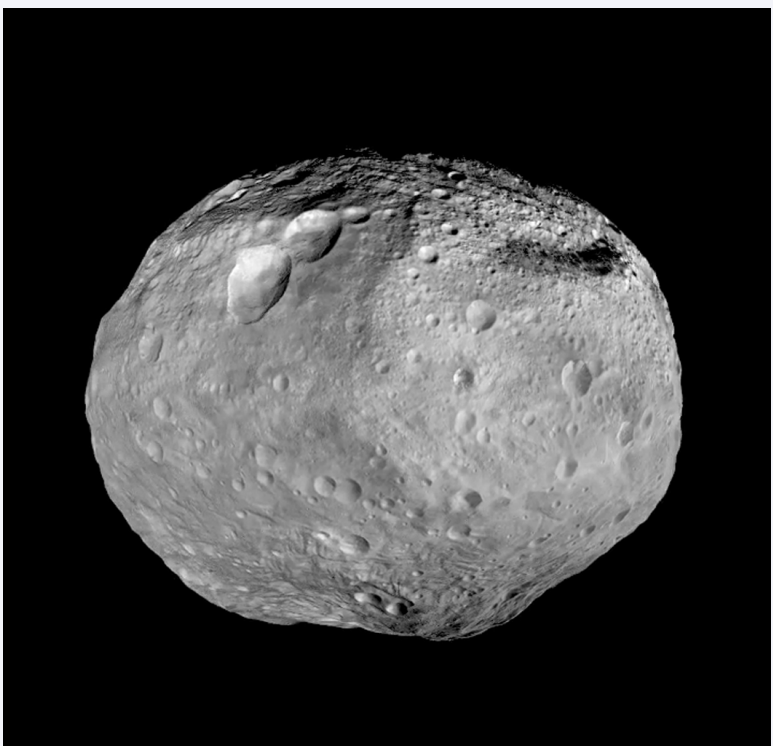


Úvod

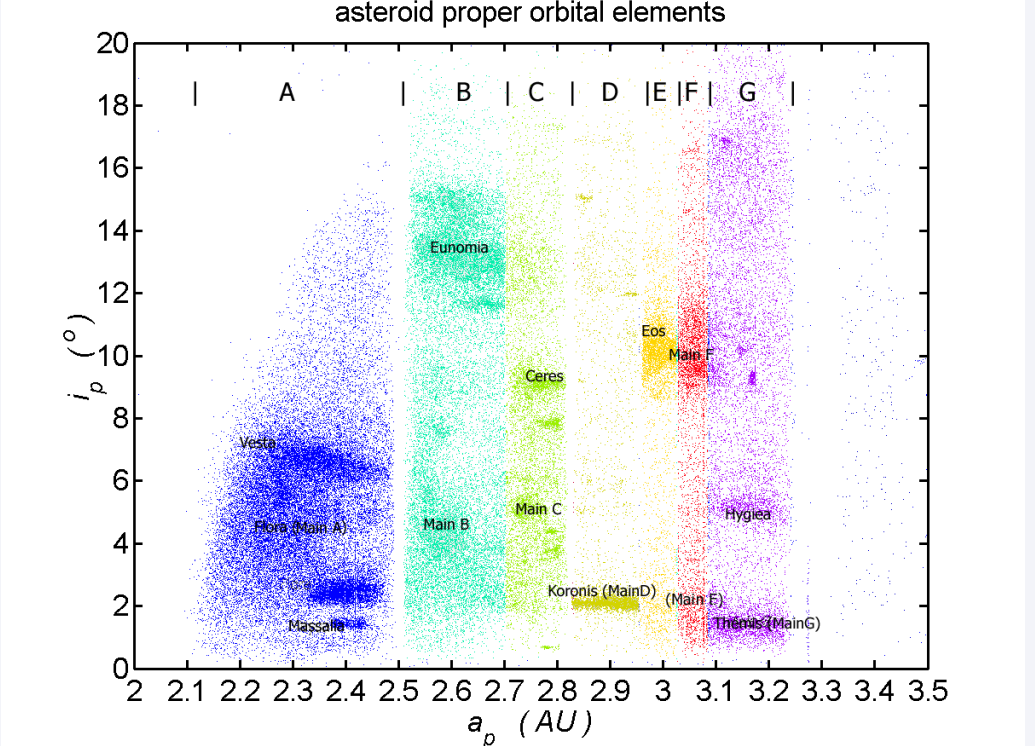
Planetky jsou nejpočetnější a svým způsobem nejzajímavější skupinou těles ve sluneční soustavě. První planetka byla objevena v roce 1801, v dnešní době je již známo přes půl milionu planetek.

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, např. můžeme podpořit teorii o *Velké pozdním bombardování* (angl. *Late Heavy Bombardment*) [1].



