

## 0.1 Rodiny planetek

Rodiny planetek jsou vlastně shluky podobných drah. V třírozměrném prostoru vlastní velká poloosa  $a_p$ , vlastní excentricita  $e_p$  a vlastní sklon  $I_p$  je patrných přibližně 40 rodin. Pojmenovány jsou vždy po asteroidu, který má nejnižší číslo v katalogu.

Rodiny nejsou vidět přímo jako shluky na obloze, zejména proto, že jejich členy mají různé velké poloosy  $a$ , tedy i úhlové rychlosti  $n \doteq \sqrt{GM_\odot} a^{-1,5}$ , a na obloze se jaksi „rozejdou“. Navíc frekvence precese argumentů pericenter  $\omega$  i výstupných uzlů  $\Omega$  citlivě závisejí na  $a$ , dráhy členů jsou pak různě natočené v prostoru a ve výsledku jsou planetky rozprostřené v pásu, jehož šířka zhruba odpovídá dvojnásobku sklonu.

Je prakticky jisté, že rodiny vznikly *srážkami* planetek a následným *orbitálním vývojem*, zapříčiněným gravitací planet a Jarkovského/YORP jevem. Porovnáme-li objem největšího člena rodiny a všech členů dohromady, obdržíme poměry LF/PB od 0,01 do skoro 1. To znamená, že se jednalo buď o *katastrofický rozpad* mateřského tělesa, nebo o pouhé *kráterování*, anebo cokoliv mezi tím.

### 0.1.1 Pravděpodobnost kolize

Protože planetky jsou rozptýlené v obrovském prostoru, vzájemné srážky jsou velmi málo pravděpodobné. V hlavním pásu je příslušná pravděpodobnost vlastně „nula“ (Dahlgren 1998):

$$P_i \simeq \frac{N}{n_p T R^2} \doteq 3,1 \cdot 10^{-18} \text{ km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}, \quad (1)$$

kde  $N$  je počet přiblížení na vzdálenost menší než  $R$  za dobu  $T$ , přičemž počet párů  $n_p$ , které se mohou potkat, je prostě  $n(n-1)$ . Naštěstí máme dostatek času — střední doba mezi katastrofickými rozpady (v hlavním pásu) je přibližně (Farinella aj. 1998):<sup>1</sup>

$$\tau_{\text{disr}} \simeq 16,8 \text{ Myr} \sqrt{[R]_{\text{m}}}, \quad (2)$$

kde  $R$  značí poloměr planetky. Kolize, která nestačí na rozpad, ale na změnu směru rotační osy ano, nastává v průměru za:

$$\tau_{\text{reor}} \simeq 15,0 \text{ Myr} \sqrt{[R]_{\text{m}}}. \quad (3)$$

Všimněme si, že pokud za  $\tau_{\text{disr}}$  dosadíme 4,5 Gyr, vyjde  $R \simeq 70$  km. To znamená, že největší planetky, jako Ceres nebo Vesta, pravděpodobně zůstaly od svého vzniku netknuté.

<sup>1</sup> Jednoduchý algoritmus Monte-Carlo pro modelování kolizí může vypadat následovně. Nastane během následujícího časového kroku  $\Delta t$  rozpad? Spočtu pravděpodobnost  $p = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$ ; vygeneruji náhodné číslo  $x \in \langle 0; 1 \rangle$ ; jestliže  $x < p$  nastane rozpad, jinak ne.

Chceme-li vypočítat kolizní frekvenci pro jinou situaci, musíme kromě  $P_1$  vědět, jak *velký* projektil je třeba k roztržení terče? Podle Bottke aj. (2005) je:

$$d_{\text{disrupt}} = \left( \frac{2Q_D^*}{V_{\text{imp}}^2} \right)^{1/3} D_{\text{target}},$$

kde  $Q_D^*$  je pevnost planetek (diskutovaná v kap. ??),  $V_{\text{imp}}$  typická dopadová rychlost a  $D_{\text{target}}$  velikost terče. Frekvence, s jakou se tělesa daného rozměru rozpadají, je pak:

$$f_{\text{disrupt}} = P_1 \frac{D_{\text{target}}^2}{4} n_{\text{project}} n_{\text{target}},$$

kde  $n_{\text{project}}$  a  $n_{\text{target}}$  označují počty projektilů a terčů, jež jsou k dispozici.

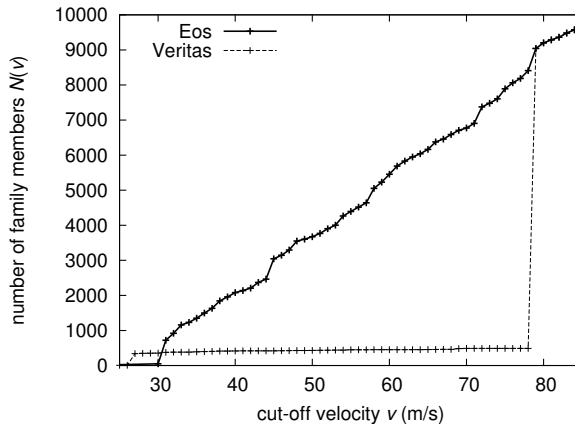
## 0.1.2 Hierarchická shlukovací metoda

Abychom mohli nějak posoudit, které planetky náležejí k sobě, používáme hierarchickou shlukovací metodu (HCM, Zappalà aj., 1990). Její princip je jednoduchý: (i) zvolíme si metriku (tj. míru vzdálenosti mezi dvěma planetkami v prostoru vlastních elementů;  $a_p = (a_{p1} + a_{p2})/2$ ):

$$v = na_p \sqrt{C_a \left( \frac{\Delta a_p}{a_p} \right)^2 + C_e \Delta e_p^2 + C_i (\Delta \sin i_p)^2}, \quad (4)$$

váhy mohou být třeba  $C_a = \frac{5}{4}$ ,  $C_e = 2$ ,  $C_i = 2$ . Obvykle se rozměr rychlosti AU/den převádí na m/s; (ii) zvolíme jeden asteroid jako prvního člena rodiny, třeba (221) Eos, a nějakou hraniční rychlost  $v_{\text{cutoff}}$ , třeba 50 m/s; (iii) testujeme všechny ostatní asteroidy z katalogu, které nejsou členy rodiny, když mají *vzdálenost od kteréhokoliv člena rodiny*  $v < v_{\text{cutoff}}$ , přiřadíme je do rodiny (tento algoritmus má složitost  $N^2$ ); (iv) opakujeme (iii), dokud nějaké členy rodiny přibývají.

