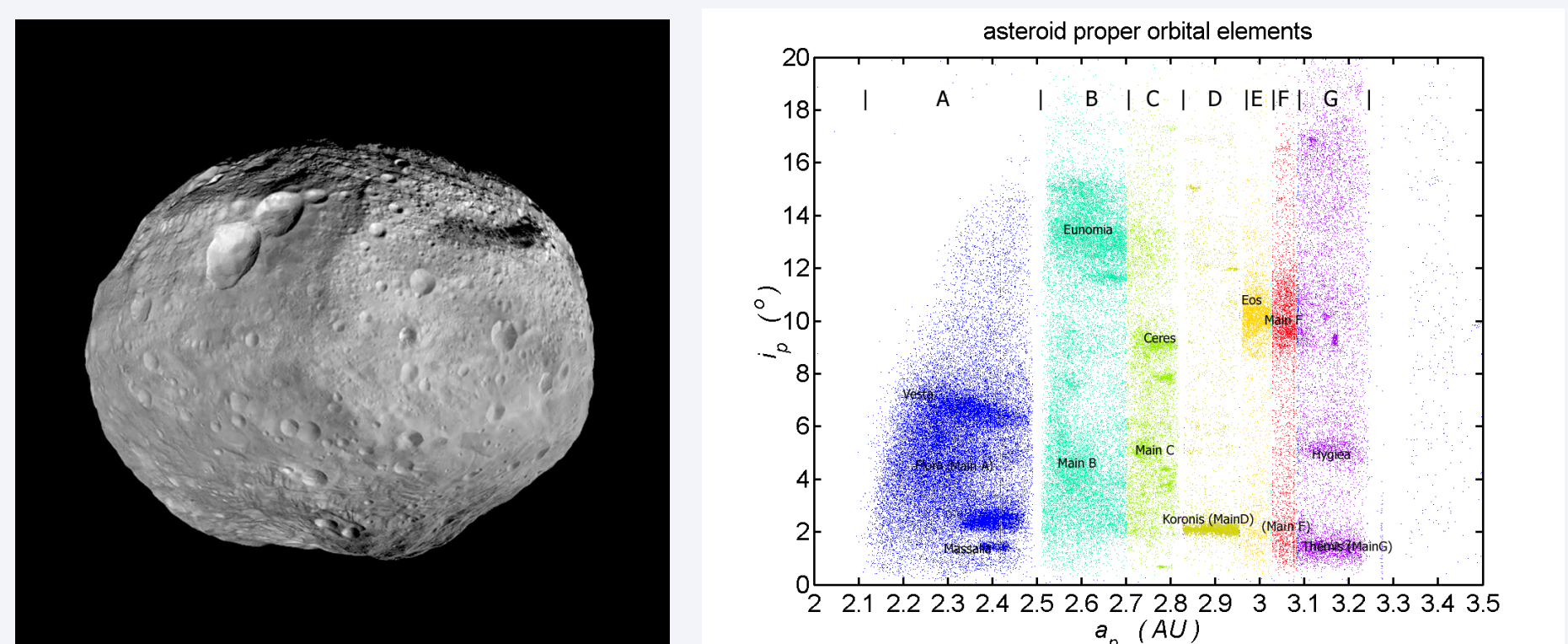


## Planetky ve sluneční soustavě

**Planetky** jsou nejpočetnější a svým způsobem nejzajímavější skupinou těles ve **sluneční soustavě**. První planetka byla objevena v roce 1801, v dnešní době je již známo přes půl milionu planetek.

V **hlavním pásu planetek** mezi *Marsem* a *Jupiterem* tvoří planetky **rodiny** — skupiny vzniklé **rozpadem** stejného mateřského tělesa, způsobeným srážkou s jiným tělesem. V naší práci se soustředíme na početnou rodinu *Eunomia*, nacházející se ve středním hlavním pásu.

Studiem kolizních rodin můžeme zjistit mnoho informací o vzniku sluneční soustavy a její **dynamické struktuře** [1], např. můžeme podpořit teorii o **Velkém pozdním bombardování** (angl. *Late Heavy Bombardment*) [2].



(a) Planetka (4) Vesta — druhé největší a nejmotnější těleso hlavního pásu planetek.

(b) Hlavní pás planetek v prostoru vlastních elementů dráhy — vlastní hlavní poloosa  $a_p$ , vlastní sklon  $\sin i_p$ .

