

Mechanika rodin planetek s aplikací na rodinu Eunomia

Adam Křivka
doc. Mgr. Miroslav Brož, Ph. D.

Cyrilometodějské gymnázium a střední odborná škola pedagogická Brno,
Lerchova 63, 602 00 Brno

25. března 2019



Úvod

Nebeská mechanika

Planetky ve sluneční soustavě

Vlastnosti rodiny Eunomia

Závěr

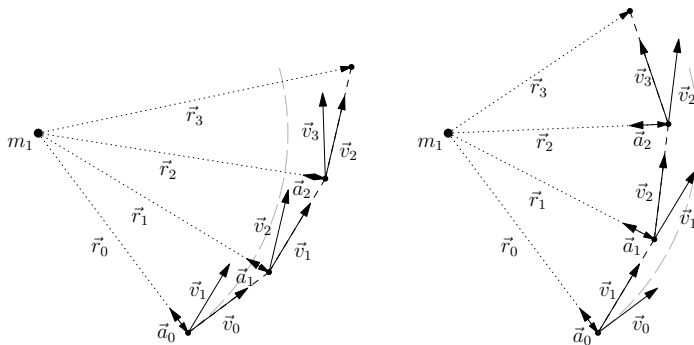
Úvod

Historický pohled a význam

- ▶ První planetka byla objevena v roce 1801.
- ▶ Dnes známo již přes půl milionu planetek.
- ▶ Rodiny planetek poprvé studoval *Kiyotsugu Hirayama* (1874–1943).
 - ! *Správné české označení je planetka, nikoliv asteroid.*
- ▶ Studiem rodin planetek můžeme
 - pochopit **dynamickou strukturu** sluneční soustavy,
 - podpořit teorie o **vzniku sluneční soustavy** (např. *Velké pozdní bombardování*)

Nebeská mechanika

Problém N těles

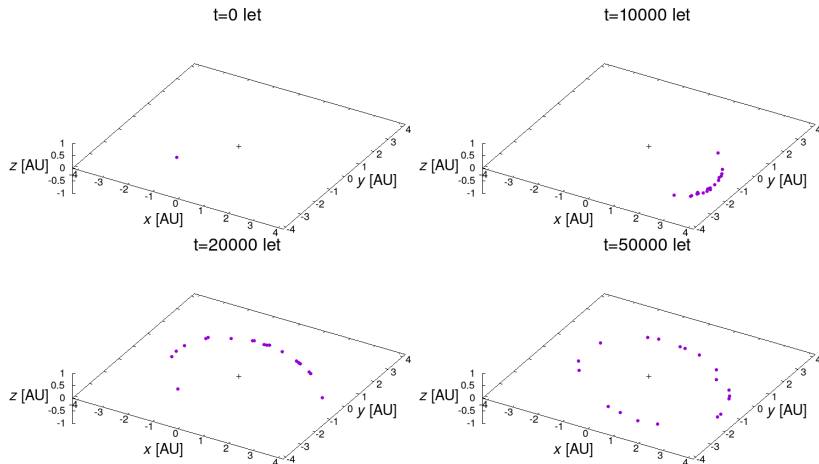


Obrázek: Ilustrace dopředné (vlevo) a zpětné (vpravo) **Eulerovy metody** pro výpočet problému dvou těles.

$$m_i \vec{a}_i = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{G m_i m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3} (\vec{r}_i - \vec{r}_j), \quad \text{pro } i \in \{1, 2, \dots, N\}$$

Nebeská mechanika

Krátkodobé simulace

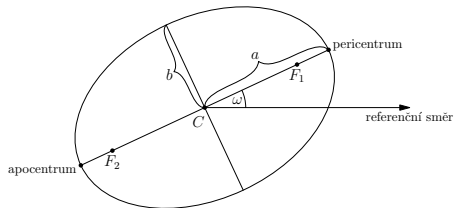


Obrázek: Trojrozměrné polohy x , y , z několika těles ($N = 20$) ze **simulované** rodiny Eunomia **rušené** čtyřmi planetami (*Jupiterem*, *Saturnem*, *Uranem* a *Neptunem*) po úvodním **izotropním** rozpadu.

