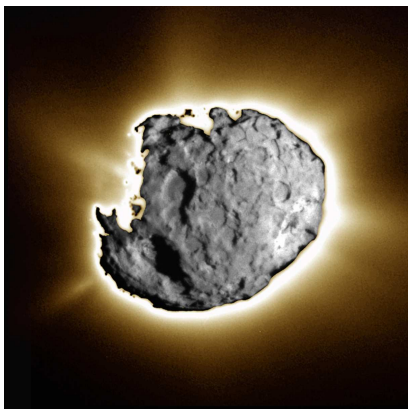


0.1 Negravitační zrychlení

0.1.1 Komety

Exemplárními příklady, kde negravitační síly hrají velkou roli, jsou komety (obr. 1). Fungují tak, že elektromagnetické záření Slunce je pohlceno povrchem jádra komety a způsobí v něm zvýšení vnitřní energie (kinetické energie molekul). Tím se vybudí elektromagnetické vazby mezi molekulami natolik, že pevná látka *změní skupenství* na plyn (rozpadne se krystalová mřížka vodního ledu), a pak se naplno projeví elektromagnetická odpudivá síla mezi molekulami plynu. V okolí komety totiž existuje *gradient tlaku* (okolo je vakuum s $p \doteq 0$), který plyn nutí k rozpínání. Přitom se strhávají i prachová zrníčka. Podle III. Newtonova zákona akce a reakce je změna hybnosti plynu a prachu kompenzována změnou hybnosti jádra komety. Říká se tomu *raketový jev*. Protože k ohřevu a k výtryskům dochází na denní straně komety, je před průchodem perihéliem kometa brzděna (neboť výtrysky směřují spíše proti směru pohybu) a po průletu naopak urychlována. Protože komety bývají aktivnější až po průletu perihéliem, převažuje ono urychlování v dráze.



Obr. 1 — Složený snímek komety 81P/Wild 2 pořízený sondou Stardust 2. ledna 2004. Krátká expozice ukazuje povrchovou topografii a dlouhá expozice několik aktivních výtrysků. Jádro má průměr přibližně 5 kilometrů. Převzato z [116].

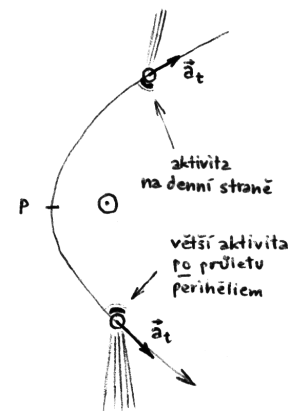
Pohyb komety ovlivněný raketovým jevem se obvykle popisuje následující rovnicí:

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{GM_{\odot}}{r^2}\hat{\mathbf{r}} + \nabla\mathcal{R} + A_1\eta(r)\hat{\mathbf{r}} + A_2\eta(r)\hat{\mathbf{T}} + A_3\eta(r)\hat{\mathbf{n}}, \quad (1)$$

kde:

$$\eta(r) = \eta_1 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\eta_2} \left(1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^{\eta_3}\right)^{-\eta_4}. \quad (2)$$

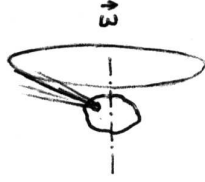
\mathbf{r} označuje heliocentrický polohový vektor komety, $\nabla\mathcal{R}$ gradient poruchové funkce vyjadřující gravitační perturbace od planet. A_1 , A_2 , A_3 jsou koeficienty negravitačních zrychlení ve směrech jednotkových vektorů $\hat{\mathbf{r}}$ (radiálně od Slunce), $\hat{\mathbf{T}}$ (kolmo na $\hat{\mathbf{r}}$ v rovině dráhy) a $\hat{\mathbf{n}}$ (kolmo k rovině dráhy). Tyto koeficienty se určují pro každou kometu zvlášť (a jsou i součástí katalogů drah).¹



Obr. 2 — Aktivita komety na denní straně jádra, situace před a po průletu perihéliem. Plynoprachové výtrysky z jádra směřují ke Slunci, ale interakce plynu a prachu s přímým tlakem záření a slunečním větrem posléze způsobují, že ohony komet směřují od Slunce.

Přesnější popis zrychlení některých komet umožňuje novější *model rotujícího výtrysku* (Chesley a Yeomans, 2005). Předpokládá, že na jádře komety je jeden aktivní výtrysk, jenž se s jádrem otáčí okolo osy a jehož aktivita je modulována slunečním zářením (obr. 3).

¹ Hodnota A_1 je obecně mnohem větší než A_2 , protože většina plynu je uvolňována poblíž subsolárního bodu. Pohybový účinek radiálně působící síly ale není tak významný, protože před průchodem perihéliem kinetickou energii komety snižuje a po průchodu opět zvyšuje. Naopak tangenciální složka $A_2\eta(R)\hat{\mathbf{T}}$ způsobuje pro prográdně rotující jádra vždy zvyšování kinetické energie. Třetí komponenta negravitační síly, s koeficientem A_3 , je často zcela zanedbatelná. Pro kometu Hale–Bopp mají negravitační parametry hodnoty $A_1 = +1,27$, $A_2 = +0,1144$. Změny aktivity komety s heliocentrickou vzdáleností jsou aproximovány funkcí $\eta(r)$. Pro vodní led se v současnosti používají následující hodnoty koeficientů ??: $r_0 = 2,808$ AU; $\eta_1 = 0,111$ 262; $\eta_2 = 2,15$; $\eta_3 = 5,093$; $\eta_4 = 4,6142$.



Obr. 3 — Výtrysk z kometárního jádra, který při rotaci opisuje plášť kužele.

