

Meteority, planetky a tepelné efekty

Miroslav Brož

Přemýšleli jste někdy při pozorování hvězdné oblohy, odkud se berou meteory, čili lidově zvané „padající hvězdy“? Následující odstavce by vám na tuto otázku měly odpovědět a měly by vás seznámit se zajímavými fyzikálními procesy, které probíhají ve sluneční soustavě. V posledních letech se ukázalo, že důležitou roli ve vývoji malých těles sluneční soustavy hrají gravitační rezonance a Yarkovského tepelný efekt. Začneme však popořádku první otázkou.

Většina čtenářů již nepochybně ví, že *meteor*em rozumíme v astronomii světelný úkaz, který vzniká srážkou Země s *meteoroidem* - malým tělesem obíhajícím ve sluneční soustavě. Velká část meteoroidů se vypaří při průletu atmosférou a jen ty, jež jsou dostatečně hmotné a pevné, dopadnou na zemský povrch, kde je můžeme nalézt jako *meteority*.

Typická životní doba meteoroidů či planetek na dráhách křížících dráhy planet je však velice krátká, nejvýše několik desítek milionů let (Myr). Za dobu existence sluneční soustavy by byla populace takovýchto těles dávno zničena, Země by doslova vymetla své okolí. Protože dnes lze stále na obloze pozorovat meteory a blízkozemní planetky, soudíme, že tato tělesa musí být odněkud průběžně doplňována.

Dříve byly za hlavní zdroj těchto těles považovány komety. Ty skutečně zdrojem meteoroidů jsou, meteory kometárního původu se často objevují na obloze v rámci

meteorických rojů. Dnes však soudíme, že jediným dostatečným rezervoárem blízkozemních planetek, jejich fragmentů a meteoroidů je *hlavní pás planetek* mezi Marsem a Jupiterem. Mechanismus, který dopravuje tělesa z hlavního pásu na dráhy křížící dráhy vnitřních planet (viz obr. 1), byl objeven a vysvětlen teprve před dvaceti lety - jsou to gravitační rezonance.

Gravitační rezonance

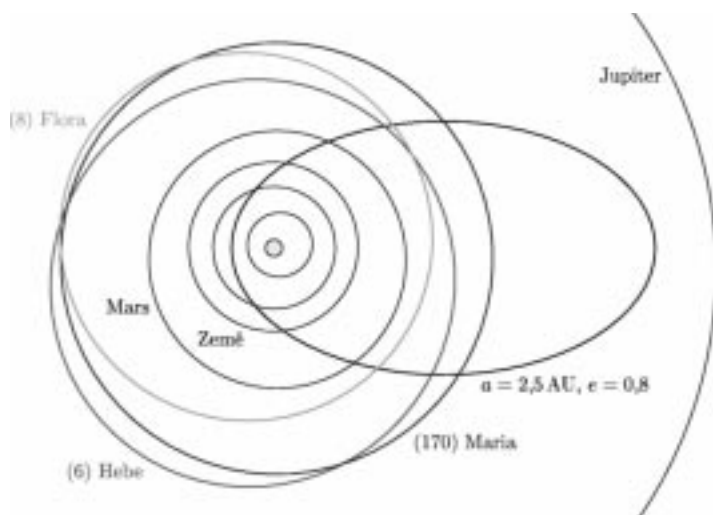
Podívejme se podrobně na obr. 2, který ukazuje rozdělení drah planetek mezi 2 až 3,5 AU. Na první pohled je zřejmé, že planetky nevyplňují hlavní pás rovnoměrně, ale podstatná část se shlukuje do *rodin*. Je mnoho důvodů domnívat se, že tyto skupiny asteroidů vznikají srážkou dvou větších těles, při které se tělesa rozpadnou a dají vznik velkému množství těles menších. Tyto nové fragmenty mají díky různým rychlostem, které jim byly uděleny při kolizi, dráhy mírně odlišné od původního mateřského tělesa, což

se projeví rozptylem drah v prostoru orbitálních elementů. Nejpočetnějšími rodinami jsou Flora, Themis, Eos, Eunomia, Koronis, Nysa, Vesta a Polana.

Tentýž obrázek ukazuje ještě jednu významnou skutečnost v rozdělení drah planetek - mezery, které povětšinou odpovídají místům v hlavním pásu, kde by planetky obíhaly s takovou periodou, která by byla v poměru malých celých čísel s oběžnou dobou planety Jupiter (příslušné poměry jsou vyznačeny na horním okraji grafu). Poprvé si mezer všiml americký astronom Daniel Kirkwood v roce 1867, když tehdy bylo známo pouhých 91 asteroidů.

Způsob vzniku mezer je následující - pokud se planetka nějakým způsobem dostane do *Kirkwoodovy mezery*, říkáme např. že planetka je v 3:1 rezonanci s Jupiterem, působením Jupitera dojde ke zvětšení excentricity (nedojde přitom ke změně velké poloosy a podle třetího Keplerova zákona se tedy nezmění ani oběžná perioda, těleso tedy stále zůstává v rezonanci). Pozoruhodné je, že 97 % takových těles končí *srážkou se Sluncem* (tzn. že musela mít excentricitu vyšší než 0,998). Zbytek se potom buď rozptýlí na planetách, díky pohybu křížícím jejich dráhy a těsným setkáním, nebo se s planetami srazí. Číselně vyjádřeno - umístíme-li těleso do 3:1 rezonance, je pravděpodobnost toho, že se srazí se Zemí, pouhých 0,23 %.

