



PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA
SPOLOČNE BEZ HRANÍC



FOND MIKROPROJEKTŮ

Meteorické roje a ich materské telesá

Leonard Kornoš

Pokroky ve výzkumu meziplanetární hmoty a rozvoj spolupráce

**Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
FMFI UK Bratislava**

23. 5. 2015

Motivácia

- identifikácia materských telies, pôvod a fyzikálne charakteristiky kometárne – asteroidálne
- komplexy – problematické vysvetlenie veľmi dlhej aktivity meteorického prúdu Tauríd
 - pokladá sa za člena väčšieho komplexu, tvoreného kométou 2P/ Encke, niekoľkimi meteorickými rojmi a blízkozemskými asteroidmi typu Apollo
- uvažovaný mechanizmus
 - rozpad väčšieho materského telesa
- viaceré štúdie – ďalšie navrhované komplexy
 - komplex 96/P Machholz
 - Kreutzova skupina komét
 - rodiny blízkozemských asteroidov po slapovom rozpade

Obsah

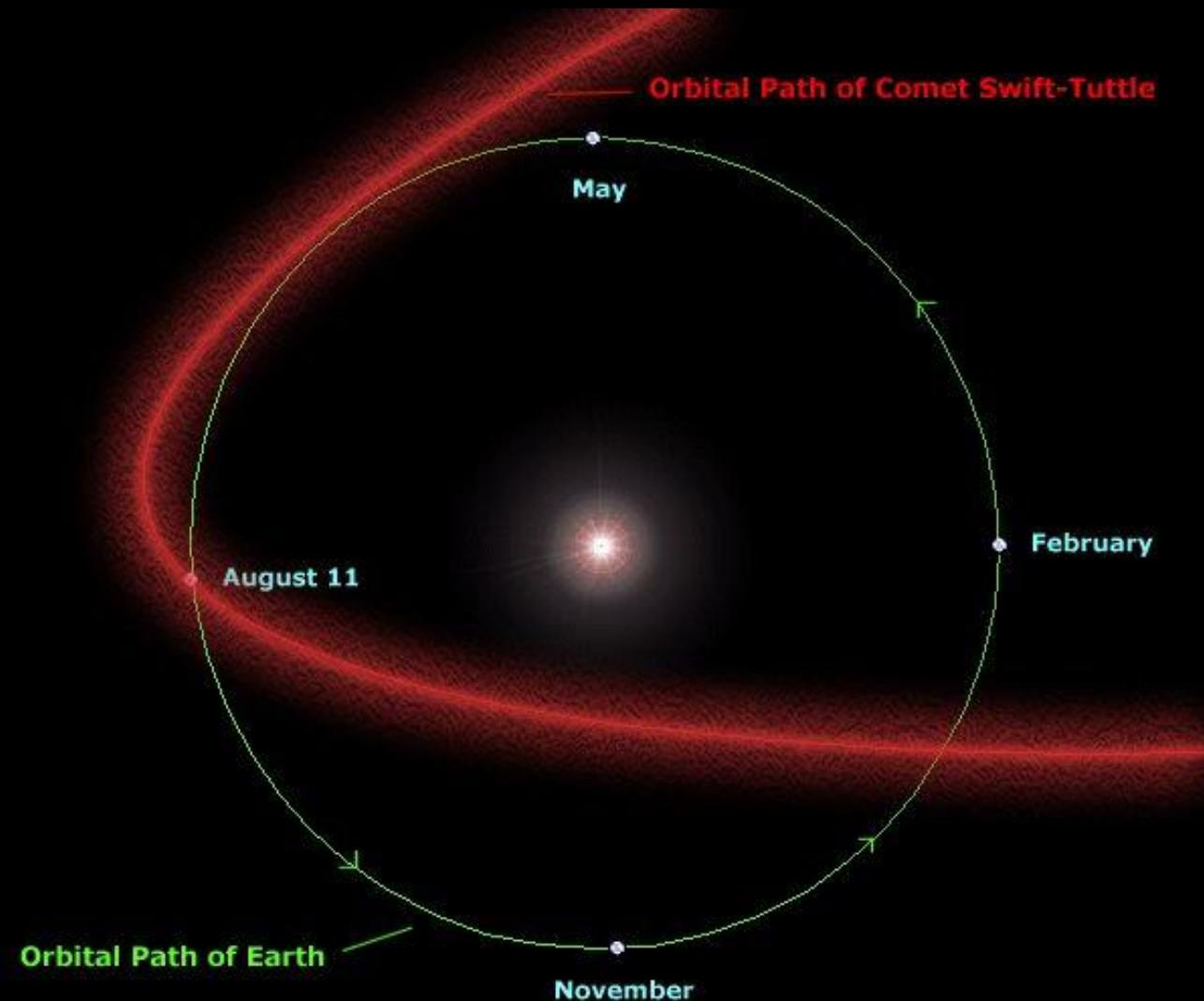
- vznik prúdu
- identifikácia materského telesa
- Kvadrantidy
- komplex Tauríd
- Mellish a jej roje
- asteroidálne meteorické roje



Giovanni Virginio Schiaparelli

Perzeidy

Leonidy



Úvod – prúd meteoroidov

kométa → meteorický prúd
asteroid

■ kométa – pravidelné dopĺňanie materiálu

- sublimácia ľadu
- uvoľnenie prachových častíc
- únikové rýchlosť ~ 10 – 100 m/s
- rozptyl častíc pozdĺž dráhy komety
- premiešavanie materiálu z rôznych návratov komety k perihéliu
- hmotnostná separácia prachových častíc

jadro komety 103P/Hartley



NASA

Úvod – prúd meteoroidov

kométa → meteorický prúd
asteroid

- **asteroid** – zvyčajne jednorazová udalosť

- zrážka s iným asteroidom
- slapový rozpad
- tepelné pnutie
- kozmické zvetrávanie
- YORP efekt

Yarkovsky–O'Keefe–Radzievskii–Paddack

Itokawa, 520 x 270 x 230 m



Hayabusa – Jaxa

IAU Meteor Data Center

- január 2015:
 - 95 established showers
 - 462 working list
 - 81 pro tempore
- rastie počet nových objavených rojov
 - radar a video technika
 - iba niekoľko z nich má spoločne určené materské teleso

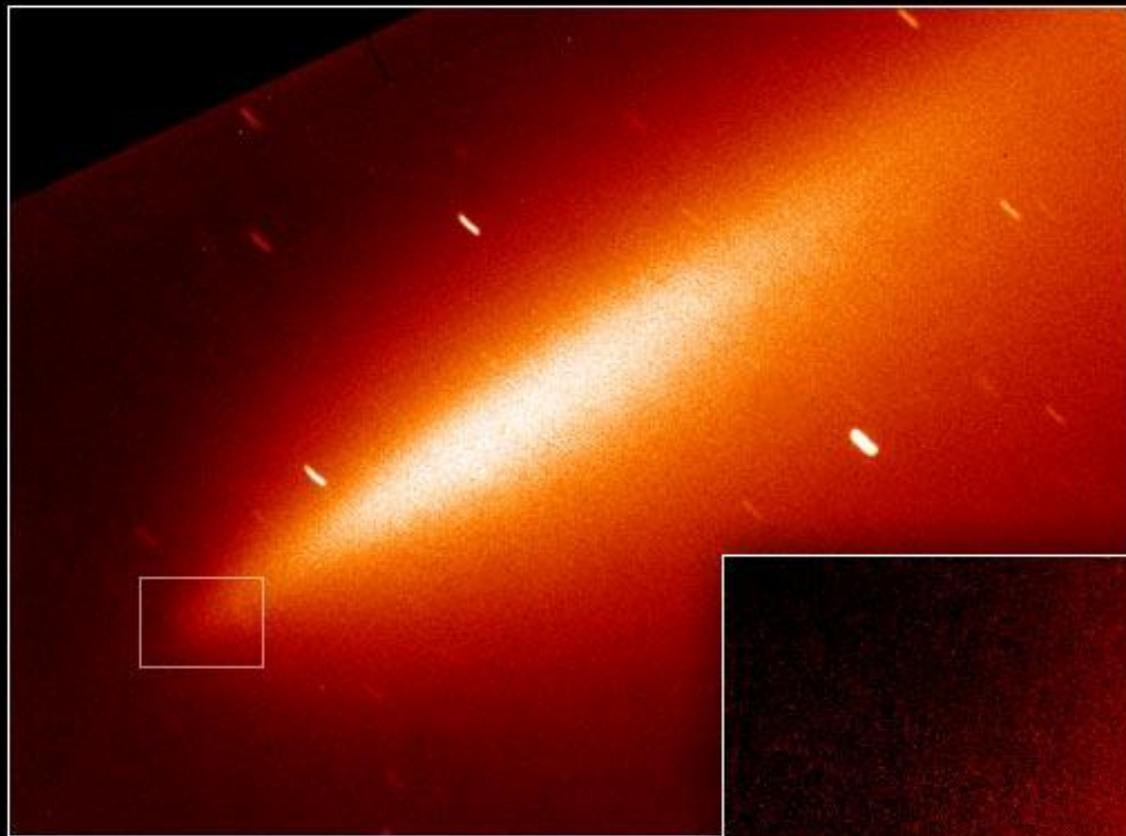
Identifikácia materských telies (1)

- jednoznačné identifikácie – viaceré hlavné roje
 - zreteľne odlišiteľné od sporadického pozadia

		Vg	Incl
Apr. Lyridy	C/1861 G1 Thatcher	48 km/s	79 deg.
eta Akvaridy	1P Halley	66	164
Orionidy	1P Halley	66	164
Perzeidy	109P Swift-Tuttle	59	114
Drakonidy	21P Giacobini-Zinner	20	31
Leonidy	55P Tempel-Tuttle	71	163
Tauridy	2P Encke	12	27
Geminidy	3200 Phaethon	35	24

Identifikácia materských telies (2)

- je veľa prúdov bez jednoznačnej identifikácie s materským telesom
 - kometárne jadro je neaktívne
 - teleso je inde ako prúd – rozdielny dráhový vývoj
 - teleso sa rozpadlo (Biela)
 - veľmi široký a slabý prúd
 - je viacero kandidátov, spätná integrácia je nespoľahlivá (Jupiter, rezonancie)
 - blízkoekliptikálne prúdy (malé sklonky, priemerné excentricity)
 - veľké množstvo telies
- fyzikálne pozorovania – povrchové, rotačné vlastnosti, spektrá meteorov, výšky horenia



University of Hawaii 2.2 m

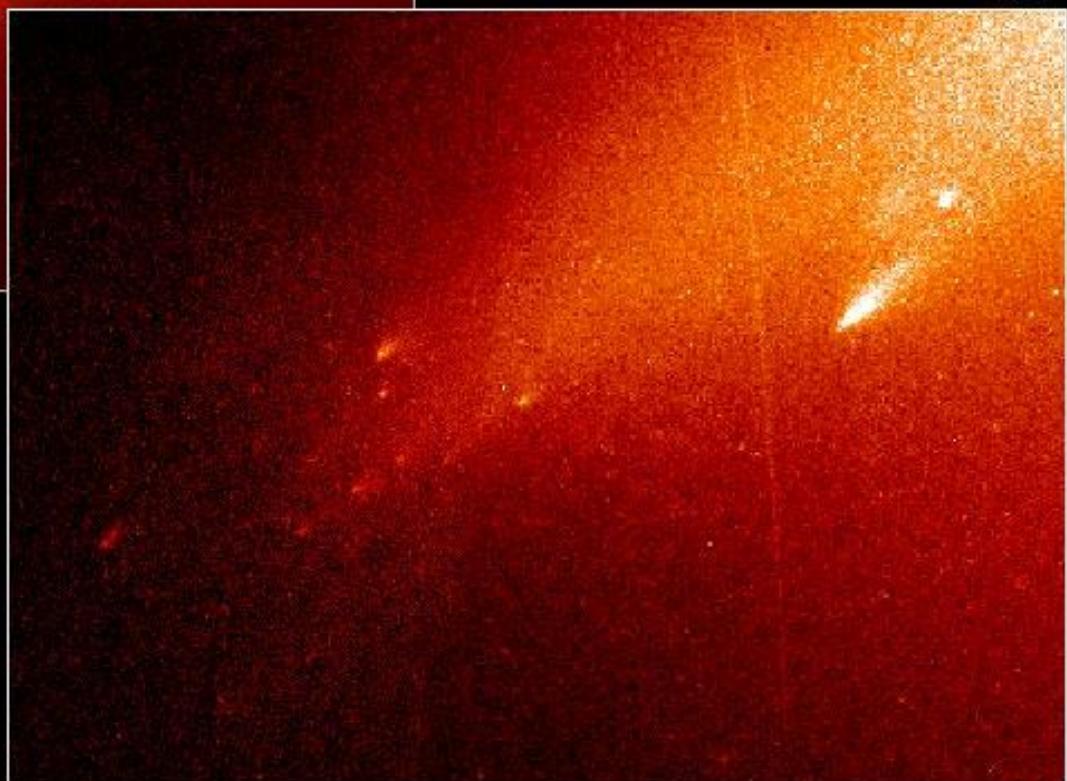
Hubble Space Telescope
WFPC2

NASA and H. Weaver (JHU)
STScI-PRC00-27

**Comet LINEAR
Fragments**
August 5, 2000

C/1999 S4

HST



Porovnávanie dráh

- D-funkcia – miera podobnosti dráh v 4 alebo 5 fázovom priestore na základe :
 - Keplerových elementov
(Southworth-Hawkins 1963, Drummond 1981, Jopek 1993, ...)
q, e, Incl, Peri, Node
každé má svoje výhody a nevýhody
 - pozorovaných veličín – radiant, geocentrická rýchlosť, dĺžka Slnka
(Valsecchi, Jopek, Froeschlé, 1999)
 L_S , Vg (veľkosť, smer do antiradiantu)
 - moment hybnosti, vektorové elementy, mtóda indexov, G-mode a i.

