

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

BRNO 2013

PETR FATKA



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY



Páry a rodiny asteroidů

Bakalářská práce

Petr Fatka

Vedoucí práce: Mgr. Petr Pravec, Dr.

Brno 2013

Bibliografický záznam

Autor: Petr Fatka
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Páry a rodiny asteroidů

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

Vedoucí práce: Mgr. Petr Pravec, Dr.

Akademický rok: 2012/13

Počet stran: viii + 28

Klíčová slova: asteroid; planetka; rodina planetek; planetkový pár

Bibliographic Entry

Author: Petr Fatka
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Pairs and families of asteroids

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: Mgr. Petr Pravec, Dr.

Academic Year: 2012/13

Number of Pages: viii + 28

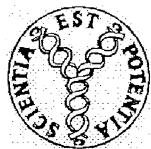
Keywords: asteroid; minor planet; asteroid family; asteroid pair

Abstrakt

Tato práce se zabývá provázaností mezi planetkovými rodinami a planetkovými páry. Cílem práce je zúžit seznam kandidátů na planetkové páry vyloučením možnosti detekovat pár v rodině. Úvodní část práce je zaměřena na obecné informace o planetkách, například o jejich výskytu ve Sluneční soustavě, chemickém složení a podobně. Následující kapitola je již zaměřena na druhy planetkových systémů a na jejich odlišné způsoby vzniku. V praktické části je čtenář seznámen s použitými databázemi kandidátů i rodin planetek a na závěr je seznámen s výsledky této práce.

Abstract

This thesis deals with consistency between asteroid families and asteroid pairs. Purpose of this thesis is to reduce number of candidates for asteroid pairs by excluding possibility to detect a pair in a family. The introductory part is focused on general informations about asteroids, such as their occurrence in the solar system, chemical composition etc. Next chapter is focused on variant kinds of asteroid systems and their different origins. In the practical part the reader is familiar with used databases of candidates and families and in the end with the results of this thesis.



Masarykova univerzita

Přírodovědecká fakulta



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student : Petr Fatka
Studijní program : Fyzika
Studijní obor : Astrofyzika

Ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PŘF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s tématem:

Páry a rodiny asteroidů


Pairs and families of asteroids

Zásady pro vypracování:

Některé asteroidy obíhající mezi drahami Marsu a Jupitera se vyskytují v párech (Vokrouhlický a Nesvorný 2008, Pravec a Vokrouhlický 2009). Existenci těchto párů vysvětluje teorie rotačního štěpení (Pravec et al. 2010). V pásu asteroidů se přitom vyskytují i tzv. rodiny asteroidů, které vznikly katastrofickými srážkami původních větších asteroidů. Víme, že některé rotačně rozštěpené páry se vyskytují zároveň i v kolizních rodinách. Souvislost mezi páry a rodinami je zatím ještě nejasná. Úkolem studenta je zpracovat databáze asteroidálních párů a rodin, najít jejich vzájemný překryv a pokusit se odhadnout, jak přítomnost páru asteroidů v určité rodině limituje jeho detekovatelnost stávajícími technikami statistické detekce asteroidálních párů.

Vedoucí bakalářské práce : Mgr. Petr Pravec, Dr.
Datum zadání bakalářské práce : září 2012
Datum odevzdání bakalářské práce : dle harmonogramu ak. roku 2012/2013

V Brně dne 6. 11. 2012


Prof. Rikard von Unge, Ph.D.
ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky
PŘF MU

Zadání bakalářské práce převzal dne: 20.11.2012

Podpis studenta



Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Petru Pravcovi za věnování volného času, který si našel ve svém nabitém programu. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mě vytrvale podporuje ve studiu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 23. května 2013

.....
Petr Fatka

Obsah

Úvod	viii
Kapitola 1. Co to jsou asteroidy?	1
1.1 První objevy	1
1.2 Značení	2
1.3 Počet a výskyt	3
1.3.1 Blízkozemní planetky	3
1.3.2 Hlavní pás	4
1.3.3 Kentauři	6
1.3.4 Transneptunická tělesa	6
1.4 Třídy planetek	7
1.5 Dráhy a rotace	8
Kapitola 2. Vznik planetkových systémů	10
2.1 Rodiny planetek	10
2.2 Binární planetky	11
2.3 Planetkové páry	11
Kapitola 3. Použité databáze planetek	13
3.1 Značení dráhových elementů	13
3.2 Vzdálenosti asteroidů v pěti-rozměrném prostoru	13
3.3 Použitá databáze planetkových rodin	14
3.4 Databáze kandidátů na planetkové páry	14
Kapitola 4. Praktická část	17
4.1 Ukázky vyřazených kandidátů	17
4.2 Shrnutí všech vyřazených kandidátů	18
4.3 Provázanost některých rodin	18
Závěr	23
Přílohy	24
Seznam použité literatury	26

Úvod

Asteroidy jsou nejhojněji zastoupenými objekty ve Sluneční soustavě, proto má smysl zabývat se jednak jejich současnými drahami, tak i jejich drahami po kterých obíhaly v dávné minulosti. Pomocí zpětného integrování drah jsme schopni určit to, jestli některé planetky v minulosti tvořily jedno těleso. Tyto údaje nám napomáhají objasnit vývoj naší Sluneční soustavy. Dále jsme schopni ze znalosti dráhových elementů odhadnout jejich budoucí trajektorie a zhodnotit případné nebezpečí pro život na Zemi.

Kapitola 1

Co to jsou asteroidy?

Pojmem asteroidy, nebo-li dnes korektněji planetky, označujeme relativně malá tělesa (od několika metrů až po stovky kilometrů) rozličných tvarů ve Sluneční soustavě. Co jim ale chybí do velikosti, to si nahrazují počtem. V současnosti jich je zaevidovaných zhruba šest set tisíc (k 22/05/2013) [9]. Jejich celkový počet ovšem silně závisí na spodní hranici jejich velikosti. Kdyby touto hranicí bylo sto metrů, tak se celkový počet planetek odhaduje na sto padesát milionů, ale kdybychom uvažovali pouze planetky větší než jeden kilometr, tak bychom došli k číslu těsně pod dva miliony. Nutno ale podotknout, že celková hmotnost všech planetek ani zdaleka nedosahuje hmotnosti Země (přibližně $5 \cdot 10^{-4} M_{\oplus}$).

Světelné křivky se již počítají na tisíce a jen o trochu hůře jsou na tom světelná spektra. Pochopitelně tato čísla neustále narůstají. Fakt, že se většina planetek nachází podobně jako většina ostatních těles poblíž ekliptiky asi překvapí málokoho, ale překvapivé může být to, že 95 % zaevidovaných planetek se nachází mezi Marsem a Jupiterem v oblasti tzn. hlavního pásu. A jak vlastně poznáme planetku na obloze? Planetky se podobně jako hvězdy jeví v dalekohledu jako bodové zdroje, ale při delším pozorování zjistíme, že se pohybují o něco rychleji a předbíhají okolní hvězdy od východu k západu typicky rychlostí jedné úhlové minuty za hodinu (v případě opozice se opožďují o půl úhlové minuty za hodinu).

1.1 První objevy

Předpovězení dalšího tělesa (planety) mezi Marsem a Jupiterem učinil již v 16. století Johannes Kepler, avšak uznání za pozorování a objevení prvního asteroidu se připisuje tehdejšímu řediteli palermské hvězdárny Guiseppu Piazzimu a datuje na přelom roku 1800 a 1801 (a to doslova, Guiseppe Piazzi porovnával vlastní pozorování z poslední noci roku 1800 a první noci v následujícím roce). Piazzi pozoroval svůj objekt, kterému přidělil jméno Ceres Ferdinanda (přídomek Ferdinanda z politických důvodů vymizel), do poloviny února, kdy musel ze zdravotních důvodů pozorování přerušit. Tehdejší brilantní matematik Carl Fridrich Gauss předpověděl trajektorii asteroidu a tak mohl Wilhelm Matthias Olbers objekt znovu nalézt na konci roku 1801 (přesně jeden rok po prvním pozorování). Při dalším proměřování polohy asteroidu (1) Ceres učinil Olbers objev nového tělesa, které dnes nazýváme (2) Pallas. Již v polovině roku 1802 se Olbers zabývá myšlenkou, jestli asteroidy (1) Ceres a (2) Pallas kdysi nebyly jedno těleso, které se rozpadlo a tak se začaly

hledat další objekty. Objevit další objekt se podařil roku 1804 Olbertovu příteli Karlu Hardingu. Konkrétně se jednalo o asteroid (3) Juno. O necelé tři roky později objevil Olbers planetku známou pod jménem (4) Vesta, která byla po dlouhou dobu poslední objevenou. Po dalších devíti letech neúspěšného pátrání vyloučil Olbers existenci dalších podobných objektů a zastavil tak výzkum v oblasti planetek.

Další éru objevování planetek odstartoval Karl Ludwig Henke, který od roku 1830 zaznamenával polohu těles v okuláru. Henke měl zcela jistě velkou trpělivost, jelikož první objev učinil až po patnácti letech marného snažení. Jednalo se o planetku (5) Astraea. Za další dva roky potvrdil existenci dalších planetek objevením (6) Hebe. Od té doby se „roztrhl pytel“ s dalšími objevy a k roku 1890 bylo známo již 300 planetek.