Nebeská mechanika

Elementy dráhy

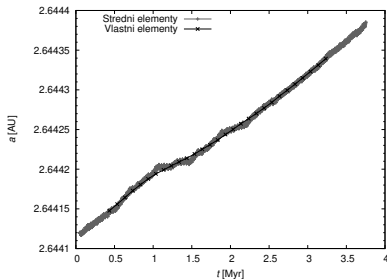
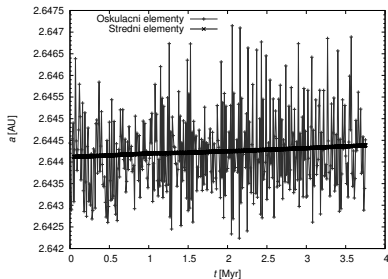
- ▶ **Velká poloosa** a [AU]
- ▶ **Excentricita** e
- ▶ **Sklon** i [°]
- ▶ **Argument pericentra** ω [°]
- ▶ **Délka vzestupného uzlu** Ω [°]
- ▶ **Střední anomálie** M [°]



$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Nebeská mechanika

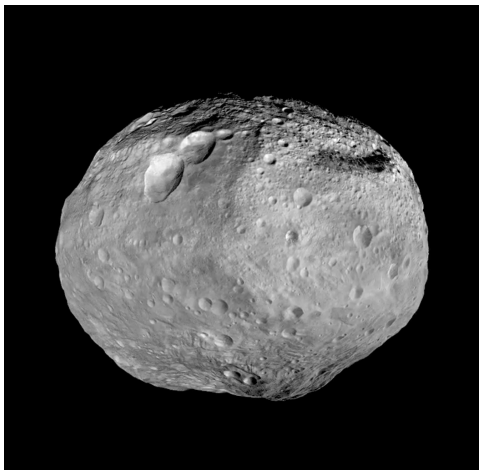
Střední a vlastní elementy



Obrázek: Porovnání **oskulační** (aktuální) a **střední** hlavní poloosy (vlevo) a **střední** a **vlastní** hlavní poloosy (vpravo) pro simulaci jedné planety po dobu 3,76 miliónů let.

Planetky ve sluneční soustavě

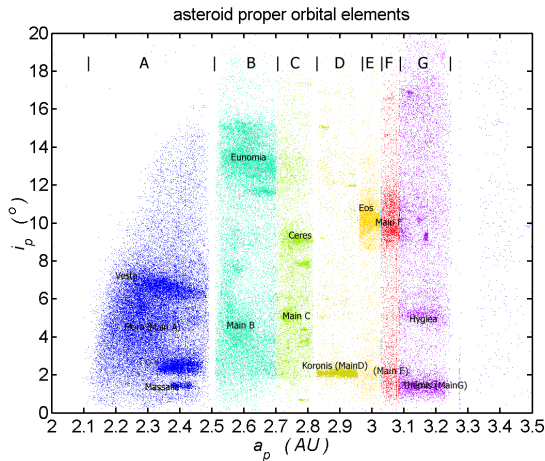
Tvar a vznik



Obrázek: Planetka (4) Vesta. Fotografie byla pořízena americkou sondou *Dawn*. Převzato z [1].

Planetky ve sluneční soustavě

Rodiny planetek

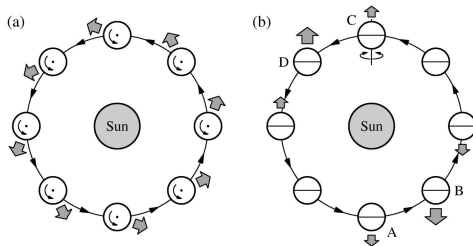


Obrázek: Planetky **hlavního pásu** podle **vlastních elementů dráhy** — vlastní velké poloosy a_p a vlastního sklonu i_p . Převzato z [2].