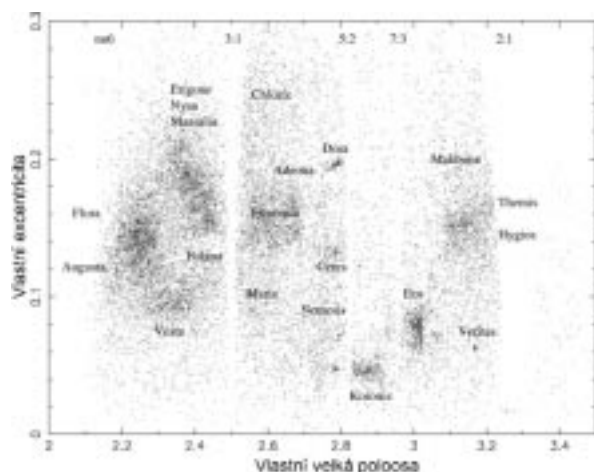
Dnes víme, že na struktuře hlavního pásu a jeho vývoji se významně podílejí také sekulární rezonance - pokud se perioda pre-



Obr. 1 - Schematické znázornění drah několika asteroidů hlavního pásu, které mohou být zdrojem meteoritů: (6) Hebe ($a = 2,423$ AU; $e = 0,20$; $i = 14,8^\circ$), (170) Maria ($a = 2,553$ AU; $e = 0,06$; $i = 14,4^\circ$) a (8) Flora ($a = 2,202$ AU; $e = 0,16$; $i = 5,9^\circ$). Pro srovnání je také zobrazena dráha tělesa s vysokou excentricitou ($a = 2,5$ AU, $e = 0,8$); je vidět, že kříží dráhy vnitřních planet Marsu, Země i Venuše a v aféliu se přibližuje k Jupiteru.

Mgr. Miroslav Brož (*1975)

vystudoval MFF UK, obor fyzika, astronomie. V současnosti je doktorandským studentem na Astronomickém ústavu UK a také pracuje na Hvězdárně a planetáriu v Hradci Králové. Zabývá se převážně dynamikou sluneční soustavy, numerickými simulacemi, ale věnuje se i popularizaci astronomie.
miroslav.broz@email.cz



Obr. 2 - Graf vlastní velká poloosa - excentricita pro více než 10 000 planetek. Jsou vyznačeny nejpočetnější rodiny a také polohy hlavních rezonancí oběžných dob s oběžnou periodou Jupiteru.

cese perihelia g příp. výstupného uzlu dráhy s pro planetku rovná periodě pro některou z planet g_6 , s_6 pro Saturn či g_5 , s_5 pro Jupiter. Ostatně hlavní pás planetek končí asi na 2,1 AU právě díky významné rezonanci $g = g_6$ označované též v_6 . Dále se uplatňují rezonance poměrně vysokých řádů, multiplety rezonancí středního pohybu, vnější rezonance s Marsem a dokonce rezonance tří těles Jupiter-Saturn-asteroid a Jupiter-Mars-asteroid.

Hlavními cestami z hlavního pásu na dráhy křížící dráhy vnitřních planet se zdají být rezonance 3:1 (asi 2,5 AU) a v_6 (nad 2,1 AU). Rezonance 5:2 (2,8 AU) a 2:1 (3,3 AU) se už na tomto procesu významně nepodílí, protože excentrické dráhy kříží také dráhu Jupitera a blízká setkání s touto planetou pak asteroidy dostávají na hyperbolické dráhy.

Skutečnost, že na přenosu hmoty se podílejí rezonance z vnitřní části hlavního pásu má ještě důležitou souvislost s taxonomickými typy asteroidů a meteoritů. Základní, nejvíce zastoupené typy asteroidů podle albeda a barvy označujeme C (podíl tohoto typu je 75 %), potom S (15 %) a M (10 %). Jejich četnost v hlavním pásu není všude stejná, ale u typů S, M pozorujeme zřetelný úbytek s rostoucí vzdáleností od Slunce, u typu C tomu je přesně naopak.

Typům asteroidů odpovídají typy meteoritů - analogií typu S jsou obyčejné chondrity, pro typ C pak uhlíkaté chondrity. Obyčejných chondritů nacházíme na povrchu

zemském podstatně více než uhlíkových, i když jsou asteroidy typu C mnohem početnější než typ S. Tento zdánlivý rozpor si vysvětlujeme jednak tím, že uhlíkaté chondrity nemají tak vysokou pevnost a při průletu atmosférou se častěji rozpadají, ale hlavní příčina tkví v přenosu meteoroidů z vnitřního hlavního pásu (přes rezonance v_6 a 3:1), kde je více planetek typu S, které jsou zdrojem obyčejných chondritů, než typu C.

Problém udržení populace blízkozemních asteroidů jsme zatím jen přesunuli do hlavního pásu, neboť doba setrvávání asteroidu v rezonanci

před zvýšením oscilací excentricity je pouze 1 až 10 Myr a rezonance by tedy byly záhy vyčištěny prakticky od všech těles. Musíme tedy nalézt další mechanismy, které budou asteroidy posouvat do rezonancí - jednou možností jsou vzájemné kolize asteroidů. Frekvence srážek mezi asteroidy v hlavním pásu je přibližně určena pro tělesa větší než kilometry, pro menší tělesa ji neznáme a můžeme ji jen odhadnout extrapolací. Ale spíš pro velká tělesa je však frekvence srážek natolik nízká, že tento proces nestačí hlavní rezonance doplňovat.