Skutečnost, že sublimace ledu neprobíhá z celého povrchu kometárního jádra, ale je lokalizovaná je ostatně zřejmá už ze spektroskopie. Rovnovážná teplota T_{eq} povrchu komety (určená ze vztahu ??) totiž vychází asi 300 K při $r_{\odot} = 1 \text{ AU}$. Měření maximum vyzařování (v IR oboru) ale také odpovídá teplotě okolo 300 K! Přitom kdyby se (na významné části povrchu) měnilo skupenství látky, musela by se část energie slunečního záření spotřebovávat a povrch by se tak efektivně *ochlazoval* na teplotu o 100 K nižší, což je spor.

0.1.2 Planetky a prach

V případě planetek nás bude zajímat mnohem subtilnější elektromagnetický jev. Funguje takto: každé těleso má *nenulovou termodynamickou teplotu*, tudíž může emitovat fotony (zejména infračervené) odnášející hybnost $p = E/c = hf/c$. Pokud je *emise záření neizotropní* (planetka je šišatá, nemá všude stejnou teplotu), vzniká tak negravitační zrychlení, jehož výsledné projevy na dráhovou dynamiku nazýváme *Jarkovského jev*, a případně moment síly měnící rotaci, což se v literatuře označuje jako *YORP jev*. Podrobně jsou oba jevy popsány v následující kapitole ??.

Pro prachové částice je nejvýznamnější *Poyntingův–Robertsonův jev*, který lze přiblížit jako aberaci slunečního záření (obr. 4): více fotonů dopadá na pohybující se částici zřepředu, čímž ji brzdí a nutí ji spirálovat směrem ke Slunci. Celkové radiační zrychlení lze vyjádřit jako [2]:

$$\mathbf{a}_{\text{rp}} = (Q_{\text{ab}} + gQ_{\text{sc}}) \frac{\Phi S}{mc} \left(\hat{\mathbf{r}} - \frac{\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{v}}{c} \hat{\mathbf{r}} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) + \mathcal{O}(v^2/c^2), \quad (3)$$

kde Q_{ab} , Q_{sc} označují účinnosti absorpce a rozptylu, g vyjadřuje asymetrii mezi rozptylem dopředu ($g = 0$) a dozadu ($g = 2$), Φ tok záření, S průřez tělesa, m jeho hmotnost a c rychlost světla. První člen v závorce reprezentuje přímý tlak záření, druhý odpovídá změně energie záření Dopplerovým jevem, poslední člen, mající opačný směr než rychlost \mathbf{v} , je Poyntingův–Robertsonův jev.

Odvození relativistického vzahu pro radiační sílu sleduje původní práce Robertsona (1937), pouze je změněna notace tak, aby odpovídala kap. ???. Nejprve budeme děj popisovat

v soustavě S' spojené s prachovou částicí, až později přejdeme do soustavy S spojené se Sluncem. Minkowskioho čtyřsila působící na částici v S' je definována jako:

$$F_{\text{M}}'^i \equiv \gamma_{v'} \left(\frac{\mathbf{v}' \cdot \mathbf{F}'}{c}, \mathbf{F}' \right) = (0, \mathbf{F}').$$

Záření nese hybnost $d\mathbf{p}' = \frac{dE'}{c} \mathbf{n}'$ ve směru jednotkového vektoru \mathbf{n}' . Celková hybnost záření plus částice se zachovává, takže při *úplné* absorpci záření částici se o stejnou hodnotu změní hybnost částice, čili na ni působí síla:²

$$\mathbf{F}' = \frac{d\mathbf{p}'}{dT'} = \frac{1}{c} \frac{dE'}{dT'} \mathbf{n}' = \frac{1}{c} \Phi' S \mathbf{n}',$$

kde Φ' označuje tok záření, S průřez částice. Výsledný vztah:

$$F_{\text{M}}'^i = \left(0, \frac{\Phi' S}{c} \mathbf{n}' \right) \quad (4)$$

se nám ale příliš nehodí pro transformaci do S ; museli bychom počítat složité Lorentzovy transformace. Ideálně bychom chtěli *vše* vyjádřit pomocí čtyřvektorů (nebo tenzorů), které se transformují snadno — prostě se opiší v nečárkovaných souřadnicích.

Máme zde čtyřrychlost částice (mající pouze časovou složku, neboť $\mathbf{v}' = 0$):

$$u'^i \equiv \gamma_{v'}(c, \mathbf{v}') = (1, 0, 0, 0), \quad (5)$$

čtyřrychlost záření (neboli nulový vektor, pro který platí $\eta_{ik} n'^i n'^k = 0$):

$$n'^i \equiv (n'^0, n'^0 \mathbf{n}'); \quad (6)$$

pro úplnost napíšeme i tenzor energie a hybnosti pro záření:

$$T'^{ik} = \Phi' \frac{n'^i n'^k}{(n'^0)^2}, \quad (7)$$

jehož složka $T'^{00} = \Phi'$ určuje hustotu energie, složky $T'^{10}, T'^{20}, T'^{30}$ hustotu hybnosti (v prostorovém směru \mathbf{n}'), atd.

