

0.1 Prstence

Existence prstenců těsně u planet není z dnešního pohledu zcela nepochopitelná — každé těleso, které se dostane do blízkosti planety je „ohrožené“ *slapovými silami*, což může vést k jeho rozpadu na malé fragmenty. Tento jev můžeme v prvním přiblížení popsat pomocí Rocheovy meze.

0.1.1 Rocheova mez

Představme si měsíc o poloměru R_m a hmotnosti M_m , a na něm ležící malou částičku. Na ni působí: i) gravitace měsíce:

$$a_{\text{gm}} = \frac{GM_m}{R_m^2}; \quad (1)$$

ii) slapové zrychlení planety (tj. vlastně rozdíl gravitačního zrychlení mezi středem a povrchem měsíce):

$$a_{\text{slapové}} \doteq \nabla a_{\text{gp}} R_m = \frac{2GM_p}{r^3} R_m. \quad (2)$$

Bude-li $a_{\text{gm}} < a_s$, zřejmě dojde k rozpadu (částička odletí), čili:

$$\begin{aligned} \frac{2GM_p}{r^3} R_m &< \frac{GM_m}{R_m^2}, \\ 2 \frac{4}{3} \pi R_p^3 \rho_p R_m^3 &< 4 \frac{4}{3} \pi R_m^3 \rho_m r^3, \\ \frac{r}{R_p} &< \overbrace{2^{\frac{1}{3}}}^{1,26} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Když bude měsíc příliš blízko k planetě, a obzvláště když bude mít malou hustotu, nevydrží to.

Toto ovšem platí, když měsíc „stojí“, ale na oběžné dráze musíme zahrnout i iii) *gradient odstředivého zrychlení*. V korotující (neinerciální) souřadnicové soustavě (obr. 1) je:

$$a_{\text{odstředivé}} = \omega^2 r, \quad (4)$$

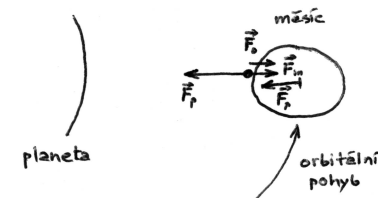
kde kvadrát úhlová frekvence obíhání je podle III. Keplerova zákona $\omega^2 = \frac{GM_p}{a^3}$ (pro kruhové dráhy je $a \doteq r$). Pozor! *Celé* těleso obíhá s frekvencí ω (neb má určitou pevnost ve smyku), takže za ω budu muset dosadit až *po* následujícím derivování!

$$a_{\text{slapové odstředivé}} = \nabla a_o R_m = \nabla_r \omega^2 r R_m = \omega^2 R_m \simeq \frac{GM_p}{r^3} R_m, \quad (5)$$

tj. skoro stejné jako a_s , ale není tam dvojka. Důsledkem vylepšené podmínky $a_{\text{gm}} < a_s + a_{\text{so}}$ je:

$$\frac{r}{R_p} < \overbrace{3^{\frac{1}{3}}}^{1,44} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

Jinými slovy (v inerciálním systému): chci-li, aby těleso zůstalo *v celku* a pohybovalo se po kružnici, potřebuji na to *dostředivou* sílu, která *roste* se vzdáleností. Jenomže gravitace klesá, takže slapy jsou efektivně větší!



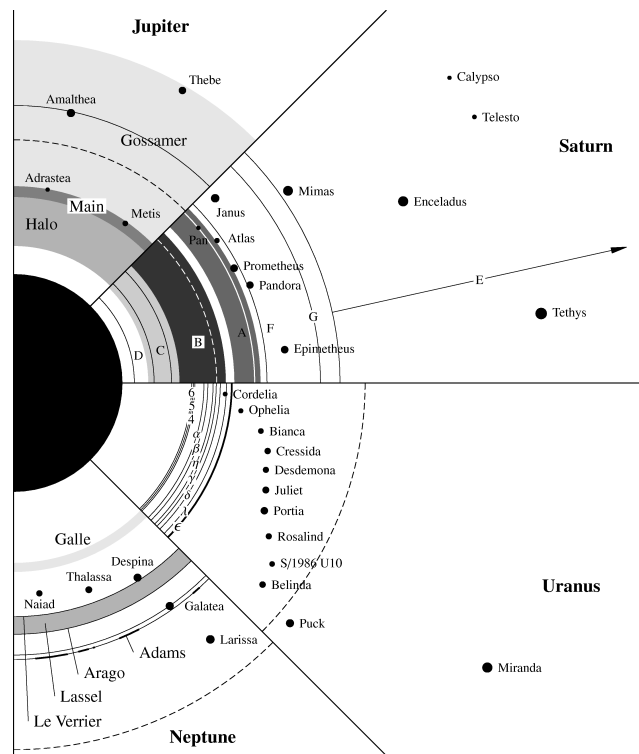
Obr. 1 — Síly působící na částici volně ležící na měsíci, který obíhá okolo planety. Pohled v neinerciální soustavě spojené s měsícem.

Roche (1847) zohlednil i deformaci (tekutého) tělesa, a tedy zmenšující se gravitaci měsíce na výdutích; obdržel:

$$\frac{r}{R_p} < 2,456 \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (7)$$

Tomuto se říká *Rocheova mez*. Nicméně, malé měsíce $\lesssim 100$ km mohou vykazovat nezanedbatelnou *vnitřní pevnost* (působenou elektromagnetismem) a tedy existovat i částečně uvnitř Rocheovy meze (číselný koeficient pro jejich rozpad by pak byl vlastně menší). U velkých měsíců je pevnost určena především gravitací (??).

Suma sumárum: teorie vysvětluje, proč pozorujeme prstence blízko planet, malé měsíce dál a velké měsíce ještě dál (obr. 2).