Významným průkopníkem v devadesátých letech devatenáctého století se stal Max Wolf, který použil k objevování nových planetek fotografii. Zaznamenáváním hvězdných objektů na fotografické desky mohl poměrně přesně porovnávat pozici jednotlivých objektů a hledat tak případné pohyby planetek. Využití této techniky mu také dovolilo dosáhnout planetek o jasnostech převyšujících dvanáctou magnitudu. Proto není divu, že za svou astronomickou kariéru objevil celkem 228 objektů a na dalších dvaceti je uveden jako spoluobjevitel.

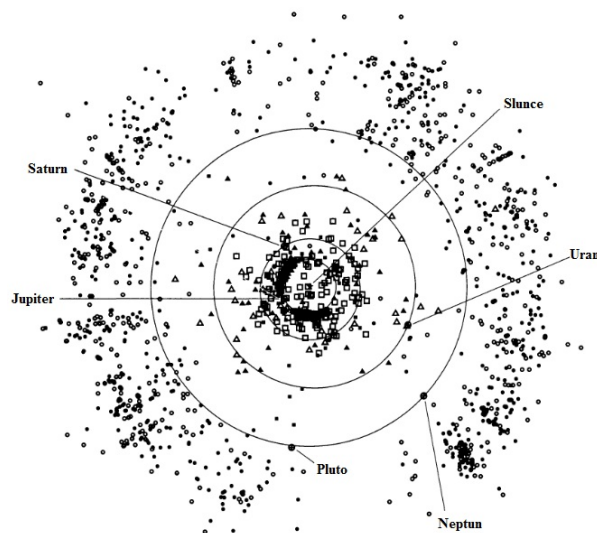
Dalším významným fotografem byl Joel Hastings Metcalf, který použil jinou metodu než Wolf. Wolf se snažil synchronizovat pohyb dalekohledu s pohybem hvězd, kdežto Metcalf synchronizoval pohyb dalekohledu s předpokládaným pohybem planetek (planetky se totiž pohybují typicky o jednu úhlovou minutu za hodinu rychleji než hvězdy). To mu poskytlo možnost detekovat objekty až o dvě magnitudy slabší než byl schopen detekovat Wolf. Metcalfovi se podařilo objevit 41 planetek a 6 komet. Případné zájemce o podrobnější historii odkazují na [10], kde také naleznete další vývoj objevování planetek. [10]

1.2 Značení

Planetky mající již dobře známou orbitální dráhu jsou označovány velmi jednoduše a přehledně. Označení takovéto planetky je ve tvaru čísla v závorce, které určuje pořadí v katalogu drah, a jménem, které obvykle navrhla osoba nejvíce se podílející na objevu. Nejznámějšími příklady mohou být (1) Ceres nebo (134340) Pluto. U planetek s nedostatečně přesně známou dráhou oběhu se používá předběžné označení, kde se místo jména uvádí rok objevu společně se dvěma písmeny a případně indexem. Například (159357) 2007 EF₂₀₄, kde rok objevu je rok 2007, první písmeno značí pořadí dvoutýdnu od začátku roku ve kterém se objev nachází (v tomto případě se jednalo o pátý dvoutýden, tedy písmeno E) a druhé písmeno značí pořadí objeveného objektu v tomto dvoutýdnu. Jelikož objevů je mnoho a písmen v anglické abecedě poměrně málo (navíc se vynechává písmeno I), doplňuje se označení číselným indexem, které značí kolikrát se začalo počítat znovu od písmene A. Samozřejmě může také dojít k tomu, že se některá planetka objeví dvakrát, v tom případě se použije starší označení a to novější se vynechá (tím je myšleno, že se nepřidá jinému objektu). [2]

1.3 Počet a výskyt

Jak již bylo řečeno za začátku této kapitoly, planetky jsou nejhojněji se vyskytující objekty ve Sluneční soustavě a jejich rozmístění není zcela náhodné, viz obrázek 1.1, ale je možné je roztrždit do několika skupin. Na ty nejvýznamnější se podíváme jednotlivě.

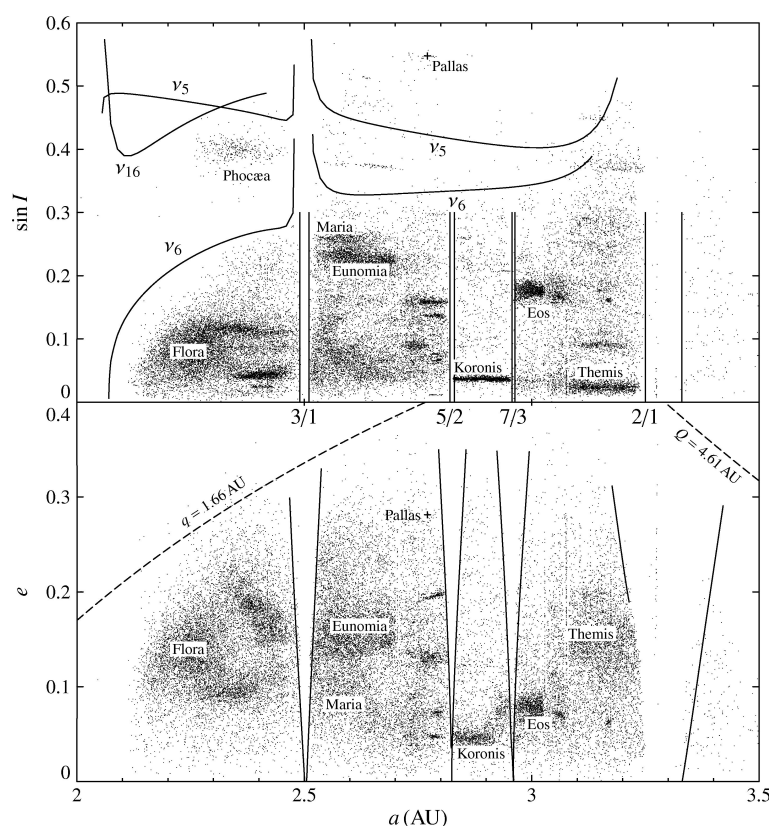


Obrázek 1.1: Schématické naznačení výskytu planetek ve Sluneční soustavě. Za povšimnutí stojí Jupiterovy trojané [2]

1.3.1 Blízkozemní planetky

Jak již název napovídá, jedná se o planetky, které obíhají v blízkosti Země (NEAs - Near Earth Asteroids) a jejich velká poloosa je menší než 1,3 AU. Počet známých blízkozemních planetek je v řádech tisíců a je jim věnována poměrně velká pozornost a to nejen proto, že jsou nejbližší, tudíž poměrně snadno dosažitelné, ale také proto, že mohou představovat nebezpečí, pokud by křížily dráhu Země. Můžeme je dále dělit do několika podskupin pojmenovaných podle jejich nejznámějších zástupců.

- **Amor** - tyto planetky se k dráze Země pouze přibližují, ale nekřížují ji, vzdálenost v periheliu je od 1,017 do 1,3 AU (i když nekříží dráhu Země, mohou křížit dráhu Marsu)
- **Apollo** - planetky s hlavní poloosou větší než 1 AU, ale jejich perihelium je menší než afelium Země, proto kříží dráhu Země
- **Aten** - planetky s hlavní poloosou menší než 1 AU, jejich afelium je větší než perihelium Země, proto také kříží dráhu Země



Obrázek 1.2: Zobrazení Kirkwoodových mezer v oblasti hlavního pásu [2]

