

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

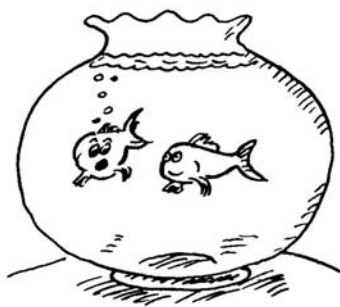
---

Zatím trocha listů 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 jíkala 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*.

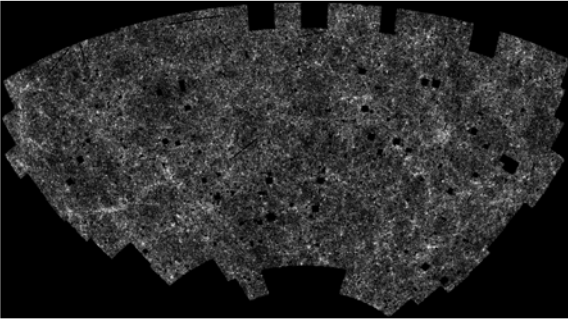


MĚLAS PRAVDU, SVĚT  
JE ZAKŘIVENÝ!

(Podle *Sterne und Weltraum*, 7-8/1982, 329)

## 9. Jaký je náš vesmír neboli kosmologie

---



---

### výsledky

---

K otázce 9.5.1.: a

K otázce 9.5.2.: Abychom mohli sledovat vesmír v době, kdy vzniklo reliktní záření, musíme cestovat zpět v čase až do doby několika set tisíc roků po velkém třesku. Záření z tohoto období vesmíru bylo v důsledku červeného posuvu přesunuto z viditelného oboru spektra do rádiového.

K otázce 9.5.3.: Po počátečním rozpínání bude následovat smršťování vesmíru, které skončí velkým křachem.

**Speciální otázky:** 1. tvrzení je správné; 2. tvrzení: chybně je uvedeno století: nejde o 16., ale 18. století, což lze poznat ze zmínky o Keplerovi a Galileim; 3. tvrzení: nejde o Josepha Fraunhofera, ale Christiana Dopplera, po něm je nazván Dopplerův jev; 4. a 5. tvrzení jsou správná.

### 10.1. Hrozí nám nebezpečí z kosmu?

**N**a 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<sup>1)</sup>. 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.

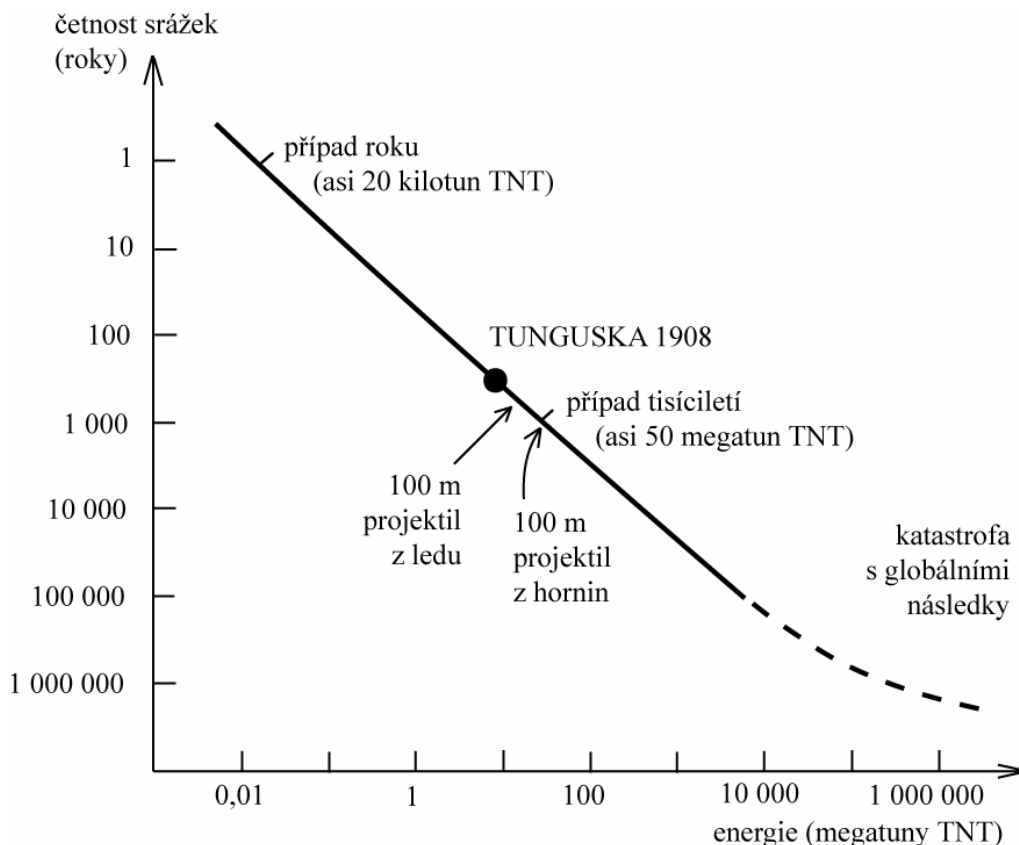


---

<sup>1)</sup> Záleží pochopitelně také na struktuře látky tělesa.

## 10. Vesmír plný otazníků

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<sup>2)</sup> 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 zahalovalo celou planetu do temnot. Tento stav trval několik let. Dopad planetky vyvolal také četná zemětřesení a závrtně vysoké přílivové vlny, a to vše spolu s požáry vykonalo dílo zkázy. Vymřelo mnoho živočichů, mezi nimi i pověstní druhohorní ještěři, ale také významná

<sup>2)</sup> Čti: *čiksulub*.