Obr. 2 — Prstence čtyř planet ve stejném měřítku poloměru planety R_p . Čárkovaná čára označuje polohu synchronní dráhy, na které satelity obíhají s periodou rovnou otáčení planety. Převzato z [5].

0.1.2 Srážky v prstenci

Podle práce Maxwella (1857) víme, že prstenec není pevnou deskou, ani soustavou prstýnků, ale musí se jednat o jednotlivé úlomky. Zkusme nyní posoudit, jak často nastávají v prstenci srážky mezi nimi. Evidentně to bude záviset na tom, jaká je objemová koncentrace n částic, jejich průřez S , vzájemná rychlost v_{rel} . Jedna částice se za dobu t potká s $N = nSv_{\text{rel}}t$ jinými, tudíž frekvence kolizí:

$$f_{\text{col}} \simeq \frac{N}{t} = nSv_{\text{rel}}. \quad (8)$$

Bohužel, ani n ani S nelze pozorovat přímo, na to máme příliš špatné dalekohledy. Co ale je snadno pozorovatelná veličina (podle zeslabení hvězdy při zákrytu prstencem), je *optická tloušťka*:

$$\tau \simeq nSH, \quad (9)$$

kde H označuje „fyzickou“ tloušťku prstenců. Pro $\tau \gg 1$ je prstenec zcela neprůhledný, pro $\tau = 0$ skrz něj všechno světlo prochází. Relativní rychlost částic můžeme alespoň odhadnout jako z -složku orbitální rychlosti pro dráhu skloněnou o úhel I vzhledem k rovině prstenců:

$$v_{\text{rel}} \simeq v_z \simeq \omega r I \simeq \omega H, \quad (10)$$

kde ω , úhlová frekvence obíhání (střední pohyb), je stejná jako výše:

$$\omega \doteq \sqrt{\frac{GM_{\text{Saturnu}}}{r^3}},$$

Po dosazení do (8) máme krásný výsledek:

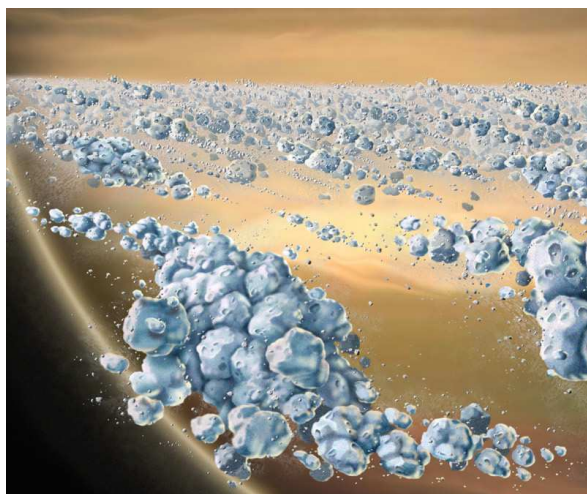
$$f_{\text{col}} \simeq \omega \tau, \quad (11)$$

frekvence závisí pouze na optické tloušťce (a triviálně na ω). Například v Saturnových prstencích A, B je $\tau \simeq 10^0$, čemuž odpovídá f_{col} několikrát za oběh. Evidentně se jedná o velmi kolizní systém! Některé prstence mají jen nepatrnou optickou tloušťku $\tau \simeq 10^{-5}$ (D, G, E u Saturnu, Gossamerův prstenec Jupitera), zde jsou naopak kolize zcela bezvýznamné.

Uvědomme si, že právě srážky stojí za tím, že Saturnův hlavní prstenec je úžasně tenký. Dráhy skloněné o úhel I totiž procházejí skrz rovinu prstenců, přitom se částice skoro vždycky srazí, což zmenšuje v_z . Zploštění tlustého prstence by se tak odehrálo na časové škále:

$$t_{\text{flat}} \simeq \frac{1}{f_{\text{col}}}. \quad (12)$$

Ve finále ale disk není nekonečně tenký, stále dochází ke kolizím malými rychlostmi v_{rel} , které udržují určitou tloušťku H a také nutí prstence k *radiálnímu rozplývání*.



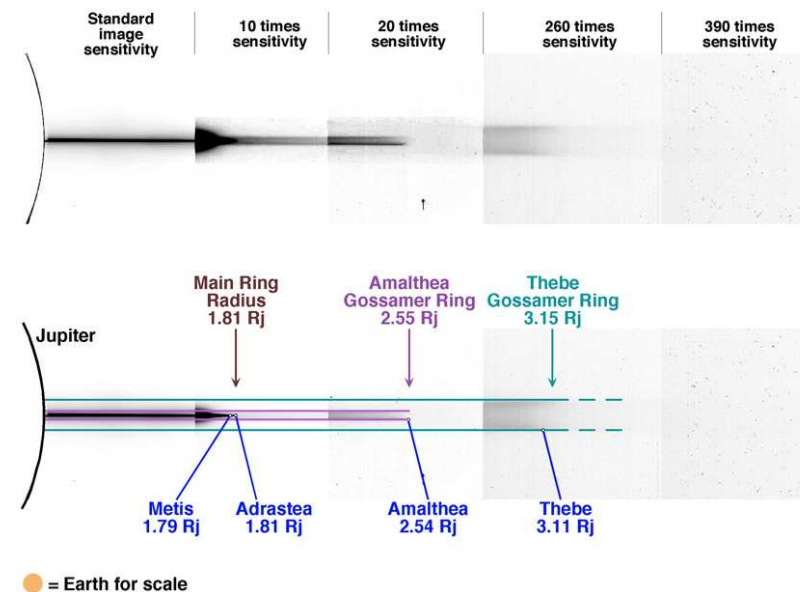
Obr. 5 — Předpokládaný vzhled Saturnova prstence, shluky částic mají rozměr řádově 10 m. Ani rozlišení kamer na sondě Cassini není takové, abychom tyto objekty mohli přímo pozorovat. © NASA/JPL/University of Colorado.