Poměrně nedávným poznatkem je fakt, že na dopravě asteroidů se mohou podílet i ostatní rezonance (vyšších řádů), kterých je podstatně více a postihují potenciálně více kilometrových těles v hlavním pásu. Tyto rezonance jsou však natolik slabé, že zvýšení excentricity dráhy tělesa a jeho doprava do blízkosti Země trvá podstatně déle (nejméně

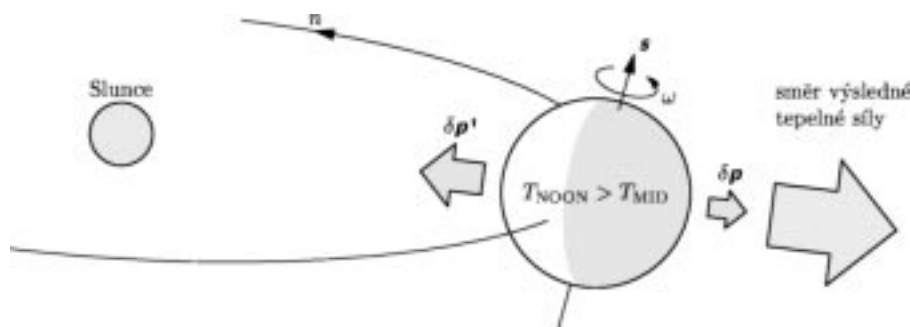
20 Myr) než v případě hlavních rezonancí. Do těchto modelů ale můžeme zahrnout také *negravitační tepelné efekty*, jež způsobují zmenšování nebo zvětšování velké poloosy asteroidu a tím doplňují rezonance. Pak lze konečně dojít ke shodě s pozorovaným množstvím meteoroidů srážejících se s naší planetou. Právě tzv. Yarkovského tepelným efektem se zabývá následující kapitola.

Yarkovského efekt

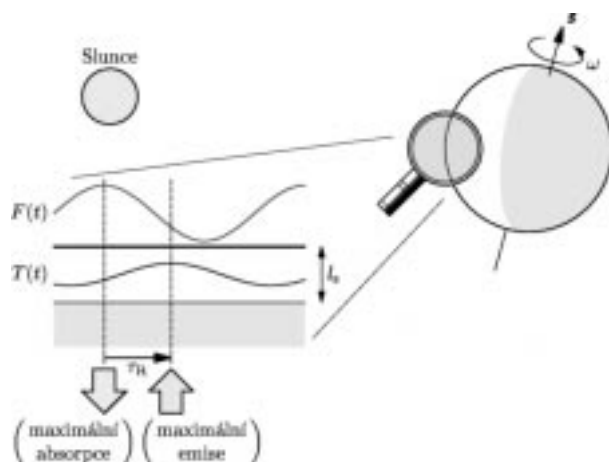
Pohyb asteroidů, měsíců planet, komet, meteoroidů (ale dnes i kosmických sond a umělých satelitů) ve sluneční soustavě určuje především gravitační síla Slunce a poruchy působené planetami. Až do poloviny 19. století to také byla jediná síla, která byla uvažována v pohybových rovnicích. Přesnost měření poloh nebeských objektů a rozvoj nebeské mechaniky však dovolily koncem 19. století odhalit první negravitační sílu, která podstatně ovlivňuje pohyb komet - uvolňování plynu a prachu z jejich povrchu. Od té doby bylo objeveno několik dalších negravitačních efektů, které určují tvářnost naší sluneční soustavy a které jsou nezbytné pro pochopení jejího dlouhodobého vývoje až k dnešnímu stavu.

Jedná se především o síly radiační, jejichž základním principem je výměna energie a hybnosti, řídící se zákonem akce a reakce, mezi zářivým polem a tělesem. Tyto síly mají obecně větší vliv na malá tělesa, neboť radiační síly, jakožto povrchové jevy, rostou s druhou mocninou rozměru tělesa, ale gravitační síla je úměrná třetí mocnině rozměru. Dominantním zdrojem zářivého pole může být v různých případech Slunce, planeta svítící převážně v infračerveném oboru, příp. těleso s vlastním zdrojem (kosmická sonda).

Základními variantami radiačních sil jsou přímý tlak záření, Poyntingův-Robertsonův



Obr. 3 - Základní princip Yarkovského efektu - zbytková síla při tepelné reemisi absorbovaného záření. δp a $\delta p'$ jsou hybnosti odnášené fotony z denní a noční polokoule.



Obr. 5 - Zpoždění mezi absorpcí a reemisí záření, rozdíl mezi rychle a pomalu rotujícími tělesy. Křivka $F(t)$ znázorňuje průběh tepelného toku s časem pro dané místo na povrchu; $T(t)$ je odpovídající průběh teploty.

efekt (k tlaku a P - R. efektu přispívá i korpuskulární sluneční vítr), diferenciální Dopplerův efekt a Yarkovského efekt. Právě Yarkovského efektem se budeme zabývat, neboť pro „naše“ meteoroidy a planetky převažuje nad ostatními. Vzniká tehdy, ustaví-li se na povrchu tělesa *nerovnoměrné rozložení teploty*. Taková situace může vzniknout velmi přirozeně, když těleso (např. planetka) obíhá okolo zdroje záření (v dalším budeme předpokládat Slunce), viz obr. 3. Polokoule planetky, která je přivrácená ke Slunci bude mít vyšší teplotu, než odvrácená strana. Fotony, které jsou vyzařovány z teplejších oblastí odnášejí více energie a hybnosti, než odpovídající fotony z chladnějších částí povrchu. Výsledkem této nerovnováhy je vznik negravitační síly, která se z historických důvodů nazývá *Yarkovského silou*. To je tedy základní princip Yarkovského efektu, podíváme se však podrobněji na další fyzikální parametry asteroidu.