Identifikace členů rodiny a jejich počet samozřejmě závisejí na zvolené mezní rychlosti. Příklad závislosti  $N(v_{\text{cutoff}})$  je na obr. 1.



Obrázek 1: Závislost počtu  $N$  členů rodiny Eos na zvolené hraniční rychlosti  $v_{\text{cutoff}}$ . Členy Eosu přibývají s rostoucí rychlostí neustále, neboť v okolí je mnoho asteroidů pozadí. Naproti tomu rodina Veritas je od pozadí dobře oddělená, v intervalu  $v_{\text{cutoff}} \in (40; 70)$  m/s je počet členů skoro konstantní. Při rychlosti 78 m/s Eos a Veritas splynou dohromady. Převzato z Vokrouhlický aj. (2005).

Členy takto zjištěných rodin mívají zároveň *podobná spektra a barvy* (Ivezić aj., 2001), což jen potvrzuje, že planetky původně tvořily jedno těleso. Můžeme si také sestrojít kombinovanou metriku, která zahrne i vzdálenost v prostoru spekter. Nicméně spekter není k dispozici tolik, kolik je známých drah. Pokud se mezi členy vyskytne nějaký s výrazně odlišným spektrem, pokládáme jej za *přímísenou planetku* (interloper), která se pouze náhodou vyskytuje v prostoru rodiny.

Metoda samozřejmě není stoprocentně spolehlivá. Selhává, když se dvě rodiny překrývají, když se planetky pozadí nabalují na okraje rodiny a není apriori zřejmé, jakou  $v_{\text{cutoff}}$  vlastně zvolit, atd.

### 0.1.3 Rozdělení velikostí populací

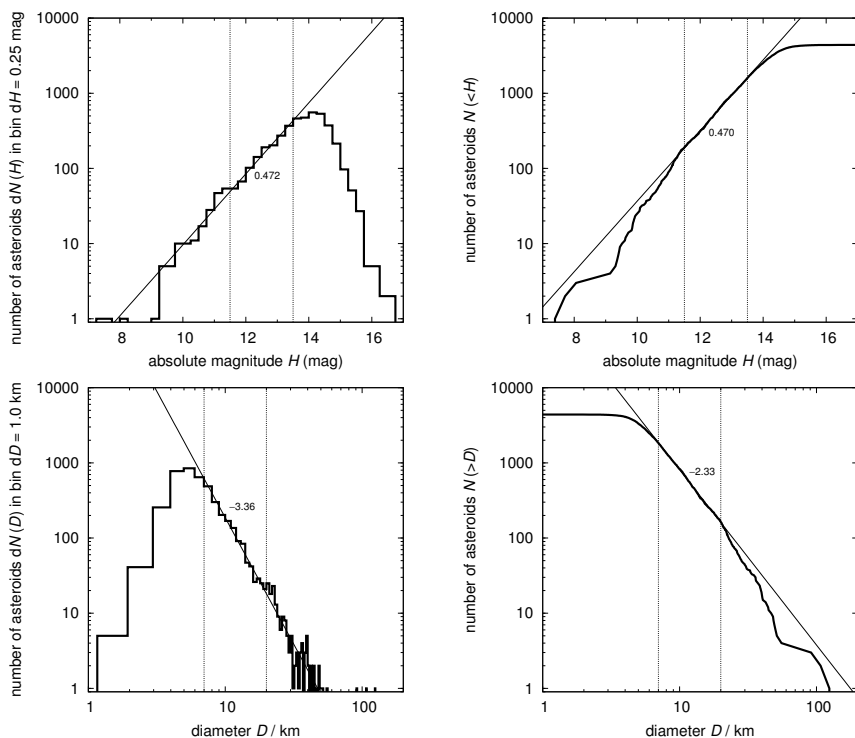
Důležitou charakteristikou skupiny planetek je rozdělení velikostí jejich členů. Můžeme sestrojovat celkem dva druhy histogramů pro dvě různé veličiny:

diferenciální/kumulativní pro absolutní hvězdnou velikost/průměr.

Tyto čtyři histogramy četnosti pro jednu a tutéž rodinu Eos jsou ukázány na obr. 2. Velmi často se plochá šikmá část kumulativního histogramu aproximuje mocninnou závislostí  $N(>D) = C[D]_{\text{km}}^{\gamma}$ , tedy přímkou na grafu  $(\log D, \log N(>D))$ . Pro absolutní hvězdné velikosti používáme aproximaci  $N(<H) = C'10^{\alpha[H]_{\text{mag}}}$ , neboli přímkou na grafu  $(H, \log N(<H))$ . Za předpokladu, že všechny členy mají stejné albedo, platí mezi indexy vztah  $\gamma = -5\alpha$ . Diferenciální histogramy  $dN(D)$  mají indexy sklonu o 1 menší než kumulativní histogramy  $N(>D)$ .

Vztah mezi  $D$  a  $H$  plyne z Pogsonovy rovnice:

$$H_2 - H_1 = -2,5 \log \frac{E_2}{E_1} = -2,5 \log \frac{D_2^2}{D_1^2} = -5 \log \frac{D_2}{D_1}.$$



Obrázek 2: Histogramy četnosti  $dN(H)$ ,  $N(<H)$ ,  $dN(D)$ ,  $N(>D)$  pro rodinu Eos, zjištěnou hierarchickou shlukovací metodou s  $v_{\text{cutoff}} = 55$  m/s.