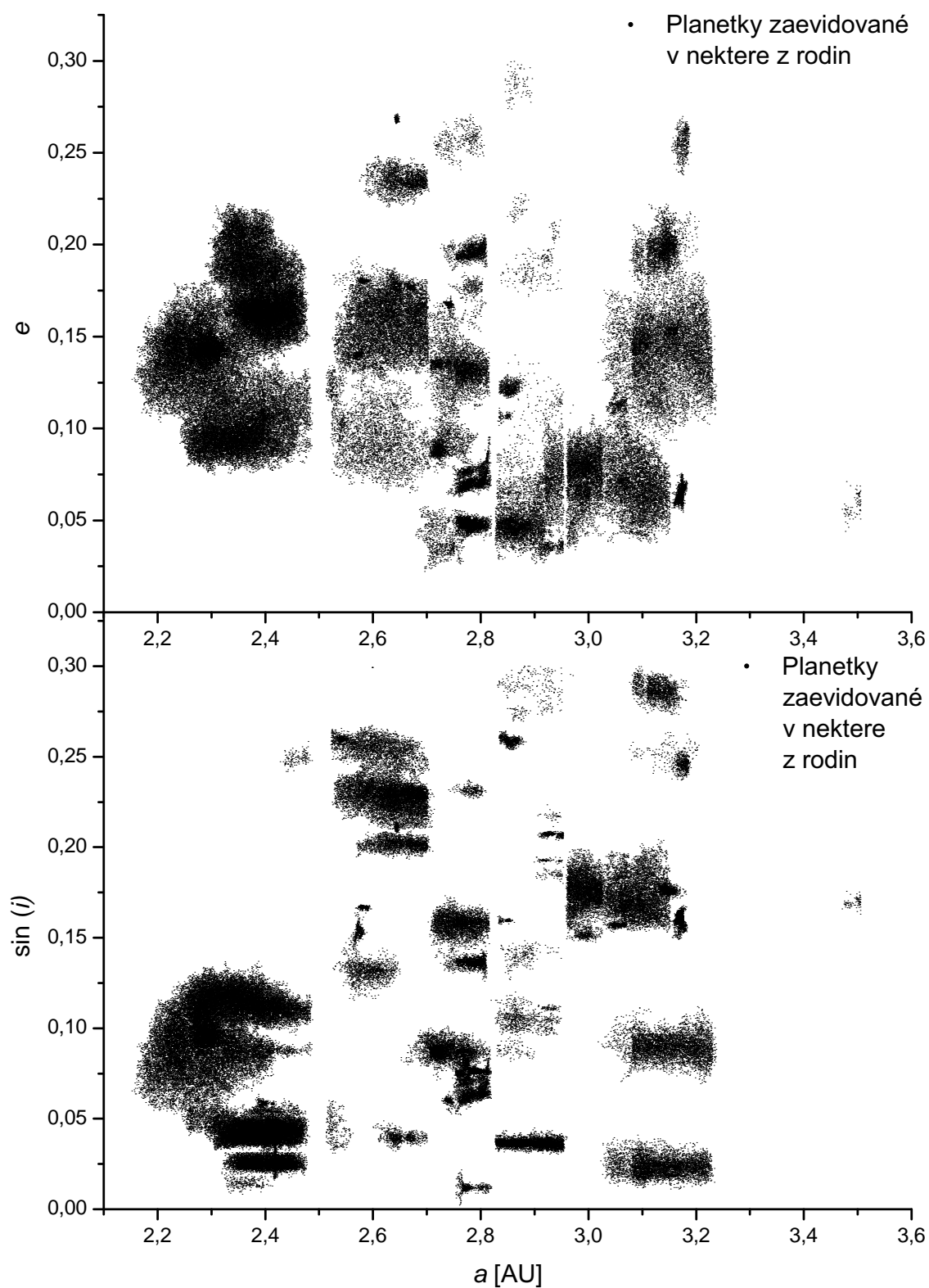
1.3.2 Hlavní pás

Oblast vzdálená od Slunce přibližně od 2 do 3,5 AU (mezi Marsem a Jupiterem) se nazývá hlavní pás a vyskytuje se zde drtivá většina nalezených planetek (nejedná se ovšem o oblast s největším počtem planetek, ale uplatňuje se zde výběrový efekt).

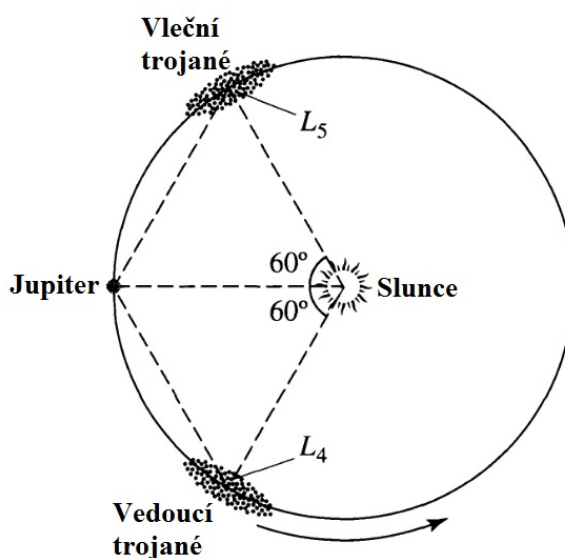
Rozložení planetek v tomto pásu není rovnoměrné, ale uplatňuje se zde přítomnost Jupiteru. To se projeví tím, že pozorujeme tzn. Kirkwoodovy mezery (oběžná perioda planetek je v poměru malých čísel vzhledem k oběžné době Jupiteru, viz obrázek 1.2). Jedná se o oblasti, které kvůli gravitačním rezonancím s Jupiterem jsou pro planetky nestabilní.

Za zmínku zcela jistě stojí také tzv. trojané. Jedná se o planetky obíhající po podobné dráze jako Jupiter, ale buď ho předbíhají nebo se za ním opožďují přibližně o 60° (nacházejí se v okolí Lagrangeových bodů L_4 a L_5). Výskyt Trojanů je naznačen na obrázku 1.3. V neinerciální soustavě spojené s obíhající planetkou a Sluncem je součet všech sil v Lagrangeových bodech působících na planetky nulový, proto zde mohou planetky setrvat nekonečně dlouhou dobu¹.

¹Na planetky přeci jen nějaká výsledná síla působí, ale body L_4 a L_5 jsou stabilní a tak planetky kolem těchto bodů librují.



Obrázek 1.3: Na těchto dvou grafech vidíme rozmístění planetek (které jsou zaevidované v některé rodině z datebáze *Nesvorný HCM Asteroid Families V2.0*) v oblasti hlavního pásu, patrné jsou opět Kirkwoodovy mezery



Obrázek 1.4: Naznačení výskytu Jupiterových trojanů v Lagrangeových bodech [2]

1.3.3 Kentauři

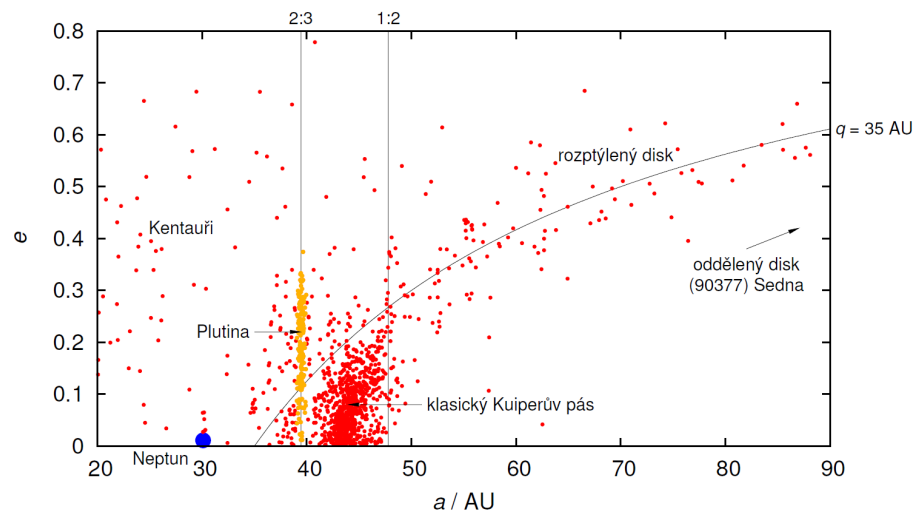
Pojmem kentaury v astronomii označujeme planety s výstřednými drahami nacházejícími se mezi Jupiterem a Neptunem (mohou i křížit jeho dráhu). Jedná se o tělesa připomínající jádra komet a některé z nich skutečně v periheliu jeví kometární aktivitu.

1.3.4 Transneptunická tělesa

Transneptunická tělesa (TNO - Trans-Neptunian Objects), jak už napovídá samotný název, se nacházejí za oběžnou dráhou Neptunu. Jedná se pravděpodobně o nejpočetnější planetkovou oblast ve Sluneční soustavě. Podobně jako u Jupiteru, i zde se uplatňují gravitační rezonance, tentokrát s Neptunem. Jejich rozmístění je naznačeno na obrázku 1.5.

- **Kuiperův pás** - tuto oblast, rozkládající se ve vzdálenosti přibližně od 35 do 50 AU, lze rozdělit na několik podoblastí, jedná se také o zdroj krátkoperiodických komet
 - **Cubewanos** - planety mající obecně malou excentricitu (pod 0,15) a hlavní poloosu od 41,8 do 48 AU
 - **Plutinos** - planety mívající větší excentricitu i sklon drah, navíc jsou v rezonanci s Neptunem v poměru 3:2, velké poloosy mají v rozmezí od 39,3 do 39,6 AU
 - **Ostatní rezonance** - dále se zde nachází planety v rezonanci s Neptunem v jiných poměrech malých čísel, ty už ale hromadné označení nemají
- **Objekty rozptýleného disku** - do této skupiny (SDOs - Scattered Disk Objects) řadíme tělesa s afeliem blízkým dráze Neptunu, hlavní poloosou větší než 50 AU a excentricitou $\geq 0,4$

- **Objekty odděleného disku** - sem zařazujeme objekty s hlavními poloosami v řádech stovek AU, velmi vysokými excentricitami a které ani v periheliu Neptun nijak neovlivňuje
- **Oortův oblak** - sem řadíme objekty, které mají vzdálenost v periheliu větší jak 55 AU



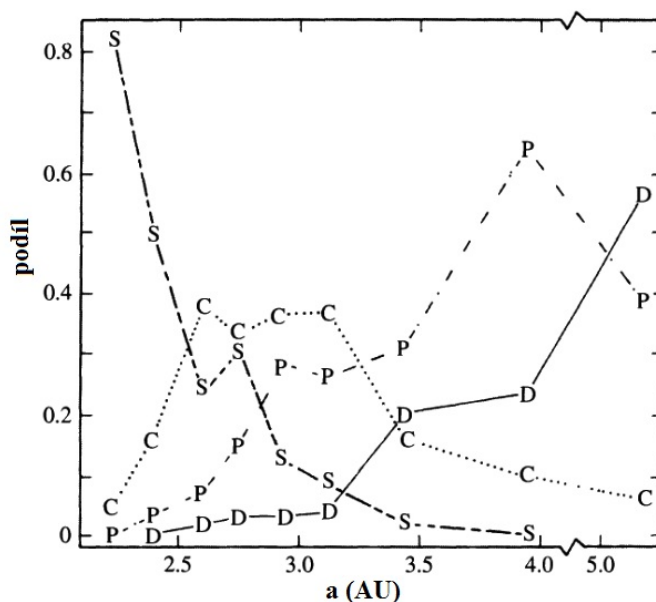
Obrázek 1.5: Rozmístění známých planetek ve větších částech Sluneční soustavy [2]

1.4 Třídy planetek

Jelikož fyzici (astronomy nevyjímaje) rádi hledají společné znaky a snaží se podobné objekty rozlišit a rozskatulkovat, nevyhnuli se rozdělení ani planetky. Samozřejmě bychom mohli planetky seskupovat do skupin podle velikosti, rotace a podobně, ale asi mnoho užítku by to nepřineslo. Ukázalo se, že je vhodné rozlišovat planetky podle jejich spektra a albeda. Planetky sice odráží pouze sluneční záření, ale toto záření je mírně modifikováno a oproti čistému slunečnímu záření se zde nachází absorpční čáry, podle kterých lze určit povrchové složení planetky. Ukazuje se zde určitý trend chemického složení v závislosti na velikosti hlavní poloosy, viz obrázek 1.6. Hrubší rozdělení planetek vypadá následovně.