0.1.3 Gossamerův prstenec Jupitera

Všechny prstence Jupitera jsou *prachové*, rozptylují světlo hlavně dopředu, jen málo dozadu.¹ Ve vnějším Gossamerově prstenci pozorovala sonda Galileo následující struktury (obr. 6):

1. vnější okraje prstenců koincidují s oběžnými dráhami určitých měsíců;
2. tloušťky prstenců se liší, jsou „vnořené“ do sebe a odpovídají sklonům drah měsíců.

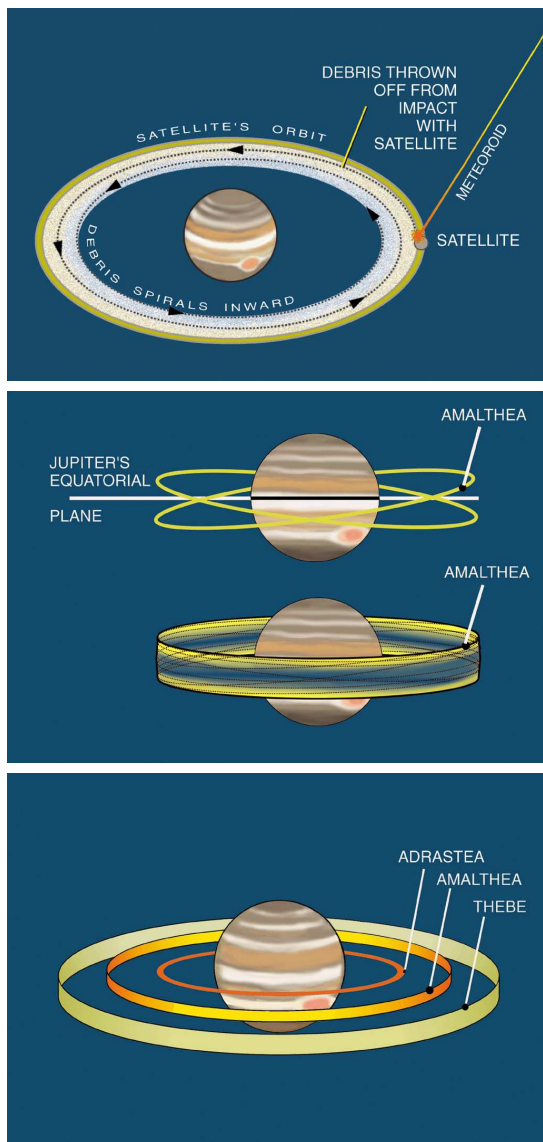
¹ To lze pozorovat třeba na zaprášené půdě: při pohledu proti Slunci spatříme poletující prachová zrníčka, jak se třpytí, kdežto při pohledu po Slunci nevidíme vůbec nic. U velkých zrn (o mnoho řádů větších než vlnová délka světla) by to bylo opačně: v prvním případě bychom (ne)viděli tmavý povrch, ve druhém bychom povrch viděli bez problémů jako jasně osvětlený. Obecně platí, že změříme-li parametry rozptylu záření, můžeme usuzovat na velikost rozptylujících částic.



Obr. 6 — Pozorovaná struktura Gossamerova prstence. © NASA/JPL.

Vznik takových struktur vysvětlujeme tímto krásným mechanismem (viz obr. 7):

1. neustálé *impakty* na měsíce Thebe, Amalthea a Adrastea z meziplanetárního prostoru vyhazují prachová zrna, která mohou překročit únikovou rychlost od měsíců;
2. prach spiráluje k planetě vlivem *Poyntingova–Robertsonova jevu* na časové škále ~ 1000 yr;
3. protože dráha každého měsíce je skloněná, jeho výška nad rovinou prstenců kolísá; zároveň se uplatňuje rychlá *precese* uzlů drah měsíců (působená zploštělým Jupiterem), tudíž uvolňovaný prach vytváří *pás* široký jako sklon dráhy měsíce.



Obr. 7 — Dynamický vývoj Gossamerova prstence, popis v textu. © NASA/JPL/Cornell University.

Hamilton (2006) navíc vysvětlil, proč prstence poněkud přesahují i za dráhy měsíců. Nabité prachové částice ovlivňuje Lorentzova síla:

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (13)$$

a *stínová rezonance*. Ve stínu Jupitera totiž nejsou částice nabíjené UV zářením Slunce a bez náboje ($q = 0$) na ně elektromagnetická síla nemůže působit.

Přechod mezi hlavním prstencem a vnitřním halem, které je podstatně tlustší (dráhy částic jsou více skloněné) je také způsoben Lorentzovou silou, respektive Lorentzovou rezonancí 3:2, kdy je perioda rotace magnetického pole B Jupitera soudělná s oběžnou dobou částic.

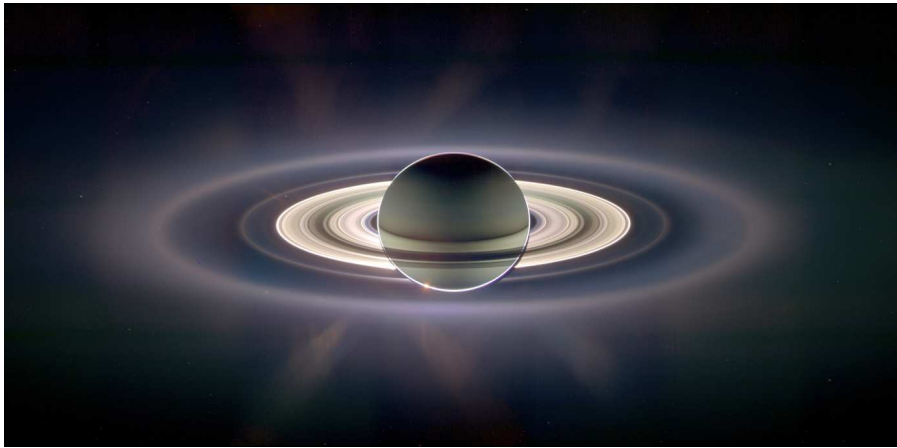
0.1.4 Hlavní prstence Saturnu

Hlavní potíž se Saturnovými prstenci je, že dodnes není jisté jejich stáří! Podle dynamických modelů slapové působení prstenců a měsíců vede ke vzdalování měsíců a postupnému pádu prstenců na planetu, a to na časové škále 200 Myr. To by naznačovalo nedávný vznik.