## 10. Vesmír plný otazníků

---

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 nepochybně – 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 našťastí 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

## 10. Vesmír plný otazníků

---

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<sup>3</sup>), 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.

---

<sup>3</sup>) 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 ovládnány 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 zeměkoulí. 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

**D**říve 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 nevypočítatelnými 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 zhoucích 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 Jadrana po úderu kosmického kladiva hřimavě 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 nevyčísitelné. 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.

## 10. Vesmír plný otazníků

---

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 si ce 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)

**T**íhneme 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.

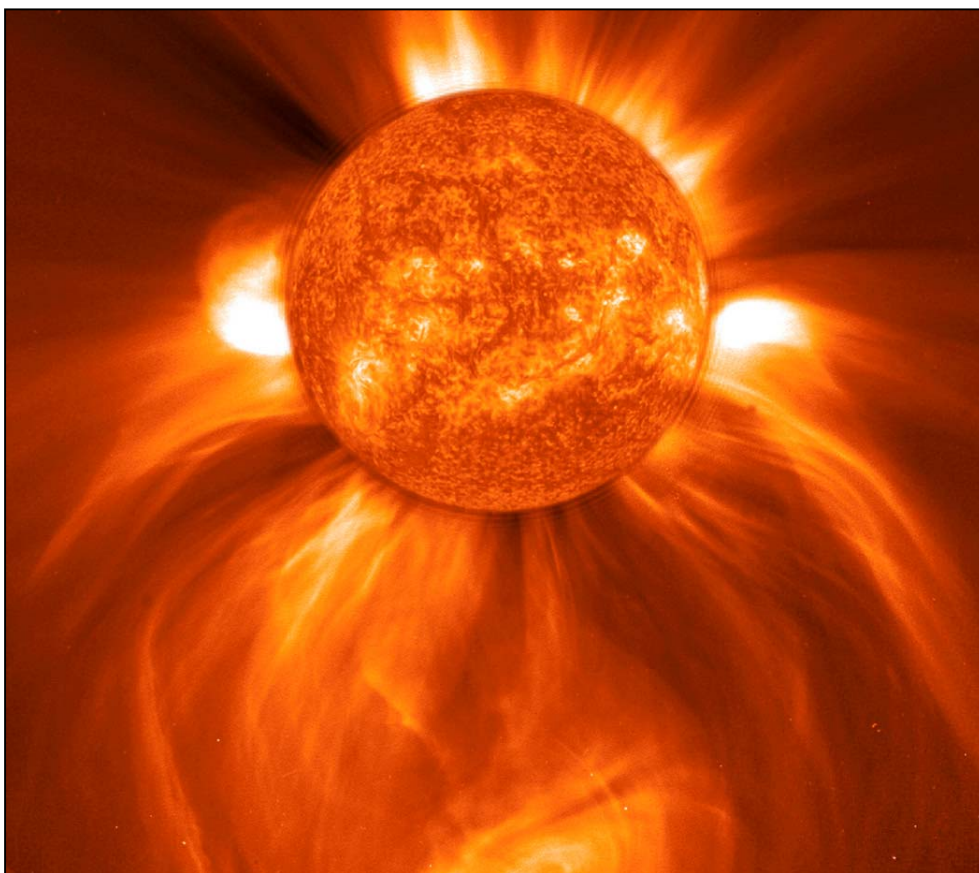
V současné době již nikdo nepochybuje o tom, že Slunce, i když je od nás vzdáleno 150 milionů kilometrů, ovlivňuje a narušuje řadu procesů na naší planetě. Na některé pozemské děje má sluneční aktivita nepochybně vliv přímý, na jiné jen zprostředkovaný.

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.

## 10. Vesmír plný otazníků

---



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 nadsadíme: nsvádíme každou naši bolest hlavy, píchnutí v boku či nezdar v práci na „Slunce plné skvrn“?

Rozeberme si vše ještě jednou. Začneme 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. Vesmír plný otazníků

---



---

### výsledky

---

K otázce 10.1.1.: K posouzení situace je třeba ještě zadat sklon trajektorie komety k rovině ekliptiky. U této komety činí sklon  $i = 21^\circ$ , což srážku komety se Zemí víceméně vylučuje.