Planetky ve sluneční soustavě

Negravitační síly

► Jarkovského jev



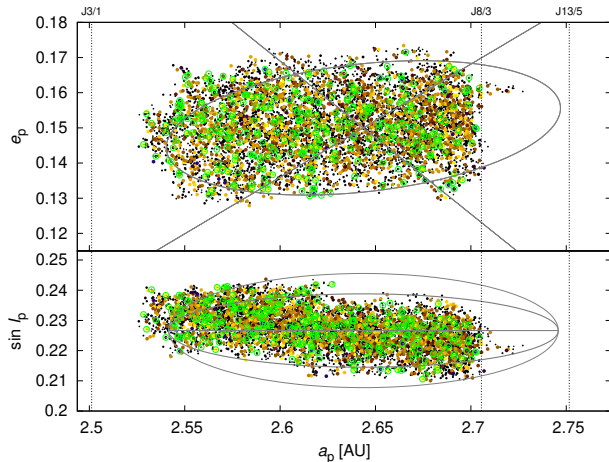
► YORP jev

► Náhodné srážky

► Chaotická difuze

Vlastnosti rodiny Eunomia

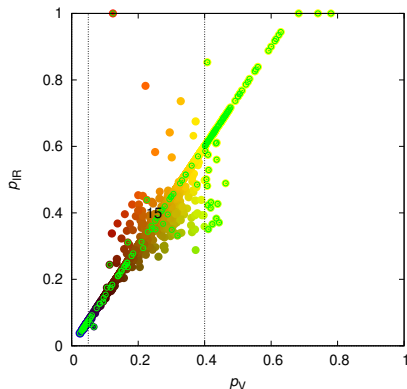
Identifikace a rozdělení



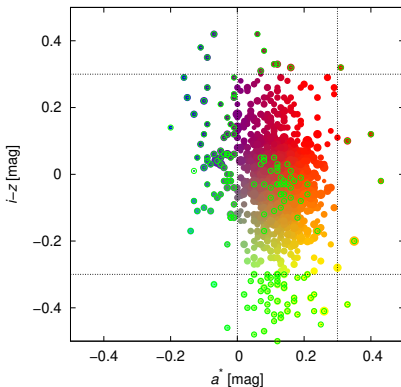
Obrázek: Pozorovaná rodina Eunomia v rovině vlastní hlavní poloosy a_p a vlastní excentricity e_p , identifikovaná **hierarchickou shlukovací metodou**. Barevná škála odpovídá **albedu** p_V a p_{IR} z katalogu WISE.

Vlastnosti rodiny Eunomia

Barevné charakteristiky



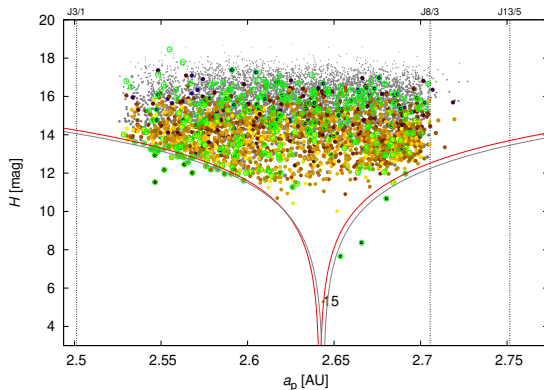
(a) **Albeda** p_V (ve viditelném spektru) a p_{IR} (v infračerveném) z katalogu WISE. Pro vyřazení **přimísěných těles** byly zvoleny hraniční hodnoty $0,05 \leq p_V \leq 0,4$.



(b) **Barevné indexy** a^* a $i - z$ z katalogu Sloan. Pro vyřazení **přimísěných těles** byly zvoleny hraniční hodnoty $0 \leq a^* \leq 0,3$ a $-0,3 \leq i - z \leq 0,3$.