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



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

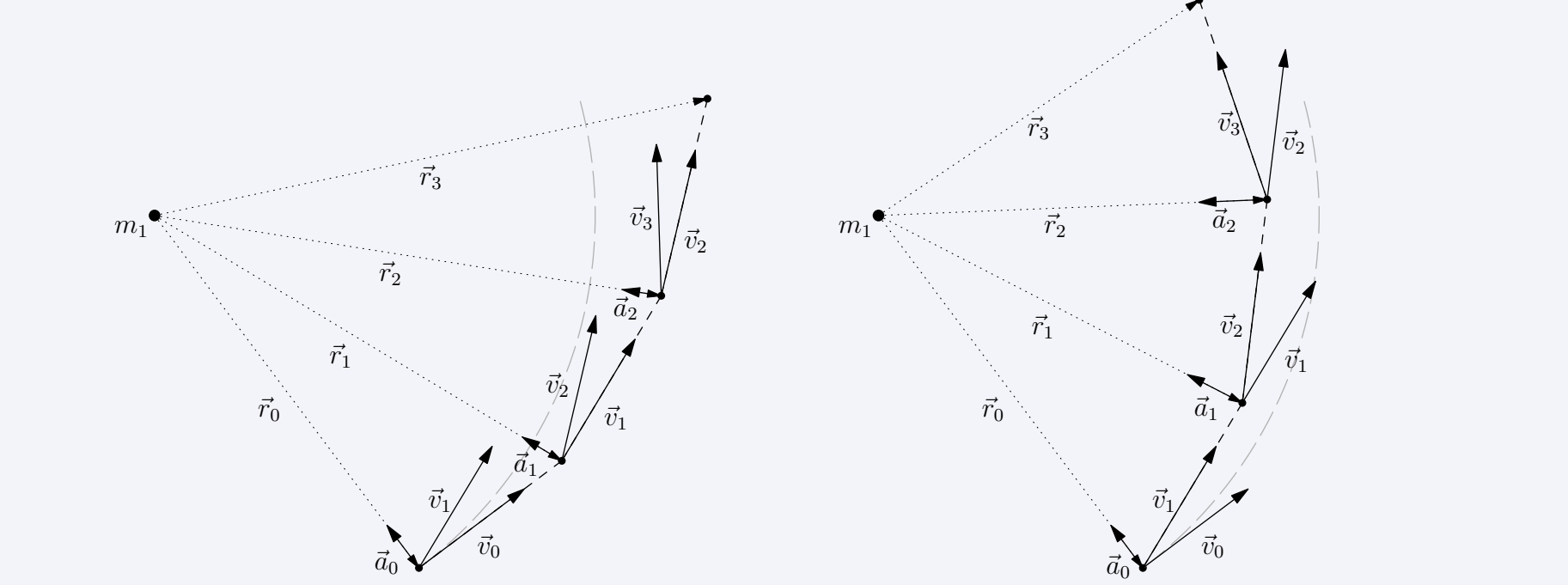
Metody

Základním problémem nebeské mechaniky je **problém N těles** — vypočítat polohu těles, která na sebe vzájemně gravitačně působí v souladu s **Newtonovým gravitačním zákonem**.

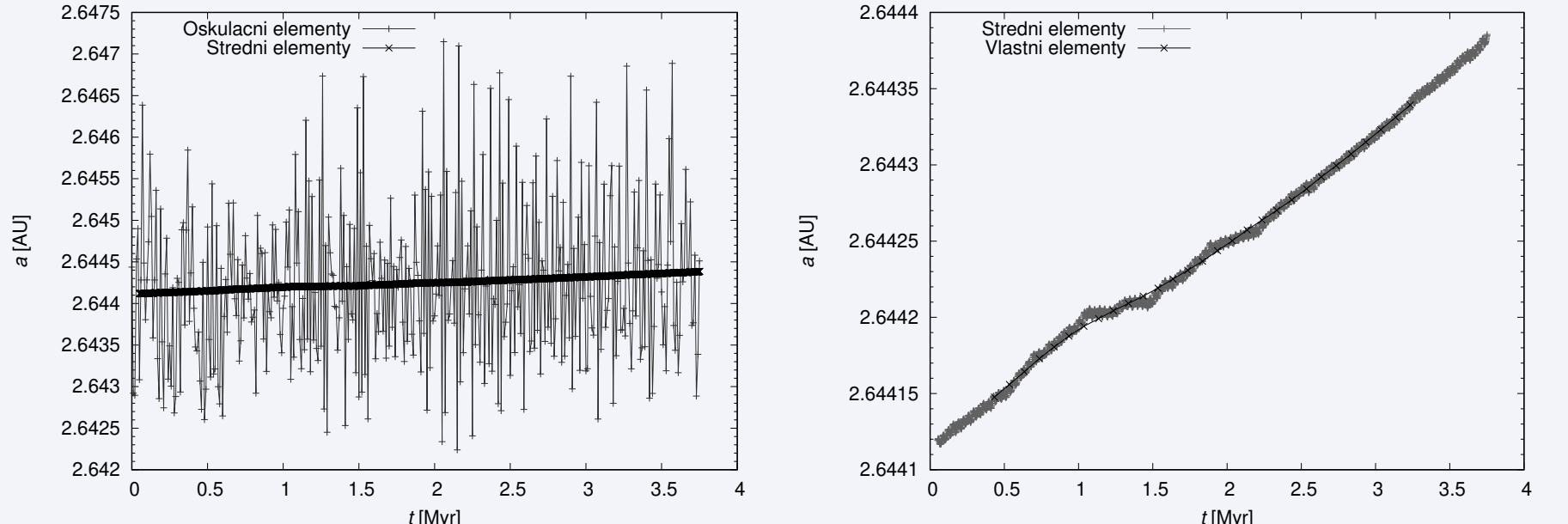
$$\vec{F}_i = m_i \vec{a}_i = - \sum_{j=1, j \neq i}^N G \frac{m_i m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3} (\vec{r}_i - \vec{r}_j), \quad \text{pro } i \in \{1, 2, \dots, N\}$$

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

K simulaci orbitálního vývoje využíváme **numerického integrátoru SWIFT**, který počítá s **Jarkovského jevem**, **YORP efektem**, **náhodnými srážkami** i **chaotickou difúzí**. Zde můžete vidět ilustraci jednodušší integrační metody — **Eulerovy metody** — která je ale pricipielně té naší podobná.



Podle pohybu planetky vzhledem ke Slunci můžeme určovat **elementy dráhy**. 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**, přičemž druhé z nich jsou nepodléhají žádným periodickým silám.