- **S-třída** - jedná se o načervenalé planetky vyskytující se hojně ve vnitřní části hlavního pásu (2 - 2,5 AU), jejich albedo se pohybuje okolo 0,2 a jsou složeny převážně z křemičitanů železa a hořčíku společně s čistým železem a niklem, jejich počet se odhaduje na jednu šestinu všech známých planetek
- **M-třída** - do této třídy řadíme lehce načervenalé planetky vyskytující se podobně jako planetky S-třídy, jejich albedo je nižší, než je tomu u planetek S-třídy (od 0,10 - 0,18) a jsou velmi bohaté na kovy, především na železo a nikl

- **C-třída** - sem zařazujeme planetky s hlavní poloosou v rozmezí od 2 do 4 AU, ale převážně se vyskytují okolo 3 AU, jedná se o velmi tmavá tělesa a albedem od 0,03 do 0,07, jsou velmi bohaté na uhlíkaté sloučeniny, dvě třetiny z nich také obsahují značné množství těkavých látek, jejich celkový počet se odhaduje na 75 % všech známých planetek
- **P-třída** - do P-třídy zařazujeme planetky vyskytující se na vnějším okraji hlavního pásu a převážně za ním (3 - 5 AU), přičemž značná část se jich kupí okolo 4 AU, opět se jedná o velice tmavé objekty s albedem od 0,02 do 0,06 a jejich povrch může obsahovat značné množství organických sloučenin (podobně jako u komet)
- **D-třída** - tato třída je podobná P-třídě, ale planetky zde zařazované se jeví červeněji a také mají větší hlavní poloosu, většina trojanů spadá do této třídy



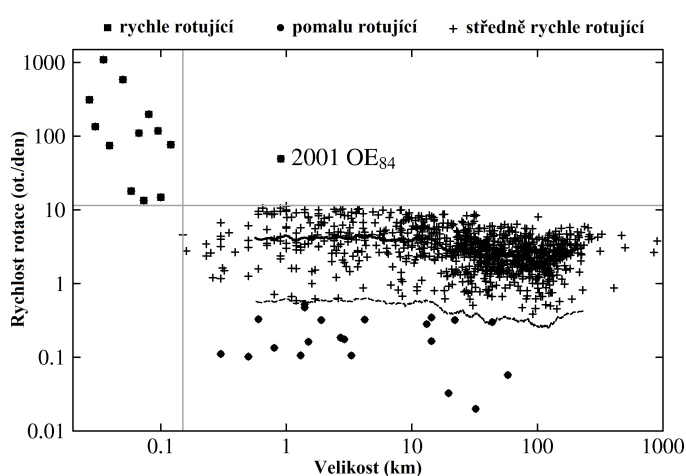
Obrázek 1.6: Závislost výskytu třídy planetek na velikosti hlavní poloosy [1]

1.5 Dráhy a rotace

Již víme, že planetky často obíhají okolo slunce v určitých preferovaných vzdálenostech, ale jak vypadají další orbitální elementy? Excentricita planetek se pohybuje ve velkém rozsahu a asi nelze určit rozumné hranice tak, abychom pokryli co nejvýstižněji typickou hodnotu excentricity (trojané mají podobně jako Jupiter excentricitu 0,05 a planetky v Oortově oblaku mají excentricity více jak 0,4). Podobně je na tom inklinace, navíc vlivem především Jupiteru a Saturnu hodnoty těchto veličin značně oscilují na časových škálách desítek až statisíců let. U excentricity to je až o 0,3 a u inklinace až o 10° .

Jelikož se planetky vyskytují napříč celou sluneční soustavou, lze na základě třetího Keplerova zákona očekávat, že i oběžné doby kolem Slunce budou dosti rozdílné. Frekvence rotací také není nějak jednotná, ale na obrázku 1.7 lze vidět, že pouze malé planetky (cca do 200 metrů) jsou schopné rotovat velmi rychle. Větší planetky jsou limitovány mezní frekvencí (přibližně 11 otáček/den). Kdyby tuto frekvenci překročily, rozpadly by se. Zajímavostí je, že mezní frekvence rotace jinak nezávisí na velikosti planetky. Důvodem proč mohou malé planetky rotovat s nadkritickou frekvencí je elektromagnetická vazba, ta ovšem není schopna udržet velké objekty.

Shrnutí je tedy takové, že nejsou žádné hodnoty orbitálních elementů, které by vyčnívali nad ostatní. Navíc se ještě tyto hodnoty mění v čase. Rotace planetek (alespoň větších jak 200 m) je limitována mezní frekvencí.



Obrázek 1.7: Závislost rychlosti rotace na velikosti planetky.

Kapitola 2

Vznik planetkových systémů

Naprostá většina planetek se během doby své existence alespoň jednou rozpadne na dvě nebo více menších planetek a vytvoří tak planetkový systém. Příčinou tohoto rozpadu je nejčastěji srážka s jinou planetkou nebo YORP¹ efekt.

2.1 Rodiny planetek

Pojmem rodina označujeme skupinu planetek, která vznikla srážkou mateřské planetky s jinou planetkou. Ne vždy musí ovšem při srážce dvou planetek dojít k jejich rozpadu (vzniku rodiny), ale může se jednat pouze o kráterování. Aby došlo ke katastrofické srážce, kdy je mateřská planetka roztříštěna, musí mít projektil (menší planetka) vhodnou velikost nebo dostačující rychlost. Velikost takového projektilu $d_{projektil}$ je dána vztahem

$$d_{projektil} = \left(\frac{2Q_D}{v_{dopadu}^2} \right)^{1/3} D_{mat}, \quad (2.1)$$

kde Q_D je specifická disperze mateřské planetky² o velikosti D , v_{dopadu} je velikost vzájemné rychlosti planetek při jejich střetu a D_{mat} je velikost mateřské planetky. Poměr hmotnosti největšího člena rodiny m_n a mateřské planetky m_m napovídá, jak vypadá rychlostní pole po srážce. Pokud je tento poměr malý (1/100), pak rychlostní pole představovuje kužel, naopak u poměru blízkému jedné, je rychlostní pole izotropické. [2]

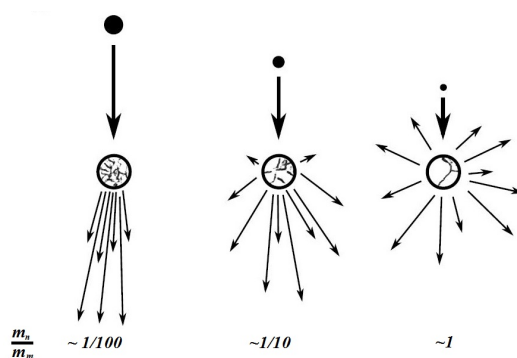
V hlavním pásu je střední doba mezi katastrofickými rozpady τ přibližně dána vztahem

$$\tau \simeq 16,8\sqrt{R}, \quad (2.2)$$

kde R udává poloměr mateřské planetky a τ je v milionech let.

¹Yarkovsky-O'Keefe-Radzievski-Paddack

²Pro planetky větší než 200 metrů platí $Q_D = \frac{4}{5}\pi\rho GR^2$.



Obrázek 2.1: Znázornění tvaru rychlostního pole po srážce [2]

2.2 Binární planetky

Pojmem binární planetky označujeme dvě planetky, které obíhají okolo společného těžiště, které obíhá okolo Slunce. Těžší planetku označujeme jako planetku primární (primár) a planetku druhou jako sekundární (sekundár). Pokud je poměr hmotnosti menší než $1/3$, můžeme se v literatuře setkat s označením satelit pro sekundární planetku.

Za vznikem binárních planetek stojí hned několik odlišných vlivů. Nejvýznamnějším z nich je bezpochyby YORP efekt, který vlivem emise záření a nesymetrického povrchu planetky urychluje nebo také zpomaluje rotaci tělesa. Pokud dochází k urychlování rotace, dojde k tomu, že planetka začne rotovat takovou rychlostí, že na povrchu v rovníkových oblastech dojde k vyrovnání odstředivé a gravitační síly a jelikož se planetky skládají z jednotlivých fragmentů (které drží spolu pouze vlivem vlastní gravitace) nic nebrání rozpadu na dvě tělesa při dalším roztočení. Toto roztáčení trvá typicky desítky milionů let.