Základní tepelné vlastnosti obvyklých materiálů shrnuje tabulka 1. Nejběžnější jsou kamenné meteoroidy z bazaltického mate-

riálu, který poměrně dobře vede teplo. Zcela odlišná jsou však tělesa, na jejichž povrchu se nachází vrstva regolitu, byť velmi tenká - struktura drobných zrn (s velkým podílem prázdného prostoru) je totiž velmi špatným tepelným vodičem a dokonale izoluje vnitřní část tělesa. Regolitová vrstva

se tvoří při srážkách s malými meteoroidy, které drolí povrchovou vrstvu. Meteoroidy železné, s vysokou hustotou a tepelnou vodivostí, již tak obvyklé nejsou - vznikají při fragmentaci diferencovaných asteroidů, tj. větších planetek, které prošly procesem přetavení a u kterých tedy mohly těžší prvky vytvořit metalické jádro. U meteoroidů typu C se předpokládá poměrně nízká celková hustota a průměrná hodnota vodivosti.

Výsledná velikost tepelné síly bude také záviset na rozměru tělesa. Malá tělíska (navíc pokud mají vyšší tepelnou vodivost) totiž stačí odvést teplo z teplejší hemisféry do chladnější, vyrovnat tím rozdíly teploty na povrchu a Yarkovského efekt bude potlačen. Pro tělesa s velkými rozměry velikost efektu také klesá, jak jsme zmínili výše.

Závěr tedy je, že Yarkovského síla bude efektivně působit jen v určitém rozsahu velikostí těles. V této souvislosti je vhodné zavést následující pohled na velikost tělesa, kterou budeme poměřovat hloubkou průniku l tepelné vlny (danou jeho tepelnými parametry). Budeme tedy hovořit o tělesech

velkých s $R \gg l$, u kterých se změny teploty objevují jen v tenké povrchové vrstvě a o tělesech malých $R \approx l$, u nichž se mění teplota i poměrně hluboko pod povrchem.

Ještě detailnější pohled ukáže časové zpoždění mezi absorpcí záření a jeho reemisí, které je způsobeno konečnou tepelnou vodivostí. Maximum povrchového rozložení teploty je tedy poněkud posunuté od směru Slunce - asteroid, což je podstatná skutečnost, neboť *změna velké poloosy dráhy je dána průmětem síly do směru pohybu*. Bez tohoto zpoždění by tedy nedocházelo k výraznému posunu ke Slunci nebo od něj.

Základem *matematického modelu* tepelných efektů je zákon zachování energie, který na povrchu tělesa můžeme zapsat v diferenciálním tvaru jako

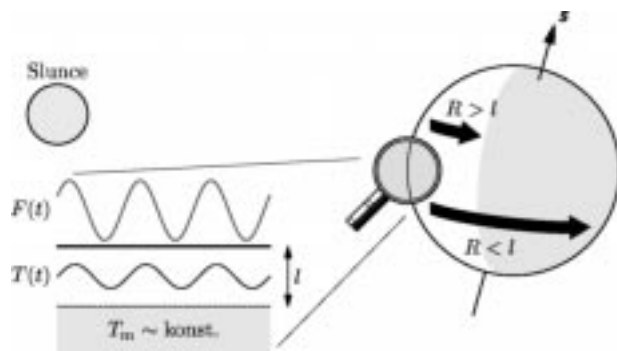
$$\epsilon \sigma T^4 + K \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) = \alpha F$$

kde ϵ je tepelná emisivita, $\alpha = (1 - \text{albedo})$ je povrchový absorpční koeficient - obě veličiny bereme většinou blízké jedné, σ je Boltzmanova konstanta, T je teplota povrchového elementu, K tepelná vodivost, r je radiální souřadnice a konečně F je radiační tok dopadající na daný povrchový element.

Tuto rovnici čteme jako:

$$\begin{aligned} &\text{energie tepelně vyzářená z jednotky povrchu} \\ &+ \\ &\text{energie odvedená do hlubších vrstev tělesa} \\ &= \\ &\text{energie absorbovaná za jednotku} \\ &\text{času jednotkou povrchu} \end{aligned}$$

V objemu tělesa musí být samozřejmě zákon zachování energie splněn také - vyjadřujeme ho rovnicí vedení tepla, tzv. Fourierovou rovnicí. Při analytickém řešení těchto diferenciálních rovnic předpokládáme následující zjednodušení: 1) těleso má kulový tvar, 2) obíhá po dráze s nízkou excentricitou a 3) teplota v libovolném místě je blízká střední hodnotě, takže si můžeme dovolit rovnice linearizovat.



Obr. 4 - Zavedení hloubky proniknutí tepelné vlny l . Pro velká tělesa ($R > l$) je tepelná historie jednotlivých povrchových elementů dobře odlišena. U malých těles ($R < l$) dochází k vedení tepla uvnitř tělesa, které vymaže rozdílné teploty na jeho povrchu.

Ještě detailnější pohled ukáže časové zpoždění mezi absorpcí záření a jeho reemisí, které je způsobeno konečnou tepelnou vodivostí. Maximum povrchového rozložení teploty je tedy poněkud posunuté od směru Slunce-asteroid, což je podstatná skutečnost, neboť *změna velké poloosy dráhy je dána průmětem síly do směru pohybu*. Bez tohoto zpoždění by tedy nedocházelo k výraznému posunu ke Slunci nebo od něj (viz. též obr.5.)

Tab. 1 - Základní tepelné parametry různých typů materiálů, z nichž bývají tvořeny meteoroidy.