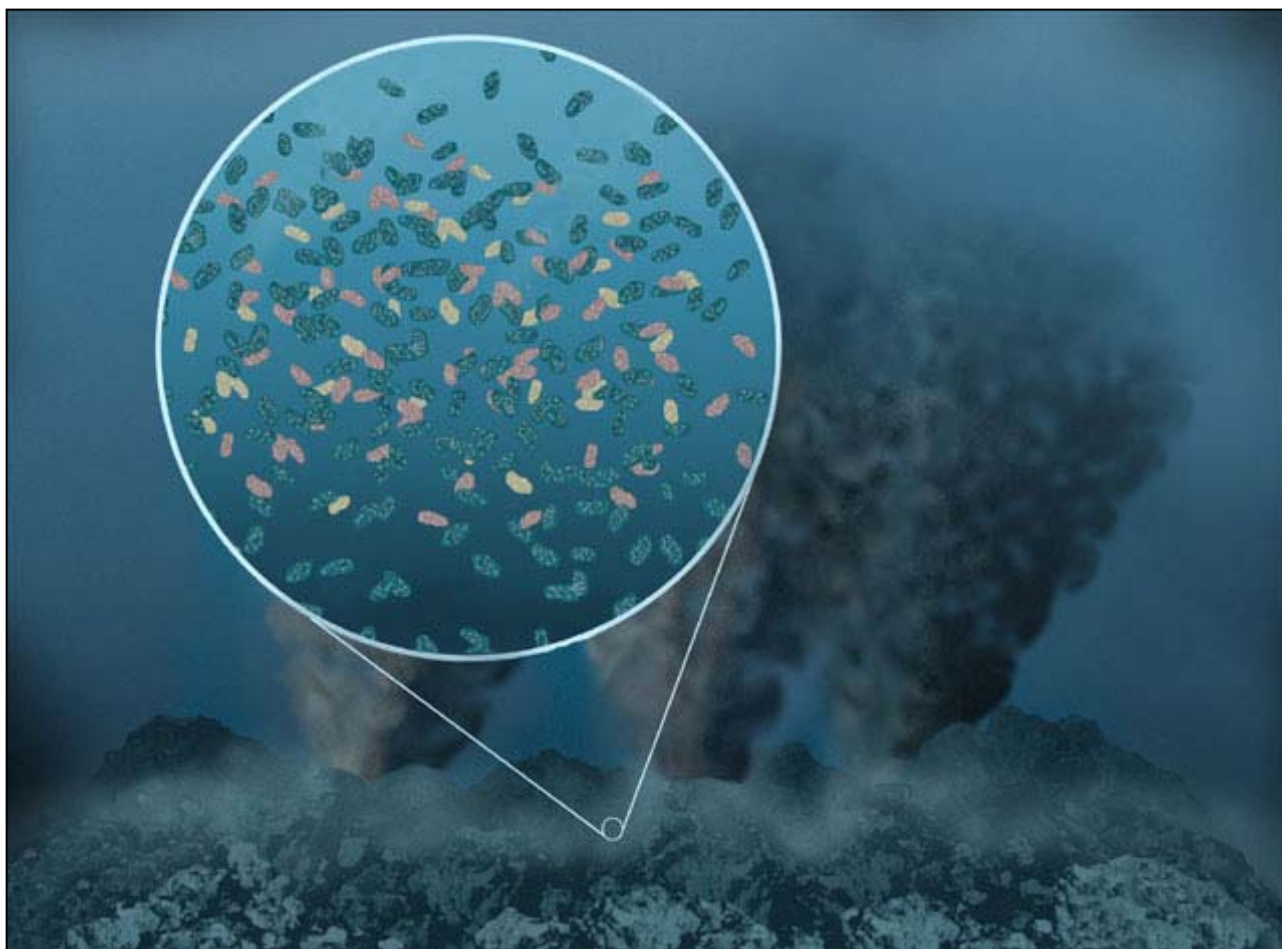
K otázce 10.1.2.: Oblak se pohybuje v meziplanetárním prostoru po spirále (z pohledu pozorovatele, vůči němuž je Slunce v počátku souřadnicové soustavy, nepohybuje se, ale rotuje). Radiální složka rychlosti je rovna  $v$ , tangenciální složku odvodíme z periody rotace Slunce a jeho velikosti. Z velikosti radiální složky rychlosti plyne, že oblak poletí ke dráze Země (do vzdálenosti 1 AU) asi  $1,5 \cdot 10^8 / 10^3 = 1,5 \cdot 10^5$  s = 42 h. Největší šanci zasáhnout Zemí mají oblaka vzniklá na *západní* polokouli Slunce (při pohledu ze Země).

K otázce 10.1.3.: Vega se z hvězdy hlavní posloupnosti změní v červeného obra, a v této fázi svého vývoje ztratí hvězdným větrem většinu své hmoty. Nevybuchne tedy jako supernova, ale stane se z ní bílý trpaslík.



### 10.2. Život ve vesmíru z pohledu astronoma

**P**aleontologické 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 zavlčený 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

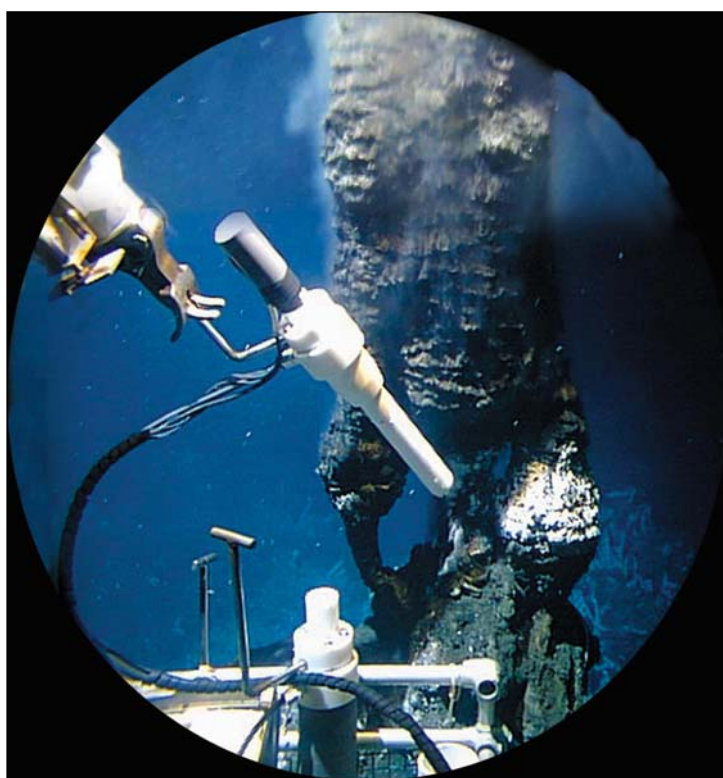
## 10. Vesmír plný otazníků

vznikají postupně v důsledku hvězdného vývoje, je zřejmé, že ve vesmíru budou existovat mnohé tzv. *mrtvé zóny*<sup>1)</sup>. 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 železato-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.