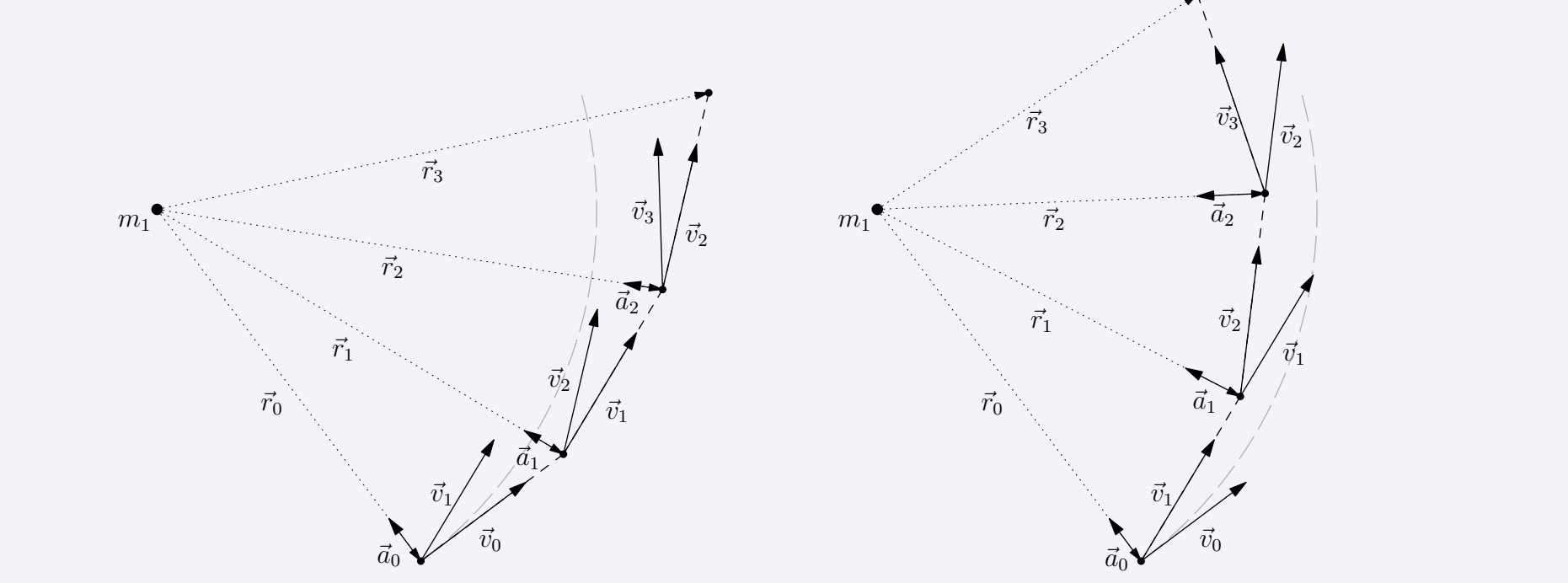
## Metody nebeské mechaniky

Základním problémem nebeské mechaniky je **problém  $N$  těles**, podle **Newtonova gravitačního zákona**

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

K simulaci orbitálního vývoje využíváme **numerického integrátoru SWIFT**, který počítá s

- **Jarkovského jevu**,
- **YORP efektem**,
- **náhodnými srážkami**,
- **chaotickou difuzí**.