Celková hmotnost prstenců je přibližně jako hmotnost 300 km měsíce. Čili prstenec mohl vzniknout jeho kolizním rozpadem, ale pravděpodobnost takové katastrofické srážky je mizivá. Snad se to mohlo udát v období velkého pozdního bombardování, před 3,8 Gyr.

Slapový rozpad měsíce je hezká teorie, ale Rocheho mez je až za synchronní dráhou. Jakýkoliv měsíc, který vznikl akrecí (samozřejmě za Rocheho mezí), by se působením Saturnových slapů vzdaloval od planety, nikoli přibližoval. Ledaže by byl retrográdní, ale takový měsíc by zase nevznikl akrecí v protosatelitárním disku.

Prstence se jeví světlé, čili mladé. Kdyby byly staré, měl by vodní led působením kosmického záření podstatně ztmavnout. Možná je ale „čerstvost“ ledu obnovována kolizemi? A teď si „vyberte“!

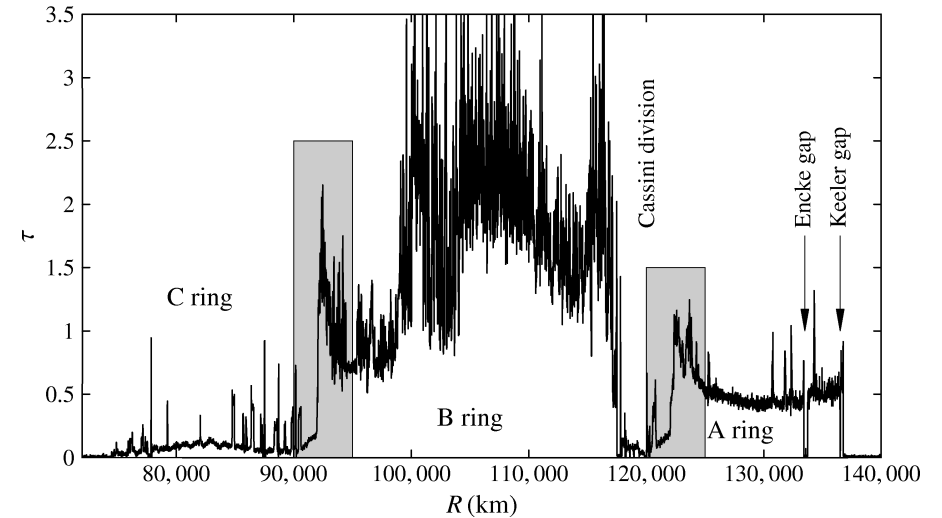


Obr. 8 — Prstence Saturnu při zákrytu Slunce. © NASA.

Mezery v prstencích jsou způsobeny gravitačními *rezonancemi* s měsíci, které vedou ke zvýšení excentricity a pak se srážkou částice posune pryč z místa rezonance. Není to však zcela přímočaré, například u širokého Cassiniho dělení není vznik jasný, protože rezonance 2:1 s Mimasem odpovídá pouze jednomu okraji dělení (vnějšímu okraji prstence B). Možná se zde uplatňuje *balistický transport*, tj. bombardování meziplanetárními částicemi, které jsou schopné trochu posunout částice v prstenci.

Vnější okraj prstence A odpovídá rezonanci 7:6 s koorbitálními satelity Janem a Epimetheem. O tom nesvědčí pouze koincidence polohy okraje a rezonance ve velké poloose, ale také tvar okraje, který pro rezonanci 7:6 má sedm radiálních vln podél obvodu. Enkeho dělení způsobuje interakce s *vmořeným* měsícem Pan; podobně byla vysvětlena Keelerova mezera.

Pozor, pro přesnou polohu rezonance je potřeba zohlednit nejen poměr středních pohybů, ale úplný rezonanční argument, kde vystupuje také $\dot{\omega}$ (nelineárně závisující na a). Hodnota $\dot{\omega}$ je v případě obíhání okolo šišaté planety relativně velká, takže poloha rezonance jakoby neodpovídala Keplerovu zákonu.

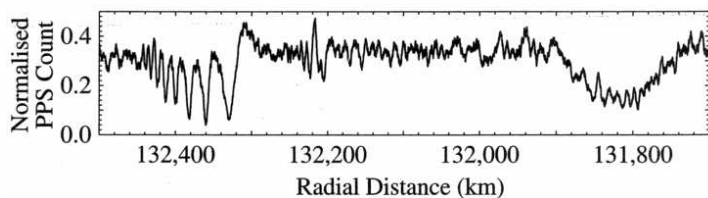
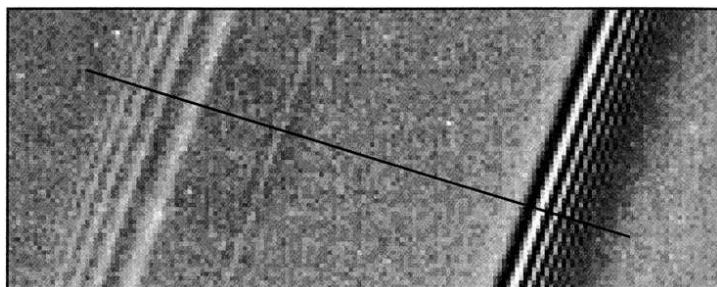


Obr. 9 — Optická tloušťka τ Saturnových prstenců C, B, A a Cassiniho dělení. Převzato z [5].