Vyhľadávanie členov prúdu

- D_{SH} – miera podobnosti dráh v 5 fázovom priestore

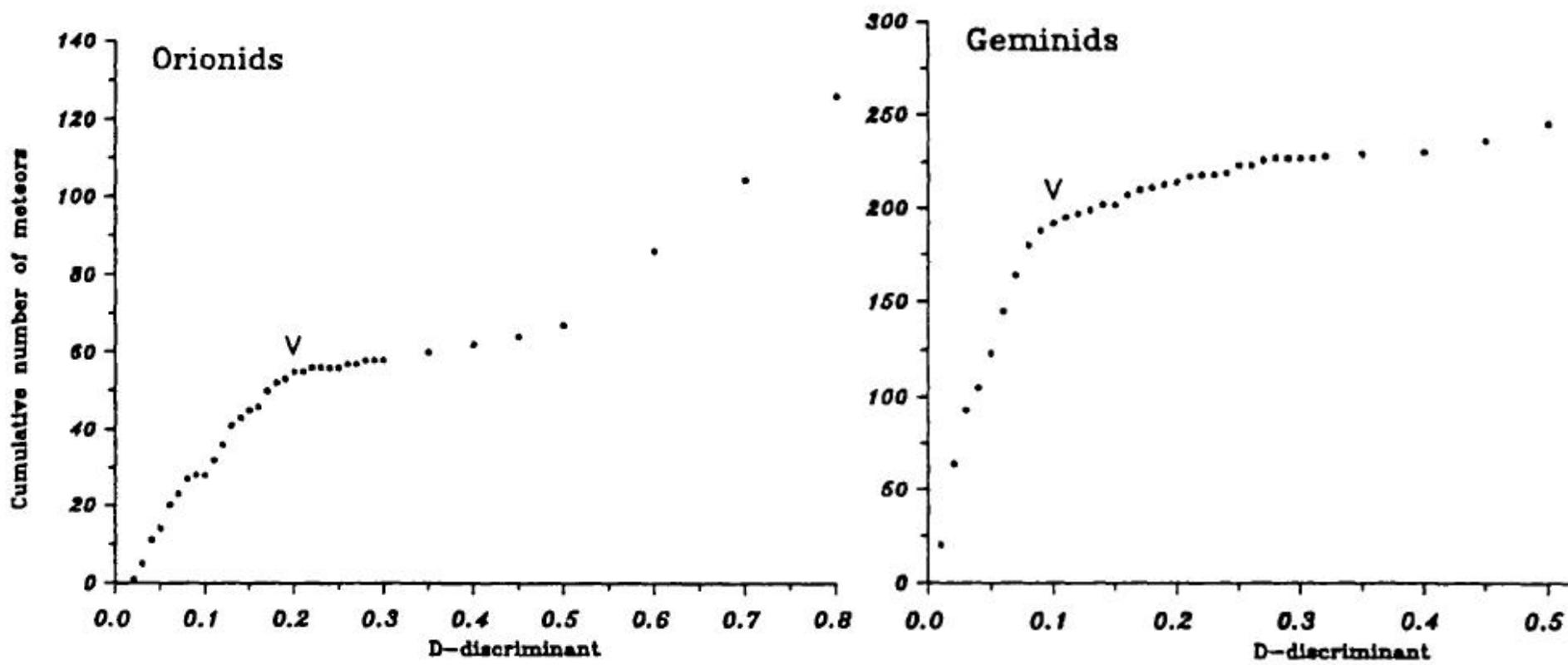
$$D_{SH}^2 = [e_2 - e_1]^2 + [q_2 - q_1]^2 + \left[2 \sin \frac{I_{21}}{2} \right]^2 + \left[\left(\frac{e_1 + e_2}{2} \right) \left(2 \sin \frac{\pi_{21}}{2} \right) \right]^2$$

Southworth, Hawkins, 1963

kde π_{12} a I_{12} sú ďalej definované tak, aby boli ošetrené aj vetvy roja

- problematické nastavenie limitnej hodnoty D
 - rôzne prístupy
- iteračná procedúra vyhľadávania meteorov prúdu

Porubčan, Gavajdová, 1994



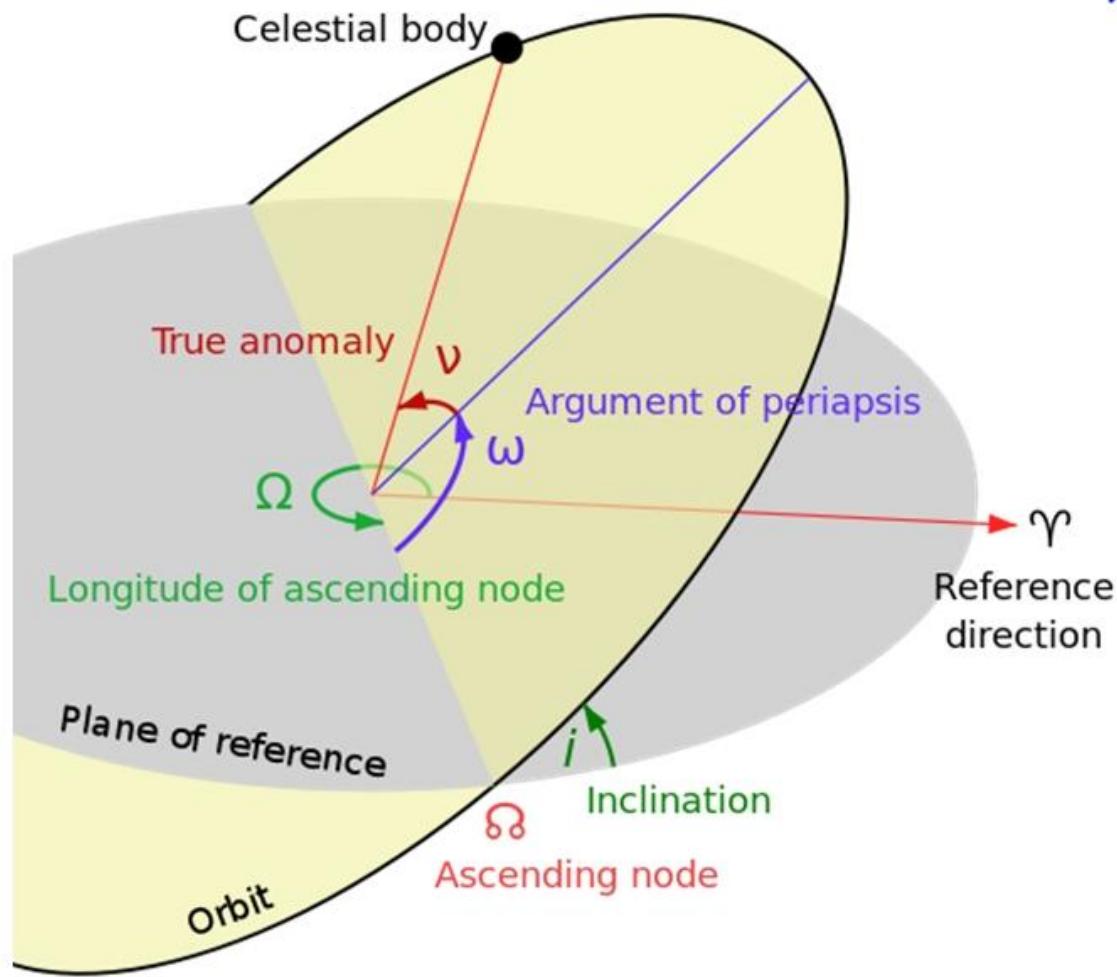
Kumulatívny nárast počtu meteorov v roji s rastúcou hodnotou D

Podobnosť dráh členov prúdu a materského telesa

použitím niektorého kritéria:

- porovnávane členov prúdu s potenciálnym materským telesom
- dráha telesa je referenčná
- ide o provnávanie okamžitých (oskulačných) dráh
 - neistota dráhy potenciálneho materského telesa
 - určenie strednej dráhy prúdu alebo jeho filamentov
- porovnávanie dynamického vývoja

Uhlové elementy



Cyklus argumentu šírky perihélia (ω)

schematický náčrt

trvá niekoľko tisíc rokov

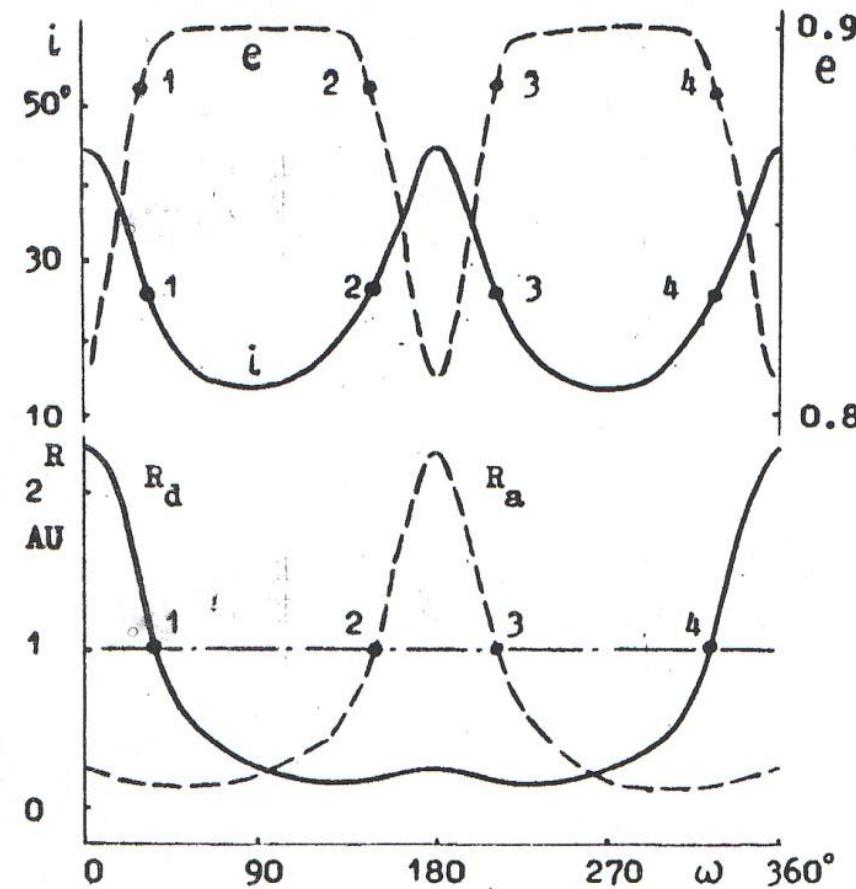
významná zmena
 q, e, i

$q, e \sim 0.1 - 0.9$

i – niekoľko desiatok
stupňov

na obr. :

roje 1-4 – rovnaké hodnoty e, i
v skutočnosti aj pre iné hodnoty
 e, i môže nastáť **R_d, R_a = 1 AU**

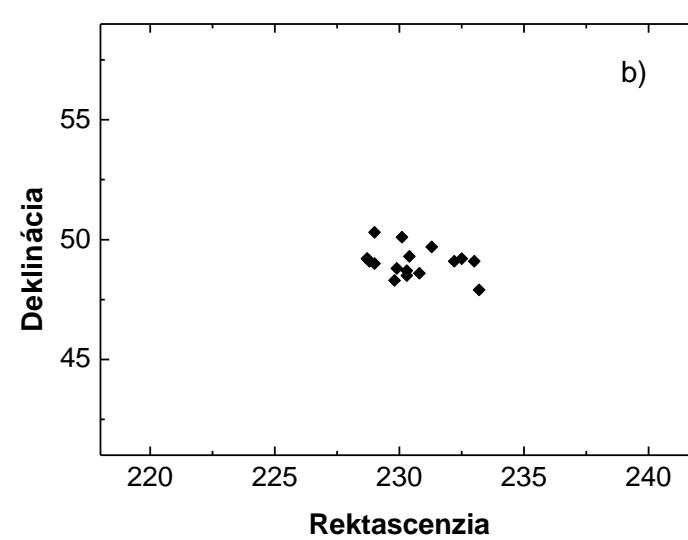
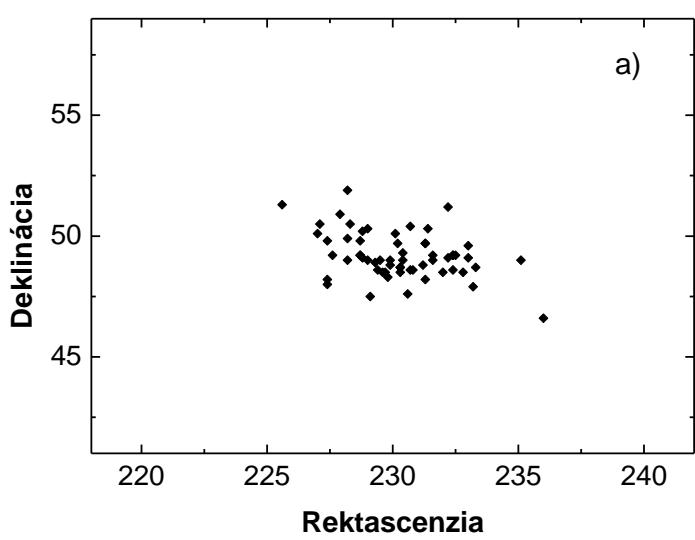
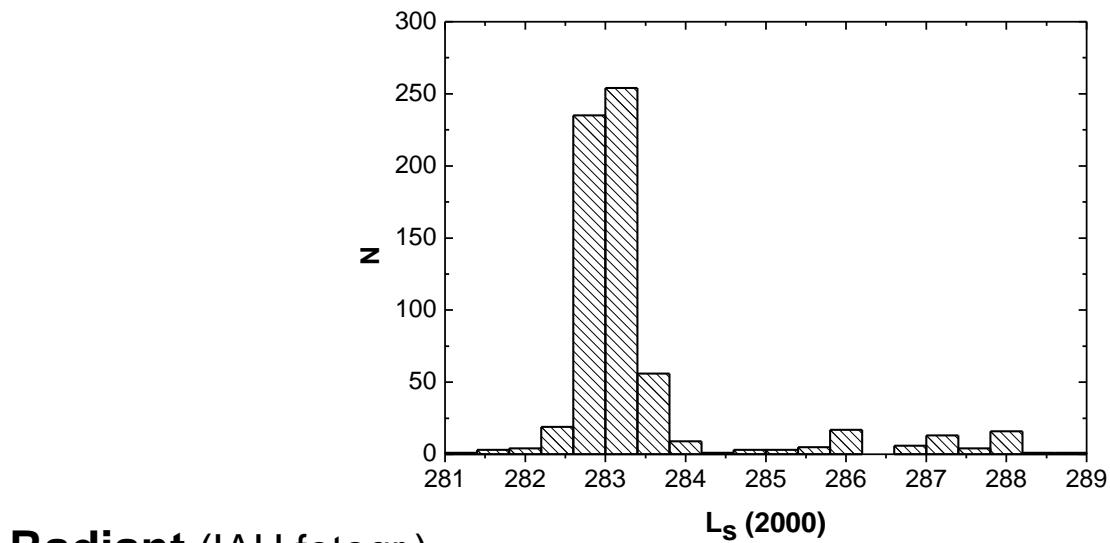


Kvadrantidy

- aktivita začiatkom januára, ostré úzke maximum
- krátkoperiodická dráha Jupiterovej rodiny
- vysoký sklon k ekliptike, 70°
- R_d – pri Zemi, R_a – v blízkosti Jupitera – silný vplyv
- časť prúdu blízko 2:1 $\rightarrow d\Omega/dt$ – prúd sa môže štiepiť
- veľké zmeny q , e , i
- súčasťou komplexu 96P/Machholz
 - 96P, **2003 EH1**, (5496)
 - niekoľko rojov
 - ostré maximum – mladý filament malé disperzie (~ 500 r.)