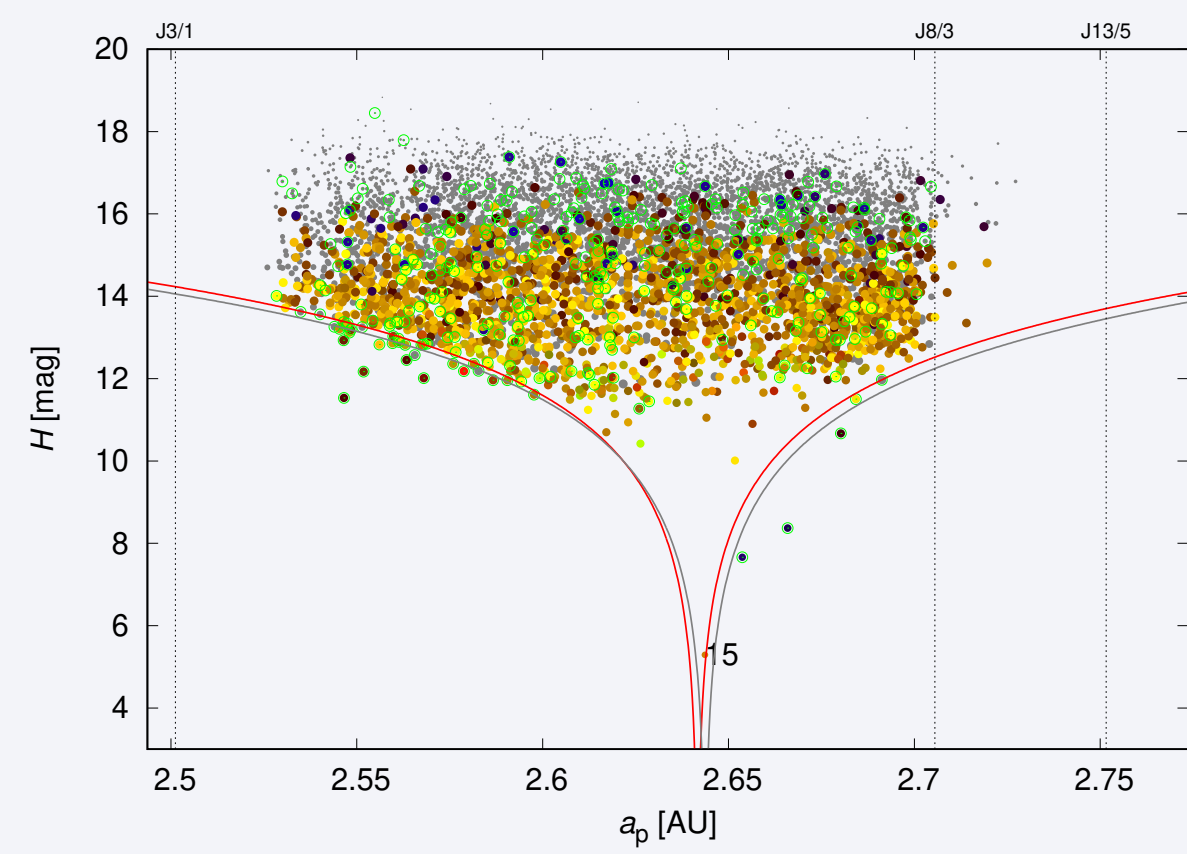
Obrázek: Porovnání oskuláčn a střední hlavní poloosy (vlevo) a střední a vlastní hlavní poloosy (vpravo) pro simulaci jedné planetky po dobu 3,76 miliónů let.

K určení členů rodiny používáme **hierarchickou shlukovací metodu (HCM)** — v prostoru $(a_p, e_p, \sin i_p)$ si zvolíme hraniční vzájemnou „vzdálenost“ těles (s jednotkami rychlosti), podle které pak určíme členy.

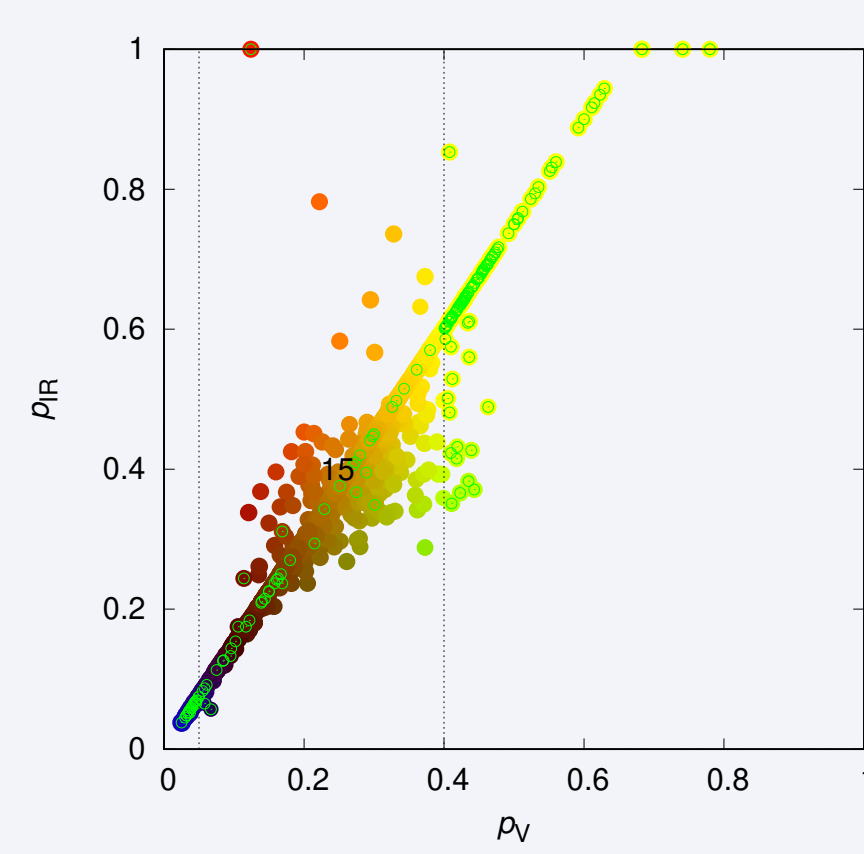
$$v = n a_p \sqrt{C_1 \left(\frac{\Delta a_p}{a_p} \right)^2 + C_2 (\Delta e_p)^2 + C_3 (\Delta \sin i_p)^2},$$

Obrázek: Závislost počtu členů rodiny Eunomia na zvolené hraniční rychlosti $v_{\text{cut-off}}$ při použití metody HCM. Počet členů prudce vzroste při přechodu z rychlosti 43 m/s na 44 m/s, což je způsobené poměrně velkou