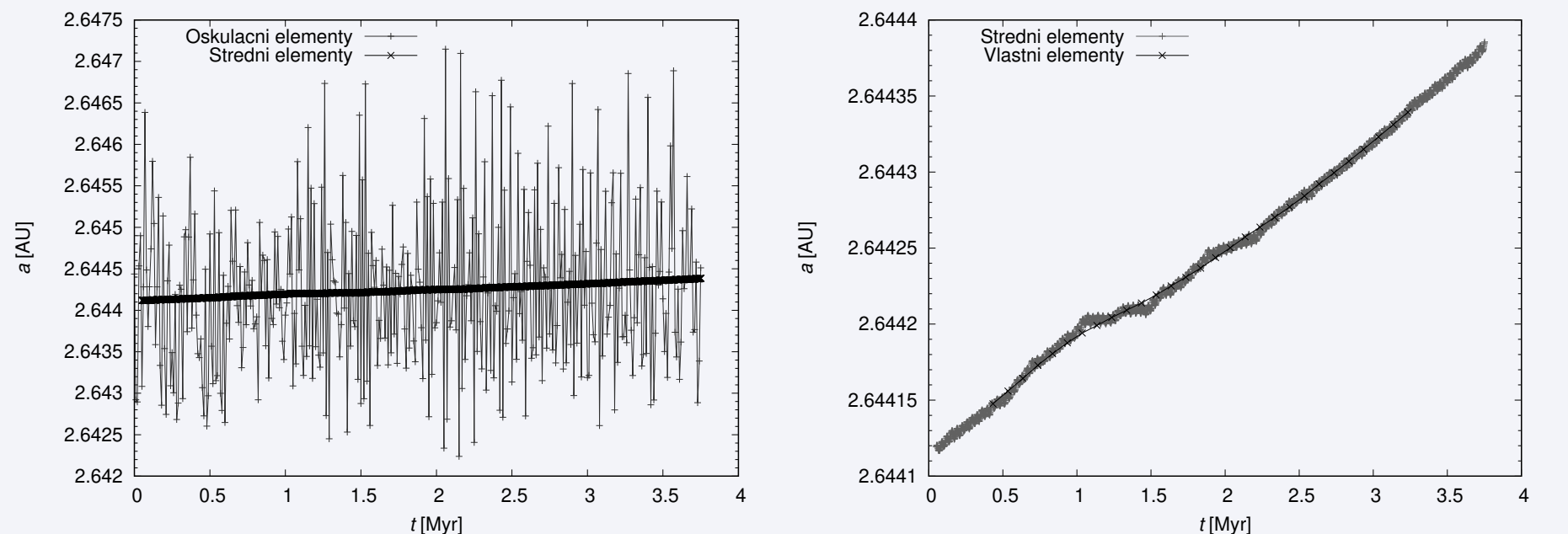


**Obrazek:** Ilustrace jednodušší integrační metody — **Eulerovy metody** — která je principiálně té naší podobná.

Oběžnou dráhu planetky kolem Slunce popisujeme **elementy dráhy**:

- **hlavní poloosa  $a$**
- **excentricita  $e$**
- **sklon  $i$**  (nebo také  $\sin i$ )

Ty se v průběhu času mění působením **perturbací** (např. gravitační působení ostatních planet), můžeme je tedy přes dlouhé úseky „průměrovat“ na **střední** a na **vlastní elementy dráhy**.



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

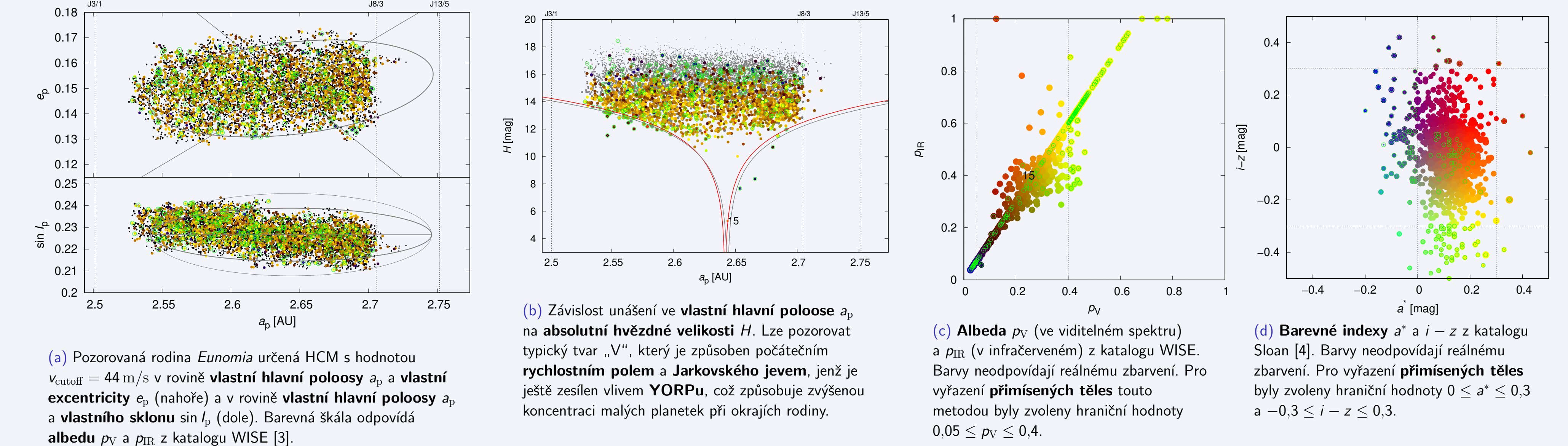
K určení členů rodiny používáme **hierarchickou shlukovací metodu** (HCM) — v prostoru  $(a_p, e_p, \sin i_p)$  si zvolíme hraniční vzájemnou „vzdálenost“ těles  $v_{\text{cutoff}}$  (s jednotkami rychlosti), podle které pak určíme členy (začneme u mateřského tělesa (15) *Eunomia*).