Vlastnosti rodiny Eunomia

Jarkovského a YORP jev

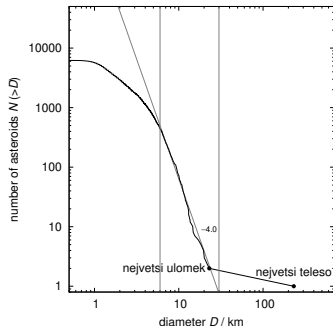


Obrázek: Rozdělení pozorované rodiny *Eunomia* v rovině vlastní hlavní poloosy a_p a **absolutní hvězdné velikosti** H . Lze pozorovat typický tvar „V“, který je způsobem počátečním rychlostním polem a **Jarkovského jevem**.

Vlastnosti rodiny Eunomia

Nastavení simulace

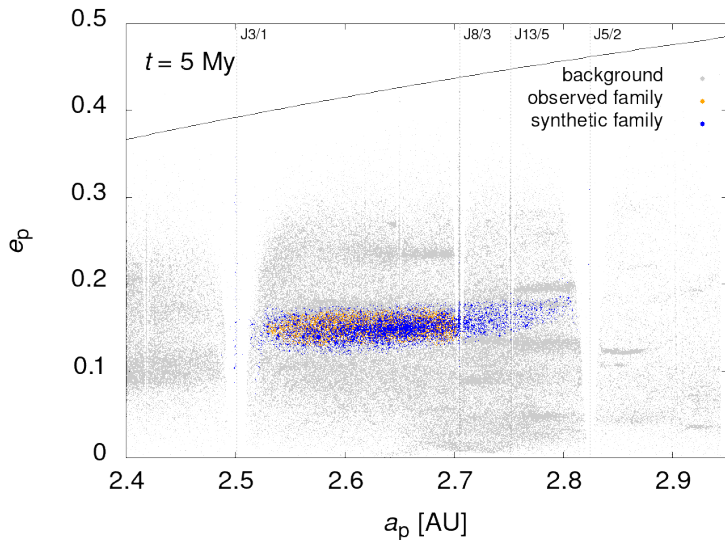
- ▶ 6210 vzájemně **gravitačně neinteragujících** částic, 4 rušící planety (*Jupiter*, *Saturn*, *Uran*, *Neptun*)
- ▶ **Numerický integrátor** SWIFT (vhodný pro dlouhodobé simulace)
- ▶ Délka úspěšného bloku 500 miliónů let
- ▶ *Výpočetní cluster Astronomického ústavu Univerzity Karlovy*
 - ▶ Spotřebováno 23040 CPU hodin
 - ▶ Objem binární dat 164 GB



Obrázek: Histogram
četnosti velikostí planetek
rodiny *Eunomia*.

Vlastnosti rodiny Eunomia

Výsledky simulace



Vlastnosti rodiny Eunomia

Metoda blackbox

► Rozdělení těles do **boxů**

	Spodní mez	Horní mez	Velikost
Vlastní hlavní poloosa a_p	2,522 AU	2,844 AU	0,0153 AU
Vlastní excentricita e_p	0,1	0,23	0,0217
Vlastní sklon $\sin I_p$	0,2	0,25	0,05