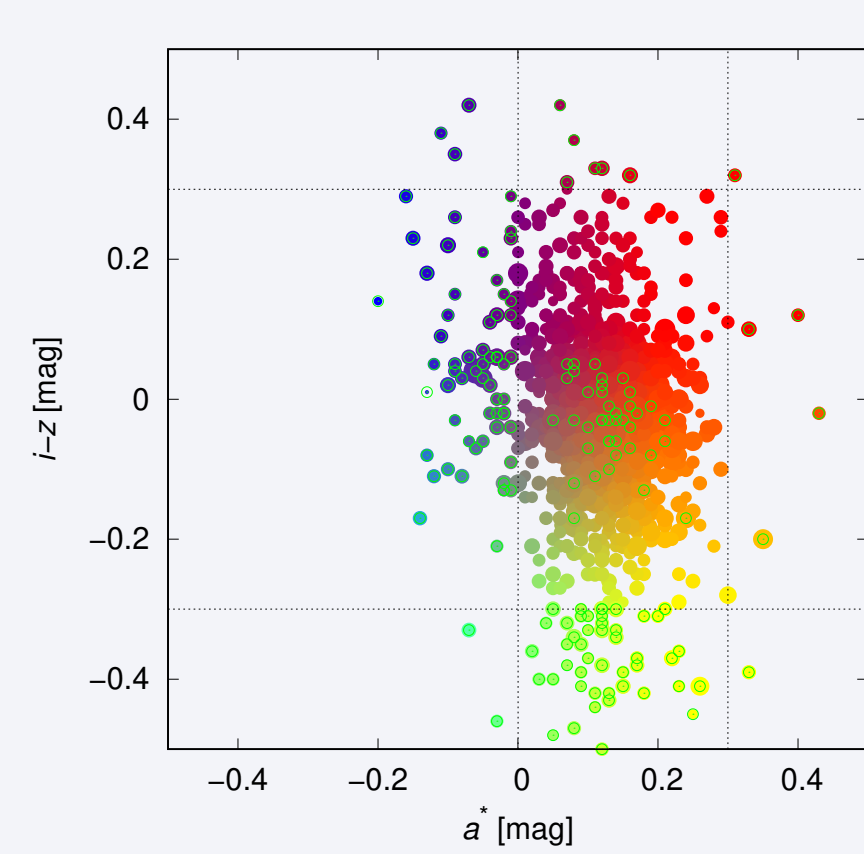
Výsledky



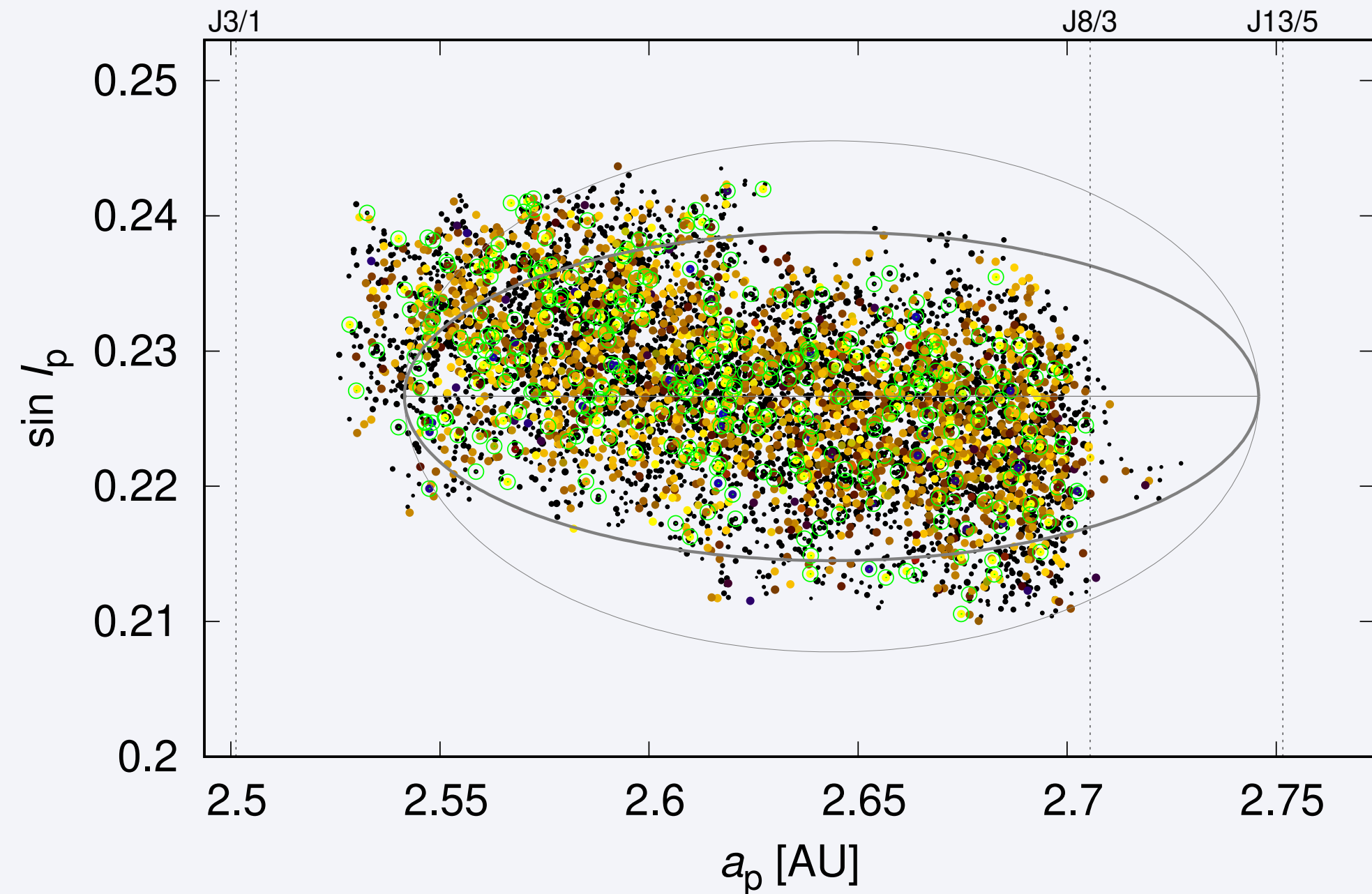
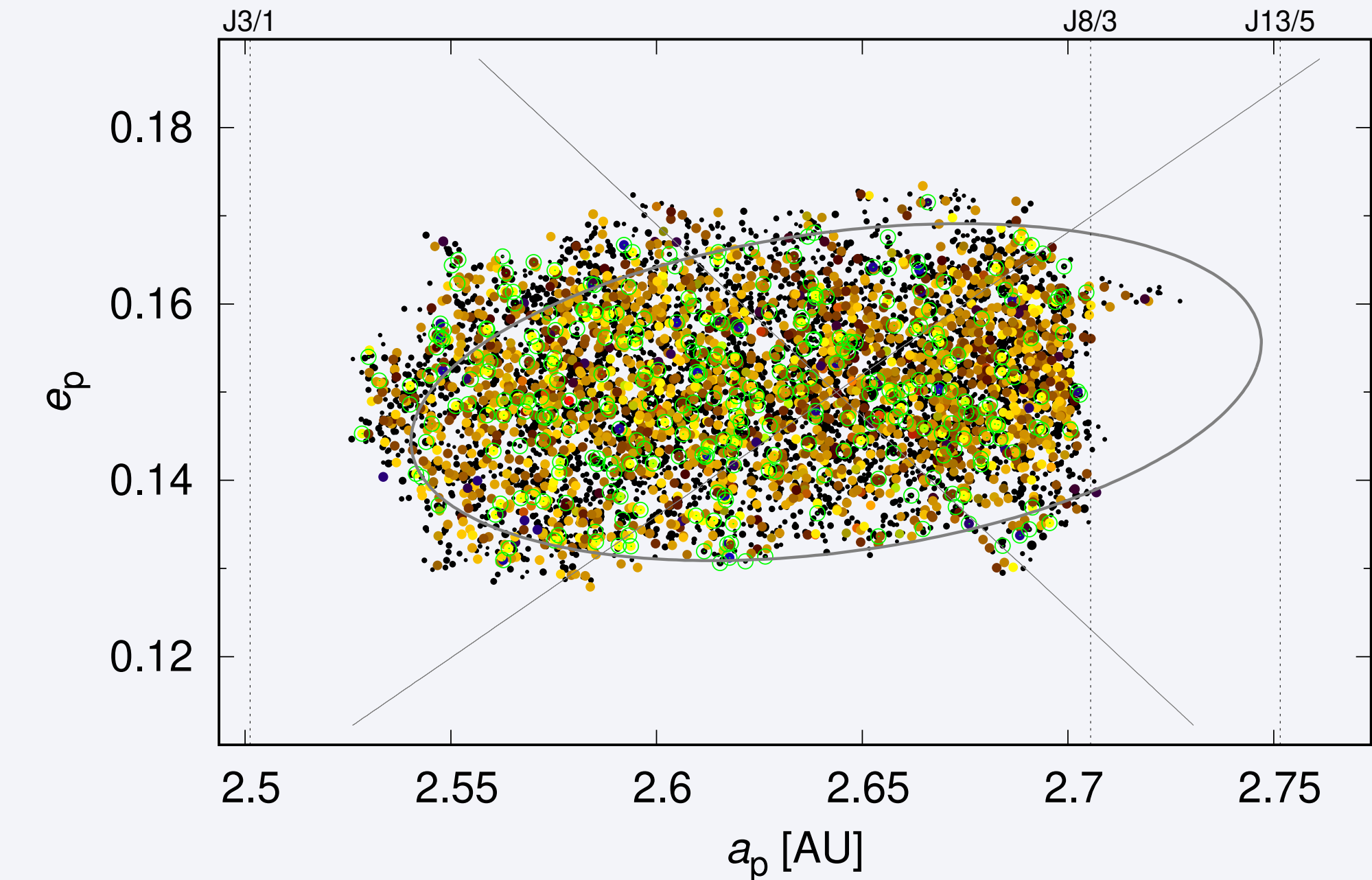
(a) Rozdělení pozorované rodiny Eunomia v rovině vlastní hlavní poloosy a_p a absolutní hvězdné velikosti H . Lze pozorovat typický tvar „V“, který je způsobem počátečním rychlostním polem a Jarkovského jevem, jenž je ještě zesílen vlivem YORP, což způsobuje zvýšenou koncentraci malých planetek při okrajích rodiny. Pro vyřazení přímísených těles byla použita červená funkce.