Kdybychom chtěli ve výrazu (4) naivně použít pouze čtyřvektor n'^i a sestavili relativistickou pohybovou rovnici:

$$F_{\text{M}}'^i = \frac{\Phi' S}{c} \frac{n'^i}{n'^0} = \frac{dP'^i}{d\tau} \equiv \frac{d}{d\tau} \left(\frac{E'}{c}, \mathbf{p}' \right),$$

zjistili bychom, že *klidová* energie E' (složka 0 rovnice) má nenulovou derivaci! To je ale v rozporu s požadavkem, aby částice byla v rovnováze se zářením, tj. aby absorbovanou energii opět emitovala a aby klidová hmotnost částice byla konstantní. Proto musíme tento

² V klidové soustavě S' můžeme bez obav používat klasických (nerelativistických) vztahů pro interakci záření a částice; snadno bych zde popsali i částečnou absorpci a rozptyl, vyjádřené faktory Q_{ab} , gQ_{sc} .

růst kompenzovat druhým členem, přičemž využijeme čtyřvektor u^i (má totiž nenulovou právě jen složku 0):

$$F_M^i = \frac{\Phi' S}{c} \frac{n'^i}{n'^0} - \frac{\Phi' S}{c} u'^i. \quad (8)$$

Problémem zůstávají skaláry Φ' a n'^0 . Naštěstí je lze snadno získat jako skalární součiny čtyřvektorů (nebo tenzorů):

$$n'^0 = n'^i u'^i, \quad (9)$$

$$\Phi' = T'^{00} = T'^{ik} u'^i u'^k, \quad (10)$$

což už je plně kovariatní formulace!

V systému S tak můžeme rovnou psát:

$$F_M^i = \frac{T^{ik} u^i u^k S}{c} \frac{n^i}{n^i u^i} - \frac{T^{ik} u^i u^k S}{c} u^i. \quad (11)$$

Přejdeme-li od čtyřrozměrné formulace zpět k trojrozměrné:

$$\begin{aligned} F_M^i &\equiv \gamma_v \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{F}}{c}, \mathbf{F} \right), \\ u^i &\equiv \frac{\gamma_v}{c} (c, \mathbf{v}), \\ n^i &\equiv (n^0, n^0 \mathbf{n}) = (1, \mathbf{n}), \\ n^i u^i &= 1 \cdot \gamma_v + \mathbf{n} \cdot \frac{\gamma_v}{c} \mathbf{v} = \gamma_v \left(1 + \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

$$T^{ik} u^i u^k = \Phi \frac{n^i n^k}{(n^0)^2} u^i u^k = \Phi (n^i u^i)^2. \quad (13)$$

pro prostorové složky rovnice (11) platí:

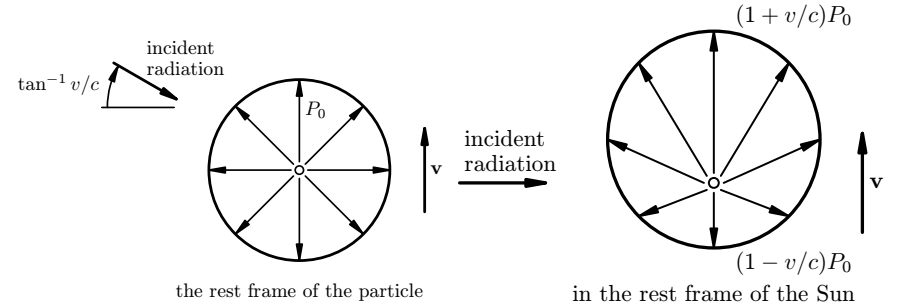
$$\frac{\Phi S}{c} \frac{\mathbf{F}}{\gamma_v} = \frac{\Phi S}{c} \left(1 + \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c} \right) \mathbf{n} - \frac{\Phi S}{c} \gamma_v^2 \left(1 + \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c} \right)^2 \frac{\mathbf{v}}{c},$$

neboli:

$$\mathbf{F} = \frac{\Phi S}{c} \left[\left(1 + \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c} \right) \mathbf{n} - \frac{\left(1 + \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c} \right)^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \frac{\mathbf{v}}{c} \right]. \quad (14)$$

Nakonec zanedbáme ve druhém členu vyšší mocniny v/c :³

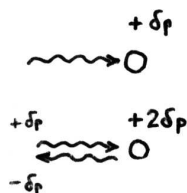
$$\mathbf{F} = \frac{\Phi S}{c} \left[\mathbf{n} - \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c} \mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right] + \mathcal{O}(v^2/c^2). \quad (15)$$



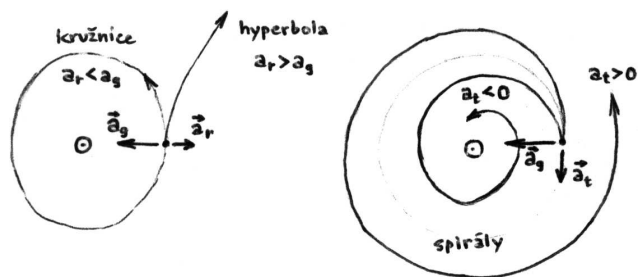
Obr. 4 — Poyntingův–Robertsonův jev nahlížený ve dvou souřadnicových soustavách: v soustavě spojené se Sluncem (vlevo) a v soustavě spojené s pohybující se částicí (vpravo). V prvním případě rozptyluje částice více záření (hybnosti) dopředu, a to z důvodu její nenulové rychlosti a Dopplerova jevu (rozptylový diagram je protažen dopředu). Ve druhém případě je rozptylování izotropní, ale sluneční záření je ovlivněno relativistickou aberací a dopadá na částici převážně zřepředu (rychlosti bývá řádu $v \simeq 10$ km/s, takže aberační úhel $\phi \simeq \frac{v}{c} \doteq 3 \cdot 10^{-5}$ rad $\doteq 7''$). Oba pohledy jsou ekvivalentní. Částice je zpomalována, spirálkuje směrem k Slunci a její dráha se stává kruhovou (tzn. že velká poloosa i excentricita klesají). Upraveno podle Burns aj. (1979). Odpovídající časovou škálu, za kterou částice spadne do Slunce, můžeme odhadnout ze vztahu: $\tau_d = 7 \times 10^6$ yr $\left(\frac{\rho}{\text{g/cm}^3} \right) \left(\frac{R}{\text{cm}} \right) \left(\frac{r}{\text{AU}} \right)^2$ (z Bertotti aj. (2003)).