**Obrazek:** Závislost počtu členů rodiny *Eunomia* na zvolené hraniční rychlosti  $v_{\text{cutoff}}$  při použití metody HCM.

$$v_{\text{cutoff}} = na_p \sqrt{C_a \left( \frac{\Delta a_p}{a_p} \right)^2 + C_e (\Delta e_p)^2 + C_i (\Delta \sin i_p)^2}$$

## Určení členů rodiny Eunomia

K určení rodiny *Eunomia* jsme použili metodu HCM. Dále jsme odstranili **přimísaná tělesa** pomocí závislosti unášení ve **vlastní hlavní poloose**  $\Delta a_p$  na **absolutní hvězdné velikosti**  $H$  a pomocí dvou spektroskopických metod — závislosti **albed**  $\rho_V$  a  $\rho_{IR}$  a závislosti **barevných indexů**  $a^*$  a  $i - z$ . Před odstraněním činil počet planetek 6503, po použití všech metod 6184.

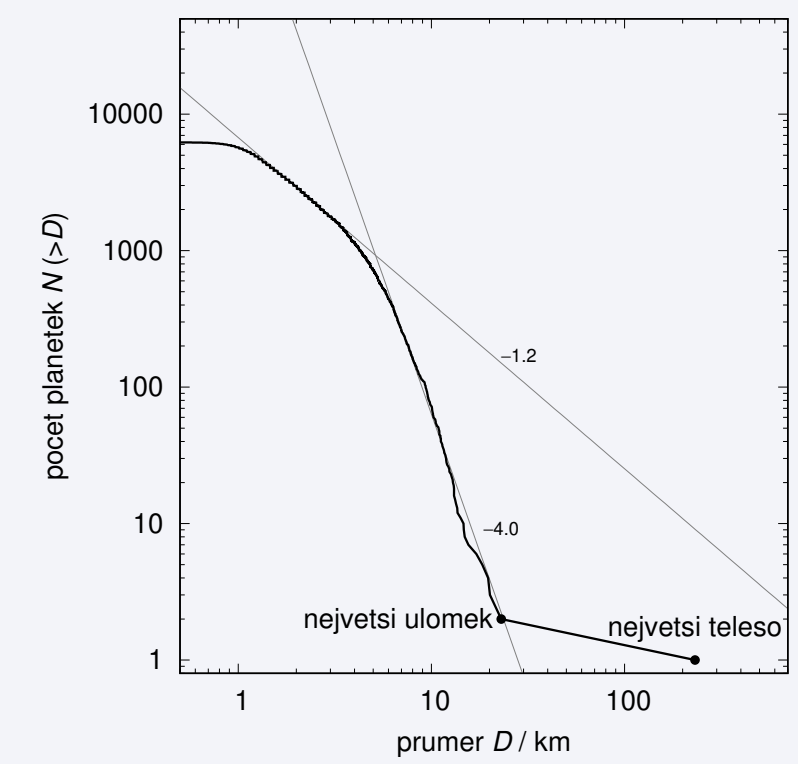


## Simulace orbitálního vývoje

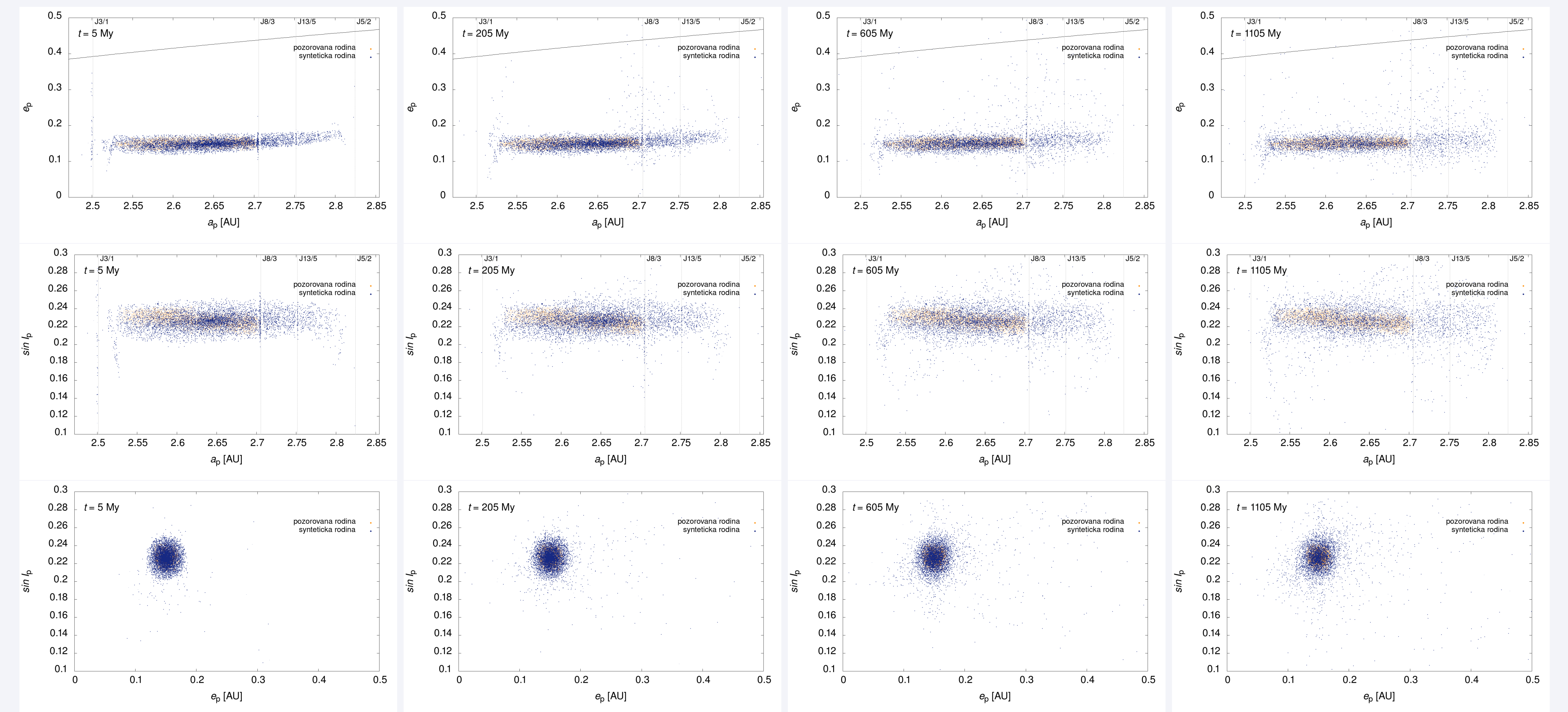
Při vytváření **syntetické** populace planetek jsme částicím přiřadili

