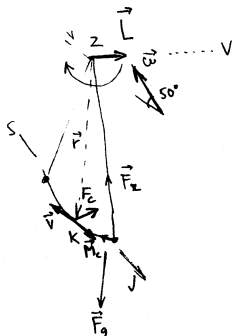


## 0.1 Základní jevy na planetách

Základní údaje o velkých těles sluneční soustavy jsou shrnuty v příloze (na str. ??). Ve sluneční soustavě existují tři různé druhy planet: terestrické planety (Merkur až Mars), plynní obři (Jupiter a Saturn) a ledoví obři (Uran a Neptun). V následující kapitole budeme diskutovat vybrané fyzikální jevy, které vysvětlují základní parametry planet. Impaktům a vulkanismu, jež formují povrch některých těles, jsou věnovány samostatné kapitoly (?? a ??).

### 0.1.1 Atmosféry

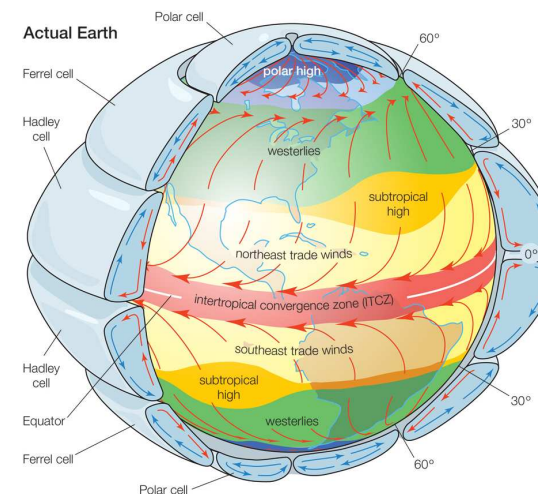
Předtím, než se budeme věnovat atmosférám, neodpustíme si poznámku o *Foucaultově kyvadle*, což je známý pokus demonstrující vliv rotace Země na pohyb (obr. 1). „Pověsti“ o tomto kyvadle praví: (i) rovina kyvu se nemění (skutečnost je taková, že se mění, a to dost komplikovaně); (ii) ve výlevkách se otáčí voda vždy stejným směrem (úplný nesmysl, jedná se o původní pomalou rotaci kapaliny, která je pouze zrychlená výlevkou); (iii) cyklóny se točí stejně jako kyvadlo (rotují opačně); (iv) ve směru východ–západ se kyvadlo vůbec neotáčí (otáčí se stejně).



**Obr. 1** — Foucaultovo kyvadlo při pohybu ve směru jih–sever s vyznačenými veličinami. Složka tíhové síly  $F_g$  nutí kývat kyvadlo, jeho moment hybnosti  $L = r \times (m\mathbf{v})$ . Coriolisova síla  $F_C$  působí kolmo na  $\mathbf{v}$  i  $\omega$ , moment Coriolisovy síly mění  $L$  podle  $\frac{dL}{dt} = \mathbf{M}_C = \mathbf{r} \times \mathbf{F}_C$ , čili stáčí ho po směru hodinových ručiček.

**Termální vítr.** Nejpodstatnější globální cirkulaci vzduchu zapříčiňuje ohřev. Vzduch na rovníku je zahříván více a stoupá díky vztlaku vzhůru. Proudění pokračuje ve výšce směrem pryč od rovníku, na zeměpisné šířce  $30^\circ$  klesá dolů. V přízemní hladině pak vane vítr (pasát) k rovníku, kvůli k rotaci Země se stáčí na severní polokouli na jihozápad. Takové proudění nazýváme *Hadleyho cirkulace* (obr. 2). Na Zemi pozorujeme tři buňky na každé polokouli, kdežto na Venuši jen jednu.

Tento mechanismus zapříčiňuje i *tryskové proudění* na rozhraní troposféry a stratosféry. Vzduch, který se posouvá od rovníku blíž k ose otáčení, musí kvůli zachování momentu hybnosti zrychlovat, čili vzhledem k povrchu Země vane vítr k východu. Navíc na rozhraní Hadleyho buněk existuje gradient teploty ve směru S–J, který také podporuje růst rychlosti Z–V proudění s výškou [8].



**Obr. 2** — Hadleyho cirkulace na Zemi. Převzato z [40].

**Horizontální vítr.** Nejdůležitější charakteristikou větru je jeho rychlost  $\mathbf{v}$ . V inerciální soustavě je zrychlení (změna rychlosti proudění):

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \mathbf{g}, \quad (1)$$

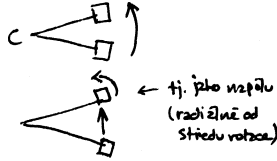
kde na pravé straně máme zrychlení od gradientu tlaku a tíhové.

Přejdeme-li do neinerciální (čárkované) soustavy, která rotuje úhlovou rychlostí  $\omega$  (stejně jako planeta), rovnice pro vítr přejde na tvar:

$$\left(\frac{d\mathbf{v}}{dt}\right)' = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \overbrace{\mathbf{g} + \omega^2 \mathbf{r}'_{\perp}}^{\mathbf{g}_{\text{eff}}} - 2\omega \times \mathbf{v}', \quad (2)$$

kam jsme byli kvůli transformaci souřadnic nuceni doplnit dvě zdánlivá zrychlení: odstředivé a Coriolisovo (viz kap. ??). Odstředivé zrychlení lze často

pokládat za zanedbatelné, zvláště když si osu otáčení chytře zvolíme blízko lokálního počátku souřadnic, kolem něhož budeme vítr studovat.<sup>1</sup>



**Obr. 3** — Rozklad otáčivého pohybu kolem zemské osy na pohyb posuvný plus otáčivý okolo osy procházející objektem (čtverečkem).

Použijeme *aproximace tenké vrstvy*. Zavedeme také lokální kartézské souřadnice na povrchu Země:  $x$  na východ,  $y$  na sever,  $z$  svisle nahoru a příslušné rychlosti  $u, v, w$ ; označíme  $\varphi$  zeměpisnou šířku (čárky u souřadnic si odpustíme, budeme vědět, že jsou neinerciální). Vektorová rovnice (2) tak přejde na tři skalární:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + 2\omega(v \sin \varphi - w \cos \varphi), \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - 2\omega u \sin \varphi, \\ \frac{dw}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g + 2\omega u \cos \varphi.\end{aligned}$$

Uvažujme pouze vítr v horizontální rovině (ve vertikální je skoro hydrostatická rovnováha a  $w \ll u, v$ ):

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \overbrace{2\omega \sin \varphi}^{f_C} v, \quad (3)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - 2\omega \sin \varphi u, \quad (4)$$

kde jsme označili  $f_C = 2\omega \sin \varphi$  jako Coriolisův parametr.

Pro *ustálené* proudění ( $du/dt = dv/dt = 0$ ) bychom měli

$$(u, v) = \frac{1}{\rho f_C} \left( -\frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (5)$$

<sup>1</sup> Důležitá je představa *oddělení* posuvného a otáčivého pohybu! Určitý objekt na povrchu Zeměkoule sice rotuje okolo osy procházející středem Země, ale tento pohyb můžeme ekvivalentně popsat jako posouvání objektu po kružnici a jeho otáčení okolo osy procházející objektem (obr. 3). Na rovníku tedy vektor  $\omega$  leží v rovině povrchu (atmosféry), tudíž  $\mathbf{a}_C = -2\omega \times \mathbf{v}$  směřuje vertikálně a horizontální pohyby neovlivňuje. Směrem k pólu se naopak  $\omega$  blíží vertikále a  $\mathbf{a}_C$  má čím dál větší horizontální složku (úměrnou  $\sin \varphi$ ).

což ovšem znamená, že *vítr vane podél izobar, nikoli ve směru gradientu tlaku!* (Složky  $(u, v)$  a  $(-y, x)$  jsou zde „přehozené“.) Těto rovnovážné situaci říkáme *geostrofické proudění*. Proudění na Zemi nebo na Marsu je často přibližně takové [8].

Užitečné je též použít místo  $(x, y)$  souřadnice tangenciální a normálové  $(s, n)$ , tzn. ve směru  $\mathbf{v}$  a kolmé na  $\mathbf{v}$ , a přepsat do nich rovnice (3) a (4). Coriolisovo zrychlení se nám pochopitelně objeví pouze u normálové složky:

$$\begin{aligned}\frac{dv_s}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s}, \\ \frac{dv_n}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} - f_C v_s.\end{aligned}$$

Lze samozřejmě ztotožnit složku  $v_s$  s velikostí rychlosti  $v = |\mathbf{v}|$ , neb  $v_n = 0$  z definice. Normálové zrychlení  $dv_n/dt$  způsobuje zakřivování trajektorie větru. Pokud si ji přiblížíme jako kružnici (část kružnice) o poloměru  $r$ , pak pro normálové alias dostředivé zrychlení musí platit známý geometrický vztah  $dv_n/dt = v^2/r$ , čili:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s}, \quad (6)$$

$$\frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} - f_C v. \quad (7)$$

Za situace, kdy je  $v^2/r \gg f_C v$ , zajišťuje dostředivé zrychlení pouze gradient tlaku.<sup>2</sup> Proudění pak nazýváme *cyklostrofické*. Globálně se takové proudění (a odpovídající gradient tlaku od rovníku k pólu) pozoruje na pomalu rotující Venuši. Vítr je zde ve stavu superrotace — jeho perioda oběhu (4 dny, ve výšce 60 km) je podstatně kratší než perioda rotace samotné planety (243 dní).