Pro naše účely jej přepíšeme jako  $H - H_{1\text{ km}} = -5 \log[D]_{\text{km}}$  a odvodíme  $\log N(<H)$ :

$$\begin{aligned}
 \log N(>D) &= \log(C[D]_{\text{km}}^\gamma) = \underbrace{\log C + \gamma \log[D]_{\text{km}}}_{\text{rovnice přímky}} = \log C - \frac{\gamma}{5}(H - H_{1\text{ km}}) \\
 &= \underbrace{\log C + \frac{\gamma}{5}H_{1\text{ km}}}_{C'} \underbrace{- \frac{\gamma}{5}H}_{+\alpha} = \log N(<H).
 \end{aligned}$$

Diferenciální rozdělení  $dN(D)$  je vlastně derivací  $N(>D)$ , čili:

$$\frac{dN}{dD} = C\gamma [D]_{\text{km}}^{\gamma-1},$$

tudíž není divu, že  $dN(D) = C\gamma [D]_{\text{km}}^{\gamma-1} dD$  má nižší sklon.

Zdánlivý úbytek těles pro malá  $D$  (velká  $H$ ) je důsledek *observační nedostatečnosti*, malé planetky prostě zatím nebyly objevené. Za určitých předpokladů však můžeme plochou část histogramu prodloužit a odhadnout tak, kolik malých (nepozorovaných) planetek v populaci je.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Pro odhad velikosti mateřského tělesa se započtením malých nepozorovaných těles můžeme použít tuto jednoduchou metodu: (i) sečteme pouze objemy pozorovaných těles větších než před-

Kolizní rozpady obvykle produkují *strmá* rozdělení velikostí fragmentů ( $\gamma \simeq -4$ ). Další vývoj srážkami jej „zplošťuje“ a po určité době, při  $\gamma \simeq -2,5$ , nastává ustálený stav, kdy se rozbité planetky doplňují rozbíjením větších, takže sklon rozdělení  $N(>D)$  se dále nemění, jen klesá celková populace (Dohnanyi, 1969). Sekundární kolize mohou na rozdělení způsobovat „vlny“.

Rozdělení velikostí dynamicky nestabilních populací může být ovlivněno transportním mechanismem, který je závislý na velikosti. Například Jarkovského drift velké poloosy je nepřímo úměrný velikosti, jako  $D^{-1}$ , což může způsobit rozdíl o  $-1$  mezi rozděleními  $N(>D)$  zdroje a cíle, protože malá tělesa se přemísťují rychleji.

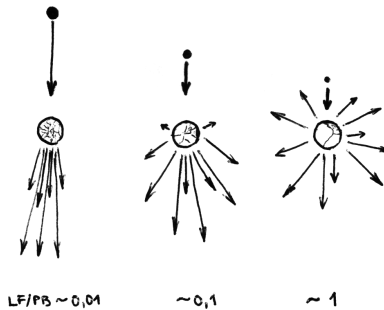
### 0.1.4 Rychlostní pole po rozpadu

Numerické modelování srážek hydrodynamickými metodami (SPH) i laboratorní experimenty škálované na rozměr planetek nám říkají, že fragmenty po srážce odletují rychlostmi řádu  $v_{\text{rel}} \simeq 10^1$  m/s (Asphaug aj., 2002; Michel aj., 2001; Durda aj., 2006).

Vzhled rychlostního pole fragmentů může být různý: pro kolize s větším poměrem LF/PB bývá pole *izotropní*; pro katastrofické rozpady má spíše vzhled úzkého *kužele* (obr. 3). Pro izotropní rychlostní pole lze použít třeba model Farinelly aj. (1993):

$$dN(v) = Cv(v^2 + v_{\text{esc}}^2)^{(\kappa+1)/2}, \quad (6)$$

kde  $dN(v)$  je počet fragmentů s rychlostmi v intervalu  $(v, v + dv)$ ,  $C$  konstanta,  $v_{\text{esc}} = \sqrt{2GM/R}$  úniková rychlost z povrchu mateřského tělesa, a  $\kappa = 3,25$  zvolený exponent mocninného rozdělení. Jedná se o rychlosti „v nekonečnu“, tzn. že byla započtena vzájemná přitažlivost fragmentů, kterou bylo třeba překonat.



Obrázek 3: Nákres rychlostního pole po impaktu s různým poměrem LF/PB hmotnosti největšího fragmentu a mateřského tělesa.

pokládáný limit observační úplnosti  $D_{\text{complete}}$  ( $V_{\text{complete}} = \sum_i \frac{\pi}{6} D_i^3$ ); (ii) aproximujeme kumulativní rozdělení velikostí mocninnou závislostí ( $\log N(>D) = \alpha \log[D]_{\text{km}} + \beta$ ); (iii) prodloužíme ji od  $D_{\text{complete}}$  do  $D_{\text{min}} = 0$ , vypočítáme celkový objem mateřského tělesa (samozřejmě je-li  $\alpha > -3$ ):

$$V_{\text{PB}} = V_{\text{complete}} + \frac{\pi}{6} 10^\beta \frac{\alpha}{\alpha + 3} [D_{\text{min}}^{\alpha+3} - D_{\text{complete}}^{\alpha+3}]. \quad (5)$$

Výsledek je  $D_{\text{PB}} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V_{\text{PB}}}$ .

## 0.1.5 Gaussovy rovnice a změny elementů

Jak se mění keplerovské orbitální elementy, když působí určité zrychlení? To popisují Gaussovy rovnice. Zrychlení  $\mathbf{a} = (\mathcal{R}, T, \mathcal{W})$  vyjádříme ve složkách radiální, transverzální a normálové, a pak:

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{n\sqrt{1-e^2}} [\mathcal{T} + e(\mathcal{T} \cos f + \mathcal{R} \sin f)], \quad (7)$$