- **průměry** (dle pozorovaných dat — zohlednili jsme **rozdělení velikostí**),
- **albeda** (dle pozorovaných dat),
- **orientace rotačních os** (náhodně; vliv na Jarkovského jev),
- **úvodní rychlosti** (jako při **izotropním rozpadu** v bodě oběžné dráhy s hodnotami  $f = 90^\circ$  a  $\omega + f = 50^\circ$ ).

Po dobu 1,3 **miliardy let** jsme simulovali populaci **6210 částic**. Simulace byla spuštěna na **výpočetním clusteru Astronomického ústavu Univerzity Karlovy** a celkově se spotřebovalo přibližně **50000 CPU hodin** a celkový objem **binárních dat** je roven 164 GB.



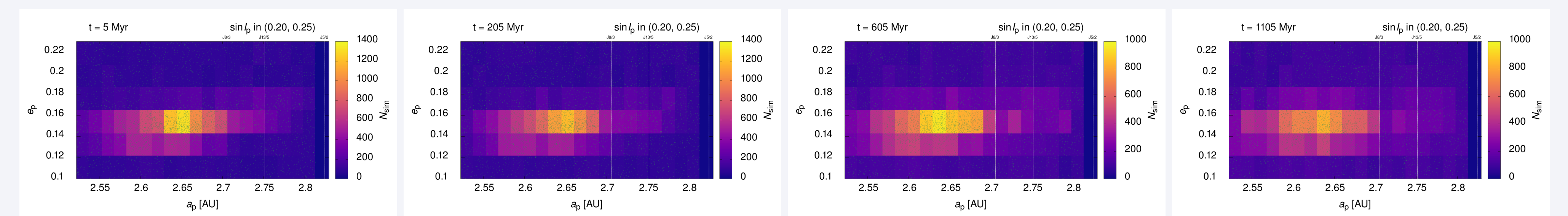
**Obrazek:** Histogram četnosti velikostí planetek rodiny *Eunomia*.



**Obrazek:** Výsledky simulace v prostorech  $(a_p, e_p)$ ,  $(a_p, \sin i_p)$  a  $(e_p, \sin i_p)$  v časech postupně  $t = 5, 205, 605, 1105$  miliónů let. Nápis J3/1, J8/3, J13/5 a J5/2 označují nejvýznamnější **rezonance s Jupiterem**. Černá křivka nahore označuje hranici oblasti, kde je hlavní poloosa a excentricita tělesa taková, že dráha kříží dráhu *Marsu*. Podobná hranice existuje i pro **Jupiter**, ale ta se nachází mimo tyto grafy (přibližně kolem  $e = 0.65$ ). Fialový obdélník označuje oblast vybranou pro vzorek populace **pozadí**.