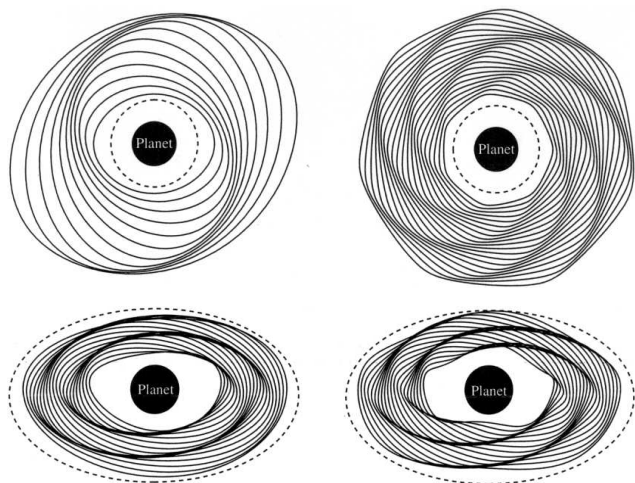
Dobře lze rezonanční dynamikou vysvětlit i pozorované *vlny* v prstencích:

1. vnitřní Lindbladova rezonance ovlivňuje excentricitu a způsobuje spirální hustotní vlny, které postupují ven od místa rezonance;
2. vnitřní vertikální rezonance perturbuje sklon a vede ke spirálním vertikálním vlnám postupujícím dovnitř.

Tyto dva druhy vln lze odlišit podle toho, že vertikální vlny se navzájem stíní při šikmém osvětlení (obr. 10, 11). Síla, která excitované částice vrací zpět do roviny, je vlastní gravitace prstenců.



Obr. 10 — Pozorované spirální vlny asociované s rezonancí 5:3 s Mimasem, vlevo hustotní vlna (mění se excentricita), vpravo vertikální vlna (mění se sklon). Převzato z [67].



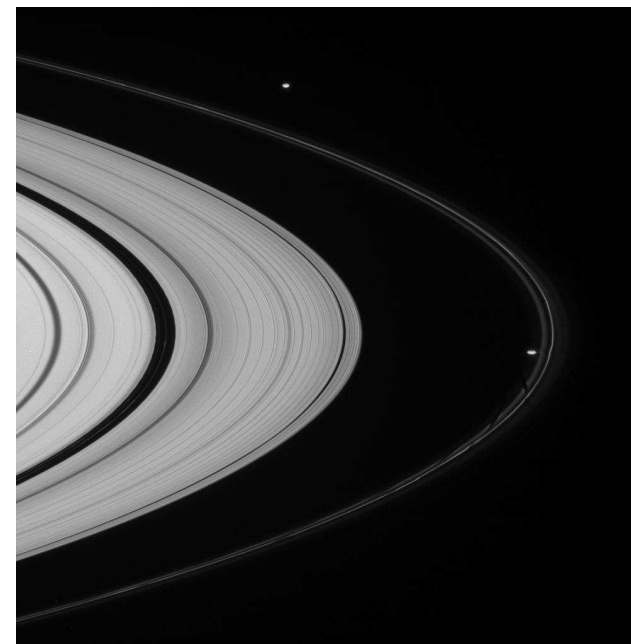
Obr. 11 — Příklady spirálních hustotních vln (nahore) a spirálních vertikálních vln (dole). Převzato z [67].

Zmiňovali jsme již, že srážky částic vedou k rozplývání prstenců. V případě úzkých prstenců funguje mechanismus *pastýřských měsíců*: dva blízké měsíčky

(vnější a vnitřní) způsobí perturbace excentricity

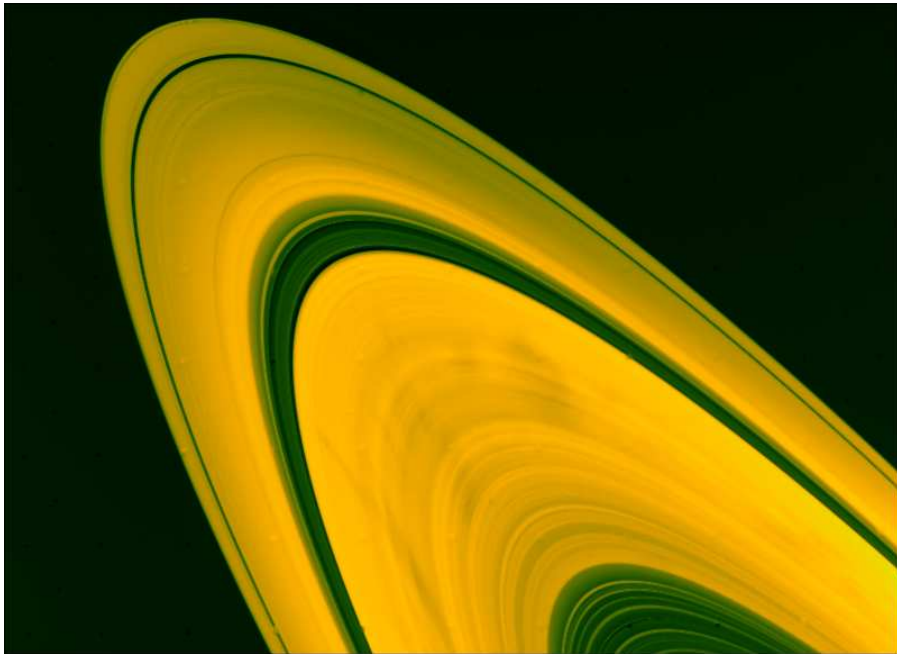
$$\Delta e \sim 2,24 \frac{M_s}{M_p} \left(\frac{a}{\Delta a} \right).$$

Ta se tlumí srážkami a ve výsledku se okraje prstenec vzdálí od měsíčků, čímž se ovšem zúží. Příkladem může být Pandora, Prometheus a úzký prstenec F.