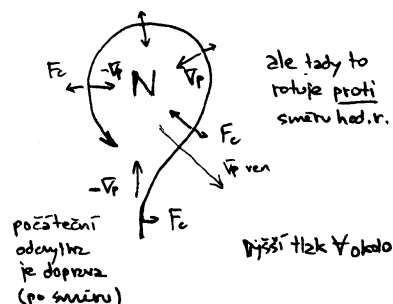
Zopakujme nakonec naše poznatky jinými slovy: na rotující planetě zásadně *nevanou* větry z oblastí vysokého tlaku do nízkého! Když se totiž vzduch pohne rychlostí  $\mathbf{v}$  proti směru gradientu tlaku ( $\mathbf{a}_{\nabla P} = -\frac{1}{\rho} \nabla P$ ), je záhy odchýlen Coriolisovým zrychlením ( $\mathbf{a}_C$ , kolmým na  $\mathbf{v}$ ) tak, že nakonec jsou obě zrychlení antiparalelní a proudění sleduje izobary ( $\mathbf{v}$  je kolmé i na  $\mathbf{a}_{\nabla P}$ ) — viz obr. 4.<sup>3</sup>

Rychlost  $v$  proudění se ustaví přibližně tak velká, aby Coriolisova síla úměrná  $v$  byla dostatečná na vyrovnání gradientu tlaku. Velký gradient tlaku (husté izobary) tedy automaticky znamenají rychlý geostrofický vítr! Pointa ale je,

<sup>2</sup> Pokud bychom *podruhé* přešli do neinerciální soustavy, tentokrát přímo spojené s větrem, mohli bychom tvrdit, že „gradient tlaku je v rovnováze s odstředivou silou“.

<sup>3</sup> Je to mimochodem důvod, proč se na Zemi gradienty tlaku vyrovnávají dosti obtížně.

že  $\mathbf{a}_{\nabla P}$  není přesně rovno  $-\mathbf{a}_C$ , takže se vzduch se může pohybovat po křivkách. Vzduch okolo oblasti nízkého tlaku (cyklóny) rotuje na severní polokouli proti směru hodinových ručiček; vysoký tlak (anticyklóna) znamená rotaci po směru.

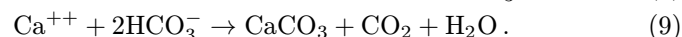
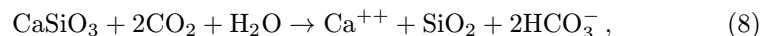


**Obr. 4** — Proudění vzduchu rychlostí  $\mathbf{v}$  okolo tlakové níže (cyklóny), zpočátku ve směru zrychlení od gradientu tlaku ( $-\frac{1}{\rho}\nabla P$ ), ale záhy odchýlené Coriolisovým zrychlením ( $-2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$ , kolmým na  $\mathbf{v}$ ) tak, že nakonec sleduje izobary.

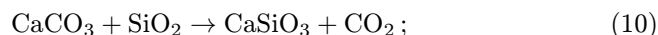
V případě plynných obřích planet, které rotují velmi rychle, se pozorují zonální větry  $\simeq 10^2$  m/s a pásové struktury. Možná jsou odrazem toho, že tekutá tělesa mají tendenci rotovat na cylindrech.

**Paradox slabého mladého Slunce.** Z hlediska dlouhodobého vývoje atmosféry je podstatná změna zářivého výkonu Slunce s časem — před 4,5 Gyr byla  $L_{ZAMS} \simeq 0,7 L_{\odot}$ . Při takovém nízkém  $L$  by Země zamrzla, skleníkovému jevu navzdory, nicméně podle metasedimentů a chemofosilií starých až 3,8 Gyr víme, že na Zemi bylo převážně teplé klima. Zároveň musíme umět vysvětlit existenci oceánů na Marsu před 3,5 Gyr nebo úplné vypaření vody na Venuši.

Klasickým řešením tohoto paradoxu je, že se v atmosféře měnil obsah *skleníkových plynů*, tzn. především vodní páry, v menší míře  $\text{CO}_2$ . Nezapomeňme, že i malé množství  $\text{CO}_2$  může podstatně zvýšit výpar  $\text{H}_2\text{O}$ ! Koloběh  $\text{CO}_2$  v oceánu a atmosféře určují chemické reakce, případně i živé organismy (mořský plankton). Oxid uhličitý rozpuštěný ve vodě reaguje se silikáty:



Usazené karbonáty jsou poté deskovou tektonikou dopravené do subdukčních zón, kde se zahřejí a uvolní se znovu  $\text{CO}_2$ :

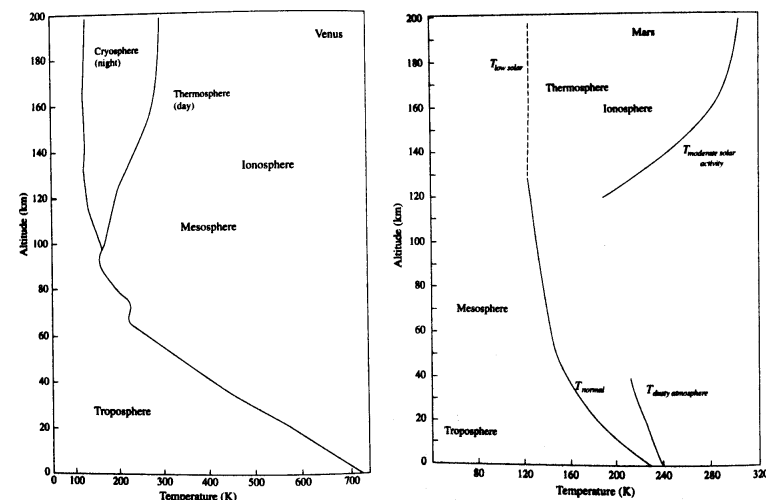


odplynění při vulkanické činnosti nakonec vrací  $\text{CO}_2$  do atmosféry. Pointa je, že rychlost prvních reakcí (odstraňujících  $\text{CO}_2$ ) je úměrná teplotě, která však roste při zvýšeném množství  $\text{CO}_2$  v atmosféře, tudíž se jedná o negativní zpětnou vazbu, udržující teplotu dlouhodobě stálou.

Aby Země nezmrzla, bylo by potřeba asi stokrát více  $\text{CO}_2$ , což by snad bylo možné, ale pak by měl být vysoký obsah sideritu  $\text{FeCO}_3$  ve starých horninách, což se nepozoruje. Model musí zároveň splňovat omezení plynoucí z Venuše nebo Marsu. Na Marsu by například zvýšení obsahu  $\text{CO}_2$  vedlo ke vzniku oblaků a přílišnému ochlazení. Možné jsou i vlivy jiných skleníkových plynů — amoniaku  $\text{NH}_3$  nebo metanu  $\text{CH}_4$ , které byly jistě přítomné v mladých atmosférách, ale zejména molekula  $\text{NH}_3$  je rychle ničena fotodisociací [54].

Méně uznávaná je představa, že Slunce bylo jasnější než předpovídá standardní model. To by ovšem musela být větší hmotnost  $M_{ZAMS} = 1,03$  až  $1,07 M_{\odot}$ , aby na Marsu byla kapalná voda a na Zemi nenastal překotný skleníkový jev. Potřeba je pochopitelně silnější sluneční vítr  $\dot{M}$ , abychom se dostali na současnou hmotnost  $1 M_{\odot}$ , což však pozorování slunečních analogů nepotvrzují.

**Termosféra a exosféra.** Pozorované vertikální teplotní profily  $T(z)$  atmosfér shrnuje obr. 5. Výpočet tlaku  $P$  a hustoty  $\rho$  s výškou by byl možný ze stavové rovnice ideálního plynu a rovnice hydrostatické rovnováhy. Atmosféry všech planet mají podobný rozsah — obři sice mají větší tíhové zrychlení  $g$  a nižší teplotu  $T$ , ale plyn je zase tvořen lehčími pohyblivějšími částicemi s menším  $\mu$ .