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 přežít i za dosti extrémních podmínek. Počátkem 70. let minulého století mikrobiolog Thomas Brock poprvé zaznamenal jednoduché mikroorganismy v horkých gejzírech Yellowstonekého 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 prúdů. 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.



Hydrotermální prúdůch v hloubce asi 2 km (foto: University of Delaware and Analytical Instrument Systems, Inc.).

<sup>1)</sup> Tak nazveme oblasti bez šancí na vznik živých organismů.

## 10. Vesmír plný otazníků

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.

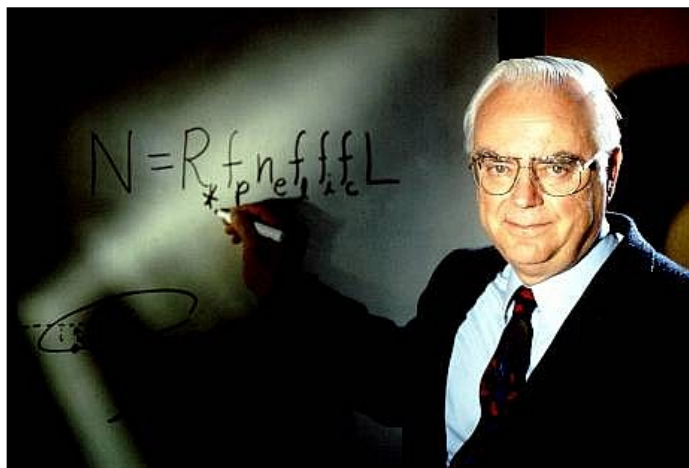
Objevy extremofilních mikroorganismů na Zemi zvyšují naději, že se podobné jednoduché živé organismy mohou najít i na Marsu, případně ve slaném oceánu pod ledovým příkrovem na Jupiterově družici Europa <sup>2)</sup>.

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 případě 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 Drakeem <sup>3)</sup>.

Jde opravdu o průhledný způsob: pravděpodobnosti jevů, které nastávají v přírodě, lze vyjádřit číselně od nuly do jedné. Když daná skutečnost nastane po každé, 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



Frank Drake a jeho rovnice.

\_\_\_\_\_

<sup>2)</sup> Důkazy o existenci tekuté (slané) vody pod ledovou vrstvou Europy jsou zatím jen nepřímé, prozrazují to měření magnetického pole družice, vykonaná orbitální sondou Galileo.

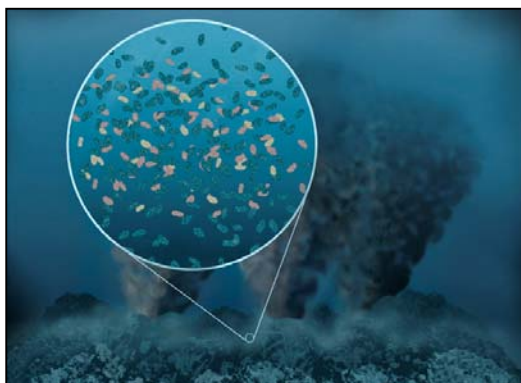
<sup>3)</sup> Čti: *frenk drejk*. Drake byl jedním z jedenácti vědců, kteří na radioastronomické observatoři v americkém Green Banku ve dnech 1. a 2. listopadu 1961 diskutovali o problematice hledání mimozemských civilizací (*Search for Extraterrestrial Intelligence* – SETI). Ve svém příspěvku seznámil přítomné, jak v principu jednoduše můžeme statisticky odhadnout počet civilizací žijících v současné době v naší Galaxii.

## 10. Vesmír plný otazníků

---

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 Martánskou akademií věd)

**C**elá 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 martánské 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



## 10. Vesmír plný otazníků

---

rozměry se během roku mění. Tyto čepičky jsou pravděpodobně obrovským rezervoárem kyslíčnicku uhličitého ve formě ledu (zmrzlý  $\text{CO}_2$ ). Někteří vědci, jichž je však menšina, vyslovili názor, že polární čepičky jsou možná částečně tvořeny zmrzlým oxidem vodným, který známe jako „mokřý led“ (zmrzlý  $\text{H}_2\text{O}$ ). 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 letech 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 vše 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 sympóziium 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.

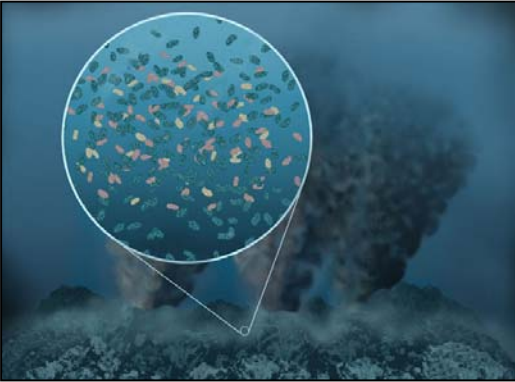
(c) Pravidelně sestavené kameny (grady) jsou prý velká sídliště inteligentních pozemšťanů.

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  $\text{CO}_2$  pro život nejpříjemnější), 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 žářem, jaký na Zemi panuje.

Z časopisu *Mercury* 7, 1978, č. 2 volně přeložil Pavel Andrlé (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?