Obr. 12 — Saturnův úzký prstenec F a jeho pastýřské měsíce Prometheus a Pandora. Je patrné, že perturbace excentricity se objevují na prstenci *za* Prometheus (ten obíhá blíž k Saturnu a tedy rychleji než prstenec), a naopak *před* Pandorou, kde je situace opačná. Oba měsíčky mají protáhlý tvar, který je z důvodu slapových sil Saturnu vždy orientován delší osou k planetě. © NASA/JPL/Space Science Institute.

Loukotě (spokes, obr. 13) vznikají elektrostatickým nabíjením a vznášením prachových částic nad rovinu a prstenců (až o 80 km), kde pak vrhají stín na větší částice v rovině prstenců. Svědčí o tom třeba korotace loukotí s magnetickým polem Saturnu.

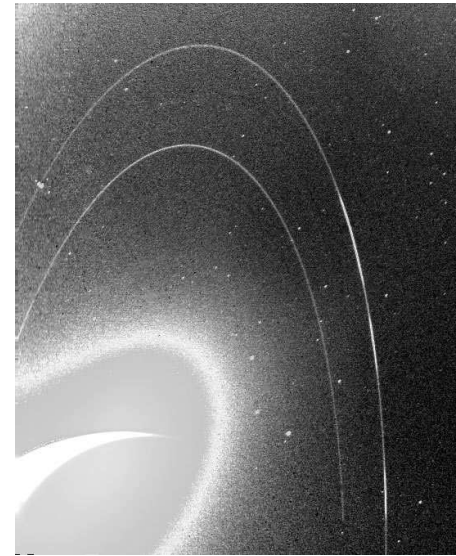


Obr. 13 — Loukotě na snímku ze sondy Voyager. © NASA.

0.1.5 Prstence Uranu a Neptunu

Uran je charakteristický úzkými, excentrickými a skloněnými prstenci ($e, i \sim 10^{-3}$). U prstence ϵ jsou patrné pastýřské měsíce Cordelia a Ophelia, ale pro ostatní úzké prstence nejsou pastýřské měsíce pozorované. Prstenec δ je také zajímavý tím, že má tvar elipsy se středem (nikoli ohniskem) v Uranu.

Neptun má místo ucelených prstenců jen oblouky. Oblouky v Adamsově prstenci jsou interpretovány jako librační centra rezonance 42:43 s měsícem Galatea. Proč prstence vznikly právě v takových místech, není známo.



Obr. 14 — Detail Neptunových prstenců (oblouků) na snímku z Voyageru 2. © NASA.

Literatura

- [1] ALVAREZ, L. W., ALVAREZ, W., ASARO, F., MICHEL, H. V.: *Extraterrestrial cause for the Cretaceous Tertiary extinction*. *Science*, **208**, s. 1095, 1980.
- [2] 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.
- [3] BEATTY, J. K., PETERSEN, C. C., CHAIKIN, A.: *The New Solar System*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [4] BERNARD, J. H., ROST, R. aj.: *Encyklopedický přehled minerálů*. Praha: Academia, 1992.
- [5] BERTOTTI, B., FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D.: *Physics of the Solar System*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 1402014287.
- [6] BOČEK, M.: *Petrologické složení povrchu a kůry Měsíce. Povětroň*, **14**, S1, 3, 2006.
- [7] BOTTKE, W. F., CELLINO, A., PAOLICCHI, P., BINZEL, R. P. (editoři): *Asteroids III*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2002. ISBN 0816522812.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] BOTTKE, W. F. aj.: *Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects*. *Icarus*, **156**, 2, s. 399–433, 2002.
- [11] BOWELL, T.: *AstOrb* [online]. [cit. 2008-09-30]. <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>.
- [12] BROŽ, M.: *Impaktní kráter Steinheim*. *Povětroň* S1/2003, s. 3–10.
- [13] BROŽ, M.: *Impaktní krátery (2) — Ries*. *Povětroň* 5/2001, s. 6–13.
- [14] BROŽ, M.: *Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System*. Dizertační práce, Karlova univerzita, Praha, 2006.
- [15] BROŽ, M.: *Yarko-site* [online]. [cit. 2008-09-30]. <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/yarko-site/>.
- [16] BROŽ, M. aj.: *Planetární stezka v Hradci Králové* [online]. [cit. 2008-12-10]. http://www.astrohk.cz/planetarni_stezka/.
- [17] BROŽ, M., NOSEK, M., TREBICHAVSKÝ, J., PECINOVÁ, D. Editoři : *Sluneční hodiny na pevných stanovištích. Čechy, Morava, Slezsko a Slovensko*. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1204-4.
- [18] BRUNS, H., *Acta Math.*, **11**, s. 25, 1887.
- [19] 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.
- [20] BURNS, J. A., SAFRONOV, V. S.: *Asteroid nutation angles*. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **165**, 403, 1973.
- [21] CALLIGAN, D. P., BAGGALEY, W. J.: *The radiant distribution of AMOR radar meteors*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **359**, s. 551–560, 2005.
- [22] ČEPLCHA, Z.: *Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks*. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **38**, s. 222–234, 1987.
- [23] ČEPLCHA, Z. aj.: *Meteor phenomena and bolides*. *Space Science Reviews*, **84**, s. 327–471, 1998.
- [24] *Cryovolcanism and Geologic Analogies* [online]. [cit. 2009-04-30]. <http://mivo-sys.tripod.com/cryo.html>.
- [25] ČÁPEK, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *The YORP effect with finite thermal conductivity*. *Icarus*, **172**, s. 526–536, 2004.
- [26] FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D., HARTMANN, W. K.: *Meteorite delivery via Yarkovsky orbital drift*. *Icarus*, **132**, s. 378–387, 1998.
- [27] FERNÁNDEZ, J. A.: *Comets. Nature, dynamics, origin and their cosmogonical relevance*. Dordrecht: Springer, 2005.
- [28] FESTOU, M. C., KELLER, H. U., WEAVER, H. A. (ed.): *Comets II*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2004.
- [29] FRANKEL, C.: *Volcanoes of the Solar System*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996. ISBN 0521477700.
- [30] GABZDYL, P.: *Prohlídka Měsíce* [online]. [cit. 2009-02-05]. <http://www.moon.astronomy.cz/>.
- [31] *Geologischer Wanderweg im Steinheimer Becken* [online]. [cit. 2003-1-1]. <http://www.pg.aa.bw.schule.de/aktiv/geoproj/sbecken/wanderfr.htm>
- [32] GRADY, M. M.: *Catalogue of meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0521663032.
- [33] GROSCHOFF, P., REIFF, W.: *Der geologische Wanderweg im Steinheimer Becken*. Steinheim am Albuch, 1993.
- [34] HAGIHARA, Y.: *Celestial Mechanics I*. Cambridge: MIT Press, 1970.
- [35] 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>.
- [36] HIRAYAMA, K.: *Groups of asteroids probably of common origin*. *Astron. J.*, **31**, 743, s. 185–188, 1918.
- [37] HOLMES, N.: *‘Shocking’ gas-gun experiments* [online]. [cit. 2008-11-13]. <https://www.llnl.gov/str/Holmes.html>.
- [38] HOLSAPPLE, K. aj.: *Asteroid spin data: no evidence of rubble-pile structures*. 36th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas, 2005.
- [39] HUTCHISON, R.: *Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521035392.
- [40] CHESLEY, S. R., aj.: *Direct detection of the Yarkovsky effect by radar ranging to asteroid 6489 Golevka*. *Science*, **302**, s. 1739–1742, 2003.
- [41] CHLUPÁČ, I. aj.: *Geologická minulost České republiky*. Praha: Academia, 2002.
- [42] *International Earth Rotation and Reference Systems Service* [online]. [cit. 2008-11-13]. <http://www.iers.org/>.
- [43] IVEZIČ, Ž. aj.: *Solar System objects observed in the Sloan Digital Sky Survey commissioning data*. *Astron. J.*, **122**, 5, s. 2749–2784, 2001.
- [44] JENNISKENS, P.: *Meteor showers and their parent comets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521853491
- [45] JOHANSENN, A. aj.: *Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks*. *Nature*, **448**, 7157, s. 1022–1025, 2007.
- [46] 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>.
- [47] *JPL Horizons system* [online]. [cit. 2008-09-30]. <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>.
- [48] *JPL planetary and lunar ephemerides, DE405* [online]. [cit. 2008-09-30]. <ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/>.

