

Tomáš Henych

Hobiti sluneční soustavy

přednáška pronesená na Podzimním astronomickém kursu ve Vyškově v září 2011

Meziplanetární hmota

- zbytky po tvorbě sluneční soustavy, hmotnostně zanedbatelná
- stejně zanedbatelná z hlediska vlivu na dynamiku **ss**

proč je tedy důležité/zajímavé se jí zabývat?

- část je původní a nepřeměněná od vzniku **ss** → důležité informace o její tvorbě; vlastnosti **mh** omezují scénáře vzniku naší soustavy
- výzkum meziplanetární hmoty motivuje rozvoj fyzikálního poznání v oblasti dynamiky složitých systémů, pozorovací techniky, numerických simulací
- v některých případech interaguje se Zemí – rádi bychom se ujistili, že je to bezpečné nebo případným rizikům předešli
- exoplanetární systémy – předpokládáme zde **mh**; u mladých hvězd navíc pozorujeme zárodečné prachoplynné disky (takový mělo na počátku zřejmě Slunce) **obr. 1**
- **mh** může souviset se vznikem života na Zemi (voda z komet, organické látky); obecněji s jeho přenosem mezi různými světy

mh má různé tváře při pohledu ze Země

- planetky vidíme jako hvězdičky, které se ale pohybují vůči hvězdám v pozadí **obr. 2 a 3**
- komety nám někdy předvedou úžasnou podívanou **obr. 4**, a jindy to není tak slavné **obr. 5**
- díky malým částicím v rovině ekliptiky se můžeme kochat zodiakálním světlem **obr. 6**
- a nebo si můžeme přát nový svetr, když vidíme padat hvězdu **obr. 7–9**, i když ta příčina nemusí být tak romantická **obr. 10 a 11**
- na druhou stranu, když se to nepřehne, je to dost levný způsob získávání vzorků **mh** k přímému výzkumu **obr. 12**

Podíváme se teď na jednotlivé podoby **mh** trochu podrobněji. I když budu zmiňovat různé skupiny planetek, komet atd. chci, abyste si je *nepamatovali*, není to tak důležité. Místo toho si všimněte společných znaků.

Planetky

nalézají se v **ss** v mnoha oblastech, ale především díky gravitačnímu působení velkých planet se dlouhodobě zdržují jen v několika stabilních oblastech

- hlavní pás (**obr. 13**; z $5 \cdot 10^5$ známých planetek je asi 95 % z HP, půl je očíslováno, $1,6 \cdot 10^4$ je pojmenováno), Trojané a Řekové Jupitera (**obr. 14**), TNOs

méně stabilní oblasti

- NEAs **obr. 15**, Mars-Crossers (Venus-Crossers), Kentauři **obr. 16**, rozptýlený disk (SDOs)

stabilita jejich drah je z velké části dána dráhovými *rezonancemi*

- představa oscilátoru s vynucující silou, když jsou n (úhlové rychlosti) v poměru malých celých čísel, dojde k rezonanci (**experiment s trubičkami**)
- rezonance dále určují strukturu oblastí, kde se planetky vyskytují → Kirkwoodovy mezery v HP, podobné struktury v transneptunické oblasti

důležitým procesem mezi planetkami jsou kolize – rodiny planetek (rozpad mateřského tělesa při velké kolizi) **obr. 17**

jak vypadají planetky na obloze?

- hlavní pás (nejčastěji): hvězdičky různých jasností, pohybují se mezi hvězdami $\sim 1'/h$ z východu na západ, kolem opozice pak $\sim 0,5'/h$ zpětně (Země planetku předbíhá), na obloze jich je nejvíc kolem ekliptiky
- blízkozemní: skoro všude na obloze, jasnost a rychlost závisí na tom, jak moc je planetka blízkozemní

jak vypadají zblízka?

- jako kusy skal pokryté krátery, balvany a regolitem
- tělesa větší než asi 100–200 km jsou spíše pravidelná, ještě větší tělesa jsou diferencovaná **obr. 18–21**
- zdánlivě celistvá tělesa jsou ale daleko spíše *rubble piles* (volně přeloženo hromady šterku) – planetky větší než asi 150 m jsou tvořeny menšími kusy, které drží pohromadě vlastní gravitace a geometrické zaklínění (**experiment s pískem, trubičkou a kelímkem**)
- hovoří pro to:
 - neustálé kolize s menšími tělesy
 - některé krátery jsou příliš velké **obr. 22** kráter Karoo (33 km) na Mathilde (53 km)
 - rychlost rotace má zřejmě horní mez
 - velmi protažené tvary některých blízkozemních těles **obr. 23**
 - rozpad komety Shoemaker-Levy 9 slapovým působením Jupitera naznačuje její malou pevnost **obr. 24 a 25**
 - dvojité krátery na terestrických planetách – asi slapové rozrušení těles s malou pevností před dopadem

rozložení velikostí (a hmotností) planetek a jejich rychlost rotace kolem vlastní osy určují vzájemné kolize **obr. 26–30**