**Obr. 5** — Pozorované teplotní profily Venuše, Země a Marsu. Převzato z [8].

V následujícím se zaměříme na vrchní atmosféru. Teplotu zde ovlivňují zejména následující procesy [54]: (i) ohřev termosféry fotoionizací molekul  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  působením tvrdého XUV záření Slunce; (ii) ohřev stratosféry fotodisociací  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$  UV zářením; (iii) ochlazování emisí IR záření při rotačně-vibračních přechodech molekuly  $\text{CO}_2$ , která zde působí jako účinný *chladič* (narozdíl od spodní atmosféry, kde zvyšování koncentrace  $\text{CO}_2$  způsobuje ohřívání); (iv) kontrakce nebo expanze termosféry; (v) exotermické chemické reakce.

*Termosféra* je vrstva, která je sice řídká, ale vzájemné kolize částic jsou stále časté (obr. 6). Její vysoká teplota je způsobena zmiňovaným ohřevem UV zářením Slunce. Protože je zde plyn v tepelné rovnováze, lze rychlosti částic popsat *Maxwellovým rozdělením*:

$$f(v)dv = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left(-\frac{m}{2kT}v^2\right) dv, \quad (11)$$

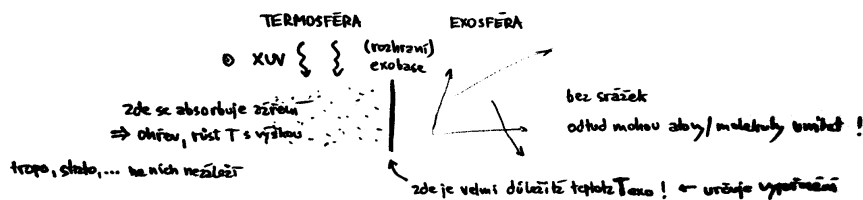
které nám říká, kolik částic má rychlost v intervalu  $(v, v + dv)$ ,  $m$  představuje hmotnost jedné částice,  $T$  termodynamickou teplotu,  $k$  Boltzmannovu konstantu. Nejpravděpodobnější rychlost částic vychází:

$$v_T = \sqrt{2kT/m}.$$

*Exosféru* již tvoří prakticky volné částice. Mají-li rychlost větší než únikovou:

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{2GM/(R+z)},$$

odletí bez jakékoliv překážky do kosmu. Pro únik molekul je rozhodující právě teplota na rozhraní termosféry/exosféry (exobázi). Dole v husté atmosféře může být teplota libovolná, na té nezáleží — molekuly odsud odlétávat nemohou, neboť je okamžitě „zarazí“ srážky.



Obr. 6 — Schéma rozhraní termosféry a exosféry.

Tok hmoty z atmosféry způsobený tepelnými rychlostmi se nazývá *Jeanův únik*. Tok (v jednotkách částice/ $\text{m}^2$ ) je dán součinem  $n_{\text{exo}}vf(v)$ , kde  $n_{\text{exo}}$

označuje koncentraci částic na exobázi. Záleží ovšem pouze na  $z$ -složce rychlosti, při výpočtu tedy budeme středovat přes poloprostor (dočasně označíme  $c \equiv \frac{m}{2kT}$ ):

$$\begin{aligned} \Phi_J &= \overbrace{\frac{1}{2\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi/2} \int_v}^{\text{středování}} n_{\text{exo}}vf(v)dv \overbrace{\cos\vartheta \sin\vartheta d\vartheta d\varphi}^{\text{složka } v_z \text{ } d\omega} = \\ &= \frac{1}{2\pi} 2\pi \left[ -\frac{1}{4} \cos 2\vartheta \right]_0^{\pi/2} \int_{v=v_{\text{esc}}}^{\infty} n_{\text{exo}}vf(v)dv = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\sqrt{\pi}} n_{\text{exo}} (c)^{\frac{3}{2}} \int_{v=v_{\text{esc}}}^{\infty} v^3 \exp(-cv^2) dv = \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} n_{\text{exo}} (c)^{\frac{3}{2}} \left[ -\frac{1}{2c} (1 + cv^2) \exp(-cv^2) \right]_{v_{\text{esc}}}^{\infty} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} n_{\text{exo}} (c)^{-\frac{1}{2}} (1 + cv_{\text{esc}}^2) \exp(-cv_{\text{esc}}^2) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} n_{\text{exo}} v_T (1 + \lambda_{\text{esc}}) \exp(-\lambda_{\text{esc}}), \end{aligned} \quad (12)$$

kde jsme zavedli parametr úniku:

$$\lambda_{\text{esc}} \equiv cv_{\text{esc}}^2 = \left( \frac{v_{\text{esc}}}{v_T} \right)^2 = \frac{GMm}{(R+z)kT}. \quad (13)$$

Ze závislosti  $\Phi_J(m)$  vidíme, že lehké částice unikají z atmosféry snadněji než těžké. Ne že mají jinou únikovou rychlost, ta je pro všechny stejná, ale v Maxwellově rovnovážném rozdělení rychlostí se těžké částice pohybují pomalu, kdežto lehké rychle!

Výpar molekul nebo únik do kosmu může zásadně ovlivnit poměry izotopů. Obzvláště citlivý je poměr deuteria a vodíku, protože D je *dvakrát* hmotnější než H, čili se vypařuje podstatně obtížněji. Tomuto procesu říkáme *izotopická frakcionace*.

Na Venuši je evidentní nízký obsah vody; vysoký poměr D/H  $(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$  v atmosféře (tj. stokrát větší hodnota než na Zemi) je jasnou známkou proběhnuvšího výparu. Původně byl obsah vody asi stejný jako na Zemi, ale *překotný skleníkový jev* způsobil, že všechna  $\text{H}_2\text{O}$  z oceánů se dostala do atmosféry. Disociace  $\text{H}_2\text{O} + \gamma \rightarrow \text{OH} + \text{H}$  ultrafialovým zářením v termosféře umožnila únik lehkého vodíku. Muselo se ale jednat o zvýšený tok UV oproti současnosti, jak odpovídá pozorováním slunečních analogů (kap. ??), aby se exobáze

ohřála na kritickou teplotu  $T_{\text{exo}} \doteq 4000 \text{ K}$ . Otázkou je, kam zmizel kyslík zbylý po disociaci? Možnosti jsou dvě: i) strhnutí atomů O unikajícími atomy H; ii) urychlení iontů  $\text{O}^+$  slunečním větrem.

Atmosféra Země je prokazatelně ochuzena o lehčí vzácné plyny Ne, Ar oproti Kr, Xe (což platí i pro izotopové poměry). Na Zemi tedy také došlo k určitému úniku, ale voda ze Země ve velké míře rozhodně neunikla. UV záření pravděpodobně zvýšilo teplotu exosféry  $T_{\text{exo}}$ , ale pokud byl zároveň vysoko v atmosféře přítomen  $\text{CO}_2$ , který účinně vyzářuje v IR (konkrétně na  $15 \mu\text{m}$ ) a ochlazoval termosféru, mohla se  $T_{\text{exo}}$  udržet nízká. Předpokládá se také silné magnetické pole Země, tedy funkční dynamo, které brání urychlování iontů slunečním větrem.

Mars má malé tíhové zrychlení  $g$  i slabé magnetické pole, čili zde není problém vysvětlit únik vodíku (termálními procesy) ani kyslíku (netermálně).

### 0.1.2 Magnetosféry

Magnetická pole planet jsou v prvním přiblížení podobná poli dipólu, který má tvar siločar [8]:

$$B_r = -\frac{2\mathcal{M}_B}{r^3} \sin \vartheta, \quad B_\vartheta = -\frac{\mathcal{M}_B}{r^3} \cos \vartheta, \quad B_\varphi = 0. \quad (14)$$

Magnetický dipólový moment Země je  $\mathcal{M}_B = 7,9 \cdot 10^{15} \text{ T} \cdot \text{m}^3$ , typické pole na povrchu vychází  $B \simeq 3 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ . Pozorované jsou samozřejmě odchylky od dipólu, způsobené mimo jiné interakcí magnetosféry s okolním prostředím, zejména se slunečním větrem (viz obr. 7). Magnetické indukce  $B$  na površích jsou podobné takřka pro všechna tělesa, ale to znamená, že  $\mathcal{M}_B$  musí být pro velké planety mnohem větší, neboť pole ubývá s  $1/r^3$ .

Magnetické pole zřejmě není původní, neboť Curieova teplota, kdy materiál ztrácí magnetizaci, je pro železo pouhých  $T_C \doteq 800 \text{ K}$ . V nitru Země patrně funguje podobné dynamo jako na Slunci, vnější jádro je tekuté a rotuje diferenciálně. Minulá přepólování jsou zaznamenána v bazaltech (obsahujících magnetit) na rozpínajícím se oceánském dně.