- [49] KAASALAINEN, M. aj.: *Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques*. *Nature*, **446**, 7134, s. 420–422, 2007.
- [50] KAVASCH, J.: *The Ries Meteorite Crater. A geological guide*. Donauwörth: Ludwig Auer GmbH, 1985.
- [51] KELLEY, M. S.: *Comet dust trails* [online]. [cit. 2009-01-31]. (<http://www.physics.ucf.edu/~msk/projects/trails/>).
- [52] 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/>).
- [53] KOZAI, Y.: *Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity*. *Astron. J.*, **67**, 9, 591, 1962.
- [54] 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).
- [55] KRONK, G.: *Cometography* [online]. [cit. 2009-01-20]. (<http://cometography.com/>).
- [56] LEVISON, H., DUNCAN, M.: *Swift* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://www.boulder.swri.edu/~hal/swift.html>).
- [57] MANNINGS, V. aj. (Ed.): *Protostars and planets IV*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2000. ISBN 0816520593.
- [58] MARCAN, S.: *Phase diagram explanation* [online]. [cit. 2009-01-20]. (<http://bhs.smuhsd.org/science-dept/marcan/>).
- [59] MCFADDEN, L.-A., WEISSMAN, P. R., JOHNSON, T. V. (Ed.): *Encyclopedia of the Solar System*. San Diego: Academic Press, 2007. ISBN 012088589.
- [60] MCSWEEN, H. Y.: *Meteorites and their parent planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [61] *MIAC. Antarctic meteorites* [online]. [cit. 2009-01-28]. (<http://miac.uqac.ca/MIAC/antarc.htm>).
- [62] MILANI, A., KNEŽEVIĆ, Z.: *Asteroid proper elements and the dynamical structure of the asteroid main belt*. *Icarus*, **107**, 2, s. 219–254, 1994.
- [63] *Minor planet & comet ephemeris service* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://www.cfa.harvard.edu/iau/MPEph/MPEph.html>).
- [64] MORBIDELLI, A., CRIDA, A., MASSET, F., NELSON, R. P.: *Building giant-planet cores at a planet trap*. *Astron. Astrophys.*, **478**, s. 929–937, 2008.
- [65] 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.
- [66] MORBIDELLI, A. aj.: *Source regions and timescales for the delivery of water to Earth*. *Meteoritics & Planetary Science*, **35**, 6, s. 1309–1320, 2000.
- [67] MURRAY, C. D., DERMOTT, S. F.: *Solar System Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [68] *National Space Science Data Center* [online]. [cit. 2009-02-17]. (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>).
- [69] NESVORNÝ, D., MORBIDELLI, A.: *Three-body mean motion resonances and the chaotic structure of the asteroid belt*. *Astron. J.*, **116**, 3029, 1998.
- [70] NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *Analytic theory of the YORP effect for near-spherical objects*. *Astron. J.*, **134**, 5, s. 1750–1768, 2007.
- [71] NESVORNÝ, D. aj.: *Evidence for asteroid space weathering from the Sloan Digital Sky Survey*. *Icarus*, **173**, 1, s. 132–152, 2005.
- [72] NORTON, O. R.: *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. ISBN 0521621437.
- [73] ÖPIK, E. J.: *Collision probability with the planets and the distribution of planetary matter*. *Proc. R. Irish Acad.*, **54**, s. 165–199, 1951.
- [74] OSTRO, S.J. aj.: *Radar imaging of binary near-Earth asteroid (66391) 1999 KW₄*. *Science*, **314**, 5803, s. 1276–1280, 2006.
- [75] DE PATER, I., LISSAUER, J. J.: *Planetary Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. ISBN 0521482194.
- [76] PECINA, P., CEPLECHA, Z.: *New aspects of in single-body meteor physics.. Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **34**, 102, 1983.
- [77] PECINA, P., NOVÁKOVÁ, D.: *Meteorický radar v Ondřejově. Povětroň*, **10**, 6, s. 4, 2002.
- [78] PETERSON, C.: *A source mechanism for meteorites controlled by the Yarkovsky effect*. *Icarus*, **29**, s. 91–111, 1976.
- [79] POKORNÝ, Z.: *Astronomické algoritmy pro kalkulátory*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 1988.
- [80] PÖSGES, G., SCHIEBER, M.: *The Ries Crater – Museum Nördlingen*. München: Dr. Friedrich Pfeil, 1997.
- [81] 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.
- [82] PRAVEC, P. aj.: *Ondřejov Asteroid Photometry Project* [online]. [cit. 2008-09-09]. (<http://www.asu.cas.cz/~ppravec/>).
- [83] PŘÍHODA, P. aj.: *Hvězdářská ročenka 2008*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 2007. ISBN 978-80-86017-47-1
- [84] QUINN, T. R., TREMAINE, S., DUNCAN, M.: *A three million year integration of the earth's orbit*. *Astron. J.*, **101**, s. 2287–2305, 1991.
- [85] *Rieskrater–Museum Nördlingen* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www.iaag.geo.uni-muenchen.de/sammlung/Rieskrater/RieskraterMuseum.html>)
- [86] RUBIN, A. E.: *Mineralogy of meteorite groups. Meteoritics and Planetary Science*, **32**, 231, 1997.
- [87] RUBINCAM, D. P.: *Polar wander on Triton and Pluto due to volatile migration*. *Icarus*, **163**, 2, s. 63–71, 2002.
- [88] 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.
- [89] SEIDELMAN, P. K. (editor): *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. U. S. Naval Observatory, Washington, 1992.
- [90] SEPKOSKI, J. J.: *Ten years in the library: New data confirm paleontological patterns*. *Paleobiology*, **19**, s. 43–51, 1993.
- [91] SKÁLA, R.: *Impact process: An important geological phenomenon*. *Acta Mus. Nat-Pragae*, Ser. B., Hist. Nat., **52**, s. 111–156, 1996.
- [92] SPURNÝ, P.: *Fotografické sledování bolidů ve střední Evropě*. *Corona Pragensis*, 2, 2001, (<http://praha.astro.cz/crp/0101a.phtml>).
- [93] *Stardust, JPL, NASA* [online]. [cit. 2006-06-01]. (<http://stardust.jpl.nasa.gov>).
- [94] STAUDACHER, T. aj.: *⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of rocks and glasses from the Noerdlinger Ries crater and the temperature history of impact breccias*. *J. of Geophysics*, **51**, 1, 1982, s. 1–11.
- [95] STUART, J. S.: *A Near-Earth asteroid population estimate from the LINEAR Survey*. *Science*, **294**, 5547, s. 1691–1693, 2001.
- [96] SUNDMAN, K. E.: *Memoire sur le probleme de trois corps*. *Acta Math.*, **36**, s. 105–179, 1912.