- největší v hlavním pásu je Ceres (~ 950 km), $0,7-1 \cdot 10^6$ planetek s $D > 1$ km

- mocninný zákon určující počet planetek v závislosti na hmotnosti, resp. průměru

$$dN \propto m^{-\alpha} dm \propto D^\beta dD, \beta = 2 - 3\alpha$$

$\alpha \sim 2,1$, pro tělesa menší než asi 10 km $\alpha \sim 1,4$, laboratorní experimenty (v mnohem menších měřítcích) $\alpha \sim 1,8$

jak můžeme odhadnout velikost planetky?

- CCD snímek – fotometrie (měření množství světla odraženého k pozorovateli) + kalibrace (pomocí zdrojů o známé jasnosti)
- množství světla závisí na ploše průřezu (velikosti tělesa), odrazivosti povrchu, vzdálenosti od Slunce a pozorovatele

$$D\sqrt{p} = K \cdot 10^{-0,2H}$$

- $K = (1329 \pm 10)$ km pro vizuální obor, H je absolutní hvězdná velikost (definovaná ve vzdálenosti 1 AU od Slunce, 1 AU od pozorovatele a v nulovém fázovém úhlu (planetka je ‚v úplňku‘), p geometrické albedo (aproximace odrazu a rozptylu světla)
- pro detekci chladných těles je vhodnější pozorovat v IR, neboť
- rovnovážná teplota je přibližně daná zákonem zachování energie

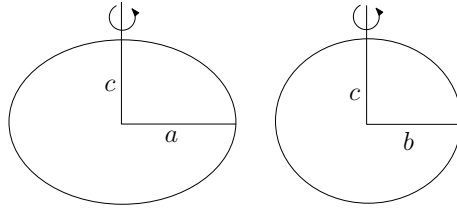
$$\pi R^2(1 - A) \frac{L_{\text{Sun}}}{4\pi r^2} = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$T = \left[\frac{(1 - A)L_{\text{Sun}}}{16\pi\sigma r^2} \right]^{1/4} \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

- T je teplota, R je poloměr tělesa, A Bondovo albedo, L_{Sun} zářivý výkon Slunce, r vzdálenost planetky od Slunce a σ Stefanova-Boltzmannova konstanta
- podle Wienova posunovacího zákona je maximum vyzařování pro běžnou planetku v hlavním pásu ($T \sim 170$ K) na vlnové délce kolem $17 \mu\text{m}$ **obr. 31**

sledujeme-li jasnost planetky v čase, dostaneme *světelnou křivku* **obr. 32**

- určíme synodickou rotační periodu
- když je těleso zhruba tvaru trojosého elipsoidu, z amplitudy světelné křivky můžeme určit poměr ploch příčných průřezů planetky pro danou geometrii a odtud poměr velikostí poloos (viz nákres)



$$\Delta m = -2,5 \log \frac{\pi a c}{\pi b c} \rightarrow \frac{a}{b} = 10^{-0,4 \Delta m}$$

- pro typické amplitudy $\Delta m \sim 0,1-0,3$ mag vychází $a/b \sim 1,1-1,3$
- z více světelných křivek je možné rekonstruovat tvar planetek **obr. 33** (Ďurech, 2010)
- neobvyklé světelné křivky – binární asteroidy (planetky se satelitem nebo dvě podobně velké planetky obíhající kolem společného těžiště), tumbleři (planetky s excitovanou rotací; volná precese) **obr. 34 a 35** (Pravec 2006 a 2005), **animace 1 a 2**

rotace planetek

- periody většinou řádu hodin, v průměru 10 h pro větší a méně pro menší planetky, ale existují i extrémy (od několika minut až po týdny)
- rozložení rotačních frekvencí → pro velké planetky ($D > 40$ km) odpovídá Maxwellovu rozdělení (kolizní rovnováha) **obr. 36 a 37** (Pravec, 2002)
- ovlivňování rotací: vzájemné srážky mezi planetkami, negravitační efekty (dlouhodobé působení slunečního záření může měnit rotaci malé nepravidelné planetky) → současné rotace tedy nejsou původní, mění se během vývoje **ss**
- to ale znamená, že rotace planetek nevypovídají přímo o stavu na počátku tvorby **ss**, je nutné nejdříve popsat všechny podstatné efekty, které rotace ovlivňují