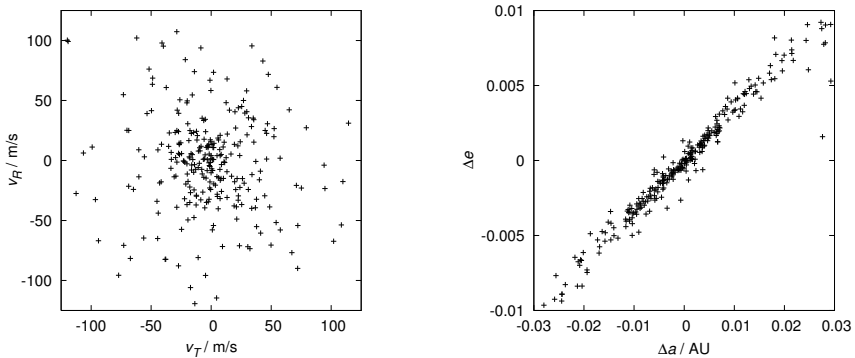
$$\frac{de}{dt} = \frac{\sqrt{1-e^2}}{na} [\mathcal{R} \sin f + \mathcal{T}(\cos f + \cos E)], \quad (8)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\mathcal{W}}{na\sqrt{1-e^2}} \frac{r}{a} \cos(\omega + f), \quad (9)$$

a podobně pro další elementy;  $n$  značí střední pohyb (vypočítaný z Keplerova zákona  $n^2 a^3 = GM$ ),  $f$  pravou anomálii,  $E$  excentrickou anomálii,  $\cos E = \frac{e + \cos f}{1 + e \cos f}$ . Všimněme si, že hlavně *transverzální* složka mění velkou poloosu, neboť  $\lim_{e \rightarrow 0} \frac{da}{dt} = \frac{2\mathcal{T}}{n}$ . Rovnice se zejména hodí pro popis negravitačních nekonzervativních zrychlení, jako jsou tření o atmosféru nebo Jarkovského jev.

Co když se *náhle* změní rychlost o  $\Delta \mathbf{v} = (\Delta v_{\mathcal{R}}, \Delta v_{\mathcal{T}}, \Delta v_{\mathcal{W}})$ ? (Tj. situace, která může nastat při impaktu.) Protože  $\frac{n}{2} da = \mathcal{T} dt = \frac{1}{m} \frac{d(mv_{\mathcal{T}})}{dt} dt = dv_{\mathcal{T}}$ , vidíme, že místo časových derivací  $\frac{da}{dt}$  a zrychlení  $\mathcal{T}$  musíme v Gaussových rovnicích prostě psát změny elementů  $\Delta a$  a změny rychlostí  $\Delta v_{\mathcal{T}}$ .

Typickým výsledkem izotropního impaktu jsou dráhy vyplňující elipsu na grafu  $(a, e)$ , nebo dokonce „úsečku“ v případě, že  $f \rightarrow 0^\circ$  (obr. 4).



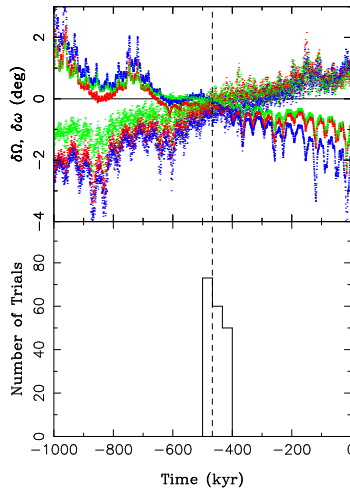
Obrázek 4: Izotropní pole rychlostí ve složkách  $(v_{\mathcal{R}}, v_{\mathcal{T}})$ , vytvořené podle (6), a jeho obraz v rovině  $(a, e)$  získaný Gaussovými rovnicemi (7)–(8). V tomto případě byla hodnota  $f = 20^\circ$  a  $\omega + f = 0^\circ$ .

V následujícím budeme studovat, jak se orbitální elementy mění dynamickým vývojem. Jedná se o tři postupné fáze: (i) keplerovská diferenciální rotace; (ii) diferenciální precese uzlů a pericenter; (iii) Jarkovského/YORP jev a chaotická difuze.

### 0.1.6 Keplerovská diferenciální rotace

Orbitální vývoj drah krátce po impaktu je určen především rozdílným středním pohybem  $n$  planetek. Již za několik tisíc oběhů mají planetky střední anomálie  $M = n(t - t_0)$  „rozeseté“ náhodně v intervalu  $(0, 360^\circ)$ . Obdobně působí veškeré gravitační poruchy planet, nejvíce se uplatňují právě ve střední anomálii.

Jednou z velmi mladých rodin, které jsou v této fázi vývoje, je Datura (Nesvorný aj., 2006; obr. 5). Byla nalezena v pětirozměrném prostoru *oskulačních* elementů, nikoli vlastních (ty není možné spočítat pro krátké časové škály). Konvergence úhlů  $\Omega$ ,  $\varpi$ ,  $M$  pro členy Datury je nejtěsnější v čase  $(450 \pm 50)$  ky před současností, což zřejmě odpovídá okamžiku rozpadu mateřského tělesa. Aby při zpětné integraci nastala konvergence i ve střední anomálii, je nutné započítat vliv Jarkovského jevu na velkou poloosu.



Obrázek 5: Konvergence úhlů  $\Omega$  a  $\varpi$  pro tři členy rodiny Datura (vzhledem k asteroidu (1262) Datura) a histogram možných stáří rodiny určený z 1 milionu zpětných integrací drah. Jednotlivé pokusy se liší v rámci nejistoty určení dráhy a velikosti Jarkovského jevu. Rodina vznikla nejpravděpodobněji před  $(450 \pm 50)$  ky. Převzato z Nesvorný aj. (2006).

### 0.1.7 Diferenciální precese uzlů a pericenter

V důsledku gravitačních poruch planet *precedují* dráhy planetek, tzn. že úhly  $\Omega$  a  $\varpi$  rostou nebo klesají s časem. Rychlosti precese jsou přitom závislé na vzdálenosti planetek od rušících planet, čili  $\dot{\Omega}(a)$  i  $\dot{\varpi}(a)$  jsou funkcemi velké poloosy. Řádově za milion let od rozpadu mateřského tělesa se rozdělení úhlů stává prakticky rovnoměrným na intervalu  $(0, 360^\circ)$ .

