

# 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

Planetky ve sluneční soustavě

Nebeská mechanika

Vlastnosti rodiny Eunomia

Závěr

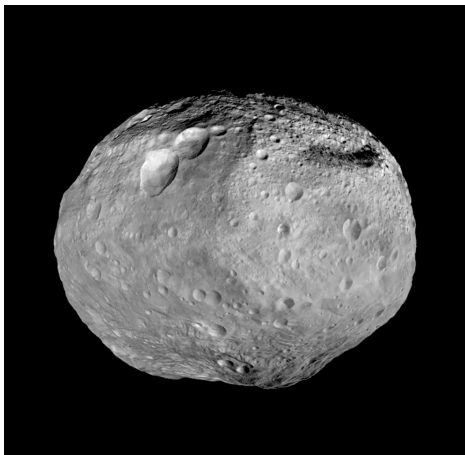
# Úvod

## 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*)

# Planetky ve sluneční soustavě

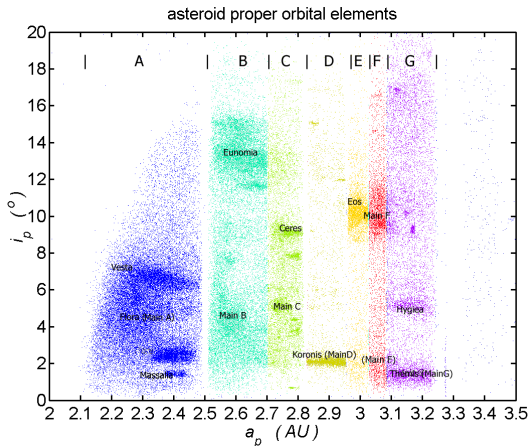
Tvar a vznik



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

# Planetky ve sluneční soustavě

## Rodiny planetek

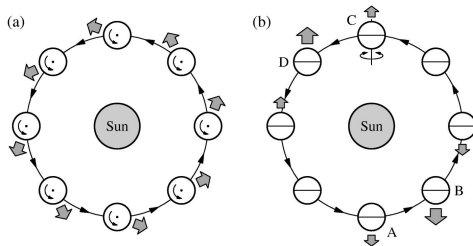


**Obrázek:** Planetky **hlavního pásu** podle **vlastních elementů dráhy** — vlastní velké poloosy  $a_p$  a vlastního sklonu  $i_p$ . Převzato z [2].

# Planetky ve sluneční soustavě

## Negravitační perturbace

### ► Jarkovského jev



### ► YORP jev

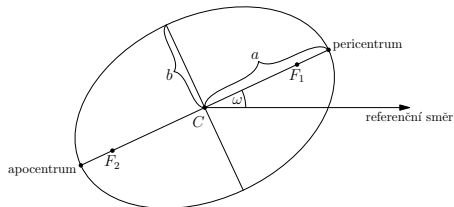
### ► Náhodné srážky

### ► Chaotická difuze

# Nebeská mechanika

## Elementy dráhy

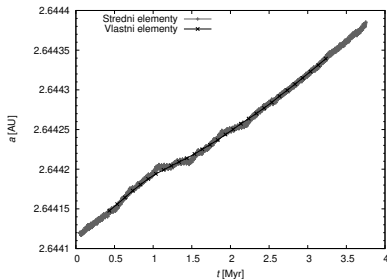
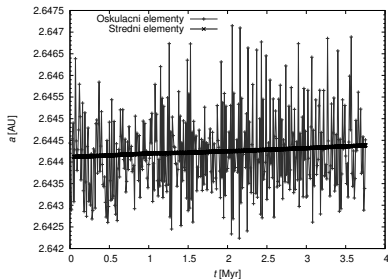
- ▶ **Velká poloosa**  $a$  [AU]
- ▶ **Excentricita**  $e$
- ▶ **Sklon**  $i$  [°]
- ▶ **Argument pericentra**  $\omega$  [°]
- ▶ **Délka vzestupného uzlu**  $\Omega$  [°]
- ▶ **Střední anomálie**  $M$  [°]



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

# Nebeská mechanika

## Střední a vlastní elementy

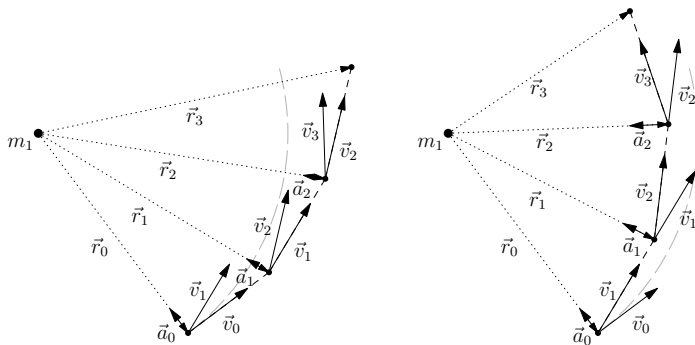


**Obrázek:** Porovnání **oskulační** (aktuální) a **střední** hlavní poloosy (vlevo) a **střední** a **vlastní** hlavní poloosy (vpravo) pro simulaci jedné částice po dobu 3,76 miliónů let.