Kornoš, Porubčan: (2004)

Porubčan, Kornoš: (2005)



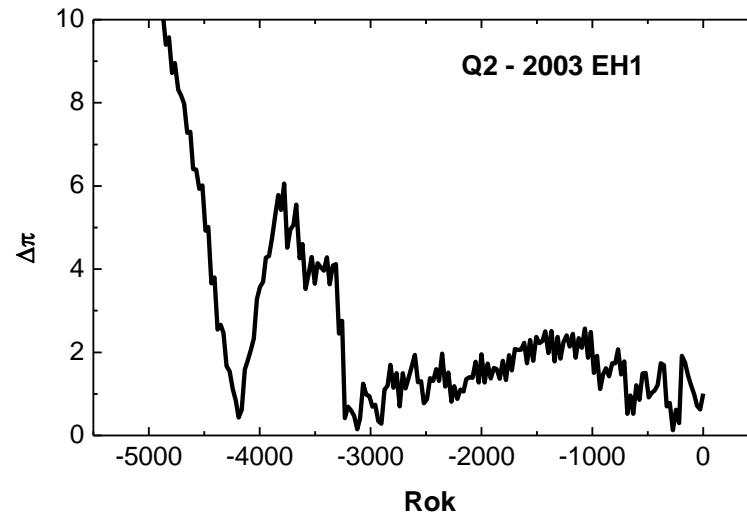
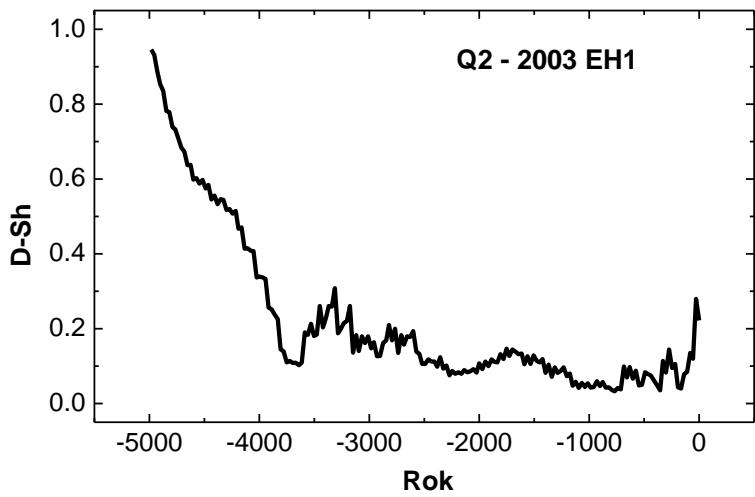
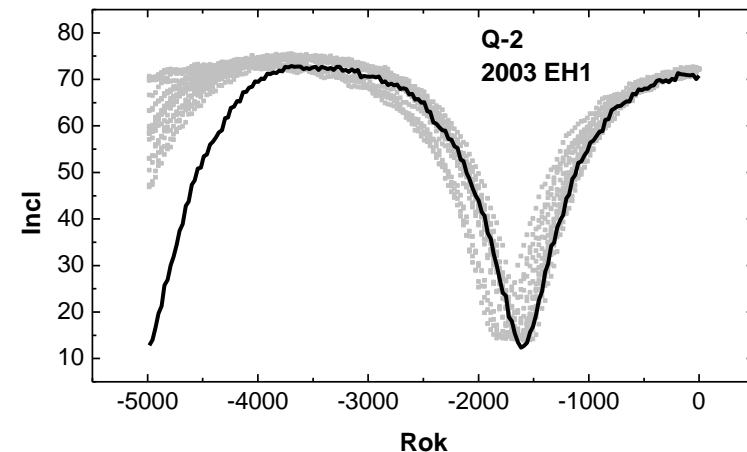
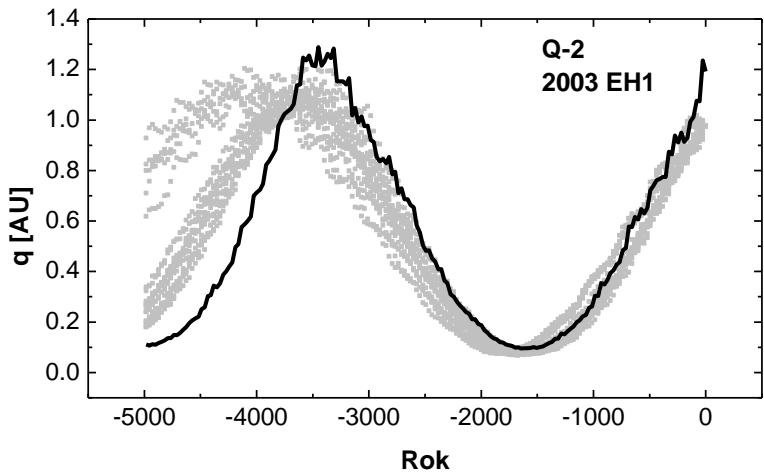
Filamenty v Kvadrantidách

Dráhy, radinty (α , δ) a geocentrické rýchlosťi (V_g) fotografických filamentov Kvadrantíd a potenciálnych materských telies.

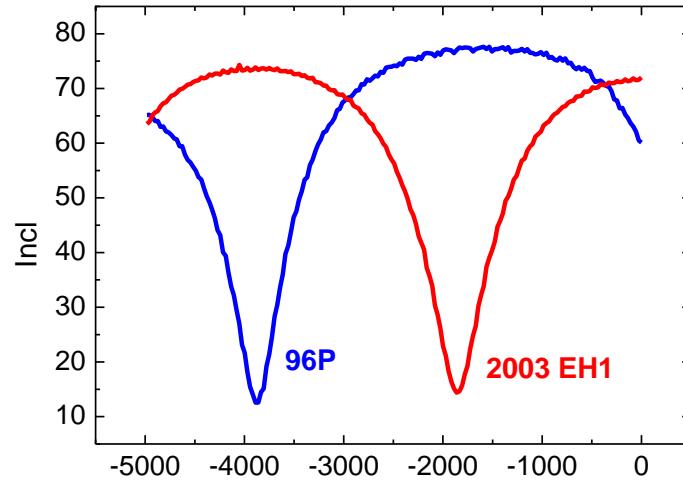
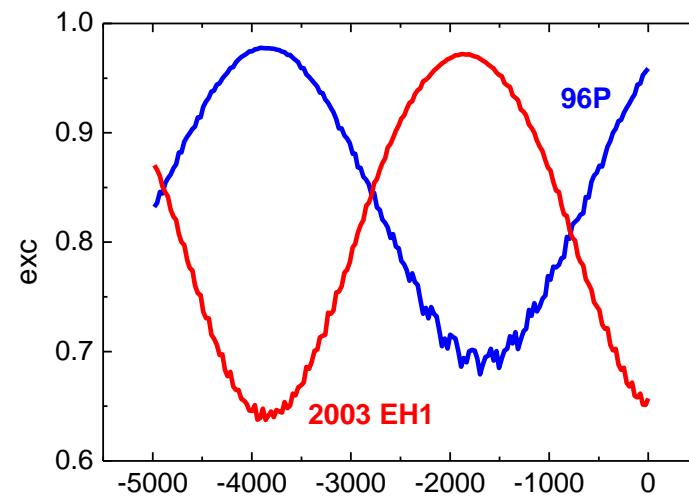
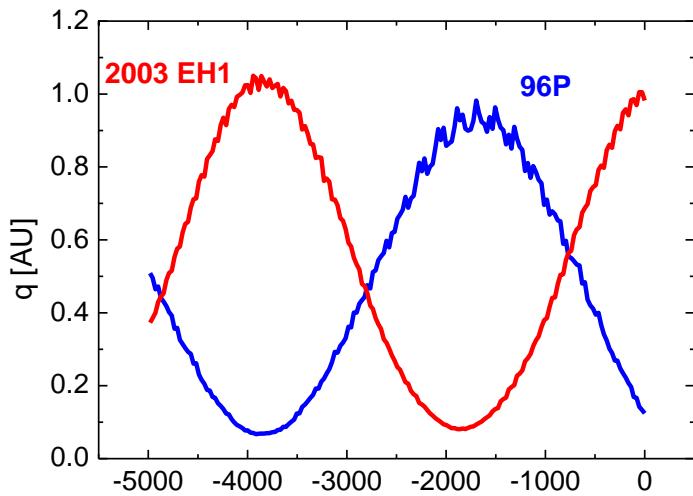
filament	Q (AU)	q (AU)	a (AU)	e	i (°)	ω (°)	Ω (°)	π (°)	α (°)	δ (°)	V_g (km/s)
Q-1	4,75	0,982	2,867	0,657	72,0	176,8	282,7	99,5	227,2	50,6	41,2
Q-2	4,88	0,977	2,931	0,666	72,2	170,3	283,2	93,5	230,2	48,8	41,3
Q-3	4,49	0,980	2,735	0,641	70,8	173,3	283,3	96,7	229,8	49,7	40,7
Q-4	5,38	0,974	3,176	0,693	70,9	168,0	283,3	91,4	232,6	48,9	41,0
Q-5	5,28	0,981	3,131	0,686	72,9	174,5	283,0	97,6	228,2	49,7	41,8
2003 EH1 (5496)	5,06 3,99	1,192 0,883	3,128 2,435	0,619 0,637	70,8 68,0	171,4 118,1	282,9 101,1	94,3 219,2	229,9	49,6	40,2
96P	5,91	0,124	3,015	0,959	60,1	14,6	94,6	109,2			
C/1490 Y1	5,73	0,854	3,290	0,741	74,5	166,5	281,0	87,5			

- C/1490 Y1 – Hasegawa (1979); Wu, Williams (1993)
96P/Machholz – McIntosh (1990)
(5496) 1973 TA – Williams, Collander-Brown (1998)
2003 EH1 – Jenniskens (2003)

Q-2 – 2003 EH1



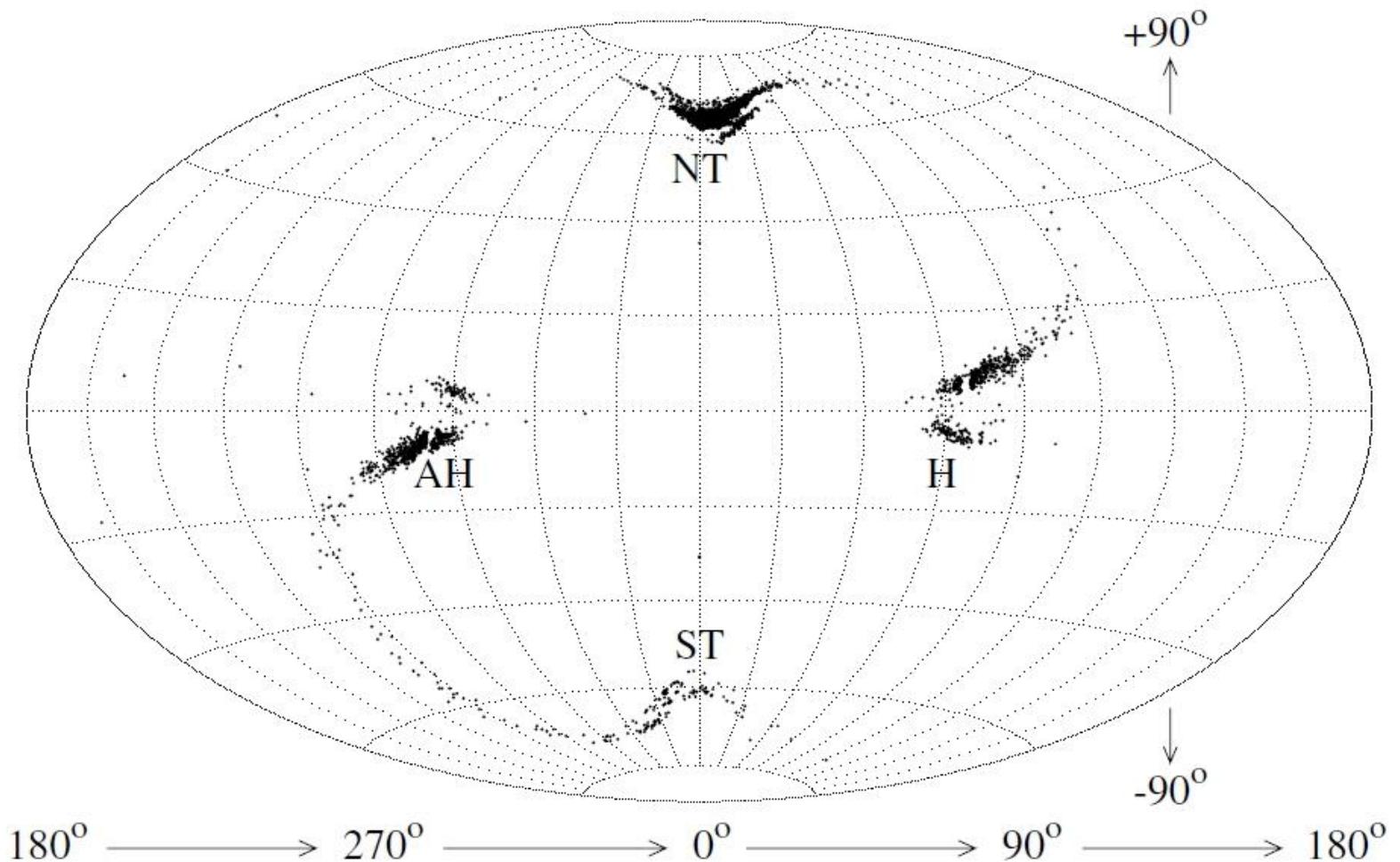
96P/Machholz – 2003 EH1



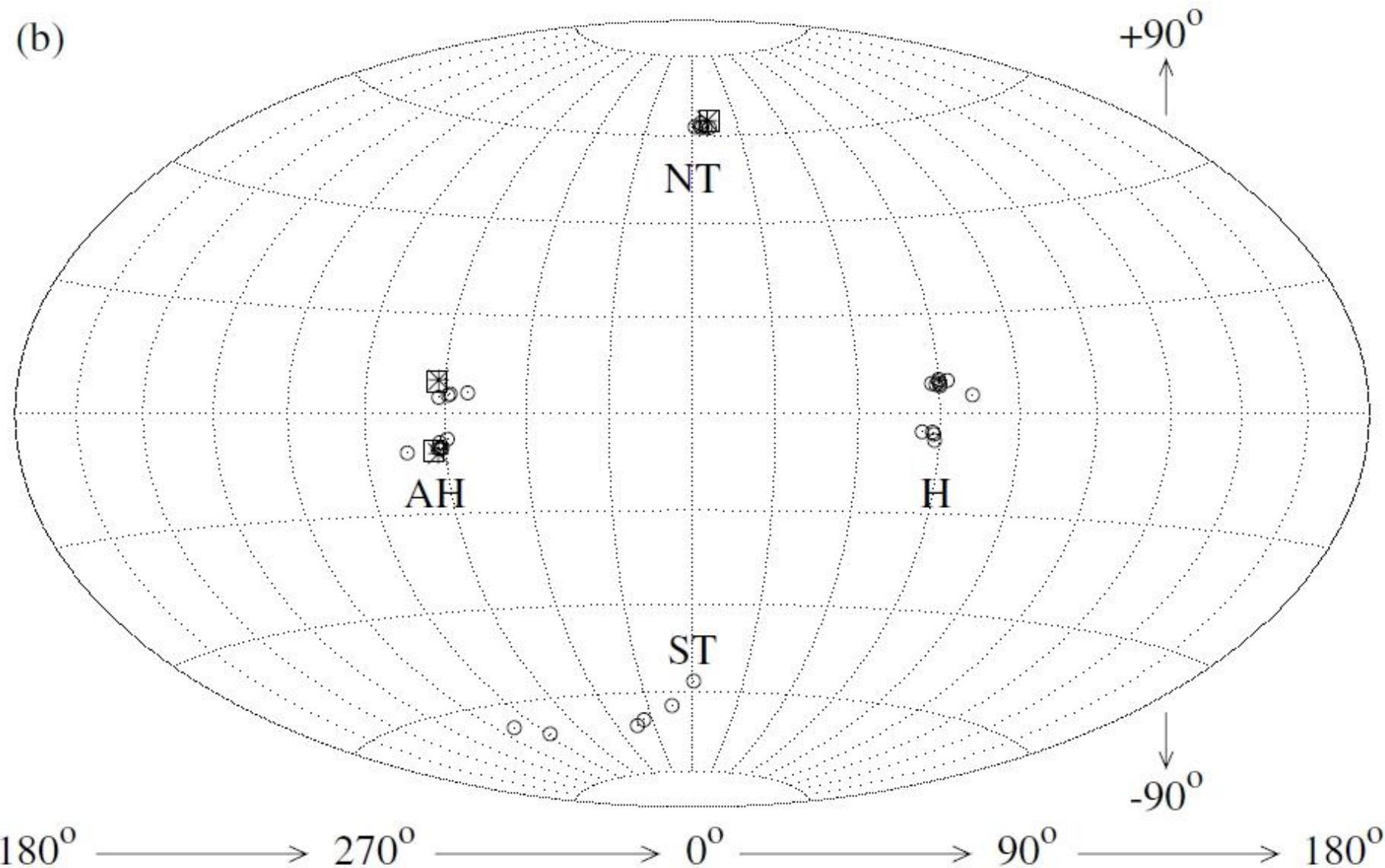
96P/Machholz – 2003 EH1

- bez negravitačných efektov prepojenie 96P a 2003 EH1
 - niekoľko desaťtisíc rokov – príliš dlho
- 1 cyklus ω – 8 pozorovateľných rojov (*Babadzhanov, 1992*)
- najnovšie práce
 - testovacie častice opakovane uvoľňované v perihéliu
 - komplex rojov 96P a 2003 EH1 takmer identické
 - 4 ekliptikálne roje, 2 toroidálne (*Neslušan a kol., 2013*)
 - denné Arietidy (H), S a J delta Akvaridy, (alfa Cetids) (AH)
 - Kvadrantidy (NT), (kapa Velids) (ST)
- Teoretický radiant telesa