- Kvůli specifickému výpočtu **vlastních elementů dráhy** z počátečních rychlostí můžeme v čase 5 miliónů let pozorovat mírně nesymetrický tvar simulované rodiny.
- Mechanismus, kterým planetky **opouštějí** rodinu je následovný: působením **Jarkovského jevu** se planetka dostane do blízkosti nějaké **rezonance**, excentricita její oběžné dráhy se **zvýší** až začne **křížit dráhu Marsu** nebo *Jupiteru*, načež se pak při **blízkém přiblížení** prudce vychýlí ze své dráhy.
- Tělesa nacházející se na počátku v blízkosti rezonance J5/2 byla velmi rychle rozptýlena, a tak se už na grafu pro  $t = 5$  miliónů let vůbec nevyskytují.
- **Rezonance** J8/3 a J13/5 jasně rozdělují rodinu na tři části, které různé široké, a tudíž se v nich planetky rozptýlují jinak.
- Potvrzuje se, že **rezonance** J8/3 je silnější než **rezonance** J13/5 (planetky v blízkosti rezonance J8/3 se v čase 205 miliónů let rozšířily do pásu o velikosti  $0,05 < e_p < 0,5$ , zatímco v blízkosti **rezonance** J13/5 pouze do pásu o velikosti  $0,1 < e_p < 0,23$ )
- Na grafu  $(a_p, \sin i_p)$  můžeme pozorovat mírné „**naklonění**“ pozorované rodiny (část pod  $a \approx 2,62$  AU má vyšší sklon  $i_p$ ), čehož si na rodně simulované bohužel zatím všimnout nemůžeme.
- Postupem času koncentrace planetek v prostoru klesá, což je způsobeno **všemi** přítomnými **rezonancemi**.

**Obrazek:** Graf  $(a_p, e_p)$  po pozorovanou rodinu *Eunomia*. Barevná škála označuje počet těles v daném boxu.



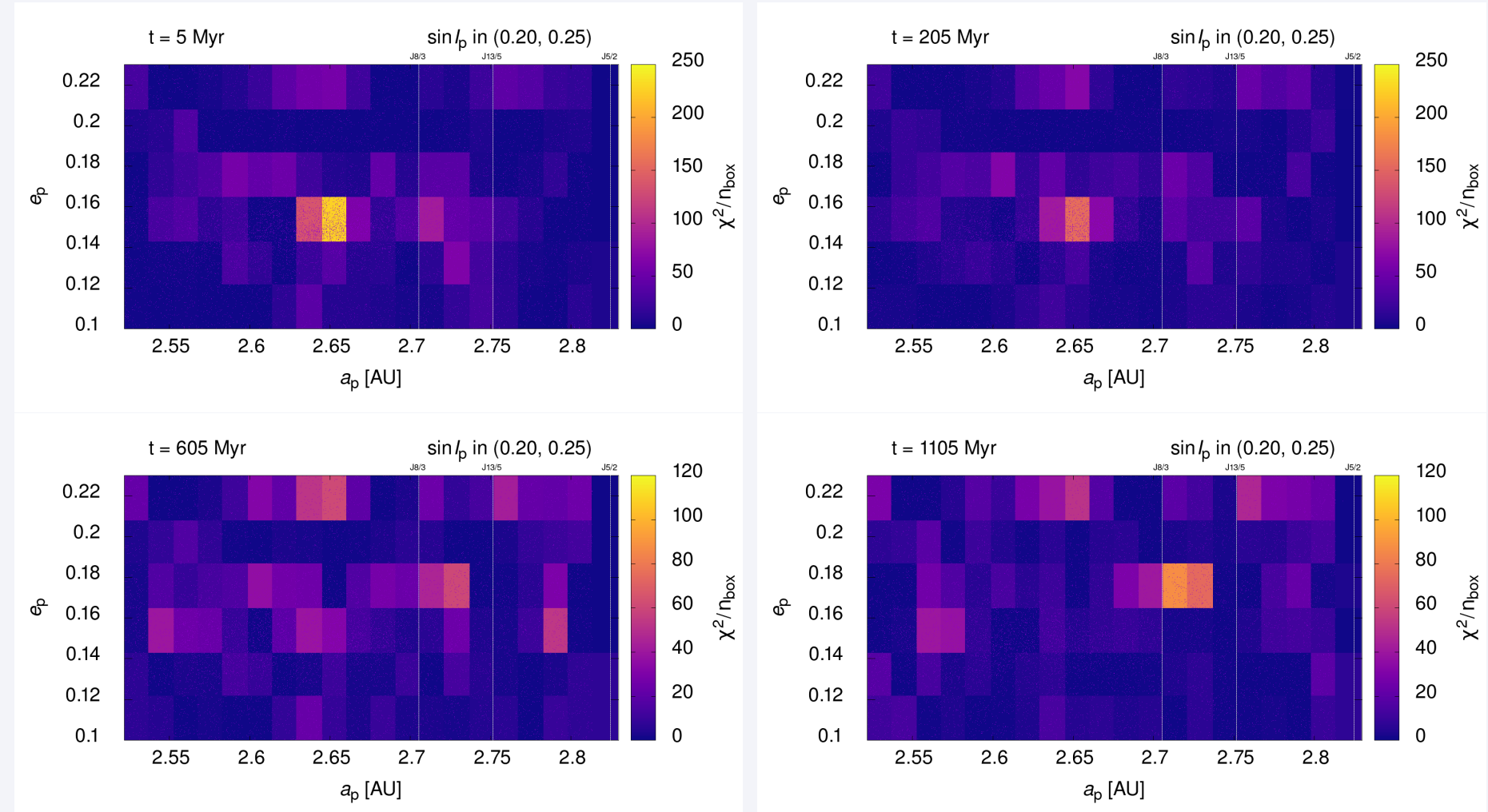
**Obrazek:** Graf  $(a_p, e_p)$  simulované rodiny *Eunomia* pro  $t = 5, 205, 605, 1105$  miliónů let. Pozor na změnu barevné škály.