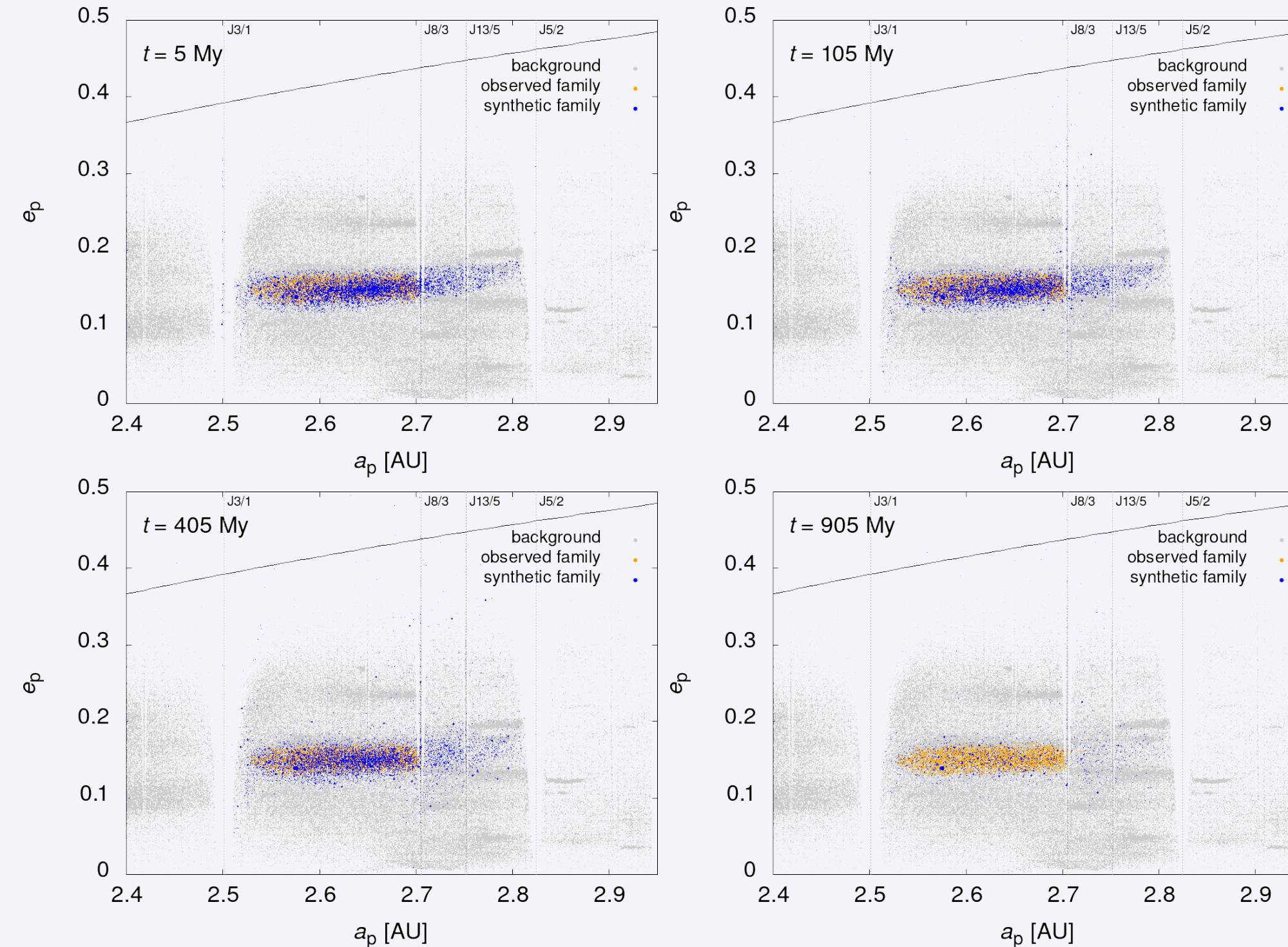
(b) Albeda p_V (ve viditelném spektru) a p_{IR} (v infračerveném spektru) z katalogu WISE [2], barvy neodpovídají reálnému zbarvení. Pro vyřazení přímísených těles touto metodou byly zvoleny hraniční hodnoty $0.05 \leq p_V \leq 0.4$.