Modelové prúdy



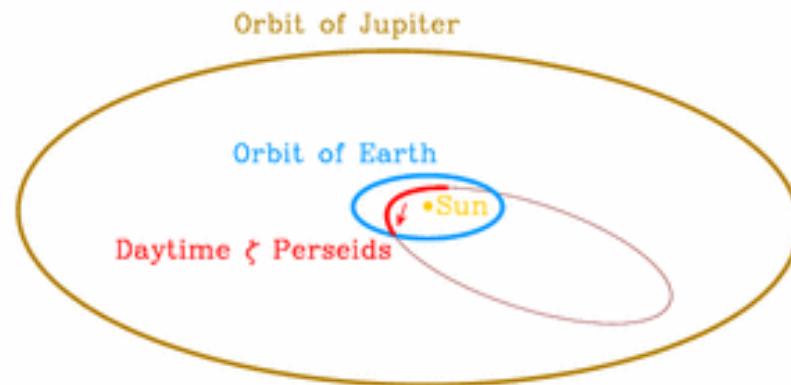
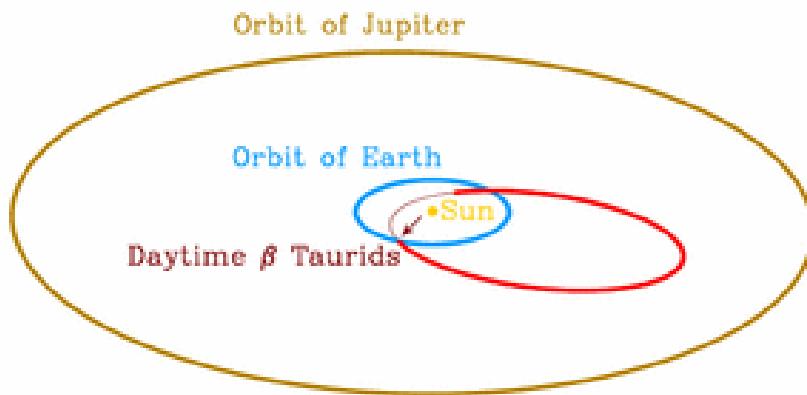
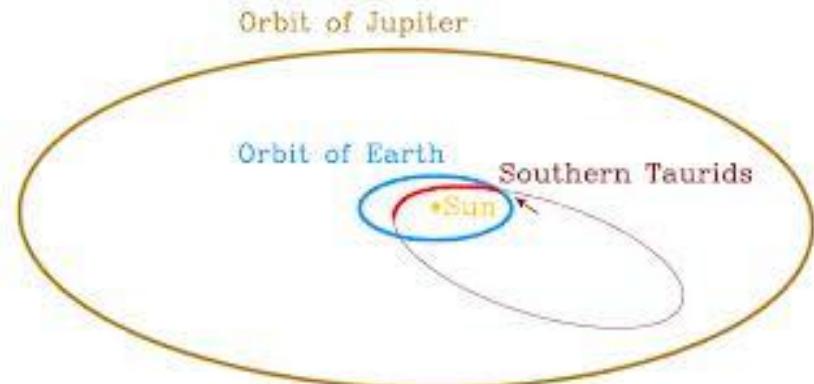
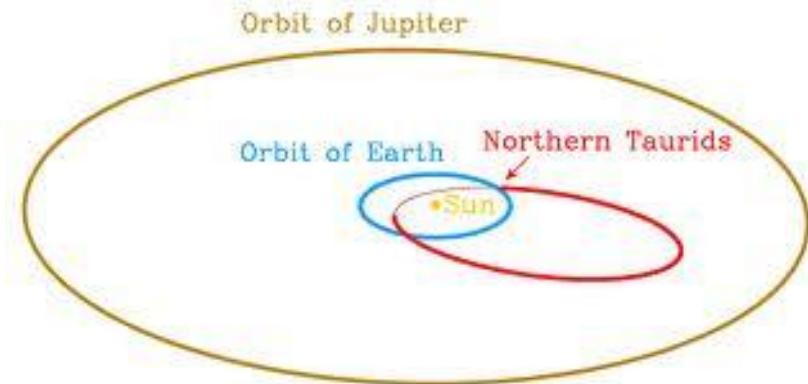
(b)



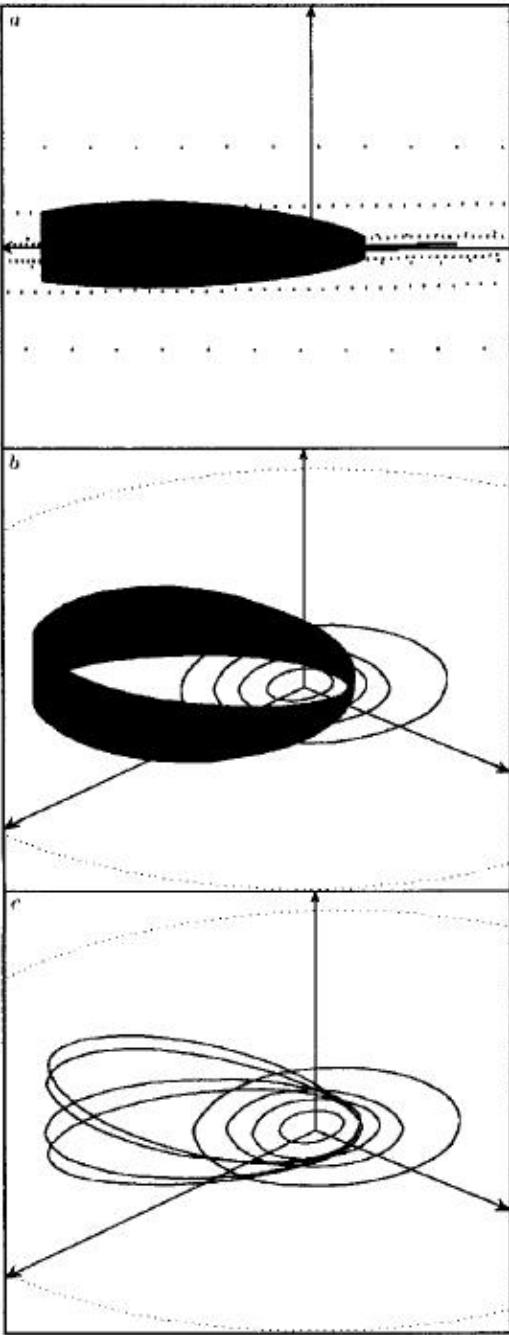
Komplex Tauríd

- rozsiahly difúzny prúd
 - dlhotrvajúca jesenná aktivita
 - jasné meteory
- spájaný s kométou 2P/Encke
 - najkratšia obežná doba – 3,3 roka
 - odpútala sa od Jupitera – bez negravitačných efektov príliš dlho
- vďaka malému sklonu – jesenná nočná a letná denná aktivita
 - štiepi sa na dve vetvy
 - S,J Tau / denné *delta* Tau a *zeta* Per (nočné / denné)
- ďalšie roje: J Pisdcidy, S,J Arietidy, S,J *chi* Orionidy a i.

Vety Tauríd



Armagh Observatory



Schematický náčrt a podmienka pozorovateľnosti
vetiev prúdu

$$r = 1AU = \frac{a(1-e^2)}{1 \pm e \cos \omega}$$

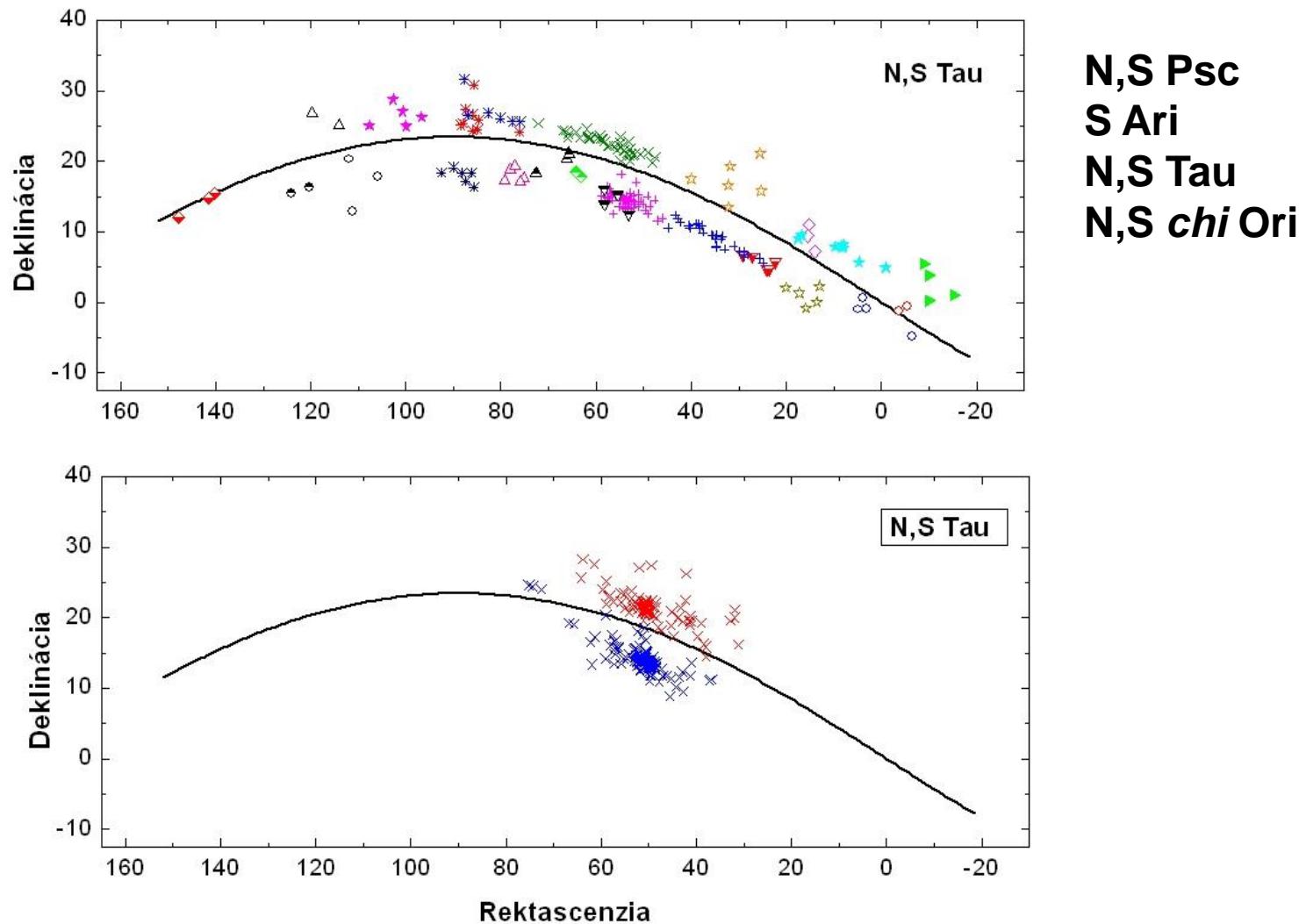
Babadzhanov, 2001

Filamenty Tauríd

- denný pohyb radiantu
- stredná dráha N, S tau
- zmena elementov ako funkcia ekliptikálnej dĺžky ($L = L_s - L_{max}$)
- Vyhľadávanie filamentov komplexu
 - $D_{SH} < 0,1$ + iteračná metóda
 - denný pohyb radiantu
 - zmeny ω, Ω
- 15 filamentov, 4 – 56 členov
- aktivita 120° (september – december)
- stáčanie celej elipsy (dĺžka perihélia)
- stotožnené – N,S Psc, S Ari, N,S Tau, N,S *chi* Ori, (*rho* Gem)
- typické kometárne / asteroidálne dráhy

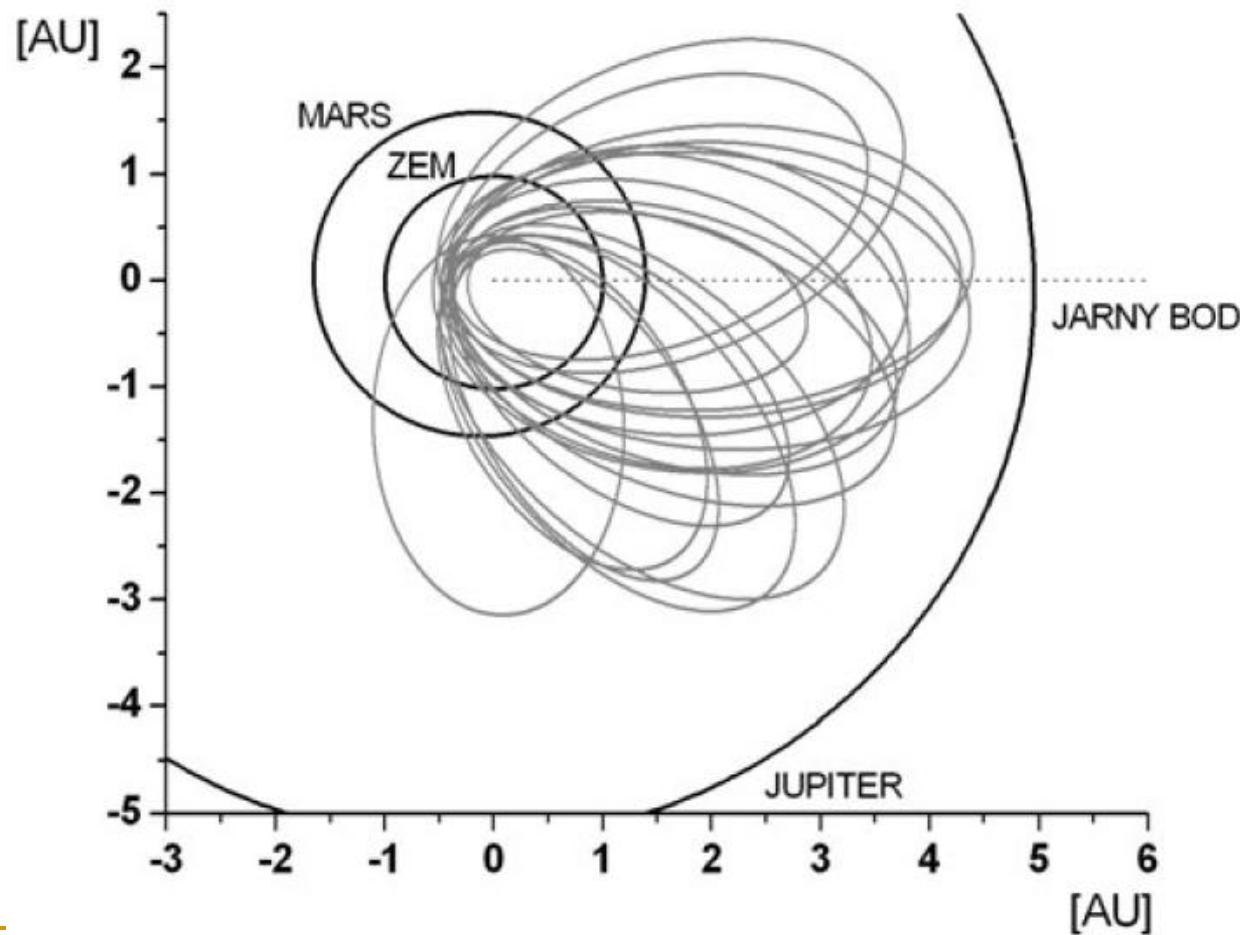
Štohl, Porubčan, 1992, Porubčan, Kornoš, 2006