Na „multý“ pohled by se mohlo zdát, že mnohem významější než Jarkovského jev nebo Poyntingův–Robertsonův jev je *přímý tlak slunečního záření* (obr. 5). V absolutní velikosti je sice zrychlení od přímého tlaku větší, nicméně na dráhovou dynamiku to nemá příliš velký vliv, protože zrychlení je přesně *radiální*, míří naproti gravitaci a jen nepatrně ji zmenšuje. Těleso tedy bude neustále obíhat okolo Slunce, jen o něco menší rychlostí. (Pouze u nejmenších prachových zrníček se může stát, že přímý tlak záření je *větší než gravitace*, a pak je samozřejmě vliv na dráhu zcela zásadní — zrníčko odletí po hyperbole ze sluneční soustavy.) Naproti tomu Jarkovského jev i Poyntingův–Robertsonův jev vykazují určitou nenulovou *transverzální* složku zrychlení, která po složení s gravitačním zrychlením Slunce způsobuje spirálování (obr. 6).

³ $(1+x)^2 = (1+2x+x^2) \doteq 1+2x$, $1-x^2 \doteq 1$



Obr. 5 — Kvalitativní popis přímého tlaku slunečního záření: při odrazu se hybnost fotonů změni o $2\delta p$, při absorpci pouze o jedno δp . Hybnost planetky se tedy podle zákona akce a reakce musí změnit o $-2\delta p$, resp. o $-\delta p$.



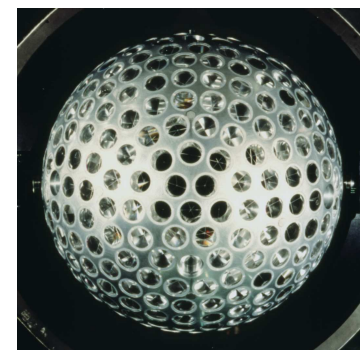
Obr. 6 — Pohybový účinek radiálního a transverzálního zrychlení působícího na planetku v gravitačním poli Slunce: v prvním případě je trajektorií kružnice (nebo hyperbola), ve druhém spirála.

0.1.3 Družice LAGEOS

Velikosti všech možných zrychlení budeme diskutovat na příkladu geodynamické družice LAGEOS, nikoli na přírodní planetce. Na této umělé družici Země lze totiž teorie ověřit měřením. Provádí se z pozemských stanic *laserovými dálkoměry*, které jsou schopné zaznamenávat vzdálenost $r(t)$ i rychlost $v(t)$. Družice je navíc pěkně kulatá, známe přesně vodivost jejího materiálu, tepelnou kapacitu, hmotnost, atd. (obr. 7).

Zjištěná okamžitá zrychlení, řazená podle velikosti, uvádí tab. 1. Na první pohled se může zdát podezřelé, že jsme schopni rozlišit zrychlení lišící se o deset řádů. Pointa je ale v tom, že pohybové účinky některých velkých zrychlení (např. slapů) pouze oscilují, ale u malých (např. Jarkovského jevu) se kumulují po dlouhou dobu! Navíc mívají různé jevy různé charakteristické periody. Observační mez pro sledování laserem je řádu $10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Největší je pochopitelně gravitační zrychlení od Země. Přesněji, potenciální energii (normovanou na jednotku hmotnosti) gravitačního pole „šišatě“ Země



Obr. 7 — Geodynamická družice LAGEOS — koule s poloměrem 30 cm a hmotností 410 kg, pokrytá 426 retro-reflektory, které umožňují její sledování lasery z pozemských observatoří. Obíhá ve výšce 5900 km nad Zemí. Viz též tab. 1. Převzato z [2].

obvykle rozvíjíme v řadu sférických harmonických funkcí $Y_{\ell m}(\vartheta, \varphi)$:

$$U(\mathbf{r}) = -\frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{\ell=1}^{\infty} \left(\frac{R_{\oplus}}{r} \right)^{\ell} \sum_{m=-\ell}^{\ell} U_{\ell m} Y_{\ell m}(\vartheta, \varphi) \right] \quad (16)$$

a rozlišujeme příspěvky od jednotlivých stupňů ℓ . Největší část zrychlení pochopitelně pochází od koule (monopólu s $\ell = 0$). Následuje kvadrupól ($\ell = 2$, $m = 0$ neboli zploštění elipsoidu), atd.⁴ Příspěvky vysokého stupně, například $\ell = 18$, bychom si mohli představit jako vliv rozložení jednotlivých kontinentů.

Všimněme si, že nikde není započteno přímé gravitační zrychlení od Slunce, ale jen příslušné *slapy*. Důvod je jednoduchý: Slunce přitahuje zároveň Zemi, kolem které družice obíhá, čili na družici má vliv pouze rozdíl mezi gravitací v místě Země a gravitací v místě družice. Totéž platí pro Měsíc i Venuši.

Slapy od Slunce a Měsíce působí ale i komplikovanějším způsobem: deformují Zemi i oceány, čímž se mění geopotenciál (16) a objevují se dodatečná zrychlení na LAGEOS. Tomuto působení říkáme *dynamické slapy*.