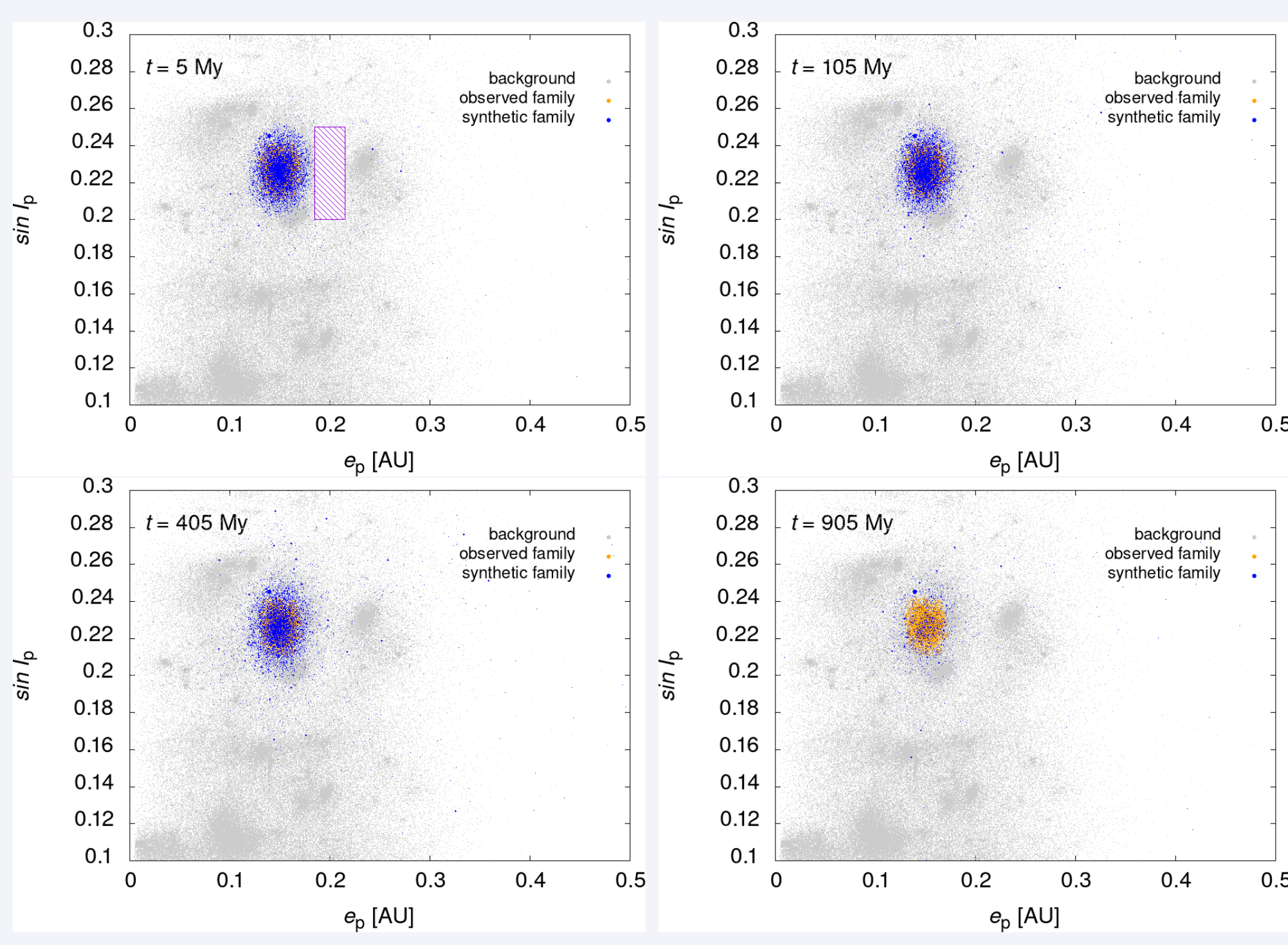
(c) Barevné indexy a^* a $i - z$ z katalogu Sloan [3]. Barvy neodpovídají reálnému zbarvení. Pro vyřazení přímísených těles byly zvoleny hraniční hodnoty $0 \leq a^* \leq 0.3$ a $-0.3 \leq i - z \leq 0.3$.