Typ materiálu	Hustota na povrchu [kg/m ³]	Hustota [kg/m ³]	Tepelná vodivost [W/m/K]	Specifické teplo [J/kg/K]
pokrytý regolitem	1500	3500	0,001 - 0,01	680
bazaltický	3500	3500	0,5 - 2,5	680
metalický	8000	8000	~40	500
C-type	1000	1000	0,1 - 1	1500

Řešení linearizované diferenciální rovnice vede k určení rozložení teploty uvnitř i na povrchu tělesa. Z povrchového rozložení teploty pak můžeme spočítat vztahy pro tepelnou sílu, které pak používáme v *pohybových rovnicích*. Komplettní řešení nelinearizovaného problému je možné pouze numerickými metodami.

Podstatnými parametry, které zásadně ovlivňují výsledný Yarkovského efekt, jsou *frekvence*, s jakou se mění tok záření dopadajícího na povrch tělesa, a tzv. *obliquita*, tj. úhel mezi rotační osou a kolmicí k rovině oběhu asteroidu. Při studiu rotující planety obíhající kolem Slunce tedy budou hrát roli rotační frekvence planety a orbitální frekvence (střední pohyb) - podle toho, kterou z těchto frekvencí uvažujeme, hovoříme o *denním* nebo *ročním* Yarkovského efektu.

Podíváme-li se na závislost Yarkovského efektu na obliquitě, zjistíme, že denní efekt je maximální, pokud je rotační osa kolmá k rovině oběhu (viz obr. 6). Podle toho, zda těleso rotuje prográdně (ve směru oběhu) či retrográdně, dochází ke zvětšování nebo zmenšování velké poloosy. Je-li rotační osa orientována v rovině oběhu, nedochází na povrchu tělesa v průběhu jedné otočky ke změnám teploty a změny velké poloosy díky dennímu efektu jsou pak nulové. Naopak maximální účinnosti dosahuje efekt roční, který však může pouze zmenšovat velkou poloosu, nikoli zvětšovat (tepelná síla totiž vždy působí proti směru pohybu tělesa, viz obr. 7).

Důležitým procesem, který ještě musíme uvážit, jsou srážky asteroidů. Ty mohou způsobit rozpad asteroidu na menší fragmenty (u kterých se pak samozřejmě změní vliv tepelných sil). Pro těleso o poloměru 1 m v hlavním pásu dochází k takové události v průměru jednou za 17 Myr.

V případě nedestruktivní srážky může alespoň dojít ke změně směru rotační osy. Tyto *reorientace* ovlivňují především denní efekt - pokud jsou příliš časté, podobají se změny velké poloosy náhodné procházce. Asteroid pak dosáhne oblasti rezonance za podstatně delší dobu, než kdyby k žádným

reorientacím nedocházelo. Pro střední dobu reorientace platí přibližný vztah $\tau = 15 \sqrt{R}$ Myr, kde za poloměr asteroidu R dosazujeme v metrech.

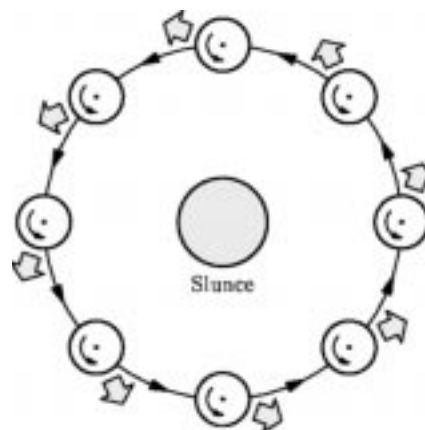
Účinnost Yarkovského tepelného efektu je shrnuta na obr. 8, který ukazuje o kolik se může asteroid s daným rozměrem maximálně posunout během své doby života, než bude kolizí s jiným tělesem rozbit na menší fragmenty. Vidíme, že pro tělesa pokrytá vrstvou regolitu může způsobit změnu velké poloosy až 0,1 AU za 1 Myr. Není však jisté, zda regolitová tělesa s poloměrem 0,1 m až 1 m vůbec existují. Avšak i pro fragmenty s poloměrem okolo 10 m je drift při vhodně orientované rotační ose nezanedbatelný - až 0,01 AU/Myr. Další skupinou těles, pro něž jsou driftы velké poloosy větší než 10^{-3} AU, jsou bazaltické fragmenty o poloměrech 1 až 50 m.

Existují i aplikace Yarkovského efektu pro velká tělesa o průměru řádově 10 km, která driftují velmi pomalu, jen 10^{-5} AU/Myr. O těchto případech však pojednáme někdy příště.

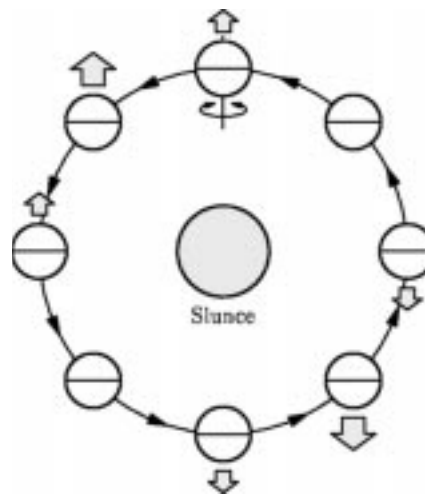
Vysvětlení expozičních dob meteoritů

Jedním z argumentů, který podporuje existenci Yarkovského tepelných jevů, je správné vysvětlení expozičních dob meteoritů, které nacházíme na Zemi. Pojem doby expozice kosmickým zářením (cosmic ray exposure, CRE) znamená, že fragment se po impaktu dostane z podpovrchových vrstev a začne na něj působit kosmické záření, které produkuje vzácné plyny v materiálech tělesa. Po dopadu na povrch Země je před vlivem kosmického záření chráněn atmosférou planety (viz. obr. 9). Laboratorní analýzou zastoupení vzácných plynů pak lze měřit časový úsek CRE.