Naproti tomu *kinematické slapy* jsou sice také vyvolané deformacemi Země a oceánů, ale pouze mění polohy pozemských měřících stanic vzhledem k družici. Kinematické slapy (ani pohyb pólu Země, ani změny délky dne δLOD) tedy nejsou skutečná zrychlení působící na družici. Když je ovšem nezapočteme přímo, objeví se tyto jevy jako „*zdánlivá*“ *zrychlení* zdánlivé zrychlení v měřeném signálu (jako pozorovatelé se nacházíme v neinerciální soustavě).

Přesuny oceánů se dokonce projevují jako tlak na šelfy kontinentů, které pod tíhou vody klesají (řádově o 1 cm) a opět se mění poloha stanic. I tektonické

⁴ Dipólní členy rozvoje geopotenciálu ($\ell = 1$, $m = -1, 0, +1$) jsou ve vhodně zvolené souřadnicové soustavě nulové.

původ zrychlení	a ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	σ_a/a
monopól Země	2,65	$2\cdot 10^{-9}$
zploštění Země $\ell = 2, m = 0$	0,001	$7\cdot 10^{-8}$
geopotenciál $\ell, m = 2$	$5,8\cdot 10^{-6}$	$3\cdot 10^{-5}$
slapy Měsíce	$2,1\cdot 10^{-6}$	10^{-7}
pohyb pólu a změny délky dne δLOD	$\leq 10^{-6}$	
slapy Slunce	$9,6\cdot 10^{-7}$	$4\cdot 10^{-10}$
$\ell, m = 6$	$8,8\cdot 10^{-8}$	$7\cdot 10^{-4}$
dynamické slapy pevnin	$3,7\cdot 10^{-8}$	0,002
kinematické slapy pevnin	$5,8\cdot 10^{-9}$	0,03
dynamické slapy oceánů	$3,7\cdot 10^{-9}$	0,1
přímý tlak záření Slunce	$3,2\cdot 10^{-9}$	0,02
kinematické přesuny oceánů	10^{-9}	0,2
relativistické jevy	$9,5\cdot 10^{-10}$	$2\cdot 10^{-9}$
albedo Země	$3,4\cdot 10^{-10}$	1
slapy Venuše	$1,3\cdot 10^{-10}$	$3\cdot 10^{-7}$
Jarkovského/YORP jev	$5\cdot 10^{-11}$	0,1
$\ell, m = 18$	$6,9\cdot 10^{-12}$	$4\cdot 10^{-2}$
změny souřadnicového systému kvůli netuhé Zemi	$3,5\cdot 10^{-12}$	0,1
tření o atmosféru	$1\cdot 10^{-12}$	0,3–1
Poyntingův–Robertsonův jev	10^{-13}	0,1
impakty mikrometeoritů	10^{-13}	
fotoelektrický jev (UV záření \odot v ionosféře \oplus)	$< 10^{-13}$	

Tab. 1 — Zrychlení a působící na družici LAGEOS a jejich relativní neurčitosti σ_a/a . Na jiné objekty by samozřejmě působila jinak velká zrychlení. například družice na nízkých oběžných dráhách vykazují o mnoho řádů větší tření o atmosféru než LAGEOS. Meziplanetární sondy, jako je Cassini, vybavené termoelektrickými generátory, produkují dodatečné anizotropické infračervené záření a odpovídající zrychlení je řádu $10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Podle [2].

pohyby kontinentů (řádu 1 cm/rok) lze zjišťovat tímto způsobem, jako časově proměnnou polohu stanic.

Radiační jevy jsou spíše na konci tabulky: přímý tlak slunečního záření, Jarkovského jev a Poyntingův–Robertsonův jev. Existují dva důležité zdroje záření, Slunce a Země, se kterými se musí počítat, a to včetně stínění Země, vlivu polostínu (částečného zakrytí Slunce) nebo proměnlivého albeda zemského povrchu.

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] DE PATER, I., LISSAUER, J. J.: *Planetary Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. ISBN 0521482194.