Pohyb nabitých částic v elektromagnetickém poli je určen *Lorentzovou silou*  $\mathbf{F}_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ . V homogenním magnetickém poli jej lze popsat snadno:

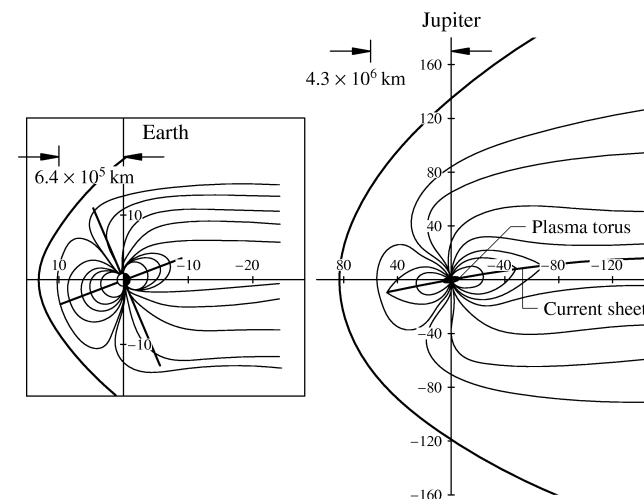
$$F_L = qv_\perp B = F_d = m \frac{v_\perp^2}{r_L}.$$

Jedná se o pohyb okolo siločar po kružnici o Larmorově poloměru:

$$r_L = \frac{mv_\perp}{qB}, \quad (15)$$

přičemž po složení s rychlostí  $v_\parallel$  ve směru siločar vznikne spirálování. Pro  $E_k \simeq 100 \text{ keV}$ , typickou ve vnitřním radiačním pásu, vychází  $r_L \simeq 100 \text{ m}$  pro elektrony a 1 836 krát větší pro protony. Existuje však mnoho složitějších pohybů; například rostoucí magnetická indukce (zhušťující se siločary) způsobuje, že se zmenšuje  $v_\parallel$  a částice se tak „odrážejí“ jako od zrcadla.

Interakce částic slunečního větru probíhá nejprve se zemskou magnetosférou, která je přivede do okolí magnetických pólů, a následně se zemskou atmosférou, kde srážková excitace molekul a zářivá deexcitace způsobuje *polární záře*. Atomární kyslík emituje fotony 557 nm (zelené barvy) a 630 nm (červené); u molekulární dusíku  $\text{N}_2$  vzniká vícero čar mezi 600 až 700 nm.



Obr. 7 — Magnetosféra Země a Jupiteru. Převzato z [2].

### 0.1.3 Vnitřní struktura

Přesné informace o vnitřní struktuře Země přináší studium *seismických vln*. Kromě obvyklých podélných zvukových vln (označovaných P jako primární) existují také zvláštní druhy vln, a to díky vazbám v pevné látce:

- příčné vlny (sekundární, označované S);
- povrchové Rayleighovy vlny (ve svislém směru, podobné vlnám na vodě);
- povrchové Loveho vlny (povrch kmitá do stran).

Seismologická měření využívají krátce trvajících vln, jež vznikají při zemětřeseních, v Zemi ale „znějí“ i déle trvající stojaté vlny (obdobné, jaké jsme diskutovali ve Slunci). Z různých rychlostí vln ( $v_P \neq v_S$ ) a z toho, že S-vlny se nemohou šířit v tekutině, je možné odvozovat profil hustoty  $\rho(R)$  i fáze látky.

Konkrétně lze z teorie pevných látek odvodit následující vlnové rovnice [8]:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = v_P^2 \nabla^2 \Phi, \quad \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial t^2} = v_S^2 \nabla^2 \bar{\psi},$$

příčměž přemístění  $\mathbf{r}$  materiálu je s potenciály  $\Phi$ ,  $\bar{\psi}$  svázáno vztahem  $\mathbf{r} = \nabla \Phi + \nabla \times \bar{\psi}$ . Rychlosti vlnění jsou určeny termodynamickými vlastnostmi látky:

$$v_P = \sqrt{\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_{rg}}{\rho}}, \quad v_S = \sqrt{\frac{\mu_{rg}}{\rho}}, \quad (16)$$

kde  $\mu_{rg}$  označuje modul pevnosti ve smyku (tj. míru napětí potřebnou pro změnu tvaru) a  $K_m$  adiabatický modul nestlačitelnosti (napětí pro změnu objemu):

$$K_m \equiv \rho \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_S \simeq \rho \frac{dP}{d\rho}.$$

Z výše uvedených vztahů okamžitě vidíme:  $v_P > v_S$  a při  $\mu_{rg} = 0$ , čili v tekutině, je  $v_S = 0$ . Profil hustoty pak lze vypočítat z rovnice hydrostatické rovnováhy:

$$\frac{dP}{dR} = -\frac{GM_R \rho}{R^2} = \frac{dP}{d\rho} \frac{d\rho}{dR} \simeq \frac{K_m}{\rho} \frac{d\rho}{dR},$$

čili

$$\frac{d\rho}{dR} = -\frac{GM_R \rho}{R^2} \frac{\rho}{K_m}.$$

Tuto rovnici nazýváme *Adamsovou–Williamsovou*. Integrovat ji lze numericky od povrchu tak, že dosadíme ze seismických měření (16):

$$\frac{K_m}{\rho} = v_P^2 + \frac{4}{3}v_S^2$$

a šikovně za  $M_R$ :

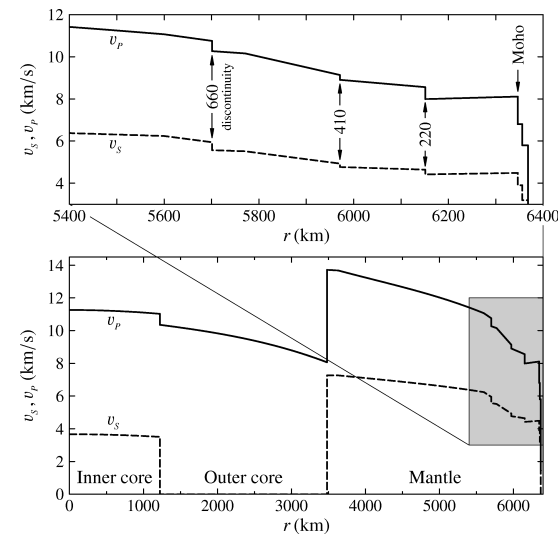
$$M_R = M_{\oplus} - \int_R^{R_{\oplus}} 4\pi R^2 dR \rho.$$

Pro přesnější výsledek bychom museli lépe zohlednit fázové přechody.

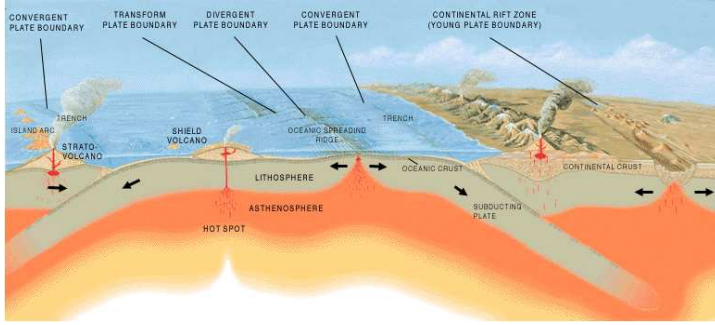
V nitru Země se ukazuje pět vrstev (viz též rozhraní na obr. 8):

1. pevná *kůra* — a) pevninská: tlustá 20 až 70 km, se střední hodnotou 35 km, průměrné chemické složení odpovídá granodioritům; b) oceánská: tlustá 4 až 20 km, v průměru 8 km, průměrné složení odpovídá bazaltům;
2. *svrchní plášť* — nahoře pevný, vespod plastický (jen místy částečně roztažený);
3. *spodní plášť* — pevnější, méně diferencovaný. Celý plášť je tlustý 2 900 km, jeho průměrné složení odpovídá peridotitům.
4. *vnější jádro* — tekuté, nikloželezné s příměsí síry (též Si, O).
5. *vnitřní jádro* — pevné, tvořené slitinou Fe (80 %), Ni (20 %).

Litosféra Země, tzn. kůra a pevná část svrchního pláště, se může pomalu pohybovat po viskózně–plastické vrstvě neboli astenosféře (obr. 9). Předpokládá se, že pozorované pohyby litosférických desek (rychlostí řádově  $10^0$  cm za rok) jsou iniciované prouděním konvekčních buněk v plášti. Není však jasné, jak přesně proudy vypadají — v každém případě se zvedají od rozhraní plášť/jádro, ale mohou fungovat odděleně ve svrchním a spodním plášti. K samotnému pohybu desek nejvíce přispívá ponořování chladnějších a tedy hustších okrajů oceánských desek do pláště.



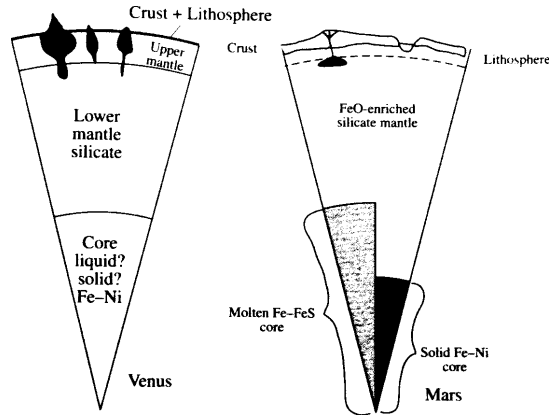
**Obr. 8** — Profil rychlostí měřených v nitru Země. Diskontinuity odpovídají význačným rozhraním: Mohorovičičově ploše oddělující kůru od svrchního pláště (tj. chemické rozhraní) a fázovým přechodům v plášti, rozhraním pevný spodní plášť/tekuté vnější jádro a vnější/vnitřní jádro. Převzato z [2].