# Nebeská mechanika

## Problém $N$ těles

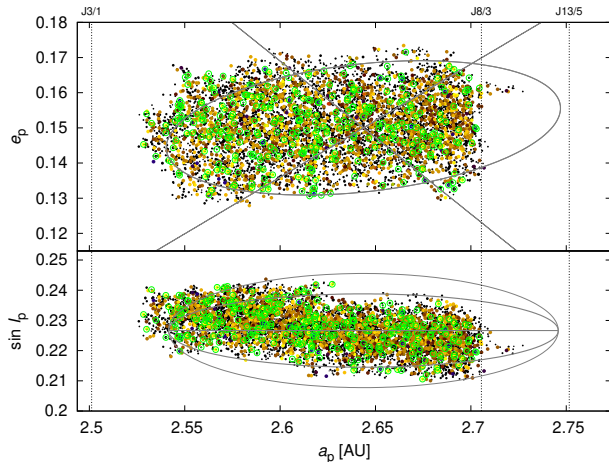


**Obrázek:** Ilustrace dopředné (vlevo) a zpětné (vpravo) **Eulerovy metody** pro výpočet problému dvou těles.

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

# Vlastnosti rodiny Eunomia

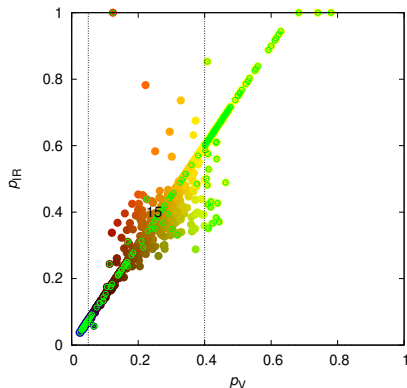
## Identifikace členů



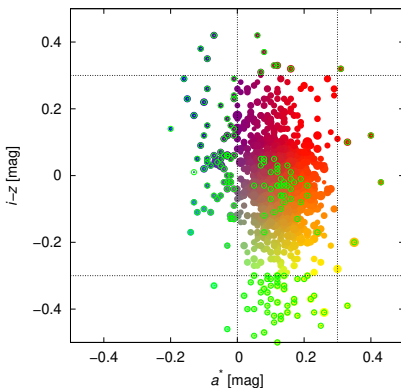
**Obrázek:** Pozorovaná rodina Eunomia v rovině vlastní hlavní poloosy  $a_p$  a vlastní excentricity  $e_p$ , identifikovaná **hierarchickou shlukovací metodou**. Barevná škála odpovídá **albedu**  $p_V$  a  $p_{IR}$  z katalogu WISE.

# Vlastnosti rodiny Eunomia

## Barevné charakteristiky



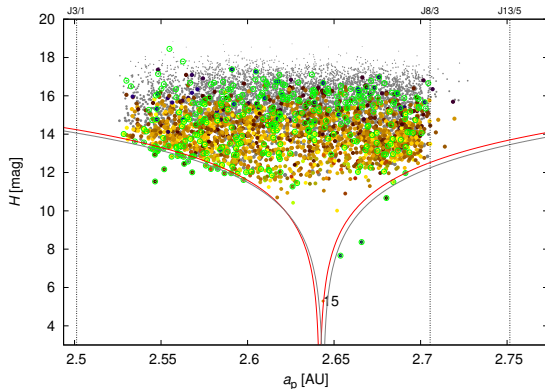
(a) **Albeda**  $p_{\text{V}}$  (ve viditelném spektru) a  $p_{\text{IR}}$  (v infračerveném) z katalogu WISE. Pro vyřazení **přimísěných těles** byly zvoleny hraniční hodnoty  $0,05 \leq p_{\text{V}} \leq 0,4$ .



(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

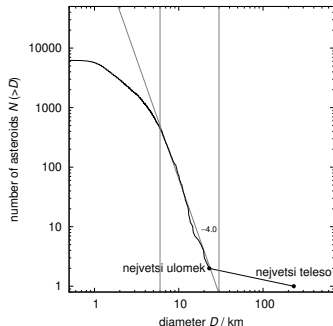


**Obrázek:** Rozdělení pozorované rodiny *Eunomia* v rovině vlastní hlavní poloosy  $a_p$  a **absolutní hvězdné velikosti**  $H$ . Lze pozorovat typický tvar „V“, který je způsobem počátečním rychlostním polem a **Jarkovského jevem**.