V tomto stavu se nacházejí například rodiny Karin, Veritas, Iannini (Nesvorný aj., 2003). Jejich stáří lze odhalit zpětnou integrací drah v čase, právě kvůli konvergenci úhlů (viz tab. 1). Jarkovského drift ve velké poloose pochopitelně ovlivňuje

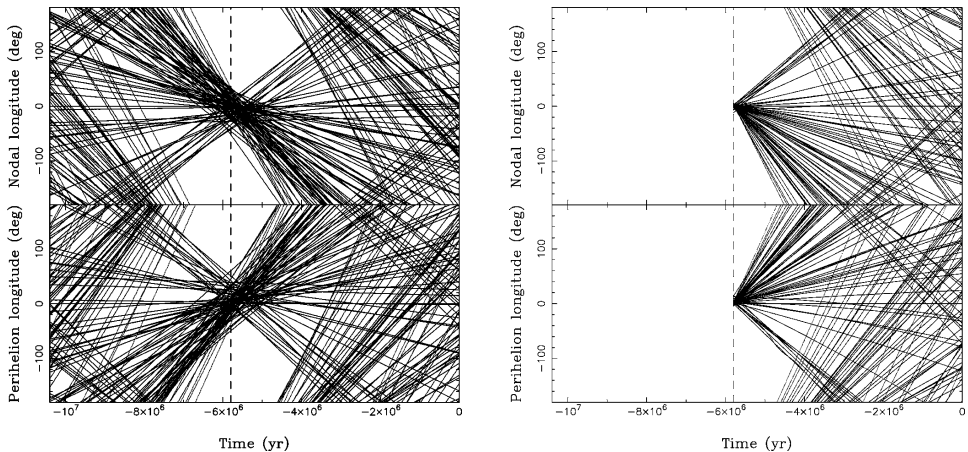
i konvergenci úhlů, a to skrze závislosti  $\dot{\Omega}(a)$ ,  $\dot{\varpi}(a)$ . Nesvorný a Bottke (2004) objevili, že konvergence drah může být podstatně zlepšena, pokud pro každého člena rodiny Karin předpokládají určitou hodnotu driftu  $\frac{da}{dt}$  (rozptyl  $\Omega$  a  $\varpi$  v okamžiku impaktu klesne ze  $40^\circ$  na  $5^\circ$ , což je podle Gaussových rovnic v mnohem lepším souladu s pozorovaným rozptylem vlastních  $a$ ,  $e$ ,  $i$ ; viz obr. 6). Tyto hodnoty driftu  $\frac{da}{dt}$ , odvozené z konvergence drah, jsou v souladu s obvyklou velikostí Jarkovského jevu pro planetky dané velikosti.

Tři zmiňované mladé rodiny souvisejí s *prachovými pásy*, které pozorovala družice IRAS v infračerveném oboru — rodiny a odpovídající pásy mají velmi podobné sklony k ekliptice. Při rozpadu mateřského tělesa na fragmenty zřejmě zároveň vzniklo velké množství prachu, který pak působením *Poyntingova–Robertsonova jevu* spiráluje ke Slunci a přitom vyzařuje tepelné záření.

Část prachu je zachycena atmosférou Země a pomalu sedá až na zemský povrch. Farley aj. (2006) prokázali, že zvýšený obsah lehkého hélia  $^3\text{He}$  (vzácného izotopu, u nějž se předpokládá meziplanetární původ) v mořských usazeninách starých  $(8,2 \pm 0,1)$  Myr přímo souvisí se vznikem velké rodiny Veritas.

rodina	věk/Myr	prachový pás
Karin	$(5,8 \pm 0,2)$	$2,11^\circ$
Veritas	$(8,3 \pm 0,5)$	$9,38^\circ$
Iannini	$< 5$	asi J/K ( $12,11^\circ$ )

Tabulka 1: Mladé rodiny planetek, u kterých se objevuje konvergence délek perihelií a délek uzlů (jakožto známka srážky, která rodinu vytvořila). Stáří bylo určeno přímými N-částicovými integracemi. Uveden je též střední sklon odpovídajícího prachového pásu pozorovaného družicí IRAS.



Obrázek 6: Dráhy členů rodiny Karin na grafech délka perihelia a délka uzlu versus čas. Vlevo: bez jakýchkoliv negravitačních sil (rozptyl  $\Omega$  a  $\varpi$  v čase  $-5,8$  Myr je  $\sim 40^\circ$ ). Vpravo: se započtením Jarkovského driftu velké poloosy (rozptyl drah je jen  $\sim 5^\circ$ ). Současný rozměr rodiny Karin ve



velké poloose činí  $\sim 10^{-2}$  AU; Jarkovského drift řádu  $10^{-4}$  AU je zřetelně viditelný pouze na grafech  $\Omega(t)$ ,  $\varpi(t)$ . Převzato z Nesvorný a Bottke (2004).

### 0.1.8 Jarkovského jev a chaotická difuze

Na *dlouhodobém* vývoji asteroidálních rodin se podílejí zejména Jarkovského jev, který způsobuje systematickou změnu velké poloosy, a gravitační poruchy planet, které v místech překrývajících se rezonancí způsobují chaotickou difuzi excentricit a sklonů.

Co je třeba k výpočtu Jarkovského/YORP jevu? Abychom správně vypočetli teplotu na povrchu planetky (a poté již snadno infračervenou emisi, sílu a případně moment síly), musíme znát její dráhu (tj. polohu zdroje záření), velikost a tvar, orientaci rotační osy a periodu, hmotnost, hustotu povrchových vrstev, albedo, tepelnou vodivost, kapacitu a infračervenou emisivitu materiálu.

To je mnoho neznámých parametrů. V „nejhorším“ případě (a pro velkou většinu planetek) máme pouze dráhu a širokopásmovou fotometrii (ze které lze „hádat“ přibližné albedo, velikost a tepelné parametry). Jak překonat tento akutní nedostatek fyzikálních parametrů? V případě rodin planetek můžeme použít *kolektivní dynamiku* — studovat celou skupinu těles a považovat tepelné parametry za statistické veličiny, tedy zvolit pro ně rozumné rozdělení pravděpodobnosti a přiřadit je jednotlivým tělesům náhodně.