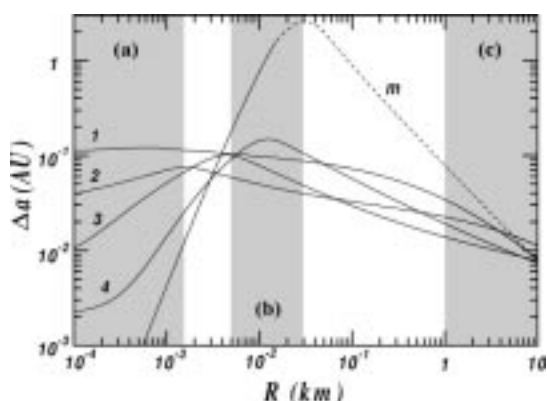
Hlavním pozorovaným faktem jsou CRE časy mnohem delší než je typická doba, kterou planety setrvávají v hlavních rezonancích (v_6 , 3:1 asi 1 - 10 Myr). Navíc mají různé taxonomické třídy meteoritů kvalitativní a kvantitativní jiné CRE.



Obr. 6 - Denní Yarkovského efekt. Rotační osa asteroidu je kolmá k jeho orbitální rovině. Silné šipky znázorňují tepelná zrychlení, která vznikají díky nahřívání přivrácené strany tělesa Sluncem. Pro těleso rotující prográdně (jako na tomto obrázku) způsobuje podélná komponenta tepelné síly zvětšování dráhy, retrográdní rotace by zapříčiňovala zmenšování.



Obr. 7 - Roční Yarkovského efekt. Rotační osa tentokrát leží v rovině dráhy. Nahřívání a ochlazení severní a jižní polokoule dává vzniknout tepelné síle, která působí podél rotační osy. Roční efekt vždy způsobuje zmenšování drah (nezávislost na směru rotace naznačuje dvojitá šipka u rotační osy). Tepelné parametry tělesa jsou zvoleny tak, že tepelné zpoždění odpovídá posuvu v dráze právě o 45°, obecně však může nabývat i jiných hodnot.



Obr. 8 - Tepelná změna velké poloosy Δa během kolizní doby života asteroidálního fragmentu v závislosti na poloměru R . Započteny jsou denní i roční varianta Yarkovského efektu. Předpokládáme různé hodnoty vodivosti povrchové vrstvy: (1) $K = 0,002 \text{ W/m/K}$, (2) $0,02 \text{ W/m/K}$, (3) $0,2 \text{ W/m/K}$, (4) 2 W/m/K a (m) 40 W/m/K . Za pozornost stojí skutečnost, že v oblastech (a) a (b) silně závisí výsledné drift Δa na vodivosti K , ale v části označené (c), tj. pro velké fragmenty, není výsledek vzhledem k tomuto parametru citlivý.

Vezmeme-li v úvahu Yarkovského efekt, můžeme tento problém přirozeně objasnit. Během doby, kdy se fragmenty díky tepelnému driftu pomalu dostávají do rezonance, mají dostatek času akumulovat dlouhé CRE. Navíc meteority různých taxonomických tříd mají i odlišné tepelné vlastnosti. Mateřská tělesa pak budou vykazovat různé vysoké drifts velké poloosy a to implikuje i různou životní dobu před pádem do rezonance.

Konkrétní porovnání počtu meteoritů a numerických modelů jejich přenosu z hlavního pásu jsou uvedeny na obr. 10. Jedná se o Monte Carlo model transportu milionů meteoroidů s rozměry od 10 cm do stovek metrů z vnitřní části hlavního pásu k Zemi. Model zahrnuje jednodušší orbitální dynamiku (pouze sekulární změny velké poloosy způsobené Yarkovského efektem) a přibližné vymezení poloh hlavních rezo-

nancí, naopak podrobně zachycuje srážkovou dynamiku, včetně více-generačních rozpadů těles a reorientací jejich rotačních os. Tato simulace jednak vykazuje mnohem vyšší účinnost transportu než modely, které nezapočítávají Yarkovského efekt, a jednak dobře reprodukuje pozorované rozdělení expozičních dob meteoritů.

Fragmenty z (6) Hebe a (170) Maria

Podívejme se nyní na orbitální vývoj jednotlivých asteroidálních fragmentů, jak jej lze získat numerickou integrací. Předpokládejme, že tato malá tělíska (např. s poloměrem 1 m) byla díky impaktu (srážce s jinou planetkou) uvolněna z mateřské planetky (6) Hebe nebo (170) Maria. Tato dvě tělesa patří mezi velmi dobré kandidáty na zdroj malých těles křížících dráhu

Země.

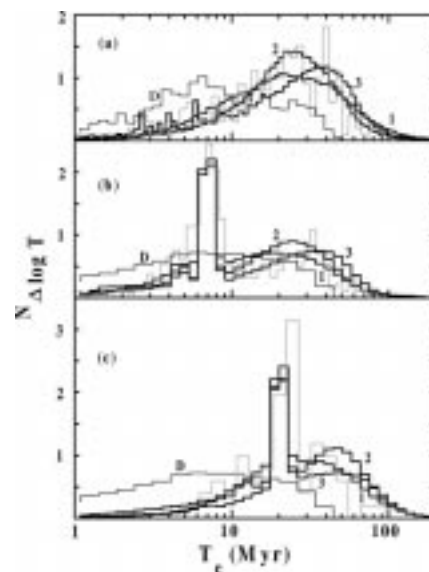
Planetka (6) Hebe patří mezi největší v hlavním pásu, má průměr 192 km. Asteroid byl podroben zevrubné fotometrické analýze a známe tedy s dobrou přesností periodu rotace 7,2745 h i polohu pólu. Hebe byla věnována velká pozornost i z hlediska možného zdroje meteoritů - její velikost z ní dělá dobrý terč pro větší množství malých impaktů uvolňujících malá tělesa, navíc je umístěna mezi dvěma silnými rezonancemi 3:1 a v_6 ($a = 2,425 \text{ AU}$). Spektroskopická data naznačují, že tento asteroid by mohl být zdrojem významné části meteoritů, tzv. obyčejných chondritů.