Dalšími způsoby, jak může vzniknout binární planetka je gravitační (slapové) působení planet, které využije necelistvosti planetky a může opět dojít k jejímu roztržení (platí pro planetky, které se dostatečně přibližují k planetám) nebo také srážky, po kterých mohou nově vzniklé planetky utvořit dvojici.

2.3 Planetkové páry

Rotující těleso (planetka) může být vhodně popsáno jeho celkovou energií E a rotačním momentem hybnosti L . Rotační moment hybnosti L jednoto tělesa lze jednoduše popsat rovnicí

$$L = \hat{I} \cdot \omega, \quad (2.3)$$

kde \hat{I} je tenzor momentu setrvačnosti a ω je úhlová rychlost. Celková energie E rotujícího tělesa je pak dána vztahem

$$E = \frac{1}{2} \omega \cdot \hat{I} \cdot \omega + U, \quad (2.4)$$

kde U je vnitřní potenciál související s rozložením hmotnosti v tělese. Jestliže dojde k rozpadu planetky, musí se zachovat celkový moment hybnosti a ten se rozdělí mezi nově

vzniklé planetky, takže tuto soustavu můžeme popsat jako

$$\mathbf{L} = \hat{\mathbf{I}} \cdot \boldsymbol{\omega} = \hat{\mathbf{I}}_1 \cdot \boldsymbol{\omega}_1 + \hat{\mathbf{I}}_2 \cdot \boldsymbol{\omega}_2 + \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \mathbf{r} \times \mathbf{v}, \quad (2.5)$$

kde \mathbf{r} je vektor vzdálenosti mezi planetkami a \mathbf{v} je jejich relativní rychlost. Jelikož se zachovává celková energie soustavy, můžeme rovnici (2.4) rozepsat podobně jako předchozí a sice

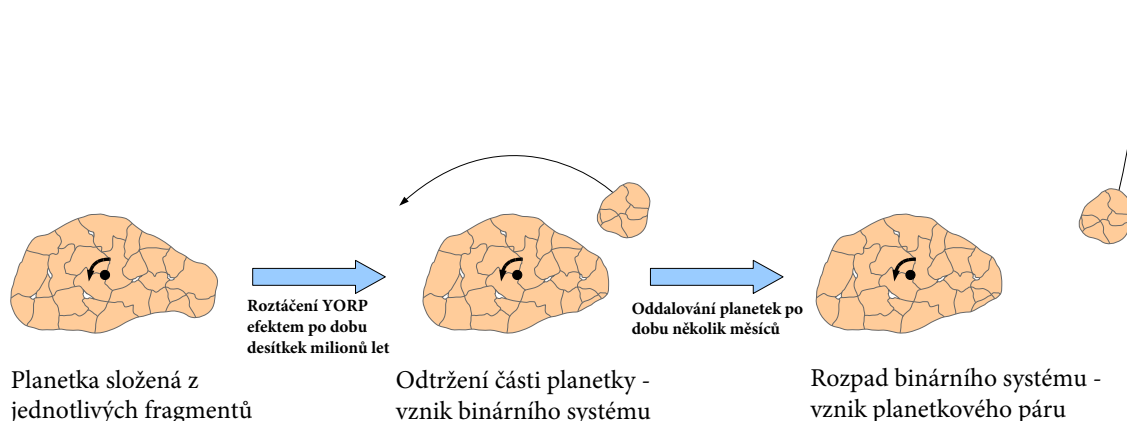
$$E = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega} + U = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_1 \cdot \mathbf{I}_1 \cdot \boldsymbol{\omega}_1 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_2 \cdot \mathbf{I}_2 \cdot \boldsymbol{\omega}_2 + \frac{1}{2} \mu \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} + U_{11} + U_{12} + U_{22}, \quad (2.6)$$

kde μ je redukovaná hmotnost³ a U_{12} je vzájemný potenciál mezi tělesy, který představuje možnost přeměny rotační energie na translační a naopak.

Pokud nedochází ke změně tvaru planetek, pak jsou vnitřní potenciály U_{11} a U_{22} konstantní a můžeme je od celkové energie soustavy odečíst

$$E_{volna} = E - U_{11} - U_{22}. \quad (2.7)$$

Dostaneme energii, která není striktně vázána k jednomu objektu a tak tuto energii označujeme jako energii volnou E_{volna} . Jestliže je volná energie kladná, má systém dostatek energie, aby se rozpadl. K tomu dochází při přenosu rotační energie primárního tělesa na translační energii sekundárního tělesa, které je urychlováno a může se dostat na hyperbolicou dráhu a vytvořit tak planetkový pár. Toto předávání energie trvá v řádech měsíců. Ovšem to, že je volná energie kladná, nemusí nutně znamenat, že se systém rozpadne, je to podmínka nutná, nikoliv dostačující. Takto oddělené planetky mají poměrně malé relativní rychlosti a obíhají kolem Slunce po téměř identické dráze, ale mohou se od sebe nacházet několik astronomických jednotek daleko.



Obrázek 2.2: Schématické naznačení vzniku planetkového páru [5]

³ $\mu = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$

Kapitola 3

Použitá databáze planetek

3.1 Značení dráhových elementů

Chceme-li popsat polohu a pohyb libovolného tělesa ve Sluneční soustavě, musíme si zavést vhodnou vztažnou soustavu. Těleso je pak popsáno v této vztažné soustavě pomocí dráhových elementů. Dráhové elementy nejsou nijak pevně dané a pro různé situace mohou být zvoleny různě. V našem případě se setkáváme pravděpodobně s nejčastěji používanou soustavou, která je popsána pomocí následujících šesti dráhových elementů. [6],[13]

- **Velká poloosa (a)** - vyjadřuje střední vzdálenost tělesa od těžiště soustavy, jednotka má rozměr vzdálenost, nejčastěji vyjádřenou v astronomických jednotkách
- **Excentricita (e)** - nebo-li výstřednost vyjadřuje tvar oběžné dráhy tělesa, pro $e = 0$ je dráha kružnice, $0 < e < 1$ elipsa, $e = 1$ parabola a $e > 1$ hyperbola, jedná se o bezrozměrnou veličinu
- **Inklinace (i)** - udává sklon dráhy tělesa k základní rovině, kterou bývá ekliptika, jednotkou je úhlový stupeň nebo radián
- **Délka výstupného uzlu (Ω)** - vyjadřuje úhlovou vzdálenost výstupného uzlu od základního směru, kterým bývá jarní bod, jednotkou je úhlový stupeň nebo radián
- **Argument šířky pericentra (ω)** - vyjadřuje úhlovou vzdálenost mezi pericentrem a výstupním uzlem, jednotkou je opět úhlový stupeň nebo radián, pokud se v ohnisku nachází Slunce, hovoříme o perihéliu; alternativním dráhovým elementem (dále používaným) je délka pericentra ϖ definována jako $\varpi = \Omega + \omega$
- **Čas průchodu pericentrem (T)** - vyjadřuje okamžik, kdy těleso prošlo pericentrem

3.2 Vzdálenosti asteroidů v pěti-rozměrném prostoru

Abychom mohli kvantitativně odhadnout, kdy se jedná o planetkový pár, zavedeme si veličinu reprezentující jakousi vzdálenost, nebo-li jak moc se liší dráhové elementy dvou kandidátů. Tuto vzdálenost si označme jako d . Jelikož určíme, jak moc se liší orbitální

dráhy dvou planetek, nezajímá nás jejich čas průchodu periheliem, takže vzdálenost d závisí pouze na $(a, e, i, \Omega, \varpi)$. Jako první zavedl tuto vzdálenost Zappalà et al (1990) [8] následujícím způsobem

$$d = na \sqrt{k_1 \left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + k_2 (\delta e)^2 + k_3 (\delta i)^2}, \quad (3.1)$$

kde n je vlastní pohyb. Je vidět, že v rovnici (3.1) se berou v úvahu pouze tři dráhové elementy. Doplněním o zbylé dva dostáváme vztah, který použili například Vokrouhlický s Nesvorným (2008) a sice [7]

$$\left(\frac{d}{na}\right)^2 = k_a \left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + k_e (\delta e)^2 + k_i (\delta \sin i)^2 + k_\Omega (\delta \Omega)^2 + k_\varpi (\delta \varpi)^2, \quad (3.2)$$

přičemž $(\delta a, \delta e, \delta \sin i, \delta \Omega, \delta \varpi)$ je vektor reprezentující odlišnost dráhových elementů, kde Ω a ϖ jsou udány v radiánech a $a = (a_1 + a_2)/2$.

Koeficienty k chápeme jako váhy jednotlivých elementů a ty byly zvoleny následovně $k_a = 5/4$, $k_e = k_i = 2$ a $k_\Omega = k_\varpi = 10^{-4}$ (Pravec, Vokrouhlický 2009 [4])¹.

Jako jednotka vzdálenosti d je AU/den, ale častěji se převádí na m/s.

Ted' už nám jen stačí zvolit si mezní vzdálenost $d_{cut-off}$ ve které se ještě stále může nacházet planetka patřící do rodiny. Tato vzdálenost se vztahuje od jakéhokoliv planetky, nemusí jím být největší člen rodiny. Pokud je rodina alespoň trochu izolována od ostatních, tak při zvětšování mezní vzdálenosti přestane v určité místě narůstat počet členů. Jsou ovšem rodiny, které jsou promíchané a tak nelze jejich členy jednoduše rozdělit. Pomocí může být přidání dalších parametrů, jako jsou například albedo nebo chemické složení. Ty ovšem vyžadují poměrně náročné spektroskopické měření.