Na příkladu rodin Koronis a Eos (Bottke aj., 2001; Vokrouhlický aj., 2005) ukážeme tři obecné procesy, jak Jarkovského drift spolu s gravitačními rezonancemi dramaticky ovlivňují celkový tvar rodiny. Můžeme ony procesy nazvat: „ohraničení“, „přůchod“ a „záchyt“.

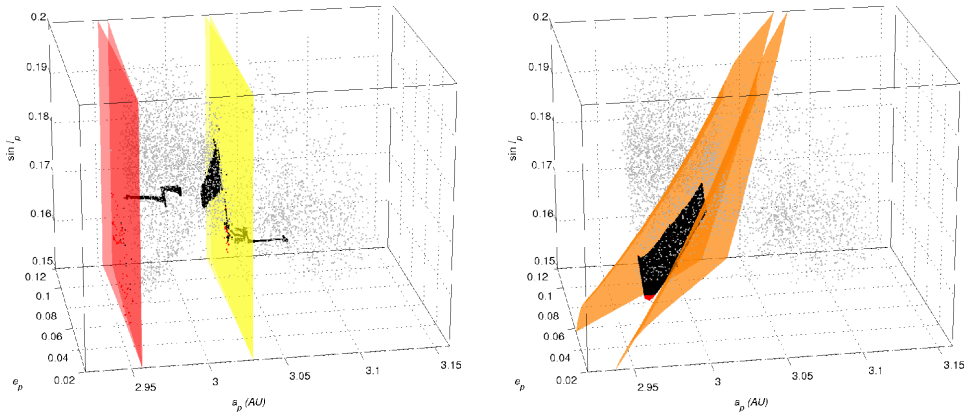
Za prvé si všimněme tvaru rodiny Eos (obr. 7): je ostře ohraničen na malé hodnotě vlastní velké poloosy  $a_p$ , na větších  $a_p$  je evidentní menší počet planetek, zejména těch velikých, a rodina je poněkud protáhnutá ve směru k nižším  $a_p$ , nižším  $e_p$  a nižším  $I_p$ . Tyto pozorované tvary krásně líčí s analyticky spočtenými hranicemi rezonancí, jmenovitě s rezonancí středního pohybu 7:3 s Jupiterem na 2,955 AU, s rezonancí 9:4 na 3,03 AU a se sekulární rezonancí  $z_1 = g - g_6 + s - s_6$ .

Pozorování vysvětlujeme takto: původně, po rozpadu mateřského tělesa, byla rodina kompaktnější; planetky driftovaly Jarkovského jevem směrem k nižším velkým poloosám a setkaly se se silnou rezonancí 7:3, která rozptyluje jejich excentricity a sklony nebo je dokonce posílá na dráhy křížící dráhy planet, a tudíž žádný člen rodiny není viditelný za rezonancí. Rezonance 7:3 proto ohraničuje rodinu Eos (obr. 7, vlevo).

Planetky driftující opačným směrem, k větším velkým poloosám, potkaly slabší rezonancí 9:4. Některé byly schopné jí projít, ale některé byly rozptýlené. Tento průchod vysvětluje, proč je za rezonancí 9:4 méně planetek a také proč je úbytek závislý na velikosti — menší planetky totiž driftují rychle a rezonanci překročí na nízkých excentricitách a sklonech (obr. 7, vlevo).

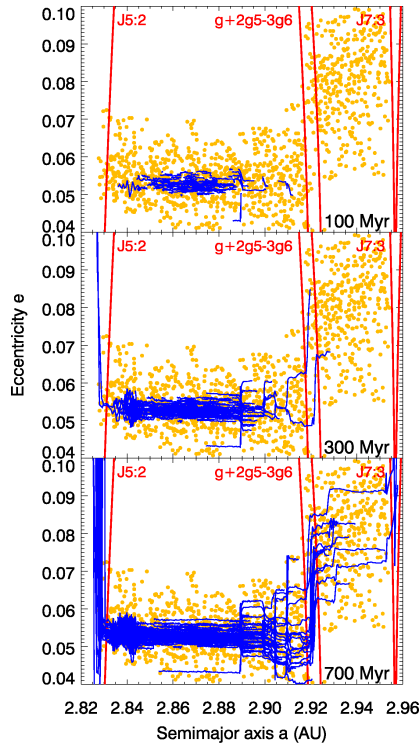
Mnoho členů rodiny Eos je zachycených v sekulární rezonanci  $z_1$ ; driftují ve velké poloose působením Jarkovského jevu a zároveň jsou nuceny sledovat librační

centrum rezonance, jehož poloha však závisí na všech třech orbitálních elementech  $a_p$ ,  $e_p$ ,  $I_p$ . Ve výsledku se nemění pouze velká poloosa, ale i excentricita a sklon, čímž vzniká jakýsi proud planetek směřující k malým hodnotám  $a_p$ ,  $e_p$ ,  $I_p$ , tedy protáhlý tvar rodiny (obr. 7, vpravo).



Obrázek 7: Rodina Eos ve třírozměrném prostoru vlastních elementů  $a_p$ ,  $e_p$  a  $\sin I_p$ . Tři rezonance, J7:3 a J9:4 (vlevo) a  $z_1$  (vpravo) jsou zakresleny spolu s příklady těles driftujících Jarkovského jevem a interagujících s těmito rezonancemi. Podle Vokrouhlický aj. 2006.

V případě rodiny Koronis je situace trochu odlišná. Rodina je rozdělena na dvě části, přičemž každá má jinou střední hodnotu vlastní excentricity (ale stejný střední sklon). Jejich rozdělení koresponduje s polohou sekulární rezonance  $g + 2g_5 - 3g_6$ . Podrobnější studie ukazuje, že na rozdíl od Eosu zde nejsou možné dlouhodobé záchyty v rezonanci, ale driftující dráhy přes ni nutně přeskakují. Během tohoto procesu se jejich  $e_p$  vždy zdvihnou o  $\sim 0,025$ , což je přesně pozorovaný rozdíl mezi středními  $e_p$  dvou částí rodiny Koronis (obr. 8). Protože rezonance nezahrnuje frekvence  $s$ , sklony  $\sin I_p$  zůstávají zcela netknuté.