Obr. 9 — Schematické znázornění deskové tektoniky na Zemi s různými typy rozhraní: konvergentními, divergentními a transformními. Převzato z [39].

Modely nitra dalších terestrických planet ukazuje obr. 10. Na Venuši nepozorujeme žádné známky globální deskové tektoniky, což si vysvětlujeme tak, že její litosféra je souvislá a že nepřítomnost vody by způsobovala příliš velké tření mezi deskami.

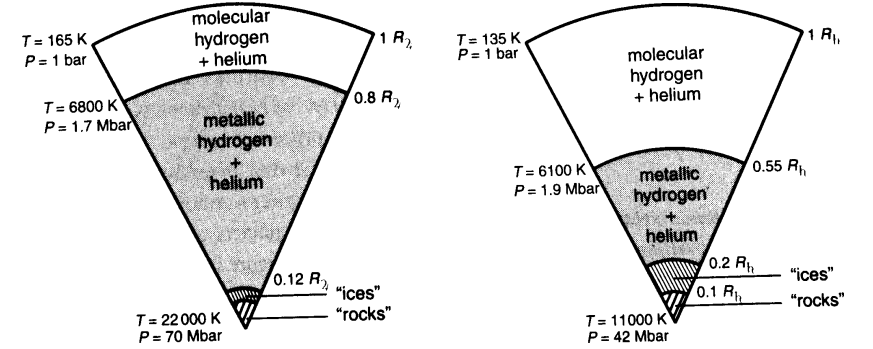
Mars je charakteristický velmi rozdílnou kůrou na severní a jižní polokouli — severní je dvakrát tenčí než jižní. Možnou příčinou je existence jediného silného výstupného proudu v plášti. (Model proudění [183] pouze vyžaduje, aby viskozita materiálu byla stratifikovaná,  $\eta_{\text{dole}}/\eta_{\text{nahoře}} \simeq 100$ .)



Obr. 10 — Modely nitra pro Venuši a Mars. Převzato z [8].

V případě plyných obrů se využívá veličin měřitelných z vnějšku:  $M$ ,  $R$ ,  $P_{\text{rot}}$ , zploštění  $\epsilon$ , gravitačních momentů  $J_2$ ,  $J_4$  a  $J_6$ . Modely pro Jupiter a Saturn jsou ukázány na obr. 11. Ledoví obři nejsou tak dobře prozkoumání a po-

zorování zatím nedovolují rozhodnout mezi různými modely nitra. Nejpravděpodobněji však obsahují rozsáhlé ledové pláště.



Obr. 11 — Modely nitra pro Jupiter a Saturn. Převzato z [8].

Za značnou nejistotu v modelech může i neúplná znalost stavové rovnice  $P(\rho, T)$  látky. Často se aproximuje *polytropou*, tzn. závislostí  $P(\rho)$  ve tvaru:

$$P = K \rho^{\frac{n+1}{n}}. \quad (17)$$

Pozoruhodné je, že existuje určitý maximální poloměr pro chladnou gravitující sféru *bez zdroje energie*, což lze ze stavové rovnice nahlédnout. Nestlačitelná látka ( $\rho = \text{konst.}$ ) je jednoduchá, zde poloměr roste s hmotností:

$$R^3 \propto M. \quad (18)$$

Druhý extrém je silně stlačená *degenerovaná* látka (např. v hnědých trpaslících), která se chová jinak — má index  $n = 3/2$  a  $K \neq K(\rho, T)$ , tedy  $P \propto \rho^{5/3}$ . Jak závisí  $R$  na  $M$ ? Nejprve odhadněme centrální tlak z rovnice hydrostatické rovnováhy ??, zapsané pro derivaci podle  $R$ :

$$\frac{dP}{dR} = -\frac{GM_R}{R^2} \rho, \quad (19)$$

a to provedením hrubé diskretizace:

$$\frac{dP}{dR} \simeq \frac{0 - P_c}{R_* - 0} \doteq \left( -\frac{GM_R}{R^2} \rho \right)_{\text{průměrné}} = \frac{1}{2} \left( -\frac{GM_*}{R_*^2} + 0 \right) \bar{\rho},$$

tedy:

$$P_c \doteq \frac{GM_*}{2R_*} \bar{\rho} = \frac{3GM_*^2}{8\pi R_*^4}. \quad (20)$$

Dosazením za centrální tlak z rovnice polytropy  $P_c = K \rho_c^{5/3}$ , a předpokladem  $\rho_c \propto \bar{\rho}$ , získáme výslednou úměru:

$$\frac{3GM_*^2}{8\pi R_*^4} = K \rho_c^{5/3} \propto K \bar{\rho}^{5/3} \propto K \left( \frac{M_*}{\frac{4}{3}\pi R_*^3} \right)^{5/3},$$

neboli:

$$R_*^3 \propto \frac{1}{M_*}, \quad (21)$$

což znamená, že přidáním hmoty se těleso *zmenší*! Jupiter je mimochodem blízko maximálního možného rozměru chladných objektů, na rozmezí našich dvou extrémních případů (18) a (21). (Hvězdy mohou být samozřejmě větší, neb jsou horké a nedegenerované.)



# Literatura

## Učebnice

- [1] BEATTY, J. K., PETERSEN, C. C., CHAIKIN, A.: *The New Solar System*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN 0521369657.
- [2] BERTOTTI, B., FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D.: *Physics of the Solar System*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 1402014287.
- [3] BOTTKÉ, W. F., CELLINO, A., PAOLICCHI, P., BINZEL, R. P. (editoři): *Asteroids III*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2002. ISBN 0816522812.
- [4] CANUP, R. M., RICHTER, K. (editoři): *Origin of the Earth and Moon*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2000. ISBN 0816520739.
- [5] FERNÁNDEZ, J. A.: *Comets. Nature, dynamics, origin and their cosmogonical relevance*. Dordrecht: Springer, 2005. ISBN 1402034903.
- [6] FESTOU, M. C., KELLER, H. U., WEAVER, H. A. (editoři): *Comets II*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2004. ISBN 0816524505.
- [7] MURRAY, C. D., DERMOTT, S. F.: *Solar System Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN 0521575974.
- [8] DE PATER, I., LISSAUER, J. J.: *Planetary Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 0521853710.
- [9] SEIDELMAN, P. K. (editor): *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. Washington: U. S. Naval Observatory, 2005. ISBN 1891389459.

## Reference

- [10] ALVAREZ, L. W., ALVAREZ, W., ASARO, F., MICHEL, H. V.: *Extraterrestrial cause for the Cretaceous Tertiary extinction*. *Science*, **208**, s. 1095, 1980.
- [11] ARTEMIEVA, N., PIERAZZO, E., STÖEFFLER, D.: *Numerical modeling of tektite origin in oblique impacts: Implications to Ries-Moldavites strewn field*. *Bull. of the Czech Geological Survey*, **77**, 4, s. 303–311, 2002.
- [12] BARUCCI, M. A., BOEHNHARDT, H., CRUIKSHANK, D. P., MORBIDELLI, A. (editoři): *The Solar System beyond Neptune*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2008. ISBN 9780816527557.
- [13] BEAULIEU, J.-P. aj.: *Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing*. *Nature*, **439**, 437, 2006.
- [14] BERNARD, J. H., ROST, R. aj.: *Encyklopedický přehled minerálů*. Praha: Academia, 1992.
- [15] BOČEK, M.: *Petrologické složení povrchu a kůry Měsíce. Povětroň*, **14**, S1, 3, 2006.
- [16] BOTTKÉ, W. F., LEVISON, H. F., NESVORNÝ, D., DONES, L.: *Can planetesimals left over from terrestrial planet formation produce the lunar Late Heavy Bombardment?*. *Icarus*, **190**, s. 203, 2007.
- [17] BOTTKÉ, W. F., RUBINCAM, D. P., BURNS, J. A.: *Dynamical evolution of main belt meteoroids: Numerical simulations incorporating planetary perturbations and Yarkovsky thermal forces*. *Icarus*, **145**, s. 301–331, 2000.
- [18] BOTTKÉ, W. F., VOKROUHLICKÝ, D., NESVORNÝ, D.: *An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor*. *Nature*, **449**, 7158, s. 48–53.