3.3 Použitá databáze planetkových rodin

Jelikož počet planetek i rodin neustále roste, je vhodné zvolit pokud možno nejnovější databázi. Použitá databáze *Nesvorny HCM Asteroid Families V2.0* byla zveřejněna 20/06/2012 a obsahuje 64 rodin celkem s 137 620 členy, kde jejich vlastní dráhové elementy² byly počítány analyticky. Tato databáze dále obsahuje 79 rodin celkem s 105 792 členy, kde vlastní dráhové elementy jsou počítány numericky. Určit dráhové elementy numericky je možné téměř pro každou planetku, otázkou však zůstává jejich přesnost. Počet planetek s numericky určenými elementy je menší než počet planetek s analyticky určenými elementy, protože u numerického určení se z pravidla snižuje cut-off vzdálenost.

3.4 Databáze kandidátů na planetkové páry

Tato databáze, kterou jsem dostal od doktora Petra Pravce, obsahuje celkem 1 110 kandidátů na planetkový pár. Podrobnější informace o použité metodě pro výběr kandidátů lze nalézt v

¹Hodnota váhy k_Ω a k_ϖ v článku Vokrouhlický, Nesvorný *Pairs of asteroids probably of a common origin* (2008) byla 10^{-5} .

²Jelikož se dráhové elementy planetek v průběhu času mění, tak přídavek *vlastní* značí dráhové elementy, od kterých byly odečteny jejich periodické změny.

článku [4]. Dráhové elementy použité pro výběr kandidátů jsou vzaty z databáze *AstDyS2*. Takto vybraní kandidáti mají vzájemnou vzdálenost d menší než 50 m/s.

Název rodiny	Cut-off vzdálenost ³	Počet členů	Název rodiny	Cut-off vzdálenost	Počet členů
Vesta	50	16 316	1995 SU37	45	287
Flora	60	16 330	Emilkowalski	30	4
Baptistina	45	3 551	1992 YC2	20	3
Massalia	50	7 665	Schulhof	10	5
Nysa/Polana	45	19 711	Hygiea	60	5 183
Erigone	50	2 513	Themis	60	5 425
Clarissa	50	202	Sylvia	80	90
Sulamitis	50	294	Meliboea	78	186
Lucienne	100	157	Koronis	40	5 961
Euterpe	60	301	Eos	45	11 677
Datura	10	7	Emma	40	382
Lucascavin	10	3	Brasilia	35	676
Juno	50	2 298	Veritas	30	1 394
Eunomia	50	6 423	Karin	10	908
Hestia	55	294	Naema	40	327
Nemesis	50	1 440	Tirela	50	1 806
Adeona	45	2 209	Lixiaohua	50	1 011
Maria	60	3 294	Telramund	45	491
Merxia	60	1 575	Terpsichore	100	137
Agnia	40	2 462	Fringilla	170	193
Astrid	50	515	Durisen	100	35
Gefion	60	3 484	Yakovlev	100	100
Dora	50	1 570	Beagle	20	149
Konig	50	452	San	80	42
Rafita	65	1 410	1998 YB3	80	58
Hoffmeister	40	1 858	1999 CG1	80	105
Iannini	30	233	1999 XT17	70	82
Padua	44	942	1993 FY12	50	112
Aeolia	50	389	Charis	70	783
Chloris	70	387	Theobalda	50	511
Misa	45	788	Terentia	60	92
Brangane	50	247	Lau	100	85

Tabulka 3.1: Seznam planetkových rodin s cut-off vzdálenostmi a počty členů (analytické určení dráhových elementů, tabulka s numerickými dráhovými elementy je uvedena v příloze)

Planetka 1	Planetka 2	d [m/s]	δd [m/s]
21436	334916	0.0424	0.0037
165389	282206	0.2215	0.0060
54041	220143	0.8012	0.0038
106700	263114	1.4921	0.0064
23998	205383	5.1595	0.0131
59184	293667	7.9019	0.0039
130909	179883	11.6719	0.0055
226268	2003 UW156	15.9930	0.0084
238012	2010 CB11	19.2635	0.0184
97805	279230	22.5669	0.0024

Tabulka 3.2: Ukázka databáze kandidátů na planetkové páry (zredukovaná)

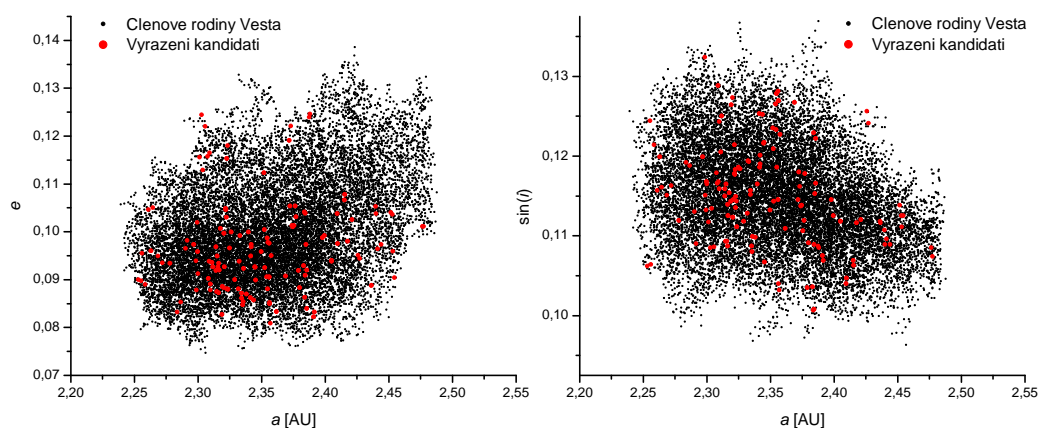
Kapitola 4

Praktická část

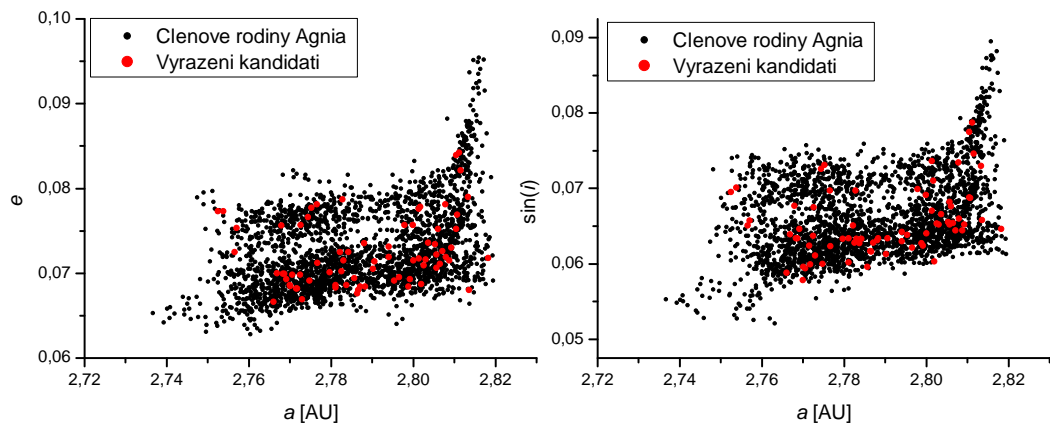
Jelikož jsou planetkové páry typicky o několik řádů let mladší než samotné rodiny planetek, není jejich výskyt v rodinách nikterak vyloučen. Problém ovšem spočívá v tom, že v rodině mají všichni její členové (až na případné výjimky) velice podobné dráhové elementy a tak detekovatelnost páru je velice ošemetná záležitost. Za předpokladu, že by hustota výskytu planetek (v prostoru dráhových elementů) v rodině byla konstantní, je ještě detekce páru možná. U rodin s vysokým gradientem této hustoty je tato metoda nepoužitelná. Rozdělení rodin na ty, které jsou vhodné pro hledání planetkových párů a které ne, bude předmětem navazující diplomové práce na toto téma. Prozatím vycházím z předpokladu, že jsou všechny rodiny nevhodné a proto je potřeba jejich členy vyřadit ze seznamu kandidátů. V budoucnu tak mohou být některé vyřazené páry opět považovány za kandidáty.