Obrázek 8: Simulovaný vývoj 210 planetek (modré čáry) působením Jarkovského jevu, v porovnání s pozorovanou rodinou Koronis (žlutými tečkami). Interakce se sekulární rezonancí  $g + 2g_5 - 3g_6$  je zcela zřetelná jako skok v excentricitách poblíž 2,92 AU. Rodina Koronis je také ohraničená silnými rezonancemi středního pohybu J5:2 a J7:3. Doba trvání simulace je 700 Myr (méně než pravděpodobné stáří rodiny). Převzato z Bottke aj. (2001).

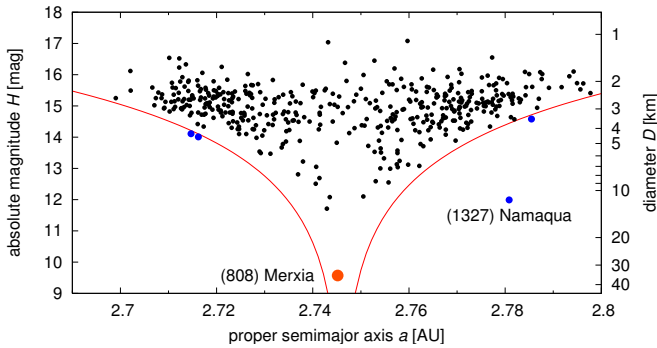
### 0.1.9 Vliv YORPu

Na vzhledu rodin se podílí i *moment* síly vznikající emisí tepelného záření planetek, neboli YORP. Moment síly totiž mění sklon rotační osy a periodu (skrze  $d\mathbf{L}/dt = \mathbf{M}$ ), a tímto prostřednictvím i velikost Jarkovského driftu ve velké poloose. YORP obvykle rotační osu sklápí kolmo k rovině dráhy na časové škále  $10^1$  Myr (pro kilometrovou planetku), hodnoty obliquity jsou pak blízké  $\gamma \simeq 0^\circ$  nebo  $180^\circ$ ; Jarkovského denní jev je v takovém případě maximální.

Například pro rodinu Merxia je ovlivnění YORPem dobře viditelné na grafu velká poloosa – absolutní hvězdná velikost (Vokrouhlický aj. 2006; obr. 9). Typický tvar do ‘V’ je způsoben jednak počátečním rozpadem a jednak Jarkovského jevem — obojí může malé fragmenty (s velkým  $H$ ) více rozprostřít ve velké poloose.

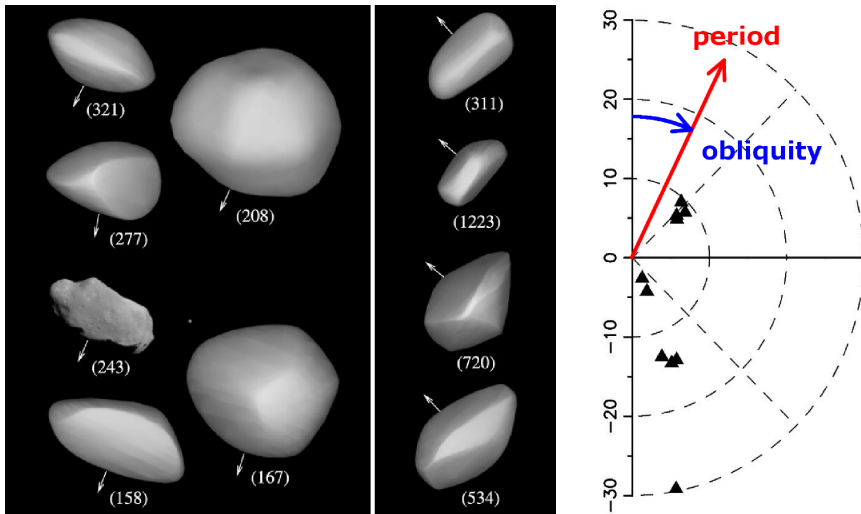
YORP je příčinou zvýšené koncentrace malých planetek na *okrajích* rodiny (a jejich úbytku ve středu), protože Jarkovského jev je YORPem (narovnáním osy)

vlastně zesílen. Podrobnější analýzou rozložení planetek v rovině ( $a_p, H$ ), respektive v jednorozměrném parametru  $C = \Delta a_p / 10^{0,2H}$ , kde  $\Delta a$  je vzdálenost tělesa od středu rodiny, je možné odlišit, jak mnoho byla tělesa rozptýlena počátečním rozpadem a jaký rozptyl získala postupně Jarkovského jevem. Odtud lze odvozovat i stáří rodiny; pro Merxii vychází  $238_{-23}^{+52}$  Myr.



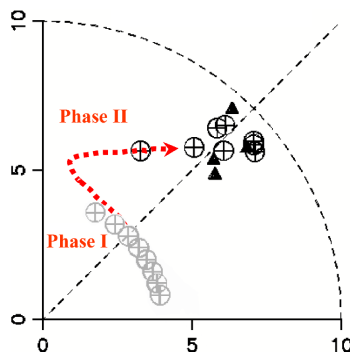
Obrázek 9: Rodina Merxia (identifikovaná metodou HCM pro rychlost  $v_{\text{cutoff}} = 80$  m/s) zobrazená na grafu velká poloosa – absolutní hvězdná velikost. Planetky vně tvaru ‘V’ (šedé tečky) jsou pravděpodobně přimísené a nesouvisejí s rodinou. (1327) Namaqua má ostatně potvrzený spektrální typ X, odlišný od typu S ostatních členů rodiny. Převzato z Vokrouhlický aj. 2006.

Pro probíhající vývoj působením YORPu existují i další důkazy, například v rodině Koronis je skupina planetek, které mají *dvojaké rozdělení sklonů rotačních os* (Slivan aj. 2003; obr. 10). Prográdní skupina má periody 7,5 až 9,5 h, obliquity  $42^\circ$  až  $50^\circ$  a dokonce podobné ekliptikální délky pólů soustředěné v rámci  $40^\circ$ . Hodnoty pro retrográdní skupinu jsou  $P < 5$  h nebo  $P > 13$  h a  $\gamma \in (154^\circ, 169^\circ)$ . Toto pozorování bylo velmi překvapivé, protože kolize by měly vytvářet náhodné rozdělení rotačních stavů, rozhodně ne bimodální.