- [19] BOTTKÉ, W. F. aj.: *Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects*. *Icarus*, **156**, 2, s. 399–433, 2002.
- [20] BOWELL, T.: *AstOrb* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>).
- [21] BRASSER, R., MORBIDELLI, A., GOMES, R., TSGANIS, K., LEVISON, H. F.: *Constructing the secular architecture of the solar system II: the terrestrial planets*. *Astron. Astrophys.*, **507**, s. 1053–1065, 2010.
- [22] BROŽ, M.: *Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System*. Dizertační práce, Karlova univerzita, Praha, 2006.
- [23] BROŽ, M.: *Yarko-site* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/mp/>).
- [24] BROŽ, M. aj.: *Planetární stezka v Hradci Králové* [online]. [cit. 2008-12-10]. ([http://www.astrohk.cz/planetarni\\_stezka/](http://www.astrohk.cz/planetarni_stezka/)).
- [25] BROŽ, M., NOSEK, M., TREBICHAŤSKÝ, J., PECINOVÁ, D. (editoři): *Sluneční hodiny na pevných stanovištích. Čechy, Morava, Slezsko a Slovensko*. Praha: Academia, 2004. ISBN 8020012044.
- [26] BRUNS, H., *Acta Math.*, **11**, s. 25, 1887.
- [27] BURBINE, T. H. aj.: *Meteoritic parent bodies: their number and identification*. in *Asteroids III*, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, a R. P. Binzel (eds), Tuscon: University of Arizona Press, 2002, s. 653–667.
- [28] BURNS, J. A., LAMY, P. L., SOTER, S.: *Radiation forces on small particles in the Solar System*. *Icarus*, **40**, s. 1–48, 1979.
- [29] BURNS, J. A., SAFRONOV, V. S.: *Asteroid nutation angles*. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **165**, 403, 1973.
- [30] CALLIGAN, D. P., BAGGLEY, W. J.: *The radiant distribution of AMOR radar meteors*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **359**, s. 551–560, 2005.
- [31] CANUP, R. M.: *Origin of Saturn's rings and inner moons by mass removal from a lost Titan-sized satellite*. *Nature*, **468**, s. 943, 2010.
- [32] CAPITAINE, N. aj.: *Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions*. IERS Technical Note No. 29. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2002.
- [33] CARROL, S. M.: *Lecture Notes on General Relativity* [online]. [cit. 2010-03-08]. (<http://preposterousuniverse.com/grnotes/>).
- [34] CEPLECHA, Z.: *Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks*. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **38**, s. 222–234, 1987.
- [35] CEPLECHA, Z. aj.: *Meteor phenomena and bolides*. *Space Science Reviews*, **84**, s. 327–471, 1998.
- [36] *Cryovolcanism and Geologic Analogies* [online]. [cit. 2009-04-30]. (<http://mivo-sys.tripod.com/cryo.html>).
- [37] ČAPEK, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *The YORP effect with finite thermal conductivity*. *Icarus*, **172**, s. 526–536, 2004.
- [38] DONES, L., WEISSMAN, P. R., LEVISON, H. F., DUNCAN, M. J.: *Oort cloud formation and dynamics*. in *Comets II*, M. C. Festou, H. U. Keller, H. A. Weaver (eds.), University of Arizona Press, Tucson, s. 153–174. 2004.
- [39] *Earthquakes* [online]. [cit. 2010-03-01]. (<http://pubs.usgs.gov/gip/earthq1/plate.html>).
- [40] *Encyclopedia Britannica. Hadley cell* [online]. [cit. 2010-02-24]. (<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/251175/Hadley-cell>).

- [41] *Encyclopedia Britannica. Navigation* [online]. [cit. 2011-05-29]. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/407011/navigation>.
- [42] ESPOSITO, L. W.: *Planetary rings. Reports on Progress in Physics*, **65**, s. 1741–1783, 2002.
- [43] FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D., HARTMANN, W. K.: *Meteorite delivery via Yarkovsky orbital drift. Icarus*, **132**, s. 378–387, 1998.
- [44] FOUCHARD, M. aj.: *The key role of massive stars in Oort cloud comets dynamics. Icarus*, in press, 2011.
- [45] FOUKAL, P. V.: *Solar Astrophysics*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. ISBN 3527403744.
- [46] FRANKEL, C.: *Volcanoes of the Solar System*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996. ISBN 0521477700.
- [47] GABZDYL, P.: *Prohlídka Měsíce* [online]. [cit. 2009-02-05]. <http://www.moon.astronomy.cz/>.
- [48] *Geologischer Wanderweg im Steinheimer Becken* [online]. [cit. 2003-1-1]. <http://www.pg.aa.bw.schule.de/aktiv/geoproj/sbecken/wanderfr.htm>.
- [49] GOMES, R., LEVISON, H. F., TSGANIS, K., MORBIDELLI, A.: *Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. Nature*, **435**, s. 466, 2005.
- [50] *GPS SPS Signal Specification* [online]. [cit. 2011-05-25]. <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpspsps1.pdf>.
- [51] GRADY, M. M.: *Catalogue of meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0521663032.
- [52] *Gravity Probe B* [online]. [cit. 2010-04-01]. <http://einstein.stanford.edu/>.
- [53] GROSCHOFF, P., REIFF, W.: *Der geologische Wanderweg im Steinheimer Becken*. Steinheim am Albuch, 1993.
- [54] GÜDEL, M.: *The Sun in time: activity and environment* [online]. [cit. 2010-01-26]. *Living Rev. Solar Phys.*, **4**, 2007.
- [55] HACAR, B.: *Mechanika sluneční soustavy*. Praha: Jednota československých matematiků a fyziků, 1948.
- [56] HAGIHARA, Y.: *Celestial Mechanics I*. Cambridge: MIT Press, 1970.
- [57] HALODA, J.: *Meteority a jejich význam pro studium procesů vzniku a vývoje těles sluneční soustavy* [online]. [cit. 2009-01-29]. <http://astro.mff.cuni.cz/vyuka/AST021/index.html>.
- [58] HAMILTON, A.: *Falling into a black hole* [online]. [cit. 2010-03-17]. <http://casa.colorado.edu/~ajsh/schw.shtml>.
- [59] HARMANEC, P., BROŽ, M.: *Stavba a vývoj hvězd* [online]. [cit. 2011-05-31]. <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/astrofyzika2/>, 2011.
- [60] HIRAYAMA, K.: *Groups of asteroids probably of common origin. Astron. J.*, **31**, 743, s. 185–188, 1918.
- [61] HOLMES, N.: *‘Shocking’ gas-gun experiments* [online]. [cit. 2008-11-13]. <https://www.llnl.gov/str/Holmes.html>.
- [62] HOLSAPPLE, K. aj.: *Asteroid spin data: no evidence of rubble-pile structures*. 36th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas, 2005.
- [63] HORSKÝ, J., NOVOTNÝ, J., ŠTEFANÍK, M.: *Mechanika ve fyzice*. Praha: Academia, 2001. ISBN 8020002081.
- [64] HOWE, R.: *Solar internal rotation and its variation* [online]. [cit. 2010-01-26]. *Living Rev. Solar Phys.*, **6**, 2009.
- [65] HUTCHISON, R.: *Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521035392.
- [66] CHAMBERS, J. E.: *Planetary Migration: What Does It Mean for Planet Formation?. Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **37**, s. 321–344, 2009.
- [67] CHANDRASEKHAR, S.: *The Mathematical Theory of Black Holes*. New York: Oxford University Press, 1998. ISBN 0198503709.
- [68] CHARBONNEAU, D. aj.: *Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star. Astrophys. J. Let.*, **529**, 1, s. L45–L48, 2000.
- [69] CHARBONNEAU, P.: *Dynamo models of the solar cycle* [online]. [cit. 2010-01-26]. *Living Rev. Solar Phys.*, **2**, 2005.
- [70] CHARNOZ, S., MORBIDELLI, A., DONES, L., SALMON, J.: *Did Saturn’s rings form during the Late Heavy Bombardment?. Icarus*, **199**, s. 413, 2009.
- [71] CHESLEY, S. R., aj.: *Direct detection of the Yarkovsky effect by radar ranging to asteroid 6489 Golevka. Science*, **302**, s. 1739–1742, 2003.
- [72] CHLUPÁČ, I. aj.: *Geologická minulost České republiky*. Praha: Academia, 2002.
- [73] CHRISTENSEN-DALSGAARD, J.: *Stellar Oscillations* [online]. [cit. 2010-01-26]. <http://www.eneas.info/>. 2003.
- [74] *IAU Standards of Fundamental Astronomy* [online]. [cit. 2011-05-25]. <http://www.iausofa.org/>.
- [75] *International Earth Rotation and Reference Systems Service* [online]. [cit. 2008-11-13]. <http://www.iers.org/>.
- [76] *IERS Rapid Service* [online]. [cit. 2011-05-25]. <http://maia.usno.navy.mil/>.
- [77] IVEZIĆ, Ž. aj.: *Solar System objects observed in the Sloan Digital Sky Survey commissioning data. Astron. J.*, **122**, 5, s. 2749–2784, 2001.
- [78] JENNISKENS, P.: *Meteor showers and their parent comets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521853491.
- [79] JOHANSENN, A. aj.: *Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks. Nature*, **448**, 7157, s. 1022–1025, 2007.
- [80] JOHNSON, C.: *Precession of a gyroscope and precession of the Earth’s axis* [online]. [cit. 2008-09-10]. <http://www.mb-soft.com/public/precess.html>.
- [81] *JPL Horizons system* [online]. [cit. 2008-09-30]. <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>.
- [82] *JPL planetary and lunar ephemerides, DE405* [online]. [cit. 2008-09-30]. <ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/>.
- [83] KAASALAINEN, M. aj.: *Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques. Nature*, **446**, 7134, s. 420–422, 2007.
- [84] KALAS, P. aj.: *Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth. Science*, **322**, 5906, 1345, 2008.
- [85] KAVASCH, J.: *The Ries Meteorite Crater. A geological guide*. Donauwörth: Ludwig Auer GmbH, 1985.
- [86] KELLEY, M. S.: *Comet dust trails* [online]. [cit. 2009-01-31]. <http://www.physics.ucf.edu/~msk/projects/trails/>.
- [87] KENKMAN, T. aj.: *Structure and formation of a central uplift: A case study at the Upheaval Dome impact crater, Utah*. in Large Meteorite Impacts III, s. 85, 2003. ISBN 0813723841.
- [88] KERR, R. P.: *Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics. Phys. Rev. Lett.*, **11**, s. 237–238, 1963.
- [89] KNUTSON, H. aj.: *A map of the day–night contrast of the extrasolar planet HD 189-733b. Nature*, **447**, 7141, s. 183–186, 2007.
- [90] KOZAI, Y.: *Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity. Astron. J.*, **67**, 9, 591, 1962.