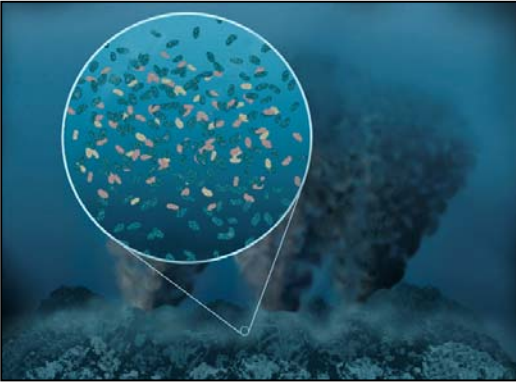
(Podle *Sky and Telescope*, April 1978, 320)

**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

---



---

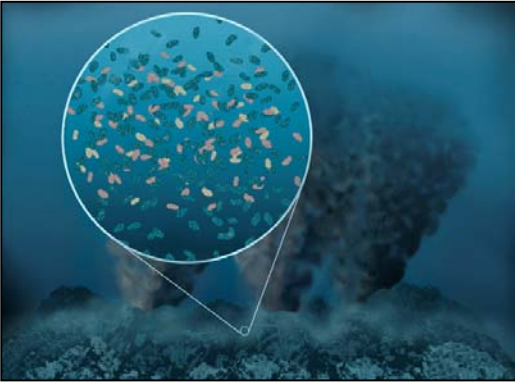
### citát

---

*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 zůstává 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 najdeme 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.*“



## 10. Vesmír plný otazníků

Práce Morrisona a Cocconih 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 relative 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?

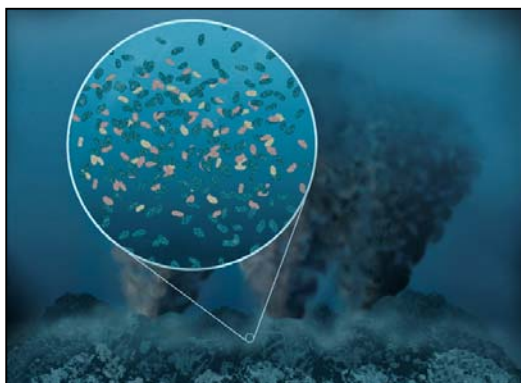
#### The Optimum Channel

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

**P**o 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 vyrazí 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-

## 10. Vesmír plný otazníků

---

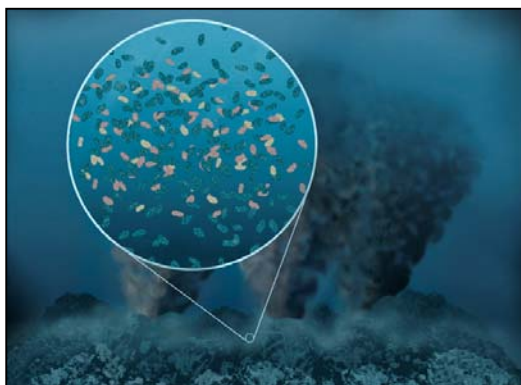
řízení či dokonce průmyslové znečištění takových rozměrů, že by nemohlo uniknout naší pozornosti? Proč už si dávno nepřestavěly celou Galaxii ke svému prospěchu?

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 nesmrtnosti, 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 odpradáva 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 zdoluhavý 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 období 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-

## 10. Vesmír plný otazníků

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.

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?



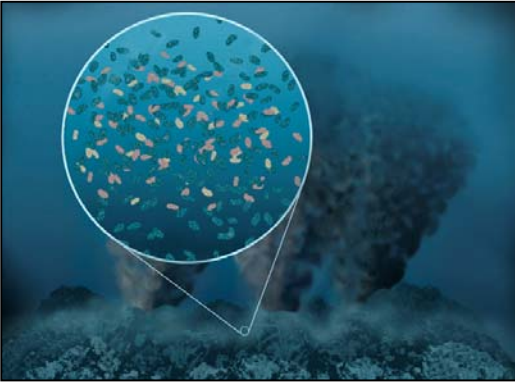
Iosif Šklovskij

## 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 vseleennaja* 1985, 76–80; překlad Zdeněk Pokorný.



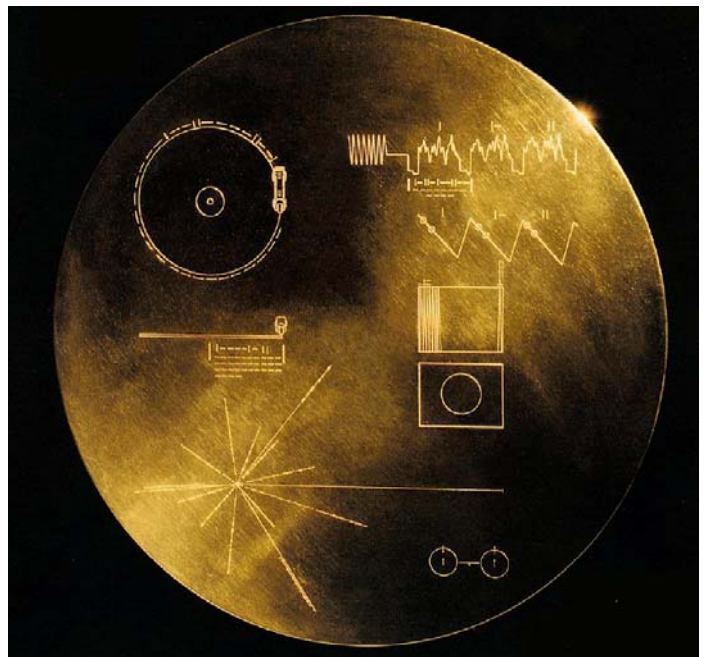
### čítanka

## Lewis Thomas: Vzkaz jiným civilizacím

**P**ředpokládejme, 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 nedvoj-  
smyslný 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.