Obrázek 10: Modely tvaru a rotační osy deseti planetek rodiny Koronis (vlevo) a polární graf perioda – obliquita pro tutéž skupinu (vpravo). Upraveno podle Slivan aj. (2003).

Příčinou tohoto stavu je zvláštní souhra YORPu a *spin-orbitální gravitační rezonance* (Vokrouhlický aj., 2003). Vývoj od nějakého náhodného rozdělení rotačních os je zprvu určován YORP jevem, který  $\gamma$  snižuje a  $P$  zvětšuje. Po asi 1 Gyr, když frekvence precese dosáhne hodnoty  $\simeq 26''/\text{yr}$ , je rotační osa zachycená ve spin-orbitální rezonanci  $s_6$  („se Saturnem“) a tato posouvá  $\gamma$  k  $50^\circ$ ,  $P$  k 8 h, a také vynucuje rovnoběžnou orientaci os v prostoru. Okolo času 2,5 Gyr, což je přibližný věk rodiny Koronis, je soulad modelu s pozorováním výborný. Obdobně je možné vysvětlit i existenci retrográdní skupiny. Zde není žádná významná spin-orbitální rezonance, takže rotační osy se vyvíjejí YORPem volně, až k asymptotickému stavu.



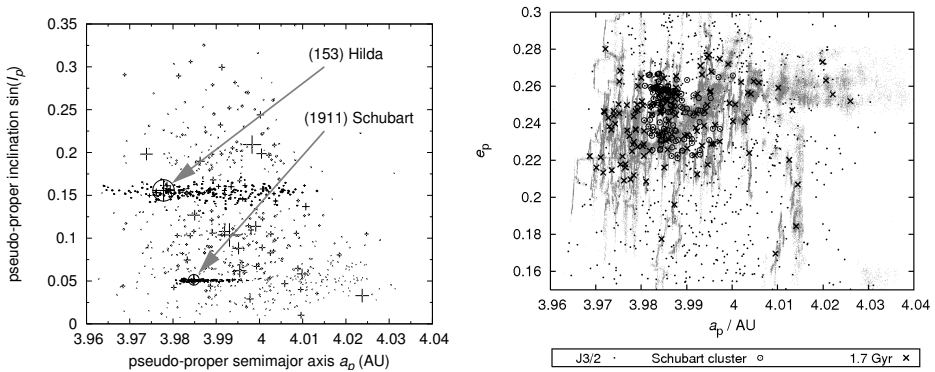
Obrázek 11: Polární graf perioda – obliquita zobrazující Slivanovu prográdně rotující skupinu. Pozorované planetky jsou označené trojúhelníčky, počáteční stav numerického modelu (s obliquitami  $\gamma \in (0^\circ, 90^\circ)$  a periodami  $P = 4\text{--}5$  h) šedými kroužky a konečný stav po 2,5 Gyr černými kroužky.

Čárkovaná čára se šipkou znázorňuje dynamický vývoj a dvě fáze, kterým dominuje: i) YORP; ii) záchyt v rezonanci. Upraveno podle Vokrouhlický aj. (2003).

### 0.1.10 Rodiny v rezonancích

Rodiny byly objeveny i mezi rezonančními asteroidy. V rezonanci středního pohybu 3:2 s Jupiterem, přesněji v její stabilní oblasti, jsou to rodiny Schubart a Hilda. V rezonanci 1:1, tedy mezi Trojany, je zřetelná například rodina Eurybates.

Obecně je dynamika v rezonancích odlišná, určuje ji zejména gravitační vliv Jupitera. V rezonancích prvního řádu (např. ve 3:2) velká poloosa planety vykonává rychlé oscilace okolo libračního centra, ale jinak je „zamknutá“ Jupiterem. Namísto obvyklého Jarkovského driftu ve velké poloose zde funguje *rezonanční Jarkovského jev*, který systematicky mění *excentricity* planetek. V případě malé tepelné vodivosti a progradní rotace planetek se excentricita zvětšuje, u retrogradních se zmenšuje (Brož a Vokrouhlický, 2008; obr. 12).



Obrázek 12: Vlevo: pozorované planety v rezonanci 3:2 s Jupiterem na grafu rezonanční velká poloosa – rezonanční sklon. Dvě rodiny, Schubart a Hilda, jsou zřetelné díky malému rozptylu sklonů. Vpravo: vývoj excentricit syntetické rodiny rezonančním Jarkovského jevem na grafu  $(a, e)$ , v porovnání s pozorovanou rodinou Schubart. Obrázek zachycuje situaci v čase 1,7 Gyr po simulovaném vzniku rodiny, kdy je rozptyl excentricit v dobrém shodě s pozorováním; šedivé linie naznačují vývoj až do 4 Gyr. Převzato z Brož a Vokrouhlický (2008).

# 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] BOTTKE, 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., RIGHTER, 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., CRUKSHANK, D. P., MORBIDELLI, A. (editoři): *The Solar System beyond Neptune*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2008. ISBN 978-0816527557.
- [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] BOTTKE, 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] BOTTKE, 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] BOTTKE, 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] BOTTKE, 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., TSIGANIS, 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., TREBICHAVSKÝ, 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., BAGGALEY, 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/gpssps1.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 fysiků, 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] JOHANSEN, 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 189733b*. *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*. Tucson: 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/antarct.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., BOTTKE, 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., BOTTKE, W. F.: *The primordial excitation and clearing of the asteroid belt — Revisited*. *Icarus*, **191**, s. 434, 2007.
- [129] ÓPIK, 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 FG<sub>3</sub>, 1998 PG, and (5407) 1992 AX: One probable and two possible binary asteroids*. *Icarus*, **146**, 1, s. 190–203, 2000.
- [138] PRAVEC, P. aj.: *Ondrejov 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.: *Dynamical 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/knode.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] TSGANIS, 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] ÚDRY 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.