Radianty komplexu – fotografické



Filamenty Tauríd

videodatabáza SonotaCo



Asteroidy v komplexe

- dnes ~ 11 000 NEO
 - náhodné priradenia časté
 - krátke oblúky pozorovaní
- nedostatok fyzikálnych pozorovaní
 - ťažko pozorovateľné
 - v dosahu nepravidelne
 - rýchly pohyb po oblohe
 - zmena jasnosti
 - zmena fázového uhla

Materské telesá komplexu 1

- kométa Encke je uprostred komplexu, súhlasí aj orientácia dráhy v dĺžke perihélia
- trvanie aktivity, rozptyl dráh, lokálne zhustenia – kométa Encke a postupný poruchový rozptyl nestačí
- Whipple, Hamid 1952 navrhli hierarchickú dezintegráciu pôvodného telesa
- v obmenách sa myšlienka opakuje, navrhlo sa teleso typu (2060) Chiron = 95P, rozpadnuté pred 20 – 30 tisíc rokmi
- Kresák priraduje aj Tunguský meteorit z r. 1908
- Farinella a kol. (2001) – pravdepodobne asteroidálneho pôvodu

Materské telesá komplexu 2

- do komplexu navrhované viaceré asteroidy – uvažované ako vyhasnuté kometárne jadrá, tiež kométa Rudnicki
- viacerými prístupmi ~ 20 – 30 telies typu Apollo
 - rôzne modifikované kritériá podobnosti dráh
 - sekulárny vývoj
 - kvázi-stacionárne parametre

$$\mu = [a(1 - e^2)]^{1/2} \cos i \quad (\text{Lidov, 1961, Kozai 1962})$$

$$v = e(0.4 - \sin^2 i \sin^2 \omega) \quad (\text{Moisejev, 1945})$$

$$T = a_J / a + 2\sqrt{a/a_J(1-e^2)} \cos i \quad (\text{Tisserand, 19. stor.})$$

Tisserandov parameter

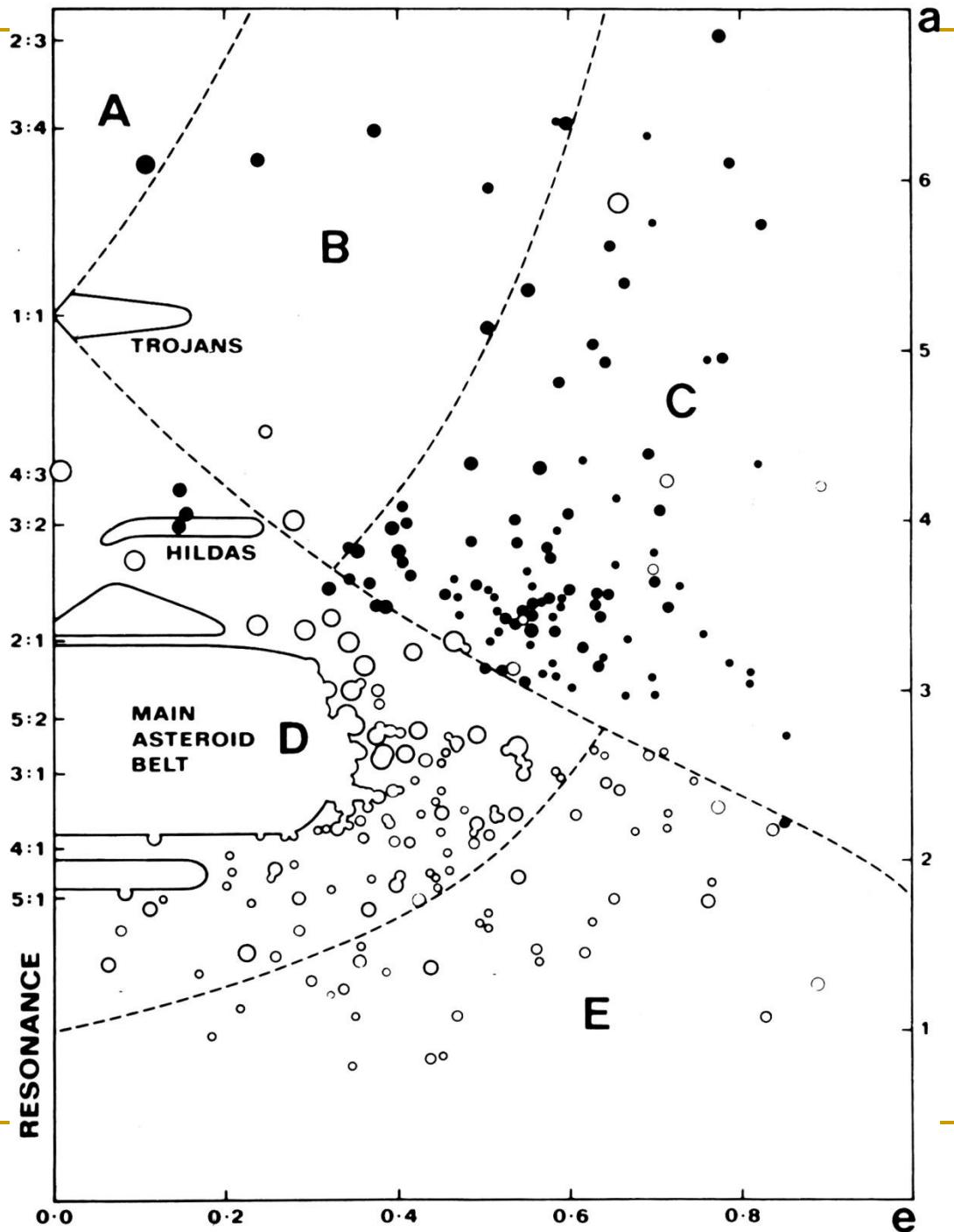
hranica medzi
kométami a asteroidmi

$T = 3,0$

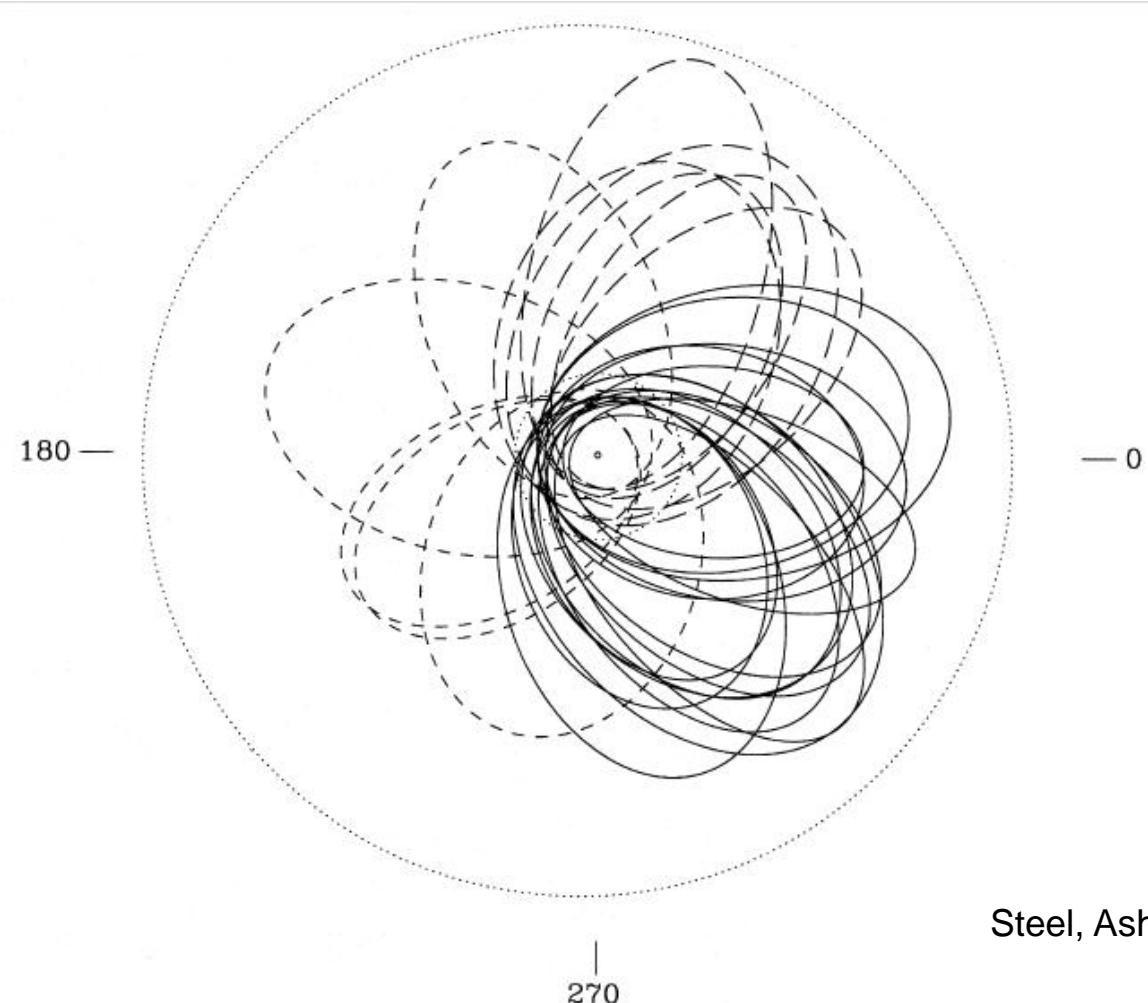
kométa Encke

$T = 3,03$

Kresák, 1985



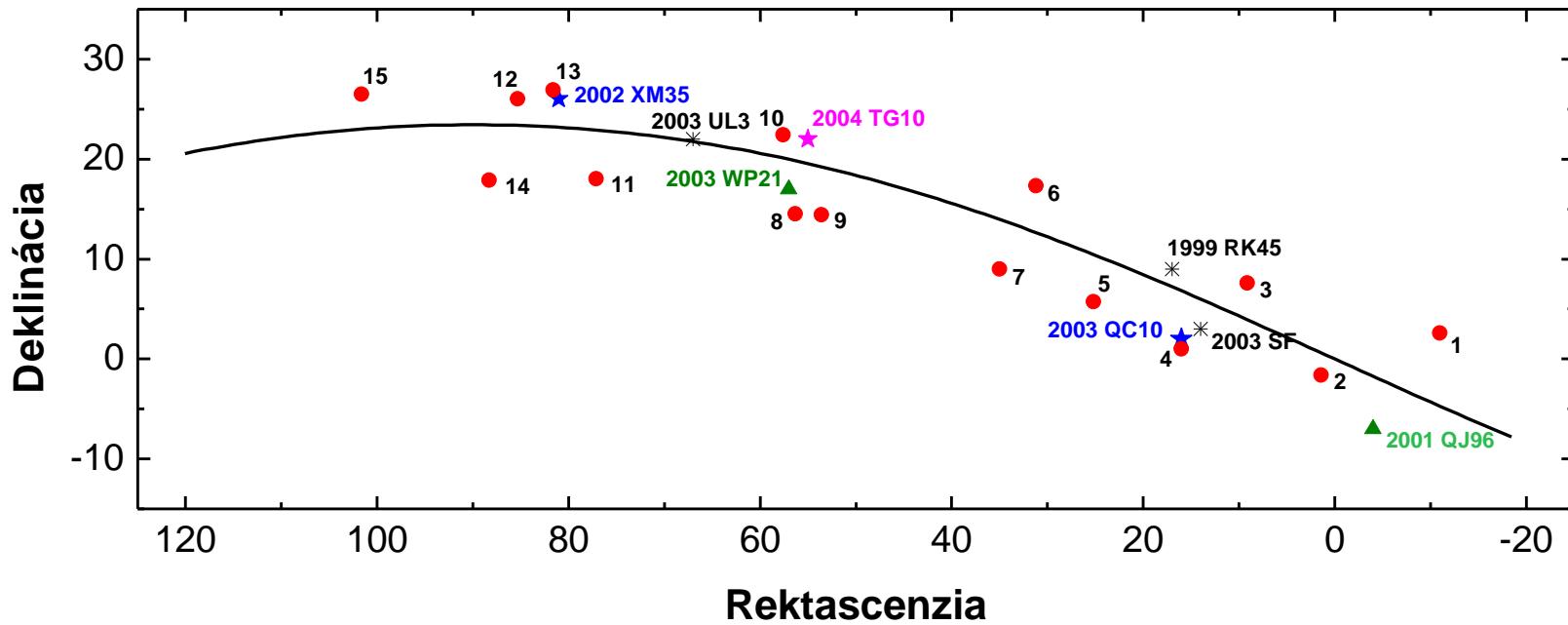
Materské telesá komplexu 3



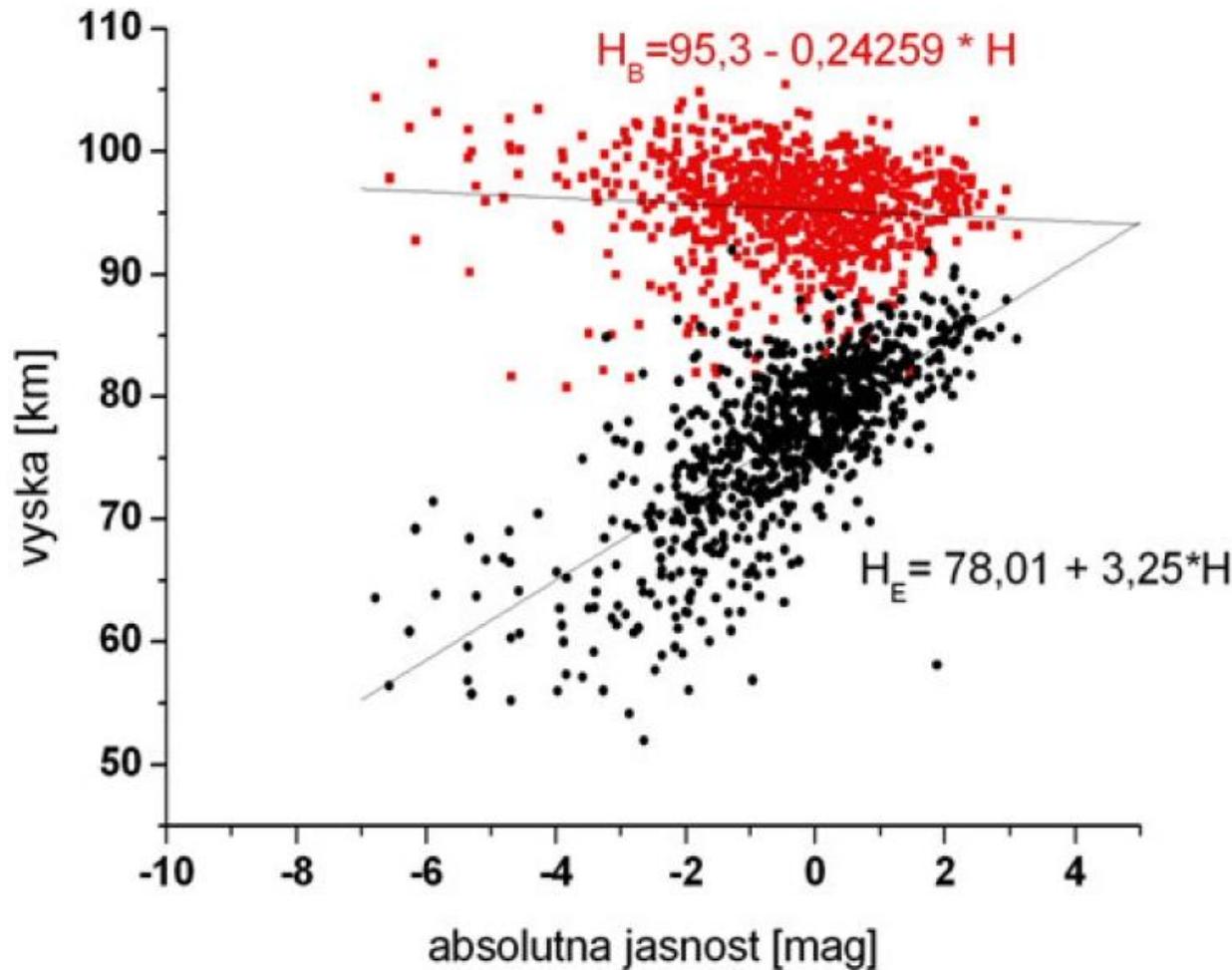
Materské telesá komplexu – výber

- vybraných 91 objektov s podobnými orbitálnymi charakteristikami a teoretickými radiantmi (Neslušan a kol., 1998)
- integrácia na 5000 rokov do minulosti
- porovnanie dráhového vývoja asteroidov s filamentami (D_{SH} , π):
 - hľadajú sa spoločné body v minulosti
 - väčšina asociácií sa nepotvrdila
 - napr. (6063) Jason, (4197) 1982 TA, (4341) Poseidon
 - navrhujeme niektoré nové