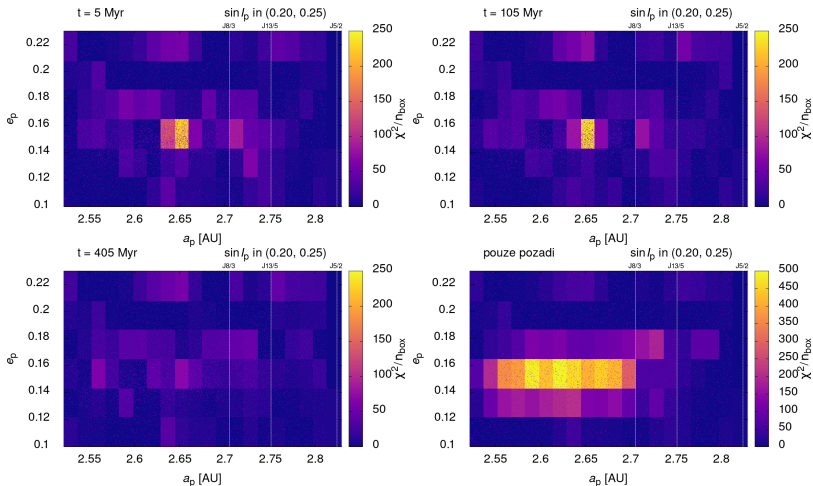
► Příspěvek každého boxu se spočte jako

$$\frac{(N_{\text{sim}} - N_{\text{obs}})^2}{N_{\text{sim}} + N_{\text{obs}}},$$

► Celková hodnota **chí kvadrátu** χ^2 se spočte jako součet přes všechny boxy

Vlastnosti rodiny Eunomia

Analýza chí kvadrátu

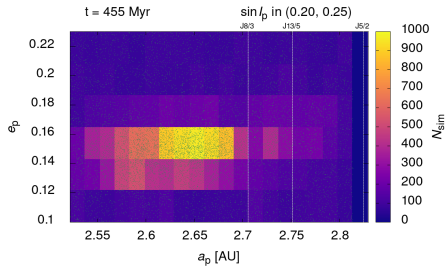


Obrázek: Hodnota **chi kvadrátu** χ^2 pro každý **box** v prostoru (a_p, e_p) .

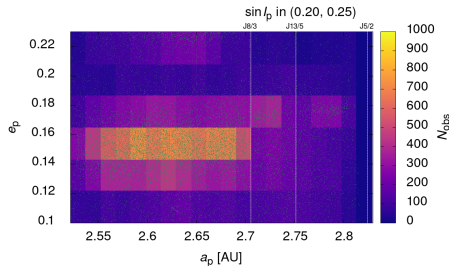
Vlastnosti rodiny Eunomia

Porovnání simulované a pozorované rodiny

Simulovaná:



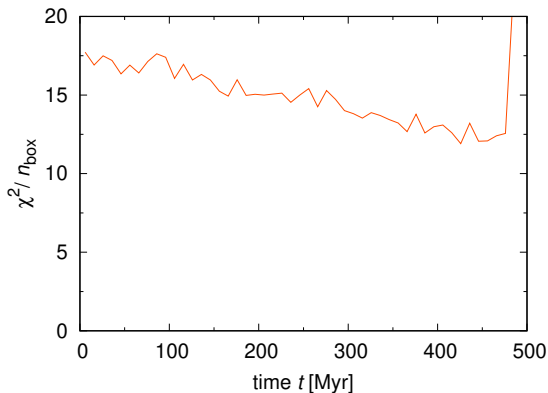
Pozorovaná:



Závěr

Vývoj chí kvadrátu

Ten „pozitivní“ graf



Obrázek: Graf závislosti hodnoty **chí kvadrátu** na čase t .

Závěr

Reference a doporučená literatura



NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA. *Full View of Vesta*. 2012. URL: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA15678>.



Wikimedia Commons. *File:AsteroidIncAu.png* — *Wikimedia Commons, the free media repository*. [Online; navštíveno 25. 12. 2018]. 2017. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:AsteroidIncAu.png&oldid=247505564>.



Brož M. a M. Šolc. *Fyzika sluneční soustavy*. ISBN: 9788073782368. Matfyzpress, 2013.



C. D. Murray a S. F. Dermott. *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press, 2000. DOI: 10.1017/CB09781139174817.



M. Brož. "Yarkovsky effect and the dynamics of the Solar System". Dostupné z: <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/mira/mp/phdth/>. Dis. Praha: Astronomický ústav Univerzity Karlovy, 2006.

Děkuji za pozornost.