## 10. Vesmír plný otazníků

---

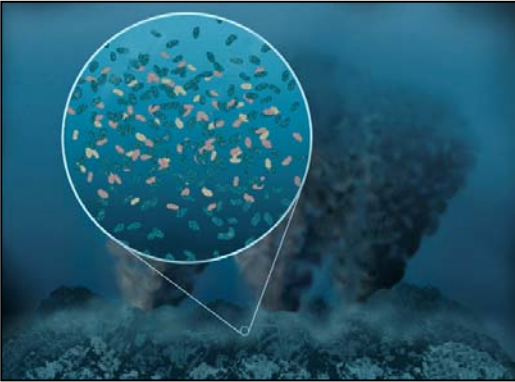
ném seznámení nasadí tu nejlepší masku. Nebo tvář. O těch horších věcech bychom se mohli taktně zmínit později. Ostatně, abychom se zase tak moc nepodceňovali, hudba by podala spravedlivější obraz naší duchovní reality než mnoho jiných poselství, jako třeba noviny a časopisy, řekněme *Time*, nebo historie 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 chvíli 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 zamyslet se, dost zhluboka a zdaleka se zamyslet.

Z knihy *Buňka, medúza a já* (Mladá fronta, Praha 1981). Přeložil Miroslav Holub.



---

medailon

---

### Carl Edward Sagan

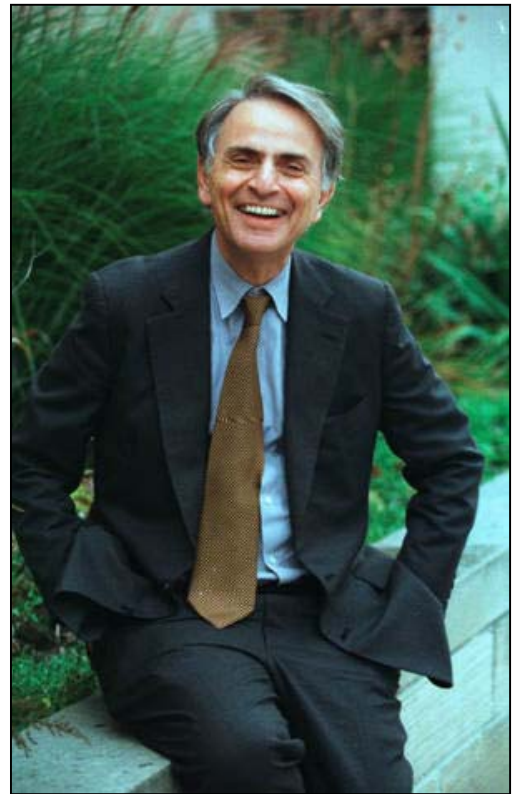
**(9. 11. 1934 – 20. 12. 1996)**

„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 Newyorském 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 ní 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-



## 10. Vesmír plný otazníků

---

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 počest 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 Pioneer 10 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.“

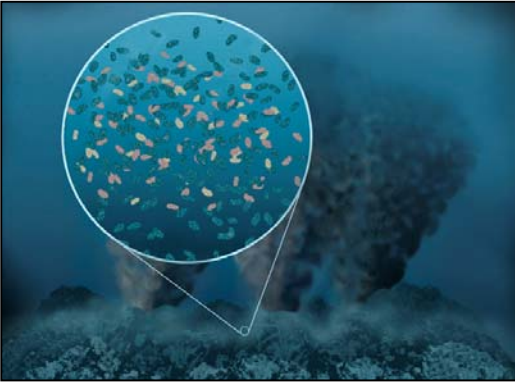
Nejnámější Saganovou aktivitou byla bezesporu popularizace astronomie. Svou televizní a publikační aktivitou vnesl do milionů domácností ve Spojených státech i v zahraničí vzrušení z vědeckého poznávání vesmíru. V tomto oboru získal takovou prestiž, že byl považován za jednoho z nejlepších, o čemž svědčí 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. Vesmír plný otazníků

---



---

### výsledky

---

K otázce 10.2.1.: Čím je hmotnost hvězdy větší, tím kratší dobu existuje (a spolu s ní i planetární soustava, pokud ji hvězda má). U velmi hmotných hvězd (ve srovnání se Sluncem) by tudíž nebylo dostatek času ke vzniku a rozvoji inteligentního života.

K otázce 10.2.2.: Mění se v závislosti na změnách zářivého výkonu centrální hvězdy, k němuž dochází v důsledku hvězdného vývoje. Nejpodstatnější je tedy pomalé zvyšování výkonu během vývoje hvězdy na hlavní posloupnosti, což se projevuje postupným vzdalováním obyvatelné zóny od hvězdy.

K otázce 10.2.3.: Živý organismus nemůže existovat bez přítomnosti prvků těžších než vodík a helium, byť mohou být přítomny jen v malém množství. Tyto prvky se utvořily až v nitrech hvězd následkem termonukleárních reakcí, pak byla část z nich rozptýlena do mezihvězdného prostoru, kde těžší prvky obohatily původní materiál z vodíku a nevelké příměsi helia. Planety a hvězdy prvních generací tedy těžší prvky neobsahovaly. Otázku lze korektně zodpovědět.