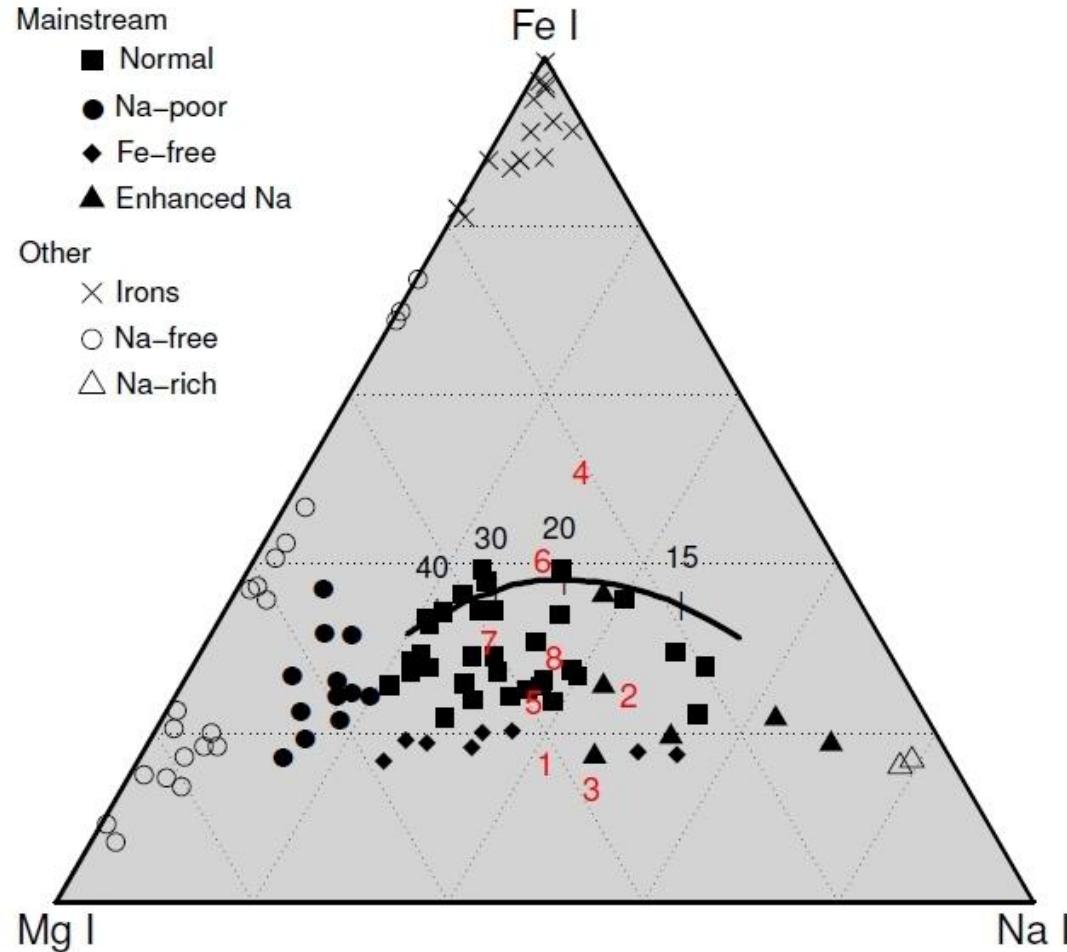
Radianty komplexu



Výšky horenia meteorov



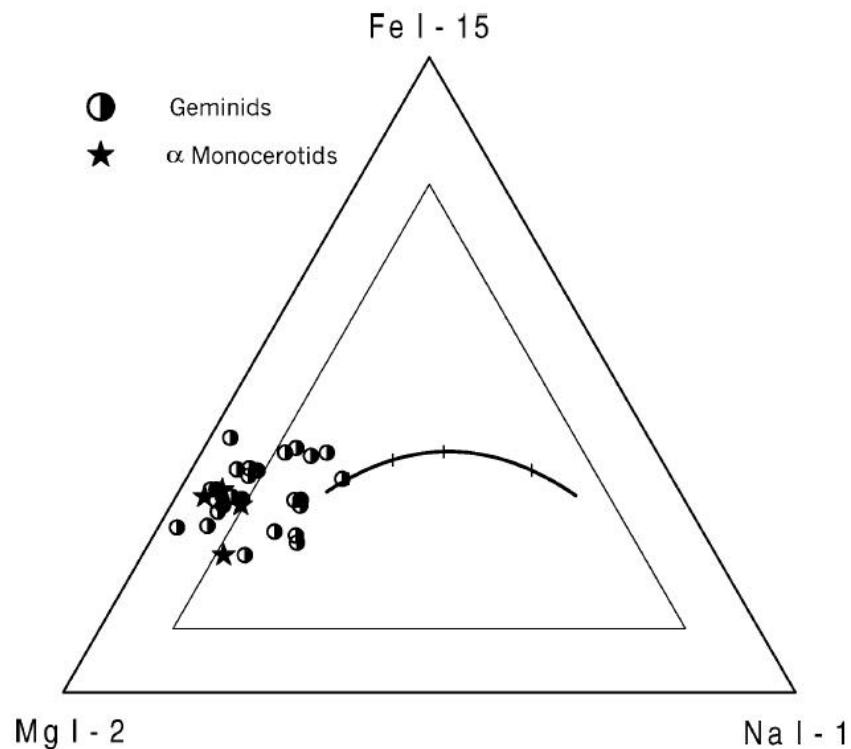
Spektrá meteorov – pomoc pri identifikácii materského telesa



Borovička et al. 2005

Geminidy

- $q \sim 0.14$ AU, V_g 35 km/s
- veľmi kompaktný roj / prúd – ukážkový
- 3200 Phaeton – žiadna alebo len veľmi malá aktivita
- v spektrách široký rozsah zastúpenia Na
- súvisí s dĺžkou pobytu meteoroidu ako samostatného telesa ?
 - Geminidy nevznikli z jednorazovej udalosti (Borovička et al. 2005)



Borovička et al. 2005)

Kométa C/1917 F1 Mellish

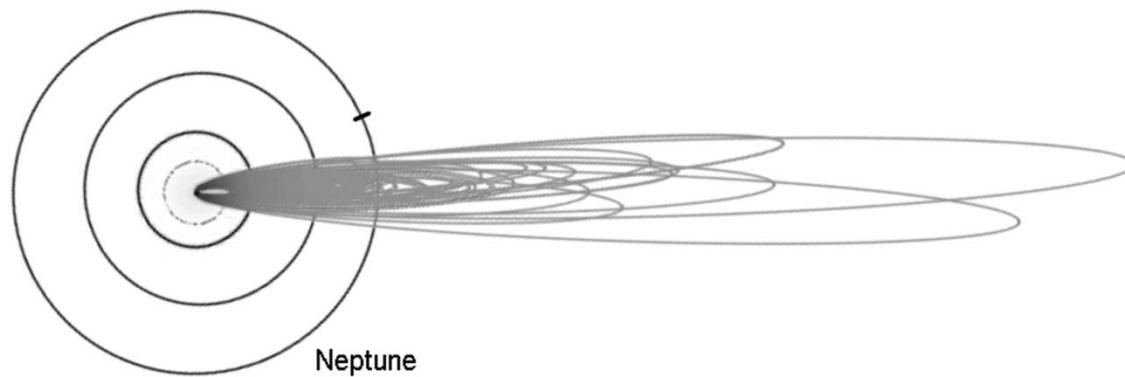
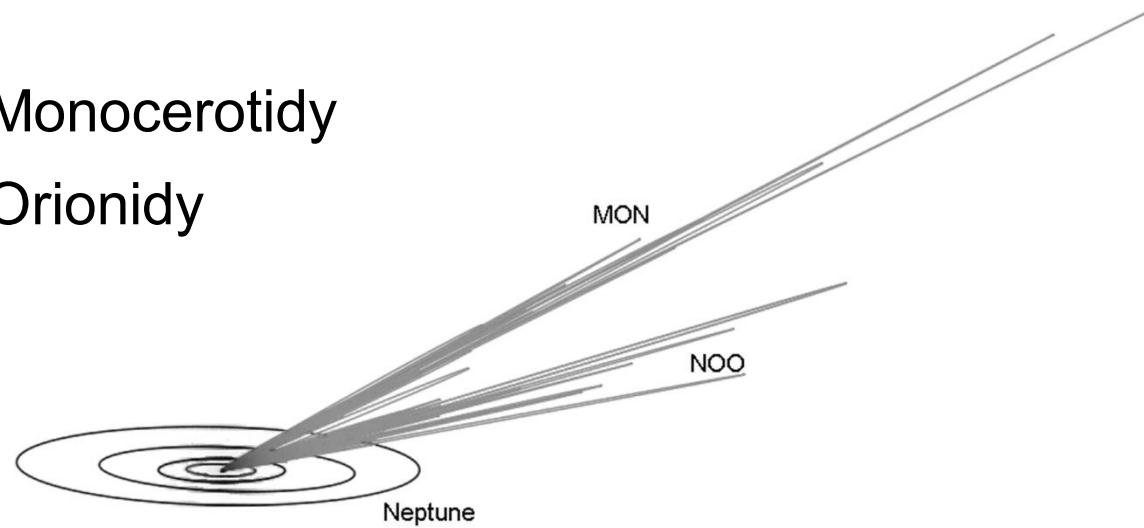
- pozorovaná pri jednom návrate
- $q \sim 0.19$, $i \sim 32$ deg, $P \sim 145$ rokov
- výstupný a zostupný uzol pomerne ďaleko od dráhy Zeme
- zmena excentricity o -0.002 → $R_a \sim 1.01$ AU

- materské teleso Decembrových Monocerotíd
- Novembrové Orionidy – podobná dráha, Vg rovnaká
 - rozdiel v sklone 10°
 - v radiante $\sim 10^\circ$
- SonotaCo databáza 111 / 110 meteorov