(170) Maria s poloměrem 23 km je mnohem menší než Hebe, ale přitom se nachází jen 0,05 AU od vnějšího okraje rezonance 3:1 s Jupiterem (velká poloosa $a = 2,553 \text{ AU}$). Planetka patří do stejnojmenné rodiny Maria, která čítá asi 80 členů.

Na obr. 11 a 12 tedy vidíme příklady numerických integrací orbitálního vývoje malých fragmentů uvolněných z těchto dvou mateřských asteroidů. Podrobné komentáře jsou uvedeny přímo u jednotlivých obrázků.

Zpracované výsledky těchto numerických simulací mohou být důležitým vstupním parametrem pro modely přenosu meteoroidů z hlavního pásu k Zemi, které uvažují pouze jednoduchou dynamiku, ale pracují s velkým počtem částic a podstatně složitějším modelem srážek mezi asteroidy. Problémy, které jsme např. zkoumali, jsou:

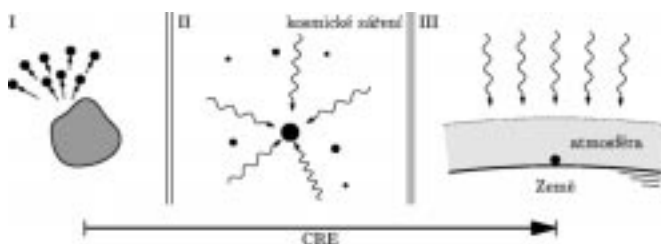
1. Určení podílu těles, které procházejí hlavními rezonancemi bez toho, aby došlo ke zvýšení jejich excentricity. Tento podíl se mění v závislosti na tom, jak rychle fragmenty driftují a tedy i na jejich velikosti



Obr. 10 - Závislost normalizované četnosti meteoritů N na jejich kosmické expoziční době T_e , porovnání skutečného počtu meteoritů (šedá linie), modelu bez Yarkovského efektu (D) a modelů s Yarkovského efektem při uvažované vodivosti (1) $K = 0,0015 \text{ W/m/K}$, (2) $0,1 \text{ W/m/K}$, (3) 1 W/m/K . Obrázky ukazují tři typy meteoritů: (a) L chondrity, které mají původ v rodině Flora, (b) H chondrity, jejichž mateřským tělesem může být Hebe a (c) HED meteority, u kterých je mateřské těleso známé přesně - je jím planetka Vesta.

a tepelných vlastnostech. Například malých regolitových těles s poloměrem 1 m projde rezonancí až 50% (viz. obr. 11).

2. Kvalifikace vlivu slabých rezonancí na rychlost transportu k hlavním rezonancím. Ve vnitřní části hlavního pásu je dislokováno velké množství slabších rezonancí (především vnější rezonance s Marsem a rezonance tří těles Jupiter - Saturn - asteroid) a právě dlouhodobé záchyty velkých, pomalu driftu-



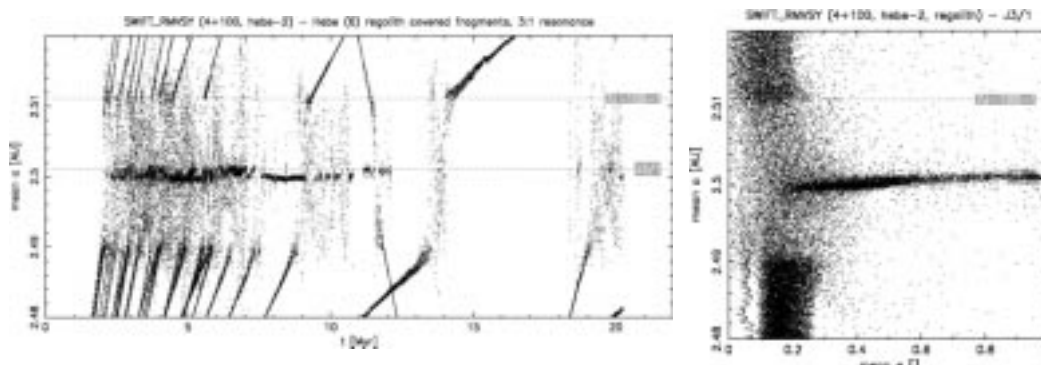
Obr. 9 - K vysvětlení pojmu doby expozice kosmickým zářením (cosmic ray exposure, CRE).

jších těles v těchto rezonancích (viz obr. 10) by mohly podstatně prodloužit dobu, po kterou trvá doprava do silných rezonancí 3:1 a ν_6 . Jak se však ukázalo, není tento vliv tak podstatný, neboť část těles prochází rezonancemi bez změny driftu, u dalších jsou kromě záchytných v rezonancích pozorovatelné i skoky; pro celý soubor částic se ze statistického hlediska tyto efekty potlačí.

Obrázky uvedené v této kapitole jsou výsledkem numerických simulací orbitálního vývoje malých těles se započtením gravitační síly Slunce, planet a také Yarkovského tepelné síly. Pro výpočet jsme použili nový rychlý numerický integrátor SWIFT_RMVS3. Máme k dispozici několik počítačů s operačním systémem Linux osazených procesory Pentium-II a Celeron 266 až 500 MHz, pracovní stanice Digital s procesory Alpha 400 a 500 MHz. Pro představu uvedme, že pro výpočet orbitálního vývoje 7 planet a 100 fragmentů po dobu 100 Myr je třeba přibližně týden strojového času a vyprodukuje se přitom 500 MB dat.