graf závislosti rotační frekvence na průměru **obr. 38**

- jeden z nepřímých důkazů pro rubble piles – existuje maximální úhlová frekvence, dalším zrychlováním by obvodová rychlost na rovníku překročila únikovou a planetka by začala ztrácet hmotu

$$v_{\text{esc}} = \left(\frac{2GM}{R} \right)^{1/2} = \omega_{\text{crit}} R \rightarrow \omega_{\text{crit}} = \left(\frac{8\pi}{3} G\rho \right)^{1/2} \propto \sqrt{\rho}$$

- v_{esc} je úniková rychlost na rovníku, G gravitační konstanta, M hmotnost a R poloměr planety, ω_{crit} pak kritická úhlová frekvence, při které se vyrovná gravitace a odstředivá síla na rovníku
- zajímavé je, že ω_{crit} nezávisí na poloměru planety (v předchozím grafu se projevuje tím, že hranice přípustné rotace je vodorovná)
- pro $\rho \sim 2,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ je $\omega_{\text{crit}} \sim 11 \text{ ot/den}$
- k překročení maximální úhlové rychlosti a rozpadům planetek zřejmě skutečně dochází → binární a párové asteroidy

binární asteroidy (podvojně planety)

- roku 1993 sonda Galileo objevila u Idy satelit (Dactyl) **obr. 39** a **40** – první potvrzený objev takové soustavy, dříve jen hypotéza
- dnes známe bináry ve všech částech **ss** (v hlavním pásu a dál tvoří asi 1–5 % populace, mezi blízkozemními je to asi až 15 %)
- vznik binárních asteroidů
 - NEAs – slapové rozrušení tělesa při blízkém průletu kolem planety nebo rotační rozštěpení (roztočení nepravidelné planety dlouhodobým působením slunečního záření)
 - hlavní pás – pozůstatek kolize (numerické simulace takovou možnost připouští)
 - TNOs – možný záchyt menšího satelitu na oběžné dráze asteroidu v gravitačním poli 3. tělesa; zpomalení satelitu a následný záchyt v důsledku dynamického tření způsobeného velkým počtem menších těles

další metody výzkumu

- přímé zobrazení pomocí adaptivní optiky (a HST) – objevy binárů nebo vícenásobných systémů **obr. 41**, detaily na povrchu těch největších **obr. 42**
- radarová pozorování – vyslání radarového signálu k planetce a pozorování jeho odrazu
ze zpoždění a dopplerovského rozladění (původně monofrekvenčního) odraženého signálu se dá určit velikost tělesa, rotační perioda, vlastnosti jeho povrchu; můžeme zrekonstruovat tvar včetně detailů, objevit satelity **obr. 43–45**

- přímý průzkum meziplanetárními sondami
- zákryty hvězd planetkami – z délky trvání zákrytu určíme průměr (přímá metoda!); z více pozorování můžeme odvodit přibližný profil tělesa **obr. 46**

odrazivost povrchu

- asi 3/4 planetek mají velmi nízké albedo (2–7 %), část má odrazivost ~ 15 %, některá tělesa odráží i více než 42 % světla

chemické složení

- zjišťuje se obvykle ze spektroskopie (viditelná a blízká IR), srovnáním se spektry vzorků meteoritů, které jsou zřejmě jejich úlomky; strukturu povrchu odhalují radarová pozorování
- podle chemického složení povrchu dělíme planetky na taxonomické typy **obr. 47** – zřejmě koreluje s polohou v ss → ukazuje na strukturu zárodečné mlhoviny (primitivní, málo přeměněné typy C a D jsou dál od Slunce)

blízkozemní planetky

- dělí se do dalších skupin podle parametrů svých drah, ale podstatné je, že některé kříží dráhu Země a jsou potenciálně nebezpečné nyní nebo někdy v budoucnosti
- při blízkých průletech nám nabízejí možnost podrobnějšího průzkumu (radarová pozorování, světelné křivky, přímé zobrazení)
- jejich typický dynamický věk je asi 10 My, poté končí svůj život ve Slunci nebo jsou vymety ze ss (občas spadnou na nějakou planetu)
- jestliže ale pozorujeme celkem stabilní populaci dnes i v minulosti (zhruba stálý počet impaktů na Měsíc), znamená to, že se tato populace musí odněkud průběžně doplňovat → zřejmě z vnitřní části hlavního pásu

transneptunická tělesa (TNOs)

kromě Pluta, které se mezi ně řadí až teď, jsou objevována od začátku 90. let minulého století **obr. 48–52**

byla teoreticky předpovězena:

- Pluto budilo vždy rozpaky (mezi planety se jaksi nehodí)

- proč by akrece materiálu měla skončit u Neptuna – oblast vlivu Slunce odolávající galaktickým slapům je mnohem větší, je přibližně daná tzv. Hillovou sférou

$$R_H = \left(\frac{M_{\text{Sun}}}{M_{\text{GC}}} \right)^{1/3} r_{\text{Sun}} \sim 200 \text{ kAU}$$

- M_{Sun} je hmotnost Slunce, M_{GC} hmotnost galaktického centra, r_{Sun} vzdálenost Slunce od středu Galaxie
- navíc nebylo jasné kde se berou tzv. komety Jupiterovy rodiny s nízkou inklinací drah (jejich zdrojem je zřejmě právě prostor za Neptunem)

proto zformulovali G. P. Kuiper a K. E. Edgeworth nezávisle na sobě hypotézu o pásu asteroidů za drahou Neptunu → Edgeworthův-Kuiperův nebo jen Kuiperův pás

- první objevené těleso 1992 QB₁, dnes známe asi 1500 takových těles, podle odhadů jich je však víc než v hlavním pásu
- existují zde tělesa větší nebo srovnatelná s Plutem (Eris, Haumea, Makemake) a také vícenásobné soustavy (právě Pluto se čtyřmi měsíci, Eris, Haumea)

jednotlivé skupiny jsou opět dány dráhovými parametry **obr. 53**

- klasický pás – nízká e a I , ale přece jen vyšší než se v teoretických pracích předpokládalo; zřejmě je to stabilnější konfigurace
- Plutinos – stabilní dráhová rezonance 2:3 s Neptunem → stabilní populace bez blízkých přiblížení k Neptunu a Uranu
- objekty rozptýleného disku (scattered-disc objects – SDOs) – objekty s $e \geq 0,4$, jsou pozorovány kolem perihelia (kdy jsou jasnější)
- Kentauři
 - zvláštní tělesa – poblíž perihelia jeví kometární aktivitu, jinak jsou neaktivní
 - zřejmě zásobují JFC ze vzdálenějších oblastí ss
 - tomu odpovídá i jejich nízký dynamický věk 10–100 My – na jedné straně se tedy ztrácí, na druhé musí existovat nějaký zdroj podobně jako u NEAs
 - doplňují se asi z SDOs nebo z klasického disku nestabilitami nebo občasnými srážkami

- další skupiny: TNOs s $a = 36\text{--}39$ AU a malými e a I ; objekty v rezonanci 1:2 s Neptunem

výběrové efekty

- způsobují významné zkreslení výsledků pozorování
- větší vzdálenost od Slunce \rightarrow delší oběžná perioda (3. Keplerův zákon) \rightarrow menší úhlový pohyb na obloze \rightarrow než je objekt odlišen od hvězd v pozadí, je nutné ho sledovat mnohem delší dobu
- větší vzdálenost od Slunce \rightarrow méně světla \rightarrow potřeba větších dalekohledů (citlivějších metod detekce)

Kometry

- pozorovány už velmi dlouho (Číňané, Chaldejci) **obr. 54**
- Tycho Brahe podal důkaz, že jde o nebeské objekty (měření paralaxy)
- přesto o nich nevíme zdaleka tolik, co o planetkách
- Halleyova kometa – předpověď E. Halleye z roku 1696, že se kometa roku 1758 vrátí, předcházela objevu Uranu (1781) a už tehdy byla **ss** podstatně rozšířena (až za dráhu Neptunu)
- pozorovací dělení: dlouhoperiodické ($T > 200$ yr) a krátkoperiodické ($T < 200$ yr) – rozlišujeme ještě komety Jupiterovy rodiny (JFC) a komety Halleyova typu
- dynamické dělení: podle Tisserandova parametru (ekliptikální a téměř izotropní komety) **obr. 55**
- transport komet do vnitřních částí **ss** je zřejmě způsoben blízkými průlety hvězd kolem Slunce; ty naruší Oortův oblak a uvolní z něj více těles, která pak směřují ke Slunci
- transneptunický region je zřejmě původní – přerušení tvorby planety na periferii **ss**
- naproti tomu Oortův oblak byl asi vytvořen později **obr. 56**
- jde o hypotetickou zásobárnu komet s izotropním rozdělením I , 20–200 kAU, $m_{\text{tot}} \sim 1\text{--}10 M_{\oplus}$ **obr. 57**