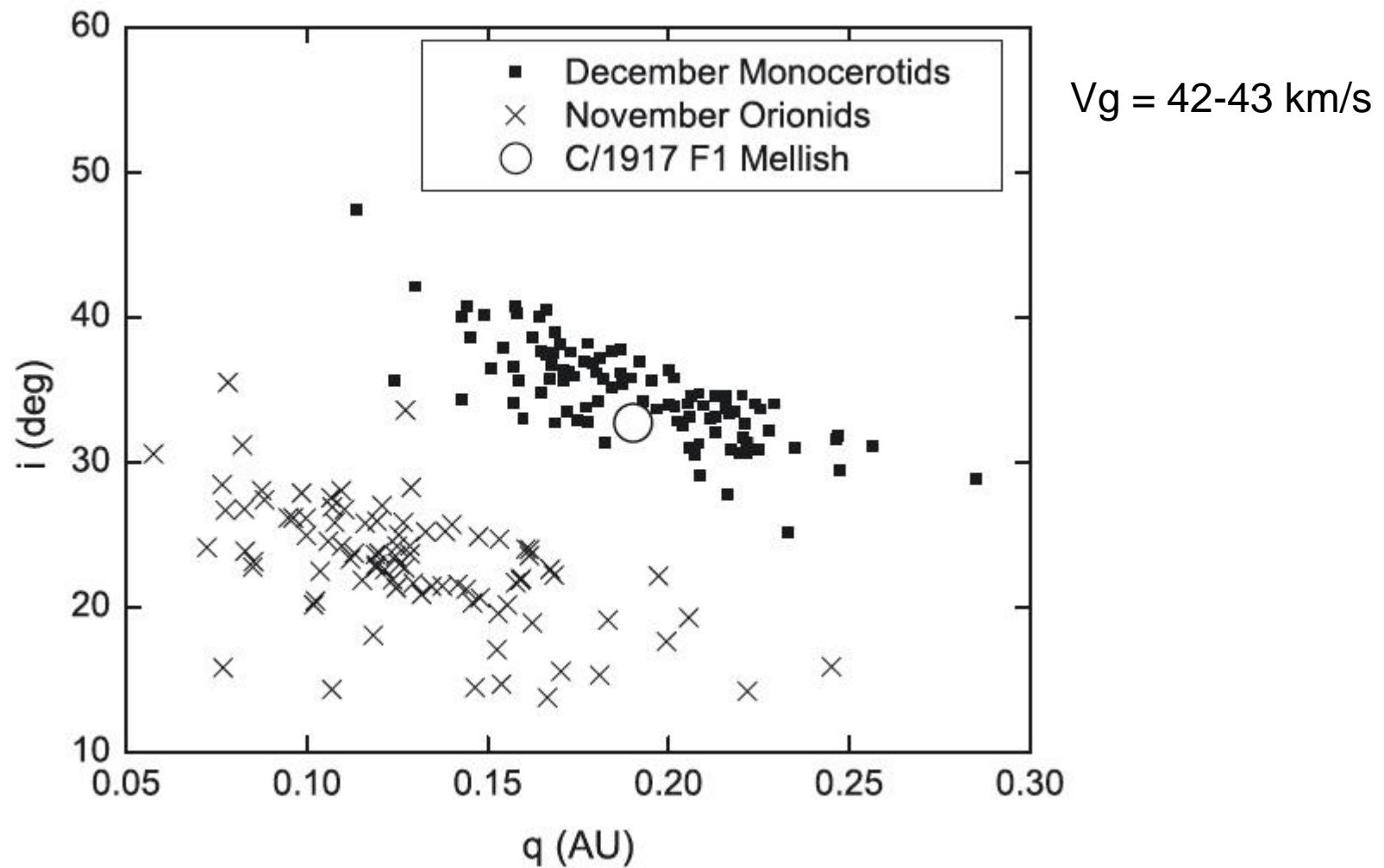
Kométa C/1917 F1 Mellish

Decembrové Monocerotidy

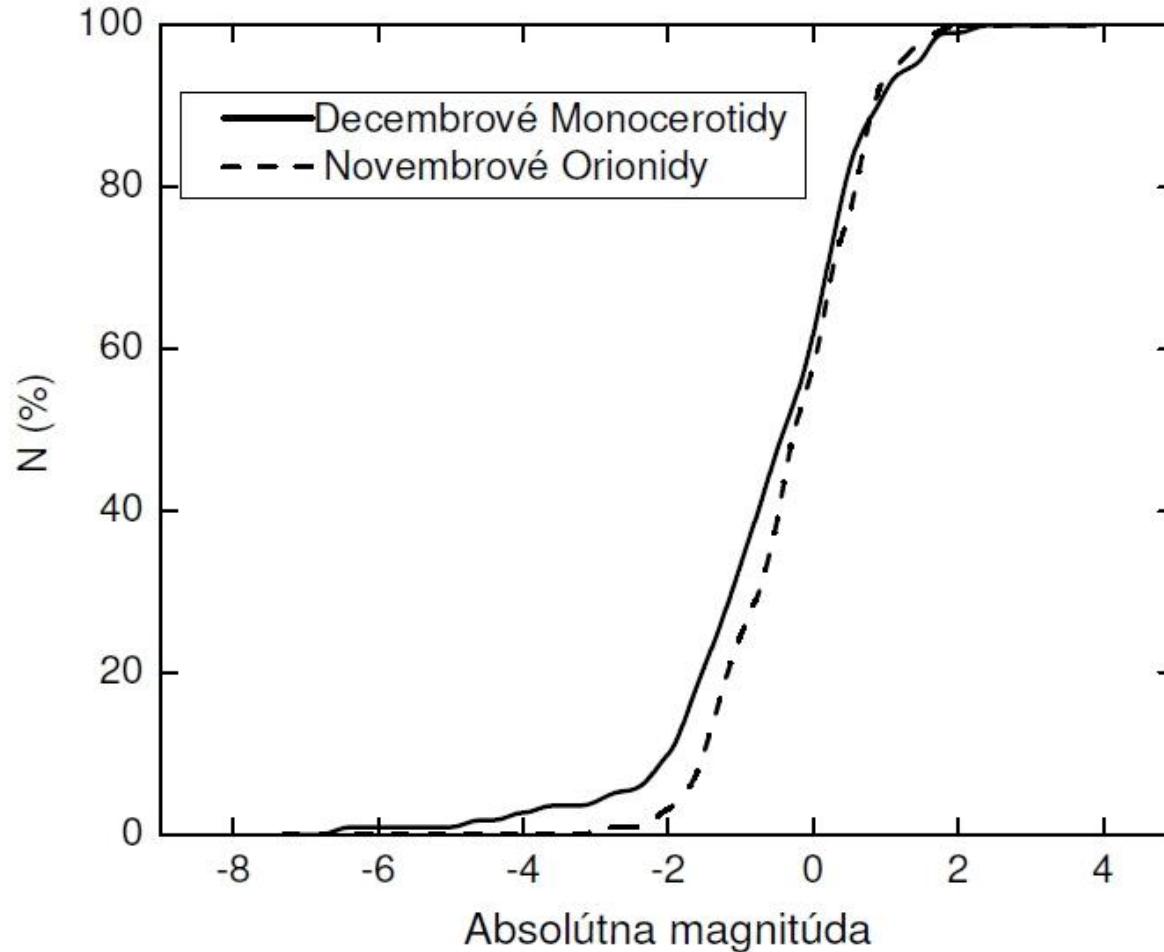
Novembrové Orionidy



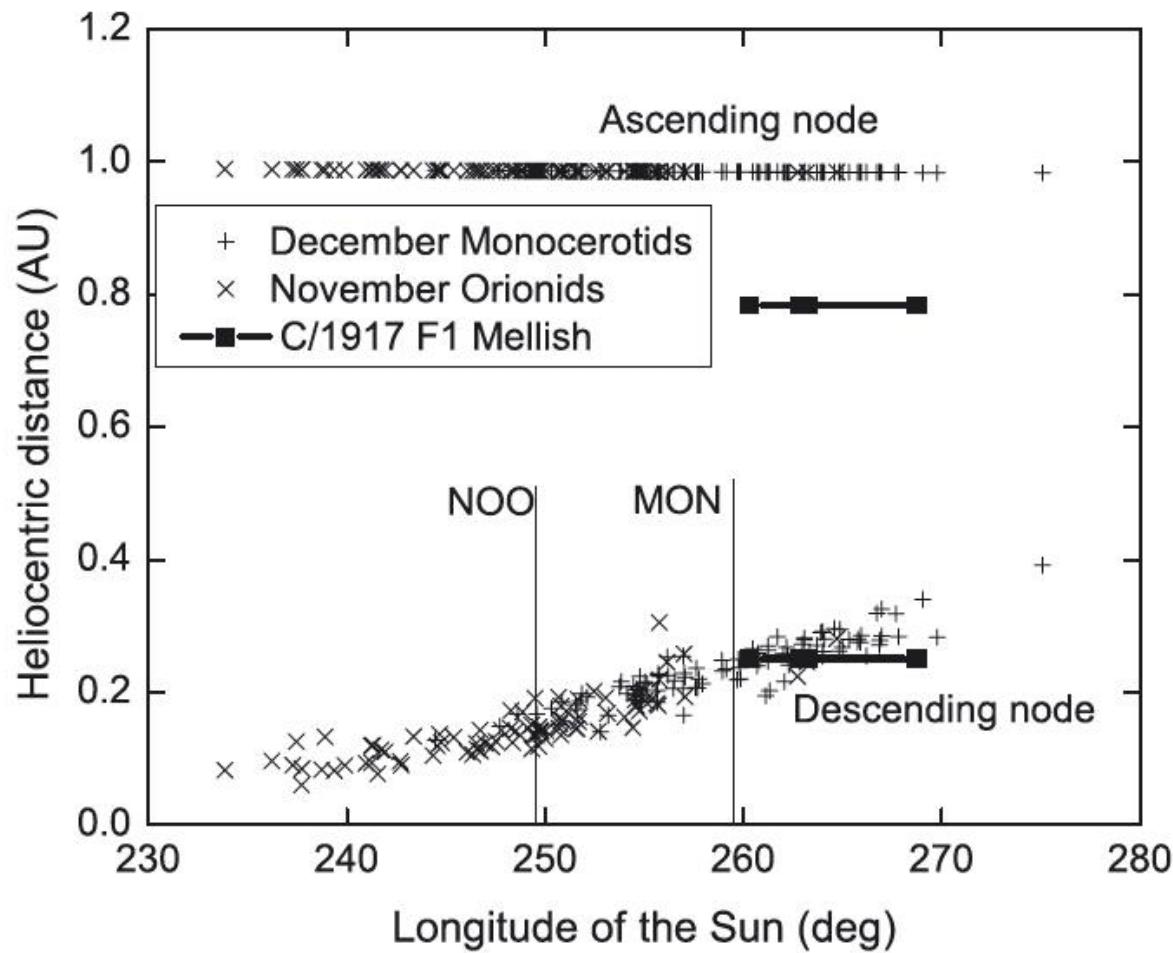
Roje kométy C/1917 F1 Mellish (?)



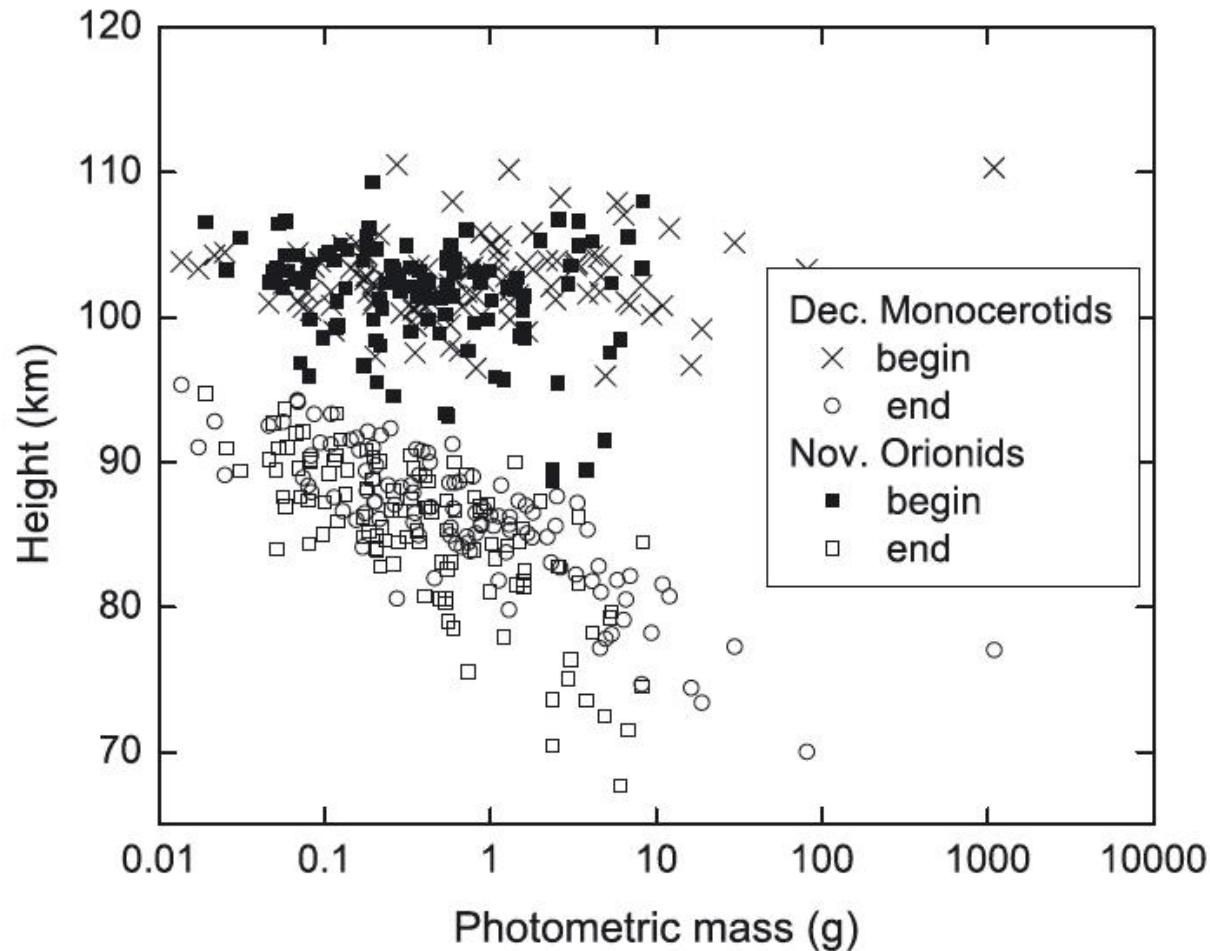
Kumulatívne rozdelenie absolútnych magnitúd



Výstupný a zostupný uzol



Výšky horenia



Kométa C/1917 F1 Mellish a jej roje

- numerické integrácie meteorov a klonov kométy
- je dynamické prepojenie medzi oboma prúdmi – spoločné body v minulosti
- nevieme vysvetliť medzeru v sklonoch
(Vereš et al. 2011)
- simulácia 10 000 modelových častíc na 50 000 rokov
 - **Dec. Monocerotidy pochádzajú z Mellish**
 - **Nov. Orionidy (zatiaľ)** nepotvrdené
(Neslušan et al. 2014)

Asteroidálny pôvod prúdov

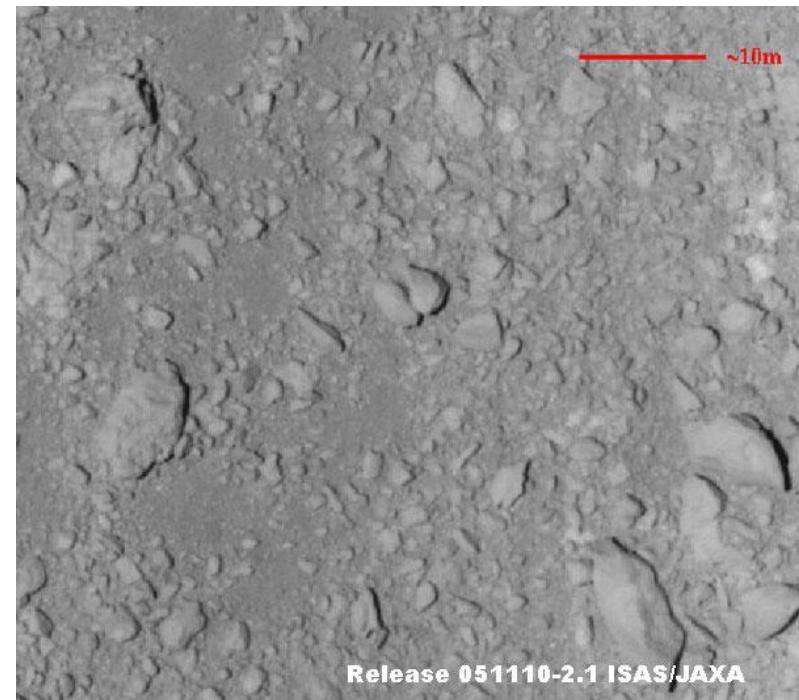
kométa
asteroid → meteorický prúd

povrch asteroidu Itokawa

- **asteroid** – jednorazová udalosť
 - zrážka s iným asteroidom
 - **slapový rozpad**
 - tepelné pnutie
 - YORP efekt – rotácia

Argumenty pre:

- snímky štruktúry povrchu Itokawy
- rotačná bariéra asteroidov (~ 2.2 hod)
- pohyb materiálu na povrchu (Itokawa)