- [91] KRING, D. A., BAILEY, J.: *Terrestrial impact craters* [online]. [cit. 2008-11-13]. ([http://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo\\_web/impact\\_cratering/World\\_Craters\\_web/intromap.html](http://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo_web/impact_cratering/World_Craters_web/intromap.html)).
- [92] KRONK, G.: *Cometography* [online]. [cit. 2009-01-20]. (<http://cometography.com/>).
- [93] LAURETTA, D. S., MCSWEEN, H. Y. (editoři): *Meteorites and the early Solar System II*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2006. ISBN 0816525625.
- [94] LEINHARDT, Z. M., MARCUS, R. A., STEWART, S. T.: *The Formation of the Collisional Family Around the Dwarf Planet Haumea*. *Astrophys. J.*, **714**, s. 1789, 2010.
- [95] LEVISON, H. F.: *Hal's talks* [online]. [cit. 2011-05-03]. (<http://www.boulder.swri.edu/~hal/talks.html>), 2006.
- [96] LEVISON, H. F., DUNCAN, M.: *Swift* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://www.boulder.swri.edu/~hal/swift.html>).
- [97] LEVISON, H. F., MORBIDELLI, A., VANLAERHOVEN, C., GOMES, R., TSIGANIS, K.: *Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune*. *Icarus*, **196**, s. 258, 2008.
- [98] MALHOTRA, R.: *The origin of Pluto's orbit: implications for the Solar System beyond Neptune*. *Astron. J.*, **110**, s. 420–429, 1995.
- [99] MANNINGS, V., BOSS, A. P., RUSSELL, S. S. (editoři): *Protostars and planets IV*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2000. ISBN 0816520593.
- [100] MARCAN, S.: *Phase diagram explanation* [online]. [cit. 2009-01-20]. (<http://bhs.smuhsd.org/science-dept/marcan/>).
- [101] MARCY, G. aj.: *Observed Properties of Exoplanets. Progress on Theoretical Physics Supplement*, **158**, s. 24–42, 2005.
- [102] MAROIS, C. aj.: *Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799*. *Science*, **322**, 5906, 1348, 2008.
- [103] MAYOR, M., QUELOZ, D.: *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*. *Nature*, **378**, 6555, s. 355–359, 1995.
- [104] MCARTHUR, B. E. aj.: *New Observational Constraints on the  $\nu$  Andromedae System with Data from the Hubble Space Telescope and Hobby–Eberly Telescope*. *Astrophys. J.*, **715**, 2, s. 1203, 2010.
- [105] MCFADDEN, L.–A., WEISSMAN, P. R., JOHNSON, T. V. (editoři): *Encyclopedia of the Solar System*. San Diego: Academic Press, 2007. ISBN 012088589.
- [106] MCSWEEN, H. Y.: *Meteorites and their parent planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [107] *MIAC. Antarctic meteorites* [online]. [cit. 2009-01-28]. (<http://miac.uqac.ca/MIAC/antarc.htm>).
- [108] MILANI, A., KNEŽEVIĆ, Z.: *Asteroid proper elements and the dynamical structure of the asteroid main belt*. *Icarus*, **107**, 2, s. 219–254, 1994.
- [109] *Minor planet & comet ephemeris service* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://www.cfa.harvard.edu/iau/MPEph/MPEph.html>).
- [110] MISNER, C. W., THORNE, K. S., WHEELER, J. A.: *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1973. ISBN 0716703440.
- [111] MORBIDELLI, A., BRASSER, R., GOMES, R., LEVISON, H. F., TSIGANIS, K.: *Evidence from the asteroid belt for a violent past evolution of Jupiter's orbit*. *Astron. J.*, **149**, s. 1391–1401, 2010.
- [112] MORBIDELLI, A., BRASSER, R., TSIGANIS, K., GOMES, R., LEVISON, H. F.: *Constructing the secular architecture of the solar system I. The giant planets*. *Astron. Astrophys.*, **507**, s. 1041–1052, 2009.
- [113] MORBIDELLI, A., CRIDA, A.: *The dynamics of Jupiter and Saturn in the gaseous protoplanetary disk*. *Icarus*, **191**, s. 158–171, 2007.
- [114] MORBIDELLI, A., CRIDA, A., MASSET, F., NELSON, R. P.: *Building giant-planet cores at a planet trap*. *Astron. Astrophys.*, **478**, s. 929–937, 2008.
- [115] MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F.: *Scenarios for the origin of the orbits of the trans-neptunian objects 2000 CR<sub>105</sub> and 2003 VB<sub>12</sub> (Sedna)*. *Astron. J.*, **128**, 2564, 2004.
- [116] MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F., TSIGANIS, K., GOMES, R.: *The chaotic capture of Jovian Trojan asteroids during the early dynamical evolution of the Solar System*. *Nature*, **435**, s. 462, 2005.
- [117] MORBIDELLI, A., TSIGANIS, K., CRIDA, A., LEVISON, H. F., GOMES, R.: *Dynamics of the giant planets of the Solar System in the gaseous protoplanetary disk and their relationship to the current orbital architecture*. *Astron. J.*, **134**, s. 1790–1798, 2007.
- [118] MORBIDELLI, A. aj.: *Source regions and timescales for the delivery of water to Earth*. *Meteoritics & Planetary Science*, **35**, 6, s. 1309–1320, 2000.
- [119] NAMOUNI, F., PORCO, C.: *The confinement of Neptune's ring arcs by the moon Galatea*. *Nature*, **417**, 6884, s. 45, 2002.
- [120] *National Space Science Data Center* [online]. [cit. 2009-02-17]. (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>).
- [121] NESVORNÝ, D., MORBIDELLI, A.: *Three-body mean motion resonances and the chaotic structure of the asteroid belt*. *Astron. J.*, **116**, 3029, 1998.
- [122] NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *Analytic theory of the YORP effect for near-spherical objects*. *Astron. J.*, **134**, 5, s. 1750–1768, 2007.
- [123] NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D., BOTTKÉ, W. F.: *The breakup of a Main-Belt asteroid 450 thousand years ago*. *Science*, **312**, s. 1490, 2006.
- [124] NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D., MORBIDELLI, A.: *Capture of Irregular Satellites during Planetary Encounters*. *Astron. J.*, **133**, s. 1962, 2007.
- [125] NESVORNÝ, D. aj.: *Evidence for asteroid space weathering from the Sloan Digital Sky Survey*. *Icarus*, **173**, 1, s. 132–152, 2005.
- [126] NEUKUM, G., IVANOV, B. A., HARTMANN, W. K.: *Cratering records in the inner Solar System in relation to the lunar reference system*. *Space Sci. Rev.*, **96**, s. 55–86, 2001.
- [127] NORTON, O. R.: *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. ISBN 0521621437.
- [128] O'BRIEN, D. P., MORBIDELLI, A., BOTTKÉ, W. F.: *The primordial excitation and clearing of the asteroid belt — Revisited*. *Icarus*, **191**, s. 434, 2007.
- [129] ÖPIK, E. J.: *Collision probability with the planets and the distribution of planetary matter*. *Proc. R. Irish Acad.*, **54**, s. 165–199, 1951.
- [130] OSTRO, S. J. aj.: *Radar imaging of binary near-Earth asteroid (66391) 1999 KW<sub>4</sub>*. *Science*, **314**, 5803, s. 1276–1280, 2006.
- [131] PECINA, P., CEPLECHA, Z.: *New aspects of in single-body meteor physics*. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **34**, 102, 1983.
- [132] PECINA, P., NOVÁKOVÁ, D.: *Meteorický radar v Ondřejově. Povětroň*, **10**, 6, s. 4, 2002.
- [133] PECHALA, F., BEDNÁŘ, J.: *Příručka dynamické meteorologie*. Praha: Academia, 1991. ISBN 8020001980.
- [134] PETERSON, C.: *A source mechanism for meteorites controlled by the Yarkovsky effect*. *Icarus*, **29**, s. 91–111, 1976.
- [135] POKORNÝ, Z.: *Astronomické algoritmy pro kalkulátory*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 1988.
- [136] PÖSGES, G., SCHIEBER, M.: *The Ries Crater – Museum Nördlingen*. München: Dr. Friedrich Pfeil, 1997.