- roku 1950 navrhl F. Whipple vysvětlení chování komet – jde o malé těleso (1–10 km) složené z ledu (nejen vodního) a silikátů – ‚špinavá sněhová koule‘ → když se dostane do vnitřních částí ss, led začne sublimovat a vytvoří komu
- spektrální pozorování z 80. let přítomnost těchto sloučenin potvrzují
- dnes jsou navíc k dispozici snímky z meziplanetárních sond, zobrazující jádra komet **obr. 58–61**
- komety zásobují meziplanetární prostor plynem a prachem → meteory (sporadické i rojové)
- po čase, který je obvykle kratší než jejich dynamický věk, se z komety uvolní většina těkavých látek → neaktivní kometa (skutečně se pozorují mezi kometami Jupiterovy rodiny)
- komety Kreutzovy rodiny (Sun-grazing comets) **obr. 62**
 - perihelia $< 2R_{\text{Sun}}$
 - pozorování hlavně ze sond sledujících Slunce (SOHO)
 - zřejmě existují i u jiných hvězd – jedna z interpretací pozorování změn ve spektru β Pic (velmi mladý systém, zřejmě ve fázi konce tvorby planetárního systému)

Drobná meziplanetární hmota a meteority

- zodiakální světlo – odraz světla pod velkým úhlem **obr. 63**
- F-koróna (false corona) – diffractive scattering pod malým úhlem
- prstence planet a planetární prach **obr. 64**
- na Zemi – sběr částic v atmosféře (zabrzdnuté, takže neshoří, $d \sim 1 \mu\text{m}$, ve výškách kolem 100 km) nebo v ledovcích (v Antarktidě)
- větší částice ($\geq 10^{-10}$ g) – pozorování radarem, odraz rádiových vln od ionizované stopy meteoru v atmosféře
- meteory ($\geq 10^{-4}$ g) – vizuální, fotografické a CCD pozorování

- ráno se díky geometrii pozoruje obecně více meteorů
- sporadické (3/h, 15/h)
- rojové (Perseidy, Geminidy, Kvadrantidy, ...) – zdrojové těleso, obvykle komete nebo TNO, zanechává podél své dráhy materiál; když Země protne dráhu takového tělesa, setká se s hustším oblakem částic **obr. 65**
- bolidy – jasné meteory, často se v atmosféře rozpadají, ‘temný let’ – těleso už je příliš chladné a pomalé, aby ionizovalo vzduch kolem sebe ($v \leq 3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_{\text{srf}} \leq 2200 \text{ K}$, vytvoření typické krusty)
- nálezy meteoritů – rozpad na Zemi za 10^3 – 10^5 let, v Antarktidě se konzervují na milióny let; fosilní nálezy (zkamenělé meteority) – až 480 My
- typy meteoritů – chondrity, achondrity, železné nebo železo-kamenné **obr. 66–68**
- meteority s rodokmenem
 - bolid pozorovaný z několika míst umožňuje vypočítat dráhu v atmosféře a v **ss**, a také odhadnout místo dopadu, což pak může vést k nálezu meteoritů
 - první případ roku 1959 v Příbrami (Z. Ceplecha), dnes už mnoho takových těles
- zdroje – rozpad planetek při srážkách, vyvržený materiál při dopadech meteoritů na jiná tělesa (Měsíc, Mars)
- první předpovězený pád planetky na Zemi – 2008 TC₃; spadl 7. října do pouště v severním Súdánu, později nalezeny meteority (Almahata Sitta) **obr. 69**

- Bertotti, B.; Farinella, P.; Vokrouhlický, D., 2003. *Physics of the Solar System – Dynamics and Evolution, Space Physics, and Spacetime Structure*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Brož, M.; Šolc, M.; Ďurech, J., 2011. *Fyzika malých těles sluneční soustavy*. Dostupné online: http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/fyzika_malych_teles/skripta
- Ďurech, J.; Sidorin, V.; Kaasalainen, M., 2010. *DAMIT: a database of asteroid models*. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 513, id.A46. Databáze dostupná online: <http://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/asteroids3D/web.php>
- Pravec, P.; Harris, A. W.; Michalowski, T., 2002. *Asteroid Rotations* in *Asteroids III*, University of Arizona Press, Tucson, p. 113–122.
- Pravec, P. *et al.*, 2005. *Tumbling asteroids*. *Icarus*, Volume 173, Issue 1, p. 108–131.
- Pravec, P. *et al.*, 2006. *Photometric survey of binary near-Earth asteroids*. *Icarus*, Volume 181, Issue 1, p. 63–93.

Verze z 23. září 2011