- [97] ŠIDLICHOVSKÝ, M., NESVORNÝ, D.: *Frequency modified Fourier transform and its applications to asteroids. Cel. Mech. Dyn. Astron.*, **65**, 1–2, s. 137–148, 1996.
- [98] TILLOTSON, J. H.: *Metallic equations of state for hypervelocity impact*. General Atomic Report GA-3216, 1962.
- [99] *The Ries/Steinheim impact crater field trip* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www.-earthsciences.ucl.ac.uk/research/planetaryweb/field/knodle.htm>)
- [100] 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.
- [101] TUČEK, K.: *Meteority a jejich výskyty v Československu*. Praha: Academia, 1981.
- [102] VOKROUHLICKÝ, D.: *A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments. Astron. Astrophys.*, **344**, s. 362–366, 1999.
- [103] VOKROUHLICKÝ, D., FARINELLA, P.: *Efficient delivery of meteorites to the Earth from a wide range of asteroid parent bodies. Nature*, **407**, 6804, 606, 2000.
- [104] VOKROUHLICKÝ, D., NESVORNÝ, D.: *Pairs of asteroids probably of a common origin. Astron. J.*, **136**, 1, s. 280–290, 2008.
- [105] VOKROUHLICKÝ, D., aj.: *Yarkovsky/YORP chronology of asteroid families. Icarus*, **182**, 1, s. 118–142, 2006.
- [106] WEIDENSCHILLING, S. J.: *Formation of Planetesimals and Accretion of the Terrestrial Planets. Space Science Reviews*, **92**, 1/2, s. 295–310, 2000.
- [107] *Wikipedia* [online]. [cit. 2008-04-10]. (<http://www.wikipedia.org/>).
- [108] WHIPPLE, F.: *A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. Astrophys. J.*, **111**, s. 375–394, 1950.
- [109] WOLF, M. aj.: *Astronomická příručka*. Praha: Academia, 1992. ISBN 802000467X.
- [110] ZEĽDOVITCH, Ya. B. aj.: *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*. 1966. ISBN 0486420027. (<http://books.google.com>).