## Stáří rodiny Eunomia

### Metoda blackbox [5]

Planetky jak pozorované, tak simulované rodiny rozdělíme do „boxů“ v prostoru  $(a_p, e_p, \sin i_p)$  a následně porovnáváme počty planetek v jednotlivých **boxech**. Simulovanou populaci ještě „smícháváme“ se vzorkem **pozadí**, přičemž dodržujeme **rozdělení velikostí**. Na tento jednoduchý princip pak používáme statistickou metodu rozdělení **chí kvadrátu** ( $\chi^2$ ) — pro každý **box** vypočteme jeho příspěvek k  $\chi^2$  jako

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

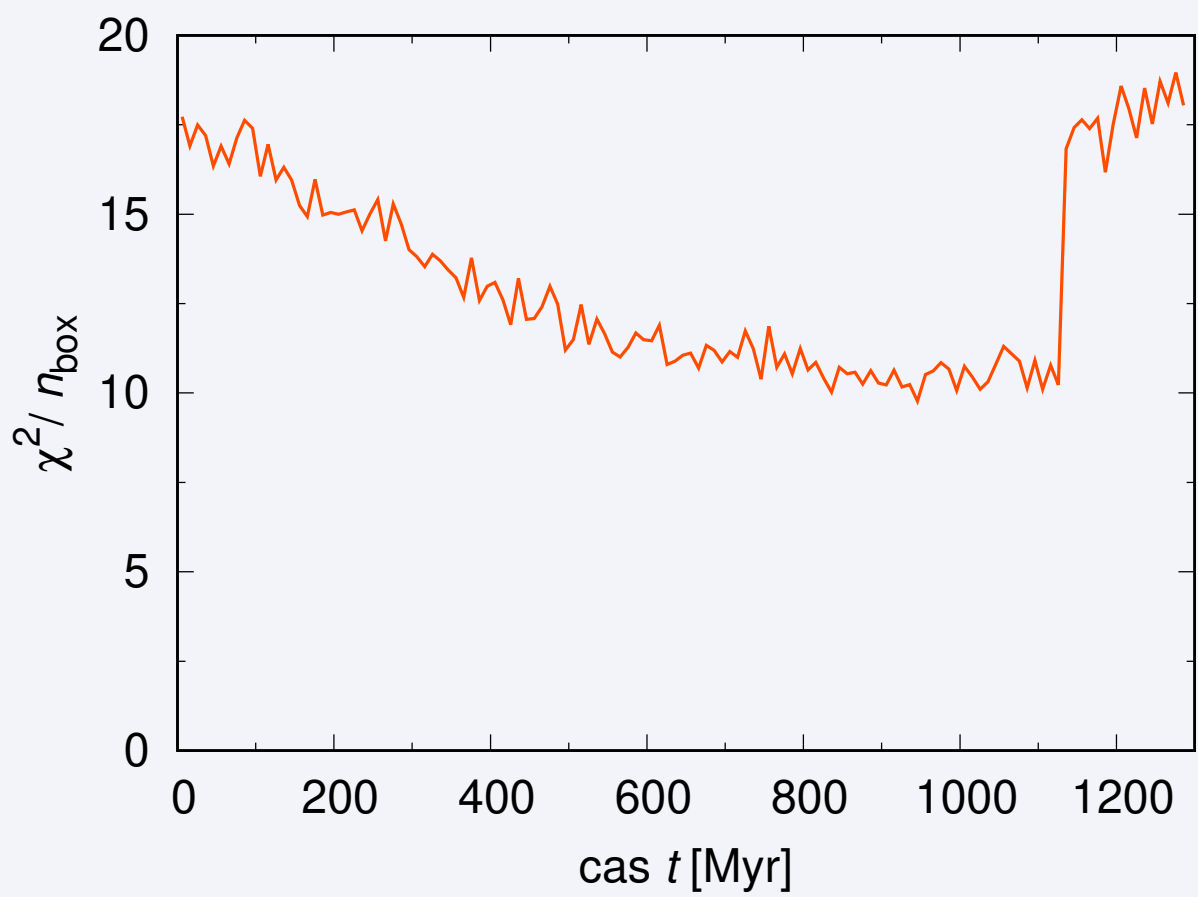


**Obrazek:** Hodnota **chí kvadrátu**  $\chi^2$  pro každý **box** v prostoru  $(a_p, e_p)$  pro  $t = 5, 205, 605, 1105$  miliónů let. Tečky označují **syntetickou** populaci i s přidáním **pozadí**.

Můžeme vidět, že ze začátku se nejvíce odlišuje jádro rodiny kolem  $2,65$  AU (moc **syntetických** částic).

Kvůli silné **kontaminaci** rodinou *Adeona* v oblasti  $0,16 < e < 0,18$  jsme byli nuceni pozorované členy této rodiny ručně odstranit.

Podařilo se nám pochopit **struktur**, které lze na našich grafech v prostorech  $(a_p, e_p)$ ,  $(a_p, \sin i_p)$  a  $(e_p, \sin i_p)$ . Některé jevy (např. přílišná kompaktnost jádra) bohužel musíme připsat **nedostatečně dlouhému časovému úseku**, po který jsme rodinu *Eunomia* simulovali. S velkou pravděpodobností můžeme říct, že rodina *Eunomia* **není mladší** než 500 miliónů let, ale zatím nedokážeme odhadnout (z důvodu ploché závislosti **chí kvadrátu** na čase), jaký je horní limit stáří rodiny *Eunomia*.



**Obrazek:** Závislost **redukováného chí kvadrátu** na čase. Skok v čase přibližně **1125 miliónů let** je způsoben **úbytkem** těles v simulaci.

V budoucnu plánujeme simulovat rodinu *Eunomia* po **delší dobu** (4 miliardy let). Pravděpodobně dostaneme nějakou minimální (statisticky významnou) hodnotu **chí kvadrátu**, čímž budeme schopni přesně určit horní mez pro **stáří** rodiny *Eunomia*.