- [137] PRAVEC, P. aj.: *Two-period lightcurves of 1996 FG3, 1998 PG, and (5407) 1992 AX: One probable and two possible binary asteroids. Icarus*, **146**, 1, s. 190–203, 2000.
- [138] PRAVEC, P. aj.: *Ondřejov Asteroid Photometry Project* [online]. [cit. 2008-09-09]. (<http://www.asu.cas.cz/~ppravec/>).
- [139] PRESS, W. R., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W., FLANNERY, B.P.: *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [140] PŘÍHODA, P. aj.: *Hvězdářská ročenka 2008*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 2007. ISBN 9788086017471.
- [141] QUINN, T. R., TREMAINE, S., DUNCAN, M.: *A three million year integration of the earth's orbit. Astron. J.*, **101**, s. 2287–2305, 1991.
- [142] *Reduce* [online]. [cit. 2010-03-08]. (<http://www.reduce-algebra.com/>).
- [143] *Rieskrater–Museum Nördlingen* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www.iaag.geo.uni-muenchen.de/sammlung/Rieskrater/RieskraterMuseum.html>).
- [144] RIVERA, E. J. aj.: *The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: a Uranus-Mass Fourth Planet for GJ 876 in an Extrasolar Laplace Configuration. Astrophys. J.*, **719**, s. 890, 2010.
- [145] ROBERTSON, H. P.: *Dynamic effects of radiation in the Solar System. Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **97**, 423, 1937.
- [146] RUBIN, A. E.: *Mineralogy of meteorite groups. Meteoritics and Planetary Science*, **32**, 231, 1997.
- [147] RUBINCAM, D. P.: *Polar wander on Triton and Pluto due to volatile migration. Icarus*, **163**, 2, s. 63–71, 2002.
- [148] RUSSEL, C. T. aj.: *Dawn mission and operations. Asteroids, Comets, Meteors 2005*, editoři Lazzaro, D., Ferraz-Mello, S., Fernandez, J. A., Cambridge: Cambridge University Press, 2006, s. 97–119.
- [149] SACKMANN, I. J., BOOTHROYD, A. I., KRAEMER, K. E.: *Our Sun. III. Present and future. Astrophys. J.*, **418**, s. 457–468, 1993.
- [150] SEPKOSKI, J. J.: *Ten years in the library: New data confirm paleontological patterns. Paleobiology*, **19**, s. 43–51, 1993.
- [151] SCHNEIDER, J. aj.: *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* [online]. [cit. 2011-06-01]. (<http://exoplanet.eu/>).
- [152] SIMPSON, E. K. aj.: *The spin-orbit angles of the transiting exoplanets WASP-1b, WASP-24b, WASP-38b and HAT-P-8b from Rossiter–McLaughlin observations. Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **???**, s. ???, 2011.
- [153] SKÁLA, L.: *Úvod do kvantové mechaniky*. Praha: Academia, 2005. ISBN 8020013164.
- [154] SKÁLA, R.: *Impact process: An important geological phenomenon. Acta Mus. Nat-Pragae, Ser. B., Hist. Nat.*, **52**, s. 111–156, 1996.
- [155] SPURNÝ, P.: *Fotografické sledování bolidů ve střední Evropě. Corona Pragensis*, **2**, 2001, (<http://praha.astro.cz/crp/0101a.phtml>).
- [156] *Stardust, JPL, NASA* [online]. [cit. 2006-06-01]. (<http://stardust.jpl.nasa.gov>).
- [157] STAUDACHER, T. aj.:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of rocks and glasses from the Noerdlinger Ries crater and the temperature history of impact breccias. *J. of Geophysics*, **51**, 1, s. 1–11, 1982.
- [158] STIX, M.: *The Sun. An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 2002. ISBN 3540537961.
- [159] STUART, J. S.: *A Near-Earth asteroid population estimate from the LINEAR Survey. Science*, **294**, 5547, s. 1691–1693, 2001.
- [160] SUNDMAN, K. E.: *Memoire sur le probleme de trois corps. Acta Math.*, **36**, s. 105–179, 1912.
- [161] ŠEDIVÝ, P.: *Kapitoly ze speciální teorie relativity*. Hradec Králové: MAFY, 2003. ISBN 8086148653.
- [162] ŠIDLICHOVSKÝ, M., NESVORNÝ, D.: *Frequency modified Fourier transform and its applications to asteroids. Cel. Mech. Dyn. Astron.*, **65**, 1–2, s. 137–148, 1996.
- [163] TILLOTSON, J. H.: *Metallic equations of state for hypervelocity impact*. General Atomic Report GA-3216, 1962.
- [164] *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty* [online]. [cit. 2011-05-31]. (<http://physics.nist.gov/constants>).
- [165] *The Ries/Steinheim impact crater field trip* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www.-earthsciences.ucl.ac.uk/research/planetaryweb/field/knodle.htm>).
- [166] *The STScI Digitized Sky Survey* [online]. [cit. 2010-02-15]. ([http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss\\_form](http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form)).
- [167] TSIGANIS, K., GOMES, R., MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F.: *Origin of the orbital architecture of the giant planets of the solar system. Nature*, **435**, s. 459, 2005.
- [168] TUČEK, K.: *Meteority a jejich výskyty v Československu*. Praha: Academia, 1981.
- [169] UDRY S., SANTOS, N. C.: *Statistical Properties of Exoplanets. Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **45**, s. 397–439, 2007.
- [170] VERNAZZA, J. E., AVRETT, E. H., LOESER, R.: *Structure of the solar chromosphere. III — Models of the EUV brightness components of the quiet-sun. Astrophys. J. Suppl.*, **45**, s. 635, 1981.
- [171] VOKROUHLICKÝ, D.: *A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments. Astron. Astrophys.*, **344**, s. 362–366, 1999.
- [172] VOKROUHLICKÝ, D., FARINELLA, P.: *Efficient delivery of meteorites to the Earth from a wide range of asteroid parent bodies. Nature*, **407**, 6804, 606, 2000.
- [173] VOKROUHLICKÝ, D., NESVORNÝ, D.: *Pairs of asteroids probably of a common origin. Astron. J.*, **136**, 1, s. 280–290, 2008.
- [174] VOKROUHLICKÝ, D., aj.: *Yarkovsky/YORP chronology of asteroid families. Icarus*, **182**, 1, s. 118–142, 2006.
- [175] WALSH, K., MORBIDELLI, A., RAYMOND, S. N., O'BRIEN, D. P., MANDELL, A. M.: *The Low Mass of Mars: First Evidence of Early Gas-Driven Migration by Jupiter. American Geophysical Union Meeting*, abstrakt V53A-2233, 2010.
- [176] WANG, Z., CHAKRABARTY, D., KAPLAN, D. L.: *A debris disk around an isolated young neutron star. Nature*, **440**, s. 772, 2006.
- [177] WEIDENSCHILLING, S. J.: *Formation of Planetesimals and Accretion of the Terrestrial Planets. Space Science Reviews*, **92**, 1/2, s. 295–310, 2000.
- [178] *Wikipedia* [online]. [cit. 2008-04-10]. (<http://www.wikipedia.org/>).
- [179] WHIPPLE, F.: *A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. Astrophys. J.*, **111**, s. 375–394, 1950.
- [180] WOLF, M. aj.: *Astronomická příručka*. Praha: Academia, 1992. ISBN 802000467X.
- [181] WOLSZCZAN, A., FRAIL, D. A.: *A planetary system around the millisecond pulsar PSR 1257+12. Nature*, **355**, 6356, s. 145–147, 1992.
- [182] ZEĽDOVITCH, Ya. B., Raizer, Yu. P.: *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*. Mineola: Dover Publications, 2002. ISBN 0486420027.
- [183] ZHONG, S., ZUBER, M. T.: *Degree-1 mantle convection and the crustal dichotomy on Mars. Earth and Planetary Science Letters*, **189**, s. 75–84, 2001.
- [184] ASAY, J. R., SHAHINPOOR, M. (editoři): *High-pressure shock compression of solids*. Berlin: Springer-Verlag, 1993.