Reference

- [4] ALVAREZ, L. W., ALVAREZ, W., ASARO, F., MICHEL, H. V.: *Extraterrestrial cause for the Cretaceous Tertiary extinction*. *Science*, **208**, s. 1095, 1980.
- [5] 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.
- [6] BERNARD, J. H., ROST, R. aj.: *Encyklopedický přehled minerálů*. Praha: Academia, 1992.
- [7] BOČEK, M.: *Petrologické složení povrchu a kůry Měsíce. Povětroň*, **14**, S1, 3, 2006.
- [8] BOTTKÉ, W. F., CELLINO, A., PAOLICCHI, P., BINZEL, R. P. (editoři): *Asteroids III*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2002. ISBN 0816522812.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] BOTTKÉ, W. F. aj.: *Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects*. *Icarus*, **156**, 2, s. 399–433, 2002.
- [12] BOWELL, T.: *AstOrb* [online]. [cit. 2008-09-30]. <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>.
- [13] BROŽ, M.: *Impaktní kráter Steinheim*. Povětroň S1/2003, s. 3–10.
- [14] BROŽ, M.: *Impaktní krátery (2) — Ries*. Povětroň 5/2001, s. 6–13.
- [15] BROŽ, M.: *Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System*. Dizertační práce, Karlova univerzita, Praha, 2006.
- [16] BROŽ, M.: *Yarko-site* [online]. [cit. 2008-09-30]. <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/yarko-site/>.
- [17] BROŽ, M. aj.: *Planetární stezka v Hradci Králové* [online]. [cit. 2008-12-10]. http://www.astrohk.cz/planetarni_stezka/.
- [18] BROŽ, M., NOSEK, M., TREBICHAŤSKÝ, J., PECINOVÁ, D. Editoři : *Sluneční hodiny na pevných stanovištích. Čechy, Morava, Slezsko a Slovensko*. Praha: Academia, 2004. ISBN 8020012044.
- [19] BRUNS, H., *Acta Math.*, **11**, s. 25, 1887.
- [20] BURBINE, T. H. aj.: *Meteoritic parent bodies: their number and identification*. in *Asteroids III*, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolich, a R. P. Binzel (eds), Tuscon: University of Arizona Press, 2002, s. 653–667.
- [21] BURNS, J. A., LAMY, P. L., SOTER, S.: *Radiation forces on small particles in the Solar System*. *Icarus*, **40**, s. 1–48, 1979.
- [22] BURNS, J. A., SAFRONOV, V. S.: *Asteroid nutation angles*. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **165**, 403, 1973.
- [23] CALLIGAN, D. P., BAGGLEY, W. J.: *The radiant distribution of AMOR radar meteors*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **359**, s. 551–560, 2005.
- [24] CARROL, S. M.: *Lecture Notes on General Relativity* [online]. [cit. 2010-03-08]. <http://preposterousuniverse.com/grnotes/>.
- [25] ČEPLCHA, Z.: *Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks*. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **38**, s. 222–234, 1987.
- [26] ČEPLCHA, Z. aj.: *Meteor phenomena and bolides*. *Space Science Reviews*, **84**, s. 327–471, 1998.
- [27] *Cryovolcanism and Geologic Analogies* [online]. [cit. 2009-04-30]. <http://mivo-sys.tripod.com/cryo.html>.
- [28] ČAPEK, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *The YORP effect with finite thermal conductivity*. *Icarus*, **172**, s. 526–536, 2004.
- [29] *Earthquakes* [online]. [cit. 2010-03-01]. <http://pubs.usgs.gov/gip/earthq1/plate.html>.
- [30] FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D., HARTMANN, W. K.: *Meteorite delivery via Yarkovsky orbital drift*. *Icarus*, **132**, s. 378–387, 1998.
- [31] FERNÁNDEZ, J. A.: *Comets. Nature, dynamics, origin and their cosmogonical relevance*. Dordrecht: Springer, 2005.
- [32] FESTOU, M. C., KELLER, H. U., WEAVER, H. A. (ed.): *Comets II*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2004.
- [33] FOUKAL, P. V.: *Solar Astrophysics*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. ISBN 3527403744.
- [34] FRANKEL, C.: *Volcanoes of the Solar System*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996. ISBN 0521477700.
- [35] GABZDYL, P.: *Prohlídka Měsíce* [online]. [cit. 2009-02-05]. <http://www.moon.astronomy.cz/>.
- [36] *Geologischer Wanderweg im Steinheimer Becken* [online]. [cit. 2003-1-1]. <http://www.pg.aa.bw.schule.de/aktiv/geoproj/sbecken/wanderfr.htm>
- [37] GRADY, M. M.: *Catalogue of meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0521663032.
- [38] *Gravity Probe B* [online]. [cit. 2010-04-01]. <http://einstein.stanford.edu/>.
- [39] GROSCHOFF, P., REIFF, W.: *Der geologische Wanderweg im Steinheimer Becken*. Steinheim am Albuch, 1993.
- [40] GÜDEL, M.: *The Sun in time: activity and environment* [online]. [cit. 2010-01-26]. *Living Rev. Solar Phys.*, **4**, 2007.
- [41] HACAR, B.: *Mechanika sluneční soustavy*. Praha: Jednota československých matematiků a fyziků, 1948.
- [42] *Hadley cell*. *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 2010-02-24]. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/251175/Hadley-cell>.
- [43] HAGIHARA, Y.: *Celestial Mechanics I*. Cambridge: MIT Press, 1970.
- [44] 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>.
- [45] HAMILTON, A.: *Falling into a black hole* [online]. [cit. 2010-03-17]. <http://casa.colorado.edu/~ajsh/schw.shtml>.