Závěr

Obory zabývající se sluneční soustavou se v současné době velmi dynamicky rozvíjejí - ať už je to díky robotizovaným pozemským dalekohledům, kosmickým meziplanetárním sondám, novým teoretickým modelům, numerickým metodám, či rozvoji výpočetní techniky. Po desetiletích vědeckého bádání začínají jednotlivé díly sklá-



Obr. 11 - Okolí rezonance 3:1 s Jupiterem na grafech $a(t)$, $a(e)$. Vyznačeny jsou polohy všech regolitových fragmentů, které oblasti procházely během 20 Myr. Asi 50 % těles díky velkému tepelnému driftu rezonancí prošlo, aniž by se u nich zvýšila excentricita. Pokud však došlo k záchytu fragmentu, mohla se jeho excentricita zvýšit i nad hodnotu 0,9.

danky zapadat do sebe a objevuje se složitý a krásný obraz naší sluneční soustavy.

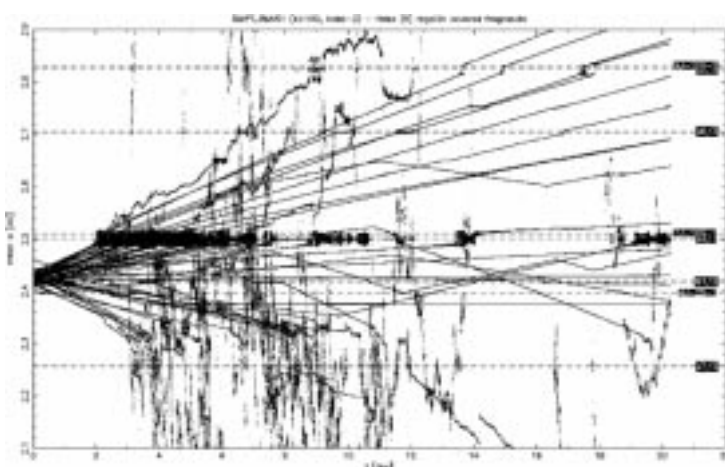
Řada problémů však zůstává kvalitativně či kvantitativně neobjasněna. Týká se to především počáteční fáze formování sluneční soustavy, kondenzace planetesimál a jejich následný vývoj ke sluneční soustavě, jak ji známe dnes (tj. s 8 - 9 planetami a dvěmi hlavními rezervoáry malých těles). Tato otázka je velmi aktuální už i v souvislosti s vlastnostmi planetárních soustav pozorovaných kolem jiných hvězd.

Článek vzniknul na základě diplomové práce „Orbitální vývoj asteroidálních fragmentů pod vlivem gravitace planet a tepelných efektů“, kterou autor vypracoval na Astronomickém ústavu MFF UK pod vedením RNDr. Davida Vokrouhlického, DrSc. v roce 1999. Na internetové adrese <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/mp/> naleznete podrobné informace o tomto tématu

včetně nových výsledků a odkazů na další relevantní stránky.

Literatura

- Farinella, P., Froeschlé, Ch., Gonczi, R.: *Meteorite delivery and transport*. Asteroids, Comets, Meteors **1993**, 205-222 (1994)
- Gladman, B. J., et al.: *Dynamical lifetimes of objects injected into asteroid belt resonances*. Science **277**, 197-201 (1997)
- Farinella, P., Vokrouhlický, D., Hartmann, W. K.: *Meteorite delivery via Yarkovsky orbital drift*. Icarus **132**, 378-387 (1998)
- Vokrouhlický, D.: *A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments*. Astron. Astrophys. **344**, 362-366 (1999)
- Vokrouhlický, D., Farinella, P.: *Delivery of stony meteorites from the asteroid belt: a dynamical-collisional Monte Carlo model*. Nature, v tisku (1999)



Obr. 12 - Orbitální vývoj 51 regolitových fragmentů o poloměru 1 m uvolněných z (6) Hebe, graf $a(t)$ (vývoj velké poloosy mezi 2,1 AU až 2,9 AU s časem od 0 do 20 Myr). Na počátku v čase nula již mají jednotlivé fragmenty odlišnou velkou poloosu. Důvodem této změny orbitálních elementů je model vzniku impaktem, při kterém byly fragmentům uděleny nějaké počáteční rychlosti (řádově 100 m/s). Velká poloosa fragmentů se díky tepelné síle zvětšuje nebo zmenšuje, při reorientacích se mění velikost a směr driftu (pokud bychom Yarkovského efekt neuvažovali, viděli bychom na grafu převážně vodorovné čáry). Na své cestě hlavním pásem interagují asteroidy s rezonancemi, což se projevuje záchyty a skoky ve velké poloose - nejzřetelněji se takto projevuje rezonance 3:1 s Jupiterem na 2,5 AU. Polohy hlavních rezonancí jsou vyznačeny vodorovnými přerušovanými čarami. Rezonance ν_6 není na tomto grafu vyznačena, neboť její poloha ve velké poloose je závislá na sklonu dráhy asteroidu. Každopádně výrazně zvyšuje excentricitu, což vede k přiblížením s Marsem, Zemí a Venuší (okolo 2,3 AU jsou patrné skokové změny velké poloosy o řádově 0,05 AU zapříčiněné právě blízkými setkáními s vnitřními planetami). Větší skoky velké poloosy náležejí částicím na tzv. vyvinutých drahách s vysokou excentricitou.