Další možností vylepšení je analýza **okolních rodin**, zejména rodiny *Adeona*. Můžeme se také zaměřit jen na některé **taxonomické typy** planetek (rodina *Eunomia* je **typu S**) nebo vyzkoušet **anizotropní rychlostní pole** — simulovat různé typy rozpadu (**kráterování**, **reakumulace**, **katastrofický rozpad**). Dále můžeme vyzkoušet **různé vzorky pozadí** pro různé oblasti (mezi rezonancemi J8/3 a J13/5 je menší koncentrace pozorovaných těles než mezi rezonancemi J3/1 a J8/3).

Po **dokončení dlouhodobé simulace** plánujeme **publikaci** výsledků v odborném časopisu (*Icarus*).

## Reference

- [1] D. Nesvorný, M. Brož a V. Carruba, „Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families“. In: *Asteroids IV*, Ed. P. Michel, F. E. DeMeo a W. F. Bottke. 2015, s. 297–321. doi: 10.2458/azu\_wapress\_9780816532131-ch016.
- [2] M. Brož et al., „Constraining the cometary flux through the asteroid belt during the late heavy bombardment“. In: *A&A* 551, A117 (břeč. 2013). A117. doi: 10.1051/0004-6361/201219296. arXiv: 1301.6221 [astro-ph.EP].
- [3] C. R. Nugent et al., „NEOWISE Reactivation Mission Year One: Preliminary Asteroid Diameters and Albedos“. In: *ApJ* 814, 117 (pros. 2015), s. 117. doi: 10.1088/0004-637X/814/2/117. arXiv: 1509.02522 [astro-ph.EP].
- [4] Ž. Ivezić et al., „Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data“. In: *AJ* 122 (lis. 2001), s. 2749–2784. doi: 10.1086/323452. eprint: <astro-ph/0105511>
- [5] M. Brož a A. Morbidelli, „A study of 3-dimensional shapes of asteroid families with an application to Eos“. In: *Icarus* 317 (led. 2019), s. 434–441. doi: 10.1016/j.icarus.2018.08.022. arXiv: 1810.04113 [astro-ph.EP].

- 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, „Jarkovsky effect and the dynamics of the Solar System“. Dostupné z: <http://sirrah.troja.mfi.cuni.cz/~mira/mp/phdth/>. Dis. Praha: Astronomický ústav Univerzity Karlovy, 2006.