- [46] HARMANEC, P., BROŽ, M.: *Stauba a vývoj hvězd* [online]. [cit. 2010-01-26]. <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/astrofyzika2/>, 2010.
- [47] HIRAYAMA, K.: *Groups of asteroids probably of common origin*. *Astron. J.*, **31**, 743, s. 185–188, 1918.
- [48] HOLMES, N.: *‘Shocking’ gas-gun experiments* [online]. [cit. 2008-11-13]. <https://www.llnl.gov/str/Holmes.html>.
- [49] HOLSAPPLE, K. aj.: *Asteroid spin data: no evidence of rubble-pile structures*. 36th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas, 2005.
- [50] HORSKÝ, J., NOVOTNÝ, J., ŠTEFANÍK, M.: *Mechanika ve fyzice*. Praha: Academia, 2001. ISBN 8020002081.
- [51] HOWE, R.: *Solar internal rotation and its variation* [online]. [cit. 2010-01-26]. *Living Rev. Solar Phys.*, **6**, 2009.
- [52] HUTCHISON, R.: *Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521035392.
- [53] CHANDRASEKHAR, S.: *The Mathematical Theory of Black Holes*. New York: Oxford University Press, 1998. ISBN 0198503709.
- [54] CHARBONNEAU, P.: *Dynamo models of the solar cycle* [online]. [cit. 2010-01-26]. *Living Rev. Solar Phys.*, **2**, 2005.
- [55] CHESLEY, S. R., aj.: *Direct detection of the Yarkovsky effect by radar ranging to asteroid 6489 Golevka*. *Science*, **302**, s. 1739–1742, 2003.
- [56] CHLUPÁČ, I. aj.: *Geologická minulost České republiky*. Praha: Academia, 2002.
- [57] CHRISTENSEN-DALSGAARD, J.: *Stellar Oscillations* [online]. [cit. 2010-01-26]. <http://www.eneas.info/>. 2003.
- [58] *International Earth Rotation and Reference Systems Service* [online]. [cit. 2008-11-13]. <http://www.iers.org/>.
- [59] IVEZIĆ, Ž. aj.: *Solar System objects observed in the Sloan Digital Sky Survey commissioning data*. *Astron. J.*, **122**, 5, s. 2749–2784, 2001.
- [60] JENNISKENS, P.: *Meteor showers and their parent comets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521853491.
- [61] JOHANSENN, A. aj.: *Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks*. *Nature*, **448**, 7157, s. 1022–1025, 2007.
- [62] 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>.
- [63] *JPL Horizons system* [online]. [cit. 2008-09-30]. <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>.
- [64] *JPL planetary and lunar ephemerides, DE405* [online]. [cit. 2008-09-30]. <ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/>.
- [65] KAASALAINEN, M. aj.: *Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques*. *Nature*, **446**, 7134, s. 420–422, 2007.
- [66] KAVASCH, J.: *The Ries Meteorite Crater. A geological guide*. Donauwörth: Ludwig Auer GmbH, 1985.
- [67] KELLEY, M. S.: *Comet dust trails* [online]. [cit. 2009-01-31]. <http://www.physics.ucf.edu/~msk/projects/trails/>.
- [68] 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. <http://books.google.com/>.
- [69] KERR, R. P.: *Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics*. *Phys. Rev. Lett.*, **11**, s. 237–238, 1963.
- [70] KOZAI, Y.: *Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity*. *Astron. J.*, **67**, 9, 591, 1962.
- [71] 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.
- [72] KRONK, G.: *Cometography* [online]. [cit. 2009-01-20]. <http://cometography.com/>.
- [73] LEVISON, H., DUNCAN, M.: *Swift* [online]. [cit. 2008-09-30]. <http://www.boulder.swri.edu/~hal/swift.html>.
- [74] MANNINGS, V. aj. (Ed.): *Protostars and planets IV*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2000. ISBN 0816520593.
- [75] MARCAN, S.: *Phase diagram explanation* [online]. [cit. 2009-01-20]. <http://bhs.smuhsd.org/science-dept/marcan/>.
- [76] MCFADDEN, L.–A., WEISSMAN, P. R., JOHNSON, T. V. (Ed.): *Encyclopedia of the Solar System*. San Diego: Academic Press, 2007. ISBN 012088589.
- [77] MCSWEEN, H. Y.: *Meteorites and their parent planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [78] *MIAC. Antarctic meteorites* [online]. [cit. 2009-01-28]. <http://miac.uqac.ca/MIAC/antarc.htm>.
- [79] MILANI, A., KNEŽEVIĆ, Z.: *Asteroid proper elements and the dynamical structure of the asteroid main belt*. *Icarus*, **107**, 2, s. 219–254, 1994.
- [80] *Minor planet & comet ephemeris service* [online]. [cit. 2008-09-30]. <http://www.cfa.harvard.edu/iau/MPEph/MPEph.html>.
- [81] MISNER, C. W., THORNE, K. S., WHEELER, J. A.: *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1973. ISBN 0716703440.
- [82] MORBIDELLI, A., CRIDA, A., MASSET, F., NELSON, R. P.: *Building giant-planet cores at a planet trap*. *Astron. Astrophys.*, **478**, s. 929–937, 2008.
- [83] MORBIDELLI, A., LEVISON, H.: *Scenarios for the origin of the orbits of the trans-neptunian objects 2000 CR₁₀₅ and 2003 VB₁₂ (Sedna)*. *Astron. J.*, **128**, 2564, 2004.
- [84] MORBIDELLI, A. aj.: *Source regions and timescales for the delivery of water to Earth*. *Meteoritics & Planetary Science*, **35**, 6, s. 1309–1320, 2000.
- [85] MURRAY, C. D., DERMOTT, S. F.: *Solar System Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [86] *National Space Science Data Center* [online]. [cit. 2009-02-17]. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>.
- [87] NESVORNÝ, D., MORBIDELLI, A.: *Three-body mean motion resonances and the chaotic structure of the asteroid belt*. *Astron. J.*, **116**, 3029, 1998.
- [88] NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *Analytic theory of the YORP effect for near-spherical objects*. *Astron. J.*, **134**, 5, s. 1750–1768, 2007.
- [89] NESVORNÝ, D. aj.: *Evidence for asteroid space weathering from the Sloan Digital Sky Survey*. *Icarus*, **173**, 1, s. 132–152, 2005.
- [90] NORTON, O. R.: *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. ISBN 0521621437.
- [91] ÖPIK, E. J.: *Collision probability with the planets and the distribution of planetary matter*. *Proc. R. Irish Acad.*, **54**, s. 165–199, 1951.
- [92] OSTRO, S.J. aj.: *Radar imaging of binary near-Earth asteroid (66391) 1999 KW₄*. *Science*, **314**, 5803, s. 1276–1280, 2006.
- [93] PECINA, P., CEPLECHA, Z.: *New aspects of in single-body meteor physics.* *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **34**, 102, 1983.
- [94] PECINA, P., NOVÁKOVÁ, D.: *Meteorický radar v Ondřejově. Povětroň*, **10**, 6, s. 4, 2002.