### 10.3. Domněnka o vzácné Zemi

**Z**ásadní 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



## 10. Vesmír plný otazníků

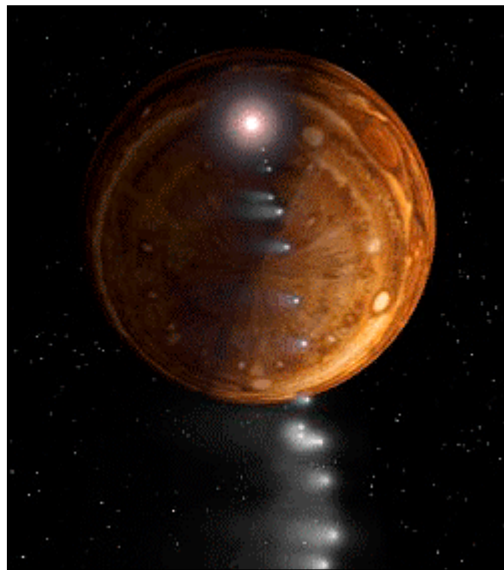
vhodné pro život měnily jen málo a pomalu. Proto je důležité, že trajektorie planet v naší sluneční soustavě jsou od doby jejího vzniku víceméně stabilní (snadno si dovedeme představit, že klima na Zemi by bylo nestabilní, kdyby naše planeta obíhala po výstředné a navíc často se měnící dráze). Zvláště 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 křída 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.

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 nepřilíši 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.

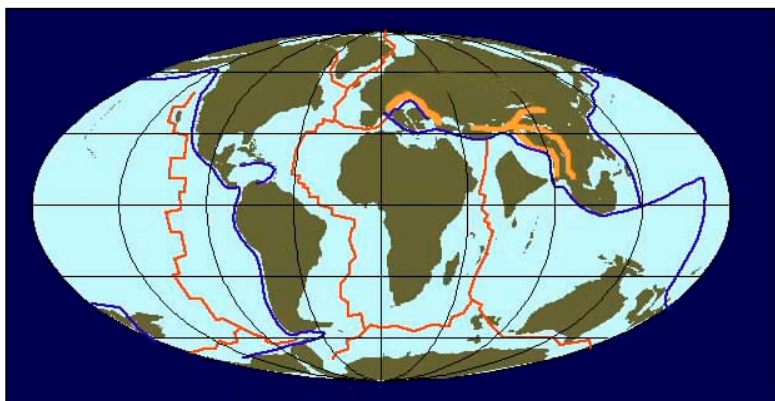
Konečně je tu řada omezení, týkající se přímo vlastní planety. Planetu musí doprovázet relativně hmotná družice, jinak její rotační osa neudrží dlouhodobě stabilní směr v prostoru. Nebýt Měsíce, neměla by naše planeta rotační osu mírně skloněnou k oběžné rovině (což způsobila obří srážka, při níž Měsíc 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 zemské kouli. Přesně to je zapotřebí k nerušenému vývoji života na planetě.

Na planetě vhodná 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 zemské kůry. 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.



Pád komety Shoemaker-Levy na Jupiter v červenci 1994.

## 10. Vesmír plný otazníků



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 uhličitánové a hydrouhličitánové 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 navrácí 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 <sup>1)</sup>). Na druhé straně se vulkanickými procesy do atmosféry navrácí 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.

<sup>1)</sup> Je to klasický případ tzv. *záporné zpětné vazby*.

## 10. Vesmír plný otazníků

---



Vše, co jsme doposud uvedli, nám dává možnost zformulovat jednu dosti závažnou hypotézu – domněnku o vzácné Zemi<sup>2)</sup>. 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.

---

<sup>2)</sup> 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*.

Začneme 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 závrtné 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-



## 10. Vesmír plný otazníků

jekty (*Unidentified Flying Objects*<sup>1)</sup>). 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 zkušených pozorovatelů (a takoví jsme prakticky všichni) za UFO považují nejčastěji jasnou planetu nebo hvězdu mihotající se nízko nad obzorem, halové jevy v ovzduší, oblaka zesponu 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 zkušené 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 pohotově 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).

<sup>1)</sup> 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 zružovělý 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

**N**a 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 <sup>1)</sup>. 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<sup>2</sup> v Austrálii, začátek stavby 2010.

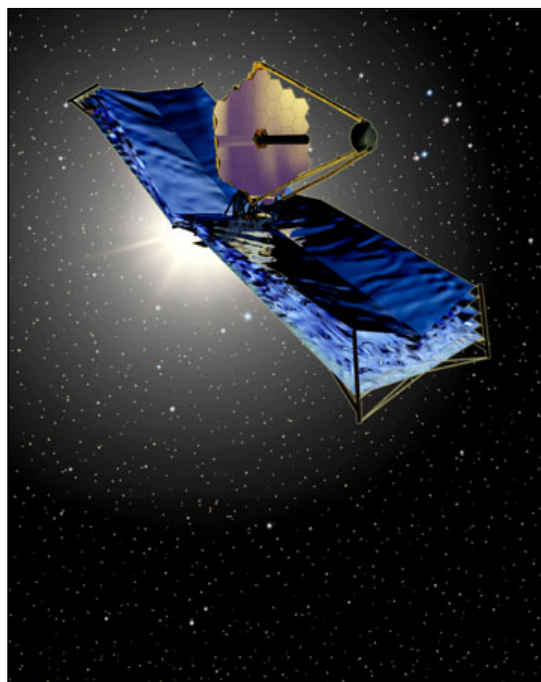
---

<sup>1)</sup> Ani v tomto směru nebyla astronomie výjimkou mezi ostatními přírodními vědami.