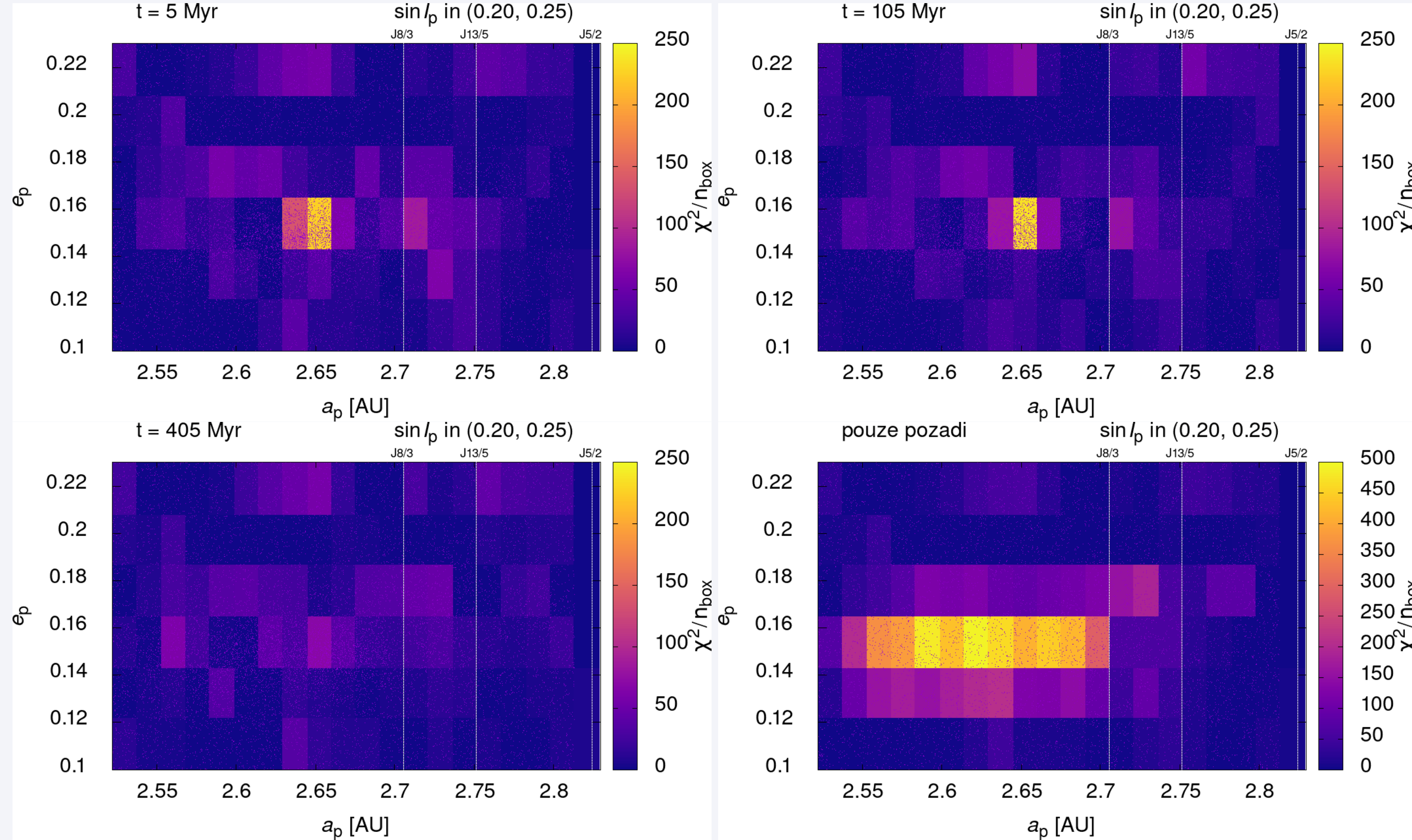
Obrázek: Pozorovaná rodina Eunomia pro hraniční rychlost $v_{\text{cut-off}} = 44 \text{ m/s}$ v rovině vlastní hlavní poloosy a_p a vlastní excentricity e_p (nahore) a v rovině vlastní hlavní poloosy a_p a vlastního sklonu $\sin i_p$ (dole). Barevná škála odpovídá albedu p_V a p_{IR} z katalogu WISE. Nápis J8/3 a J13/5 označují polohu rezonancí středního pohybu s Jupiterem. Sedé elipsy a úsečky (degenerované elipsy) naznačují výpočet Gaussových rovin pro hodnoty pravé anomálie $f = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ (nahore) a součtu $\omega + f = 0^\circ, 50^\circ, 90^\circ$ (dole), kde zvolenou tučnější elipsou je elipsa pro hodnoty $f = 90^\circ$ a $\omega + f = 50^\circ$.



(a) Výsledky simulace v prostoru (a_p, e_p) v časech postupně $t = 5, 105, 405, 905$ miliónů let. Modré body označují simulovanou rodinu, žluté body pozorovanou rodinu identifikovanou HCM a šedé body pozadí a jiné okolní rodiny. Jsou také značeny nejvýznamnější rezonance s Jupiterem J3/1, J8/3, J13/5 a J5/2. 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 $e = 0.65$). Skripty k vytvoření těchto grafů můžete nalézt v příloze ??.

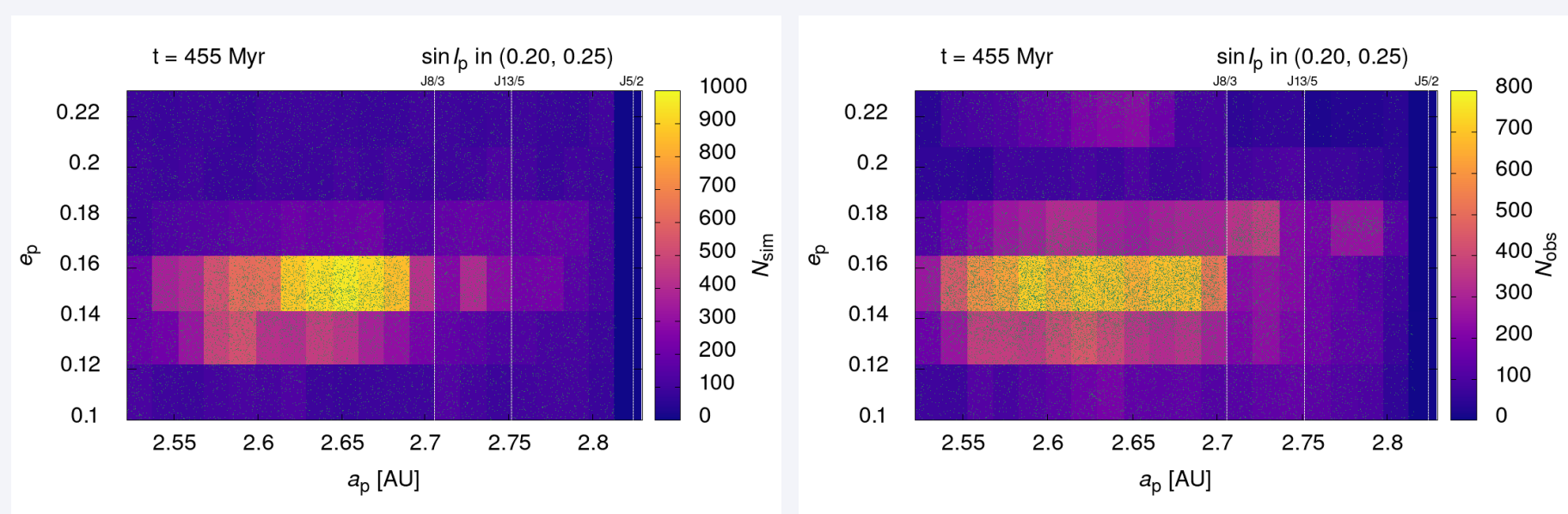


(b) Výsledky simulace v prostoru $(e_p, \sin i_p)$ v časech postupně 5, 105, 405 a 905 miliónů let. Fialový obdélník označuje oblast vybranou pro vzorek populace pozadí.