- [95] PECHALA, F., BEDNÁŘ, J.: *Příručka dynamické meteorologie*. Praha: Academia, 1991. ISBN 8020001980.
- [96] PETERSON, C.: *A source mechanism for meteorites controlled by the Yarkovsky effect*. *Icarus*, **29**, s. 91–111, 1976.
- [97] POKORNÝ, Z.: *Astronomické algoritmy pro kalkulátory*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 1988.
- [98] PÖSGES, G., SCHIEBER, M.: *The Ries Crater – Museum Nördlingen*. München: Dr. Friedrich Pfeil, 1997.
- [99] 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.
- [100] PRAVEC, P. aj.: *Ondřejov Asteroid Photometry Project* [online]. [cit. 2008-09-09]. (<http://www.asu.cas.cz/~ppravec/>).
- [101] PRESS, W. R., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W., FLANNERY, B.P.: *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [102] PŘÍHODA, P. aj.: *Hvězdářská ročenka 2008*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 2007. ISBN 9788086017471.
- [103] QUINN, T. R., TREMAINE, S., DUNCAN, M.: *A three million year integration of the earth's orbit*. *Astron. J.*, **101**, s. 2287–2305, 1991.
- [104] *Reduce* [online]. [cit. 2010-03-08]. (<http://www.reduce-algebra.com/>).
- [105] *Rieskrater–Museum Nördlingen* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www.iaag.geo.uni-muenchen.de/sammlung/Rieskrater/RieskraterMuseum.html>).
- [106] ROBERTSON, H. P.: *Dynamic effects of radiation in the Solar System*. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **97**, 423, 1937.
- [107] RUBIN, A. E.: *Mineralogy of meteorite groups*. *Meteoritics and Planetary Science*, **32**, 231, 1997.
- [108] RUBINCAM, D. P.: *Polar wander on Triton and Pluto due to volatile migration*. *Icarus*, **163**, 2, s. 63–71, 2002.
- [109] 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.
- [110] SACKMANN, I. J., BOOTHROYD, A. I., KRAEMER, K. E.: *Our Sun. III. Present and future*. *Astrophys. J.*, **418**, s. 457–468, 1993.
- [111] SEIDELMAN, P. K. (editor): *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. U. S. Naval Observatory, Washington, 1992.
- [112] SEPKOSKI, J. J.: *Ten years in the library: New data confirm paleontological patterns*. *Paleobiology*, **19**, s. 43–51, 1993.
- [113] SKÁLA, L.: *Úvod do kvantové mechaniky*. Praha: Academia, 2005. ISBN 8020013164.
- [114] SKÁLA, R.: *Impact process: An important geological phenomenon*. *Acta Mus. Nat-Pragae*, Ser. B., Hist. Nat., **52**, s. 111–156, 1996.
- [115] SPURNÝ, P.: *Fotografické sledování bolidů ve střední Evropě*. *Corona Pragensis*, **2**, 2001, (<http://praha.astro.cz/crp/0101a.phtml>).
- [116] *Stardust, JPL, NASA* [online]. [cit. 2006-06-01]. (<http://stardust.jpl.nasa.gov>).
- [117] 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.
- [118] STIX, M.: *The Sun. An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 2002. ISBN 3540537961.
- [119] STUART, J. S.: *A Near-Earth asteroid population estimate from the LINEAR Survey*. *Science*, **294**, 5547, s. 1691–1693, 2001.
- [120] SUNDMAN, K. E.: *Memoire sur le probleme de trois corps*. *Acta Math.*, **36**, s. 105–179, 1912.
- [121] ŠEDIVÝ, P.: *Kapitoly ze speciální teorie relativity*. Hradec Králové: MAFY, 2003. ISBN 8086148653.
- [122] ŠIDLICHOVSKÝ, M., NESVORNÝ, D.: *Frequency modified Fourier transform and its applications to asteroids*. *Cel. Mech. Dyn. Astron.*, **65**, 1–2, s. 137–148, 1996.
- [123] TILLOTSON, J. H.: *Metallic equations of state for hypervelocity impact*. General Atomic Report GA-3216, 1962.
- [124] *The Ries/Steinheim impact crater field trip* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www-earthsciences.ucl.ac.uk/research/planetaryweb/field/knodle.htm>)
- [125] *The STScI Digitized Sky Survey* [online]. [cit. 2010-02-15]. (http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form).
- [126] 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, 2004.
- [127] TUČEK, K.: *Meteority a jejich výskyty v Československu*. Praha: Academia, 1981.
- [128] VERNAZZA, J. E., AVRETT, E. H., LOESER, R., *Astrophys. J. Suppl.*, **45**, 635, 1981.
- [129] VOKROUHLICKÝ, D.: *A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments*. *Astron. Astrophys.*, **344**, s. 362–366, 1999.
- [130] VOKROUHLICKÝ, D., FARINELLA, P.: *Efficient delivery of meteorites to the Earth from a wide range of asteroid parent bodies*. *Nature*, **407**, 6804, 606, 2000.
- [131] VOKROUHLICKÝ, D., NESVORNÝ, D.: *Pairs of asteroids probably of a common origin*. *Astron. J.*, **136**, 1, s. 280–290, 2008.
- [132] VOKROUHLICKÝ, D., aj.: *Yarkovsky/YORP chronology of asteroid families*. *Icarus*, **182**, 1, s. 118–142, 2006.
- [133] WEIDENSCHILLING, S. J.: *Formation of Planetesimals and Accretion of the Terrestrial Planets*. *Space Science Reviews*, **92**, 1/2, s. 295–310, 2000.
- [134] *Wikipedia* [online]. [cit. 2008-04-10]. (<http://www.wikipedia.org/>).
- [135] WHIPPLE, F.: *A comet model. I. The acceleration of Comet Encke*. *Astrophys. J.*, **111**, s. 375–394, 1950.
- [136] WOLF, M. aj.: *Astronomická příručka*. Praha: Academia, 1992. ISBN 802000467X.
- [137] ZEĽDOVITCH, Ya. B. aj.: *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*. 1966. ISBN 0486420027. (<http://books.google.com>).
- [138] 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.