4.1 Ukázky vyřazených kandidátů

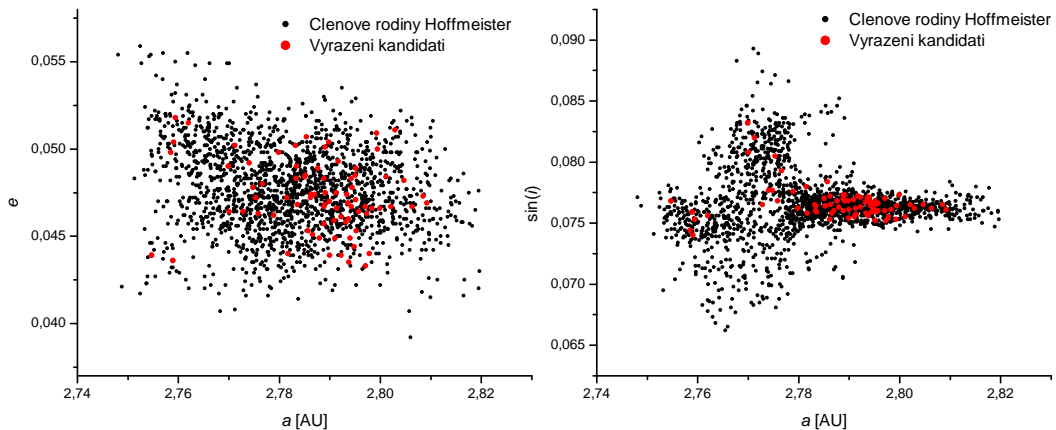
Zde jsem vybral tři rodiny ve kterých jsem našel a vyřadil nejvíce kandidátů. Na následujících grafech je vidět, že poměr hustoty rozložení vyřazených kandidátů ku hustotě rozložení členů rodin je přibližně konstantní a nepřevládá tu žádný výrazný trend.



Obrázek 4.1: Zobrazení rodiny Vesta, celkem je zde přes 16 tisíc členů, přičemž bylo vyloučeno 78 kandidátů



Obrázek 4.2: Zobrazení rodiny Agnia, celkem je zde nacelých 2 500 členů, přičemž bylo vyloučeno 39 kandidátů



Obrázek 4.3: Zobrazení rodiny Hoffmeister, celkem je zde přes 1 800 členů, přičemž bylo vyloučeno 44 kandidátů

4.2 Shrnutí všech vyřazených kandidátů

Celkem jsem z 1 110 kandidátů našel 666 párů v analytické databázi rodin a 597 v numerické databázi. Počty nálezů jsou uvedeny v tabulce 4.2 zvlášť pro každou databázi. Na obrázku 4.4 je grafické znázornění vyřazených a zbylých kandidátů.

4.3 Provázanost některých rodin

Během různých porovnávání databází se ukázalo, že některé planety jsou zaevidované ve více než jedné rodině (viz tabulka 4.1). Důvodů může být hned několik. Jedním z nich je fakt, že u starých rodin mohlo dojít ke srážce dvou jejích členů a mohla tak vzniknout rodina nová. Příkladem mohou být rodiny Karin a Koronis, kde stáří rodiny Koronis se

odhaduje na několik miliard let a stáří rodiny Karin pouze na několik milionů let.

Další důvod provázanosti dvou rodin je jednoduše ten, že rodiny vznikly blízko sebe a postupem času se mohli promíchat. Tyto rodiny mohou mít obecně odlišné povrchové chemické složení a tak možným způsobem, jak členy těchto rodin od sebe rozeznat je spektroskopické měření. Příkladem jsou rodiny Nysa a Polana, které již jsou v použité databázi sloučeny.

Jiným vysvětlením promíchanosti více rodin může být výskyt stabilních oblastí. Jestliže se planetky do této oblasti „zatoulají“, setrvávají v ní velice dlouhou dobu a tak se jejich počet v této oblasti může postupně zvyšovat. Příkladem takovéto oblasti je oblast Hungaria. Možným kandidátem na tuto oblast je také okolí rodiny Flora.

Analytická databáze		Numerická databáze	
Název rodin	Počet shodných členů	Název rodin	Počet shodných členů
Beagle + Themis	149	Beagle + Themis	106
Flora + Datura	7	Flora + Datura	6
Flora + Baptistina	3 551	Flora + Baptistina	2 157
Flora + Lucascavin	3	Flora + Lucascavin	3
Flora + Nysa/Polana	7	Flora + Nysa/Polana	36
Karin + Koronis	908	Karin + Koronis	580
Eunomia + Schulhof	5	Eunomia + Schulhof	5
Datura + Baptistina	7		
celkem	4 637	celkem	2 893

Tabulka 4.1: Počty členů zaevidovaných ve více rodinách

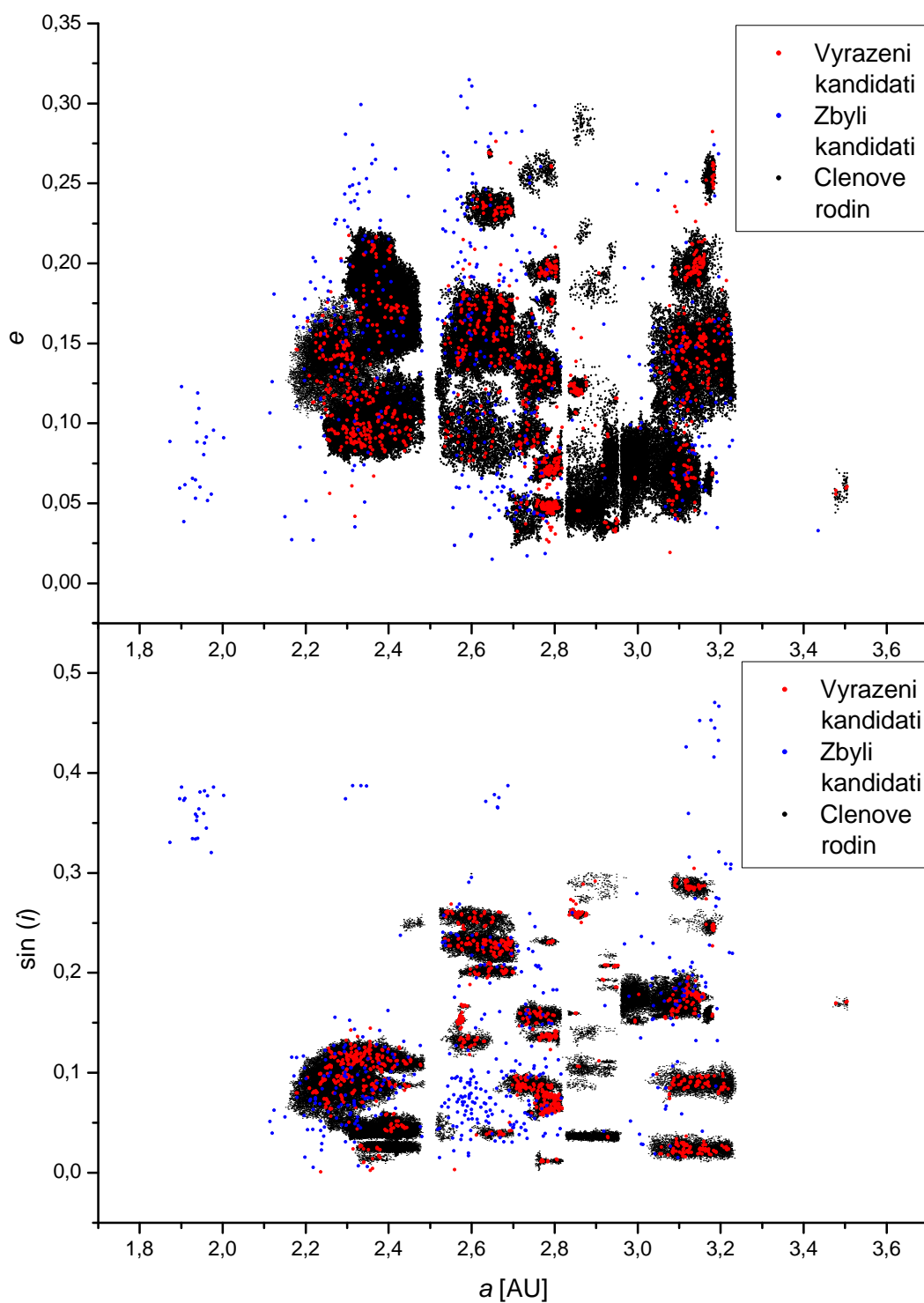
Název rodiny	Analytická databáze		Numerická databáze	
	Počet členů	Vyřazeno kandidátů	Počet členů	Vyřazeno kandidátů
Vesta	16 316	78	13 693	79
Flora	16 330	58	12 387	35
Baptistina	3 551	0	2 157	16
Massalia	7 665	5	4 820	4
Nysa/Polana	19 711	20	16 576	20
Erigone	2 513	11	1 785	11
Clarissa	202	3	125	2
Sulamitis	294	3	243	3
Lucienne	157	0	90	0
Euterpe	301	3	316	3
Datura	7	0	6	0
Lucascavin	3	0	3	0
Phocaea	-	-	2 001	5
Juno	2 298	23	991	16
Eunomia	6 423	27	4 243	26
Hestia	294	0	174	0
Nemesis	1 440	13	859	9
Adeona	2 209	16	1 608	14
Maria	3 294	17	2 516	15
Padua	942	7	766	6
Aeolia	389	1	210	1
Chloris	387	1	238	1
Misa	788	11	476	9
Brangane	247	7	125	0
Dora	1 570	20	1065	19
Merxia	1 575	15	865	14
Agnia	2 462	39	1 727	36
Astrid	515	6	374	5
Gefion	3 484	20	2 716	17
Konig	452	17	238	13
Rafita	1 410	10	882	9
Hoffmeister	1 858	44	1 264	41
Iannini	233	4	89	2
1995 SU37	287	3	164	1
Emilkowalski	4	0	4	0
1992 YC2	3	0	3	0
Schulhof	5	0	5	0
Pallas	-	-	87	0
Gallia	-	-	127	0
Hansa	-	-	860	5
Gersuind	-	-	261	0