## 10. Vesmír plný otazníků

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 sebelepší disputace, vedené třeba i nejvřehlasnějšími 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 určité 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.*

## 10. Vesmír plný otazníků

---

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 samoučelná: 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

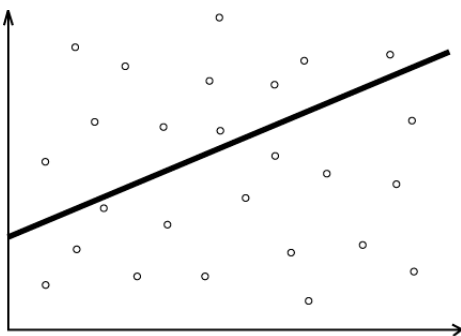
---

### *Nezávažnější úlohy v astrofyzice*

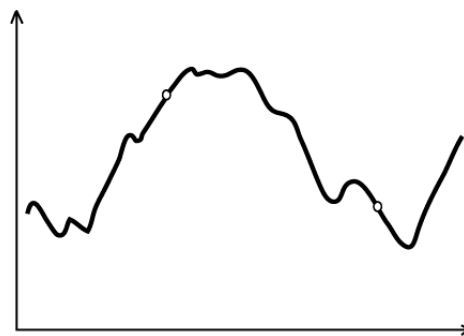
*Podle významného francouzského astronoma Jean-Claude Peckera spočívá astrofyzikální výzkum v podstatě v řešení dvou základních úloh, a to:*

*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.



## 10. Vesmír plný otazníků

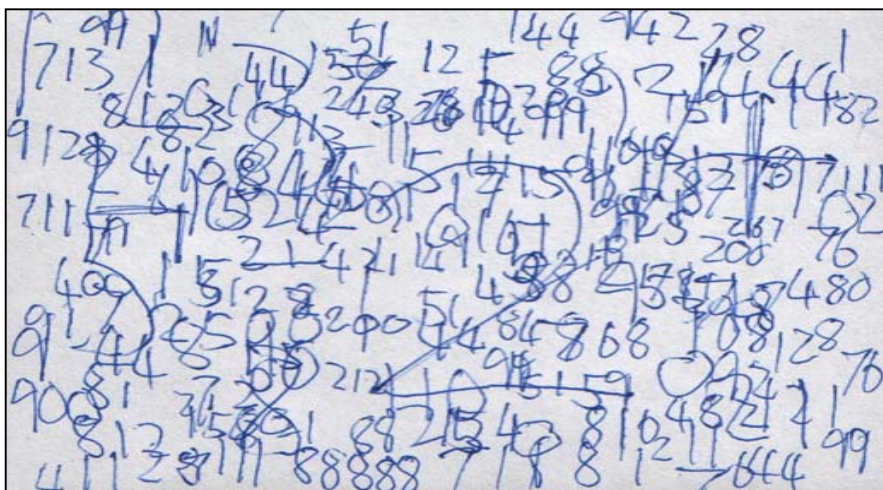


### speciální otázka

## 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 pouhými 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  $\text{kg/m}^3$ ) 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?



## 10. Vesmír plný otazníků



speciální otázka

### Listujeme v astronomické encyklopedii

Otevřeli jsme jeden z mnoha výkladových astronomických slovníků hned na první straně a začeti jsme se do prvních hesel:

*aberrace, 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?



## 10. Vesmír plný otazníků

---



---

### 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 Senegalů, 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 koncentracích? 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).

## 10. Vesmír plný otazníků

---



## 10. Vesmír plný otazníků

---



---

### 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 souvislosti. Často žasneme, že některé – podle nás už dávno – 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, zapíše do čtverečku.

- |                          |   |                   |
|--------------------------|---|-------------------|
| <input type="checkbox"/> | byly objeveny kvasary   | 1. 1.století n.l. |
| <input type="checkbox"/> | změřeny první paralaxy hvězd  | 2. 1602–1618      |
| <input type="checkbox"/> | bylo objeveno reliktní záření   | 3. 1663           |
| <input type="checkbox"/> | objevena první exoplaneta, obíhající kolem hvězdy slunečního typu             | 4. 1837–1839      |
| <input type="checkbox"/> | první doložený popis zrcadlového dalekohledu (reflektoru)                     | 5. 1918–1924      |
| <input type="checkbox"/> | první úspěšná radiolokace Měsíce  | 6. 1929           |
| <input type="checkbox"/> | uveřejněna první práce o „úprku galaxií“ (rozpínání vesmíru)                  | 7. 1946           |
| <input type="checkbox"/> | Johannes Kepler formuluje zákony pohybu planet                                | 8. 1963           |
| <input type="checkbox"/> | zveřejněna učebnice astronomie, nazývaná často <i>Almagest</i>                | 9. 1965           |
| <input type="checkbox"/> | vychází první moderní katalog spekter hvězd <i>The Henry Draper Catalogue</i> | 10. 1995          |

## 10. Vesmír plný otazníků

---

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....

## 10. Vesmír plný otazníků

---



---

### výsledky

---

**Speciální otázka – řádový odhad:** *ad 1:*  $10^0$  %; *ad 2:*  $10^1$  %; *ad 3:*  $10^3$  hvězd; *ad 4:*  $10^{57}$  atomů; *ad 5:*  $10^8$  let; *ad 6:*  $10^3$  m; *ad 7:*  $10^1$  km/s; *ad 8:*  $10^9$  kg/m<sup>3</sup>; *ad 9:*  $10^2$  mm; *ad 10:*  $10^2$ krát. Pokud jste se nikde nespletli o více než jeden řád, dosáhli jste výborného výsledku.

**Speciální otázka – encyklopedie:** Pojmy *afel*, *apastron* a *apogeum* jsou některé z *apsid*.

**Speciální otázka na závěr:** k událostem mají být přiřazena tato pořadová čísla: 8, 4, 9, 10, 3, 7, 6, 2, 1, 5.