# Vlastnosti rodiny Eunomia

## Nastavení simulace

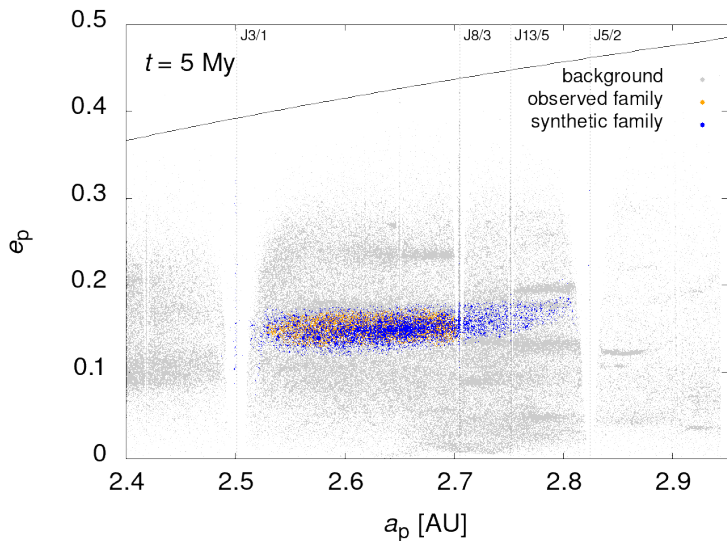
- ▶ 6210 vzájemně **gravitačně neinteragujících** částic, 4 rušící planety (*Jupiter*, *Saturn*, *Uran*, *Neptun*)
- ▶ **Numerický integrátor** SWIFT (vhodný pro dlouhodobé simulace)
- ▶ Délka úspěšného bloku 500 miliónů let
- ▶ *Výpočetní cluster Astronomického ústavu Univerzity Karlovy*
  - ▶ Spotřebováno 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 (chí kvadrát)

## ► 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

## ► Použita statistická metoda **chí kvadrátu**

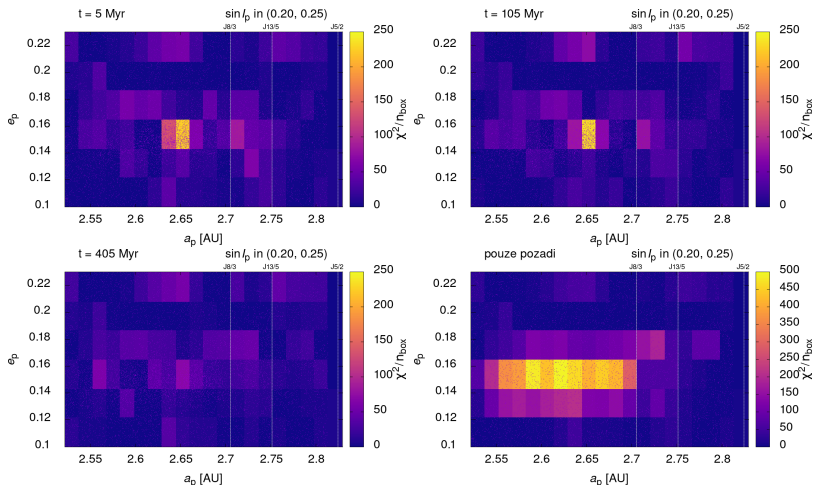
- Příspěvek každého boxu se spočte jako

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

- Celková hodnota  $\chi^2$  se spočte jako součet přes všechny boxy

# Vlastnosti rodiny Eunomia

## Analýza chí kvadrátu



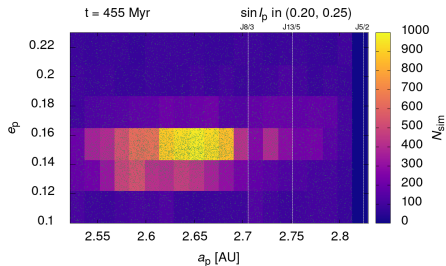
**Obrázek:** Hodnota chí kvadrátu  $\chi^2$  pro každý box v prostoru  $(a_p, e_p)$ .



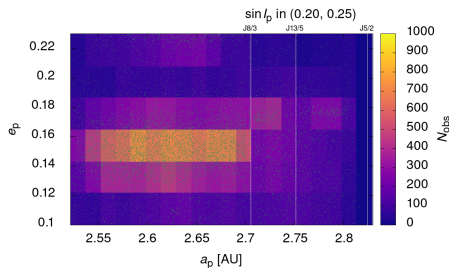
# Vlastnosti rodiny Eunomia

Porovnání simulované a pozorované rodiny

Simulovaná:

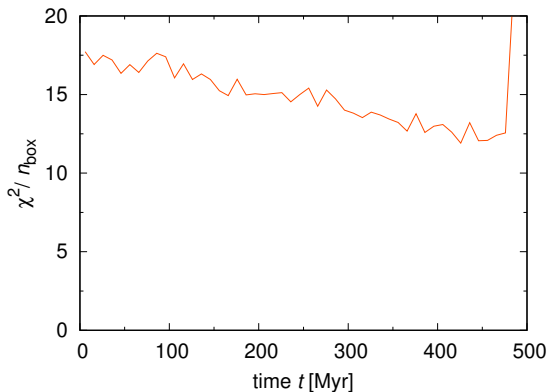


Pozorovaná:



- ▶ Několik krátkodobých simulací
- ▶ Identifikace členů rodiny Eunomia
- ▶ Úspěšná simulace orbitálního vývoje rodiny Eunomia
- ▶ Popis dynamické struktury rodiny Eunomia
- ▶ Odhad stáří rodiny Eunomia na pravděpodobně více než 500 miliónů let

*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.