pokračování na další straně

pokračování z předchozí strany

Název rodiny	Analytická databáze		Numerická databáze	
	Počet členů	Vyřazeno kandidátů	Počet členů	Vyřazeno kandidátů
Watsonia	-	-	86	0
Barcelona	-	-	236	0
Tina	-	-	69	0
Dennispalm	-	-	38	0
Brucato	-	-	270	0
Hygiea	5 183	32	3 949	27
Themis	5 425	44	4 249	47
Sylvia	90	2	79	2
Meliboea	186	0	182	0
Koronis	5 961	1	4 972	1
Eos	11 677	26	6 498	15
Emma	382	1	312	3
Brasilia	676	18	396	12
Veritas	1 394	1	911	1
Karin	908	0	580	0
Naema	327	5	239	5
Tirela	1 806	14	1 091	12
Lixiaohua	1 011	19	555	17
Telramund	491	1	331	1
1993 FY12	112	1	70	1
Charis	783	1	353	1
Theobalda	511	8	240	6
Terentia	92	1	45	0
Lau	85	1	39	0
Beagle	149	6	106	0
Terpsichore	137	0	138	0
Fringilla	193	1	72	0
Durisen	35	0	23	0
Yakovlev	100	0	72	0
San Marcello	42	0	44	0
1998 YB3	58	0	24	0
1999 CG1	105	0	103	0
1999 XT17	82	1	60	1
Euphrosyne	-	-	1 130	5
Alauda	-	-	917	1
Armenia	-	-	53	1
Ulla	-	-	24	0
Luthera	-	-	97	1
celkem	137 620	666	105 792	597

Tabulka 4.2: Podrobná tabulka počtu nalezených kandidátů v každé rodině



Obrázek 4.4: Grafické znázornění vyřazených (červení) a zbylých kandidátů (modří).

Závěr

V první kapitole jsem se zabýval nejobecnějšími charakteristikami planetek. Jelikož mi první objevy přišli nesmírně zajímavé, věnuji první podkapitolu historii objevování planetek. V následujících částech této kapitoly se čtenář seznámí s výskytem planetek ve Sluneční soustavě, jejich rozdělení podle povrchového chemického složení a podobně.

Následující kapitola se již zabývá planetkovými systémy a jejich odlišným vznikem. Konkrétně se čtenář dozví, že planetkové rodiny vznikají výhradně srážkami a binární planetky společně s planetkovými páry vznikají YORP efektem. Dále je obeznámen s principem určování planetkových rodin pomocí hierarchické shlukovací metody. Podrobněji je v této kapitole popsán mechanismus utvoření planetkového páru.

Třetí kapitola je již zaměřena na použité databáze. Na jejím začátku je čtenáři předloženo použité značení dráhových elementů, které je následně použito při definici vzdálenosti v prostoru těchto dráhových elementů. Dále jsou čtenáři předloženy ukázky z těchto databází.

V závěrečné kapitole této práce jsem nejprve ukázal příklady vyřazených kandidátů v jednotlivých rodinách, kde se ukázalo, že se zde neuplatňuje žádný významný výběrový efekt. Následně je zde graficky uveden celkový přehled všech vyřazených kandidátů společně se zbylými kandidáty. V následující tabulce jsou vypsány celkové počty vyřazených kandidátů v každé rodině a to jak v analytické části databáze, tak i v té numerické. Zajímavým vedlejším produktem této práce je nalezení překryvů některých rodin. Celkové počty překryvů jsou společně s diskuzí uvedeny na konci této kapitoly.

Z celkových 1 110 kandidátů bylo v analytické databázi nalezeno a vyřazeno 666 kandidátů a 597 kandidátů v databázi numerické. Jedná se poměrně o značné zúžení tohoto seznamu kandidátů. Nutno ale připomenout, že jsem vycházel z přísného předpokladu a sice, že použitou metodou nelze detekovat planetkový pár v rodině. Tento předpoklad je ovšem splněn pouze v rodinách, ve kterých je velký gradient hustoty výskytu planetek (v prostoru dráhových elementů). Jak musí být velikost takového gradientu hustoty a jakých rodin se to týká, bude předmětem navazující diplomové práce zaměřené na tuto problematiku.

Přílohy

Název rodiny	Cut-off vzdálenost	Počet členů	Název rodiny	Cut-off vzdálenost	Počet členů
Vesta	55	13693	Gersuind	120	261
Flora	65	12387	Watsonia	150	86
Baptistina	48	2157	Barcelona	150	236
Massalia	55	4820	Tina	200	69
Nysa/Polana	55	16576	Dennispalm	200	38
Erigone	60	1785	Brucato	200	270
Clarissa	55	125	Hygiea	65	3949
Sulamitis	55	243	Themis	65	4249
Lucienne	100	90	Sylvia	80	79
Euterpe	65	316	Meliboea	85	182
Datura	15	6	Koronis	45	4972
Lucascavin	10	3	Eos	46	6498
Phocaea	200	2001	Emma	45	312
Juno	60	991	Brasilia	40	396
Eunomia	50	4243	Veritas	35	911
Hestia	65	174	Karin	10	580
Nemesis	50	859	Naema	45	239
Adeona	50	1608	Tirela	60	1091
Maria	65	2516	Lixiaohua	50	555
Padua	45	766	Telramund	45	331
Aeolia	50	210	FY12	50	70
Chloris	80	238	Charis	70	353
Misa	50	476	Theobalda	60	240
Brangane	55	125	Terentia	60	45
Dora	55	1065	Lau	120	39
Merxia	55	865	Beagle	25	106
Agnia	45	1727	Terpsichore	150	138
Astrid	60	374	Fringilla	150	72
Gefion	65	2716	Durisen	100	23

pokračování na další straně

pokračování z předchozí strany

Název rodiny	Cut-off vzdálenost	Počet členů	Název rodiny	Cut-off vzdálenost	Počet členů
Konig	55	238	Yakovlev	120	72
Rafita	70	882	San Marcello	100	44
Hoffmeister	45	1264	YB3	80	24
Iannini	30	89	1999 CG1	100	103
1995 SU37	50	164	1999 XT17	80	60
Emilkowalski	30	4	Euphrosyne	90	1130
1992 YC2	20	3	Alauda	120	917
Schulhof	10	5	Armenia	120	53
Pallas	200	87	Ulla	150	24
Gallia	200	127	Luthera	50	97
Hansa	200	860			

Tabulka 4.3: Seznam planetkových rodin s cut-off vzdálenostmi a počtem členů (s numericky počítanými dráhovými elementy)

Seznam použité literatury

- [1] BRADLEY W. CARROLL, Bradley W.Dale A. *An introduction to modern astrophysics*. 2. ed. San Francisco: Pearson Addison-Wesley, 2007. ISBN 03-214-4284-9.
- [2] BROŽ, Miroslav a Martin ŠOLC. *Fyzika malých těles sluneční soustavy*. 2012. vyd. Praha: Astronomický ústav, Matematicko–fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, 2012. Dostupné z: http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/mira/fyzika_malych_teles/skripta/fmt_20120903.pdf
- [3] HENYCH, Tomáš. *Světelné křivky planetek* [online]. 2006 [cit. 2013-05-21]. Bachelářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Filip Hroch. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/106041/prif_b/.
- [4] PRAVEC, P. a D. VOKROUHLICKÝ. Significance analysis of asteroid pairs. *Icarus*. 2009, vol. 204, issue 2, s. 580-588. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.07.004.
- [5] PRAVEC, P., D. VOKROUHLICKÝ, D. POLISHOOK, D. J. SCHEERES, A. W. HARRIS, A. GALÁD, O. VADUVESCU, F. POZO, A. BARR, P. LONGA, F. VACHIER, F. COLAS, D. P. PRAY, J. POLLOCK, D. REICHART, K. IVARSEN, J. HAISLIP, A. LACLUYZE, P. KUŠNIRÁK, T. HENYCH, F. MARCHIS, B. MACOMBER, S. A. JACOBSON, Yu. N. KRUGLY, A. V. SERGEEV a A. LEROY. Formation of asteroid pairs by rotational fission. *Nature*. 2010, vol. 466, issue 7310, s. 1085-1088. DOI: 10.1038/nature09315.
- [6] JANÍK, Jan. *OBEČNÁ ASTRONOMIE*. Brno: Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, 2012. Dostupné z: <http://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F3170new.pdf>
- [7] VOKROUHLICKÝ, David a David NESVORNÝ. PAIRS OF ASTEROIDS PROBABLY OF A COMMON ORIGIN. *The Astronomical Journal*. 2008, vol. 136, issue 1, s. 280-290. DOI: 10.1088/0004-6256/136/1/280.
- [8] ZAPPALA, Vincenzo, Alberto CELLINO, Paolo FARINELLA a Zoran KNEŽEVIĆ. Asteroid families. I - Identification by hierarchical clustering and reliability assessment. *The Astronomical Journal*. 1990, vol. 100. DOI: 10.1086/115658.

Internetové zdroje

- [9] http://ssd.jpl.nasa.gov/?body_count
- [10] <http://planetky.astro.cz/clanky.phtml?cislo=8>
- [11] <http://sajri.astronomy.cz/poctyplanetek/pocet.htm>
- [12] <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnos.html>
- [13] http://cs.wikipedia.org/wiki/Elementy_dr%C3%A1hy
- [14] http://www.asu.cas.cz/news/253_rozhovor-petr-pravec-planetky-se-mohou-rozpadat/