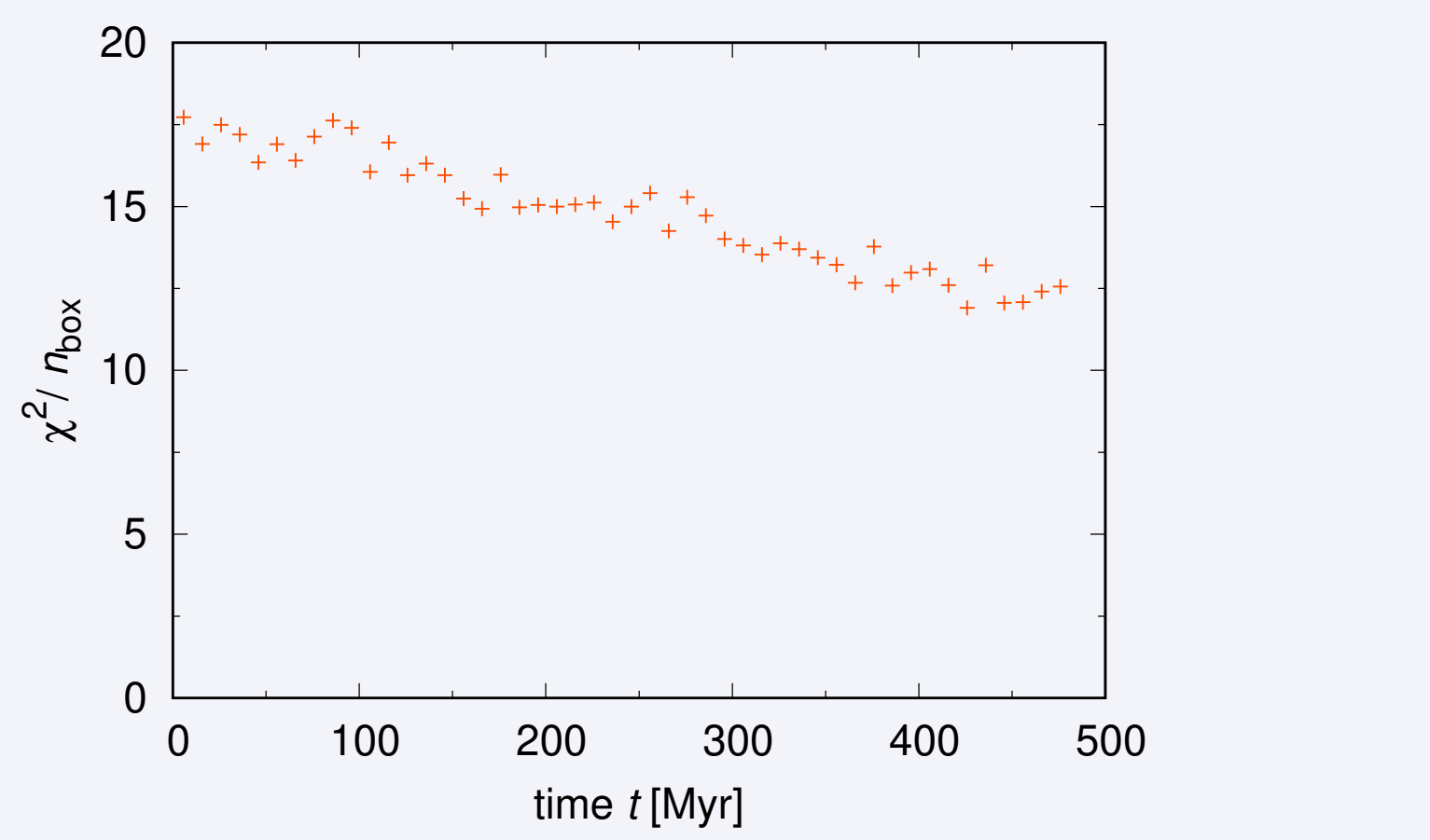
Obrázek: Hodnota chi kvadrátu χ^2 pro každý box v prostoru (a, e). Na prvních třech obrázcích lze vidět rozdělení chi kvadrátu pro $t = 5, 105, 405$ miliónů let, na posledním obrázku lze vidět rozdělení chi kvadrátu při vygenerování pouze pozadí bez použití částic simulované rodiny. Barevná škála je pro všechny až na poslední obrázek stejná. Zelené tečky označují simulovanou populaci i s přidáním pozadí. J8/3, J13/5 a J5/2 označují rezonance středního pohybu s Jupiterem.

Závěry



Obrázek: Graf (a_p, e_p) pro simulovanou (vlevo) a pozorovanou (vpravo) rodinu Eunomia v čase $t = 455$ miliónů let, kdy byla hodnota χ^2 nejlepší. Tentokrát barevná škála označuje počet těles v daném boxu. Lze porovnat s podobným grafem χ^2 — problémové oblasti jsou přímo v centru rodiny (simulovaná populace je příliš kompaktní) a potom v oblasti $a_p \in (2.55 \text{ AU}, 2.5 \text{ AU})$ a $e_p \in (0.14, 0.16)$, kam se naopak částice simulované populace nestihly rozšířit.

Budoucí práce



Obrázek: Závislost redukovaneho chi kvadrátu χ^2/n_{box} na čase t . Lze vidět, že se jeho hodnota snižuje, tudíž můžeme předpokládat, že bychom delší integraci dostali nižší hodnoty, případně bychom mohli určit interval stáří rodiny Eunomia.

Reference

- M. Brož et al., „Constraining the cometary flux through the asteroid belt during the late heavy bombardment“, In: *A&A* 551, A117 (bez. 2013), A117. DOI: 10.1051/0004-6361/201219296. arXiv: 1301.6221 [astro-ph.EP].
- 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].
- 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/010511>.