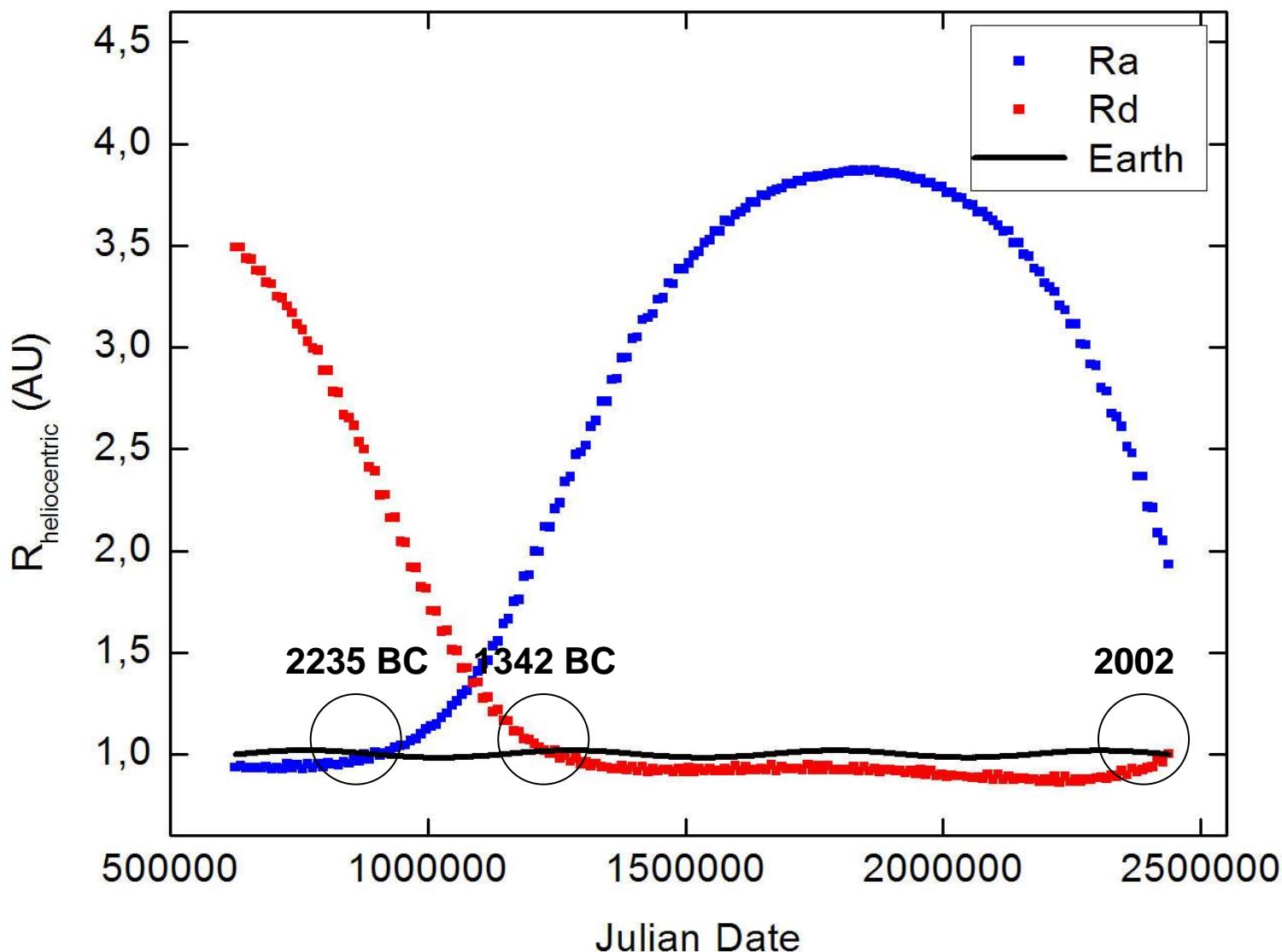


Asteroidálne meteoroidy

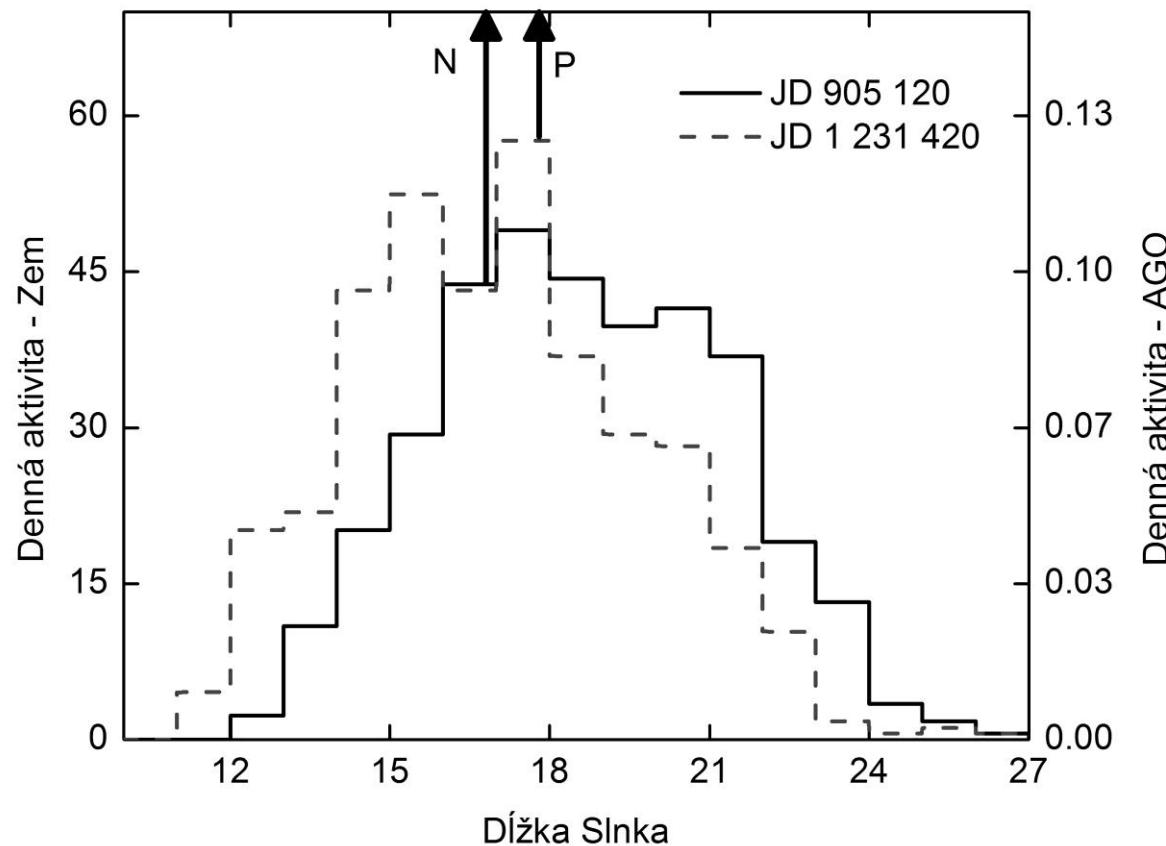
- pád meteoritu Neuschwanstein (2002)
- na identickej dráhe meteoritu Příbramu (1959)
- odlišné typy meteoritov a rozdielny kozmický vek
- **heterogénny prúd?**
- (*Spurný P. et al., 2003*).

- Slapový rozpad – Roche hranica $\sim 2 R_{\oplus}$
- prúd telies vo veľkom intervale veľkostí

Rozpad „Itokavy“ v dvoch okamihoch v minulosti



Aktivita v súčasnosti (1 cm častice)



Tóth, Vereš, Kornoš: (2011), Mon. Not.R. Astron. Soc. 415, pp. 1527-1533

Väčšie telesá

- útvar Davy na Mesiaci
- Příbram – Neuschwanstein
- Čeljabinsk – (86039) 1999 NC43

- na základe impaktnej frekvencie
 - rozpad 200 m telesa raz za 6000 – 7000 rokov
 - niekoľko slabých prúdov v blízkosti Zeme
 - rodiny NEO objektov (Schunova et al., 2014), 10^4 – 10^5 rokov



Apollo 12

Záver

- štruktúra meteorických prúdov a komplexov môže byť veľmi komplikovaná
- pôvod v matereských telesách zahmlený viacerými efektami
- dynamické cesty sa zvyčajne nájdu
- fyzikálne charakteristiky málo známe !!

je potrebné:

- systematické pozorovania meteorov (aj spektrálne)
 - získavame informácie o materských telesách ďaleko do minulosti
- prúdy telies v blízkom okolí Zeme nás priamo ovplyvňujú:
 - ohrozenie družíc na obežnej dráhe
 - typ Čeljabinsk
 - užitočné (malé asteroidy)

Ďakujem za pozornosť



Lyridy – základné údaje

- pravidelný meteorický roj IAU #006
- 14.-26. apríl, max. 21.-22. (L_S 32.4°)
- 5-10 meteorov / hod
- občasné zvýšenia aktivity až 100 / hod

- niektoré staré záznamy sa spájajú s výraznou aktivitou Lyríd
 - 687 BC, 15 BC
- výrazne zvýšená aktívita napr. 1803 (Olivier 1925)
- 1922, 1934, 1946, 1982 (50-600 meteorov) – (Lindblad, Porubčan, 1991)
- náznak 12 rokov cyklus ? (Guth 1947, a i.)

Kométa Thatcher

- C/1861 G1 Thatcher
- 415 rokov, $i = 79^\circ$
- 187 astrometrických polôh – 149 dní oblúk, Oppolzer (1864)
 - vizuálne mikrometrické pozorovania
- Weis (1867) – $R_D \sim 0.002$ AU od dráhy Zeme
- **$R_D \sim 1$ AU, R_A blízko dráhy Saturna**
- Galle (1867) – dráhová podobnosť kométy a prúdu Lyríd

Numerické integrácie

Plán

- vypustiť modelové častice z jadra kométy v niekoľkých prechodoch perihéliom v minulosti
- integrácia dráhy kométy Thatcher 50 000 rokov do minulosti a naspäť do súčasnosti
- integrátor RADAU – RA15 (balík Mercury 6, Chambers, 1999)
- nie je možné získať východziu dráhu z r. 1861
- preto **TESTY**

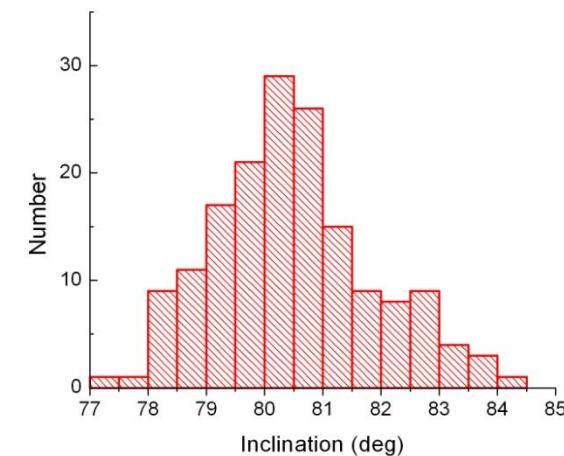
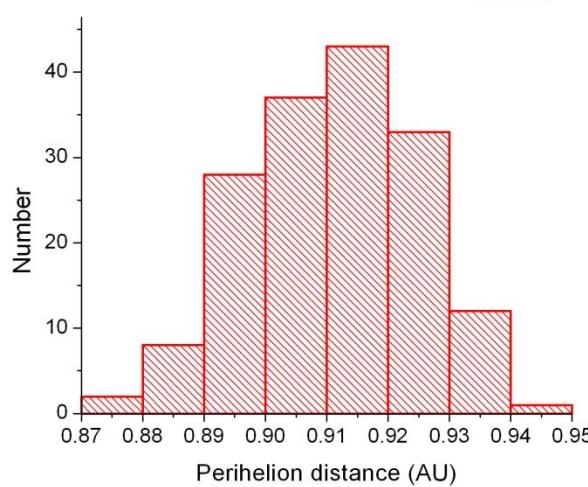
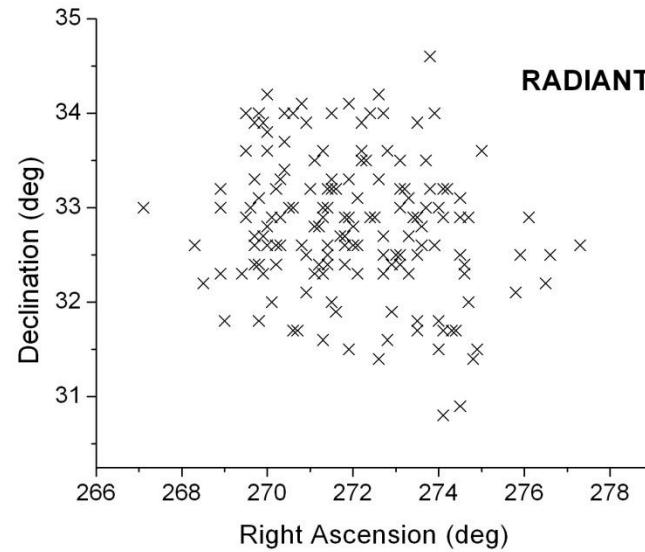
Testy integrácií

- kométa Thatcher po integrácii 50000 rokov, riešenia v intervale:
 - $\Delta q = \pm 0.1$ AU
 - $\Delta e = \pm 0.2$
 - i, ω, Ω – niekoľko málo stupňov
- veľká polos v intervale 20 – 200 AU (krajné hodnoty) **??? !!!**
- odpovedajúce V_h (43.383, 43.841) → **$\Delta V_h = 0.458$ km/s**
 - $a = (42.0, 56.0)$ AU → V_h (43.650, 43.711) → **$\Delta V_h = 0.060$ km/s**
- detailné štúdium nie je možné
- dynamický priestor sa zachováva

Lyridy – simulácie

- zjednodušený model uvoľňovania častíc
- v prechodoch perihéliom:
 - -10000, -20000, -30000, -40000, -50000 rokov
- uvoľnené častice kolmo k povrchu jadra kométy
 - pozdĺž rovníka a $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ rovnobežiek s odstupom 1°
 - na každej čiare 180 častíc, spolu 900
 - os jadra je kolmá na rovinu dráhy kométy

Modelové častice po integrácii



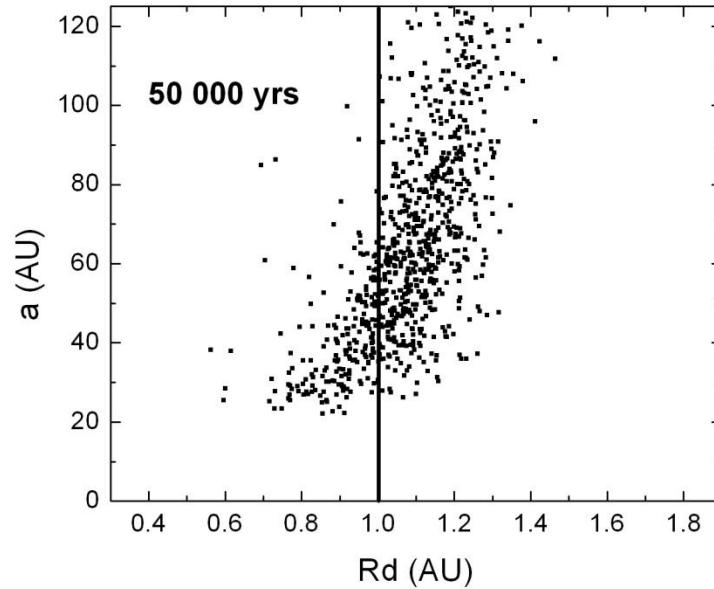
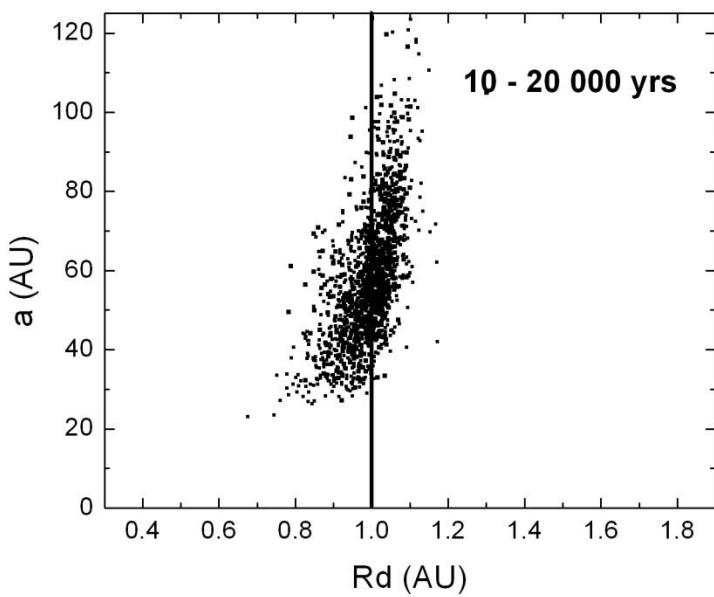
Stredné parametre pre prúdy spred 10000 – 50000 rokov

do blízkosti dráhy Zeme,

R_d (0.98 – 1.02) AU sa dostane v súčasnosti spolu 785 častíc

Filament	α	δ	V_g	q	e	ω	Ω	I	D_{SH}	N
L10	272.8 ± 1.0	33.1 0.6	47.46 0.46	0.921 0.010	0.984 0.003	213.3 0.7	32.4 0.6	80.7 1.1	0.009 0.005	271
L20	271.2 ± 1.4	33.3 0.7	47.13 0.55	0.915 0.011	0.984 0.004	214.1 1.0	31.2 0.9	79.8 1.4	0.009 0.006	203
L30	270.4 ± 1.6	33.6 0.9	46.79 0.70	0.914 0.010	0.984 0.005	214.6 1.3	30.8 1.1	79.0 1.7	0.008 0.005	146
L40	271.9 ± 1.8	32.8 0.7	47.40 0.54	0.911 0.014	0.984 0.005	214.5 2.1	31.9 1.2	80.4 1.4	0.010 0.010	154
L50	277.1 ± 3.1	33.8 1.0	47.62 0.66	0.937 0.016	0.969 0.006	208.9 3.6	35.2 3.3	81.5 1.6	0.011 0.006	11
EDMOND	272.1	33.3	46.5	0.919	0.941	214.5	32.1	79.4		
Thatcher				0.921	0.983	213.4	31.9	79.8		

$R_d - a$



Poznámky k výsledkom

- $R_d \sim 1$ AU
- $R_a \sim 7 - 20$ AU
- rozloženie častíc nezávisí od smeru uvoľnenia z povrchu jadra kométy
- obrazec rozloženia v $(R_d - a)$ sa nemení, ani keď sú častice vypustené vysoko nad/pod rovníkom (test do $\pm 60^\circ$)
- **dôvod** – dlhodobá integrácia **zahladí** jemné efekty **polohy a smeru** vypustenia častíc
- častice s $a < 20$ AU – nevzišli zo simulácie
- výstupný uzol častíc sa s dĺžkou integrácie posúva k väčšej heliocentrickej vzdialenosťi

Mean orbit of Lyrids form EDMOND

Welch (2001) eq. (4) applied :

$$\rho_j = \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{D_{ij}^2}{D_c^2} \right) ; \quad D_{ij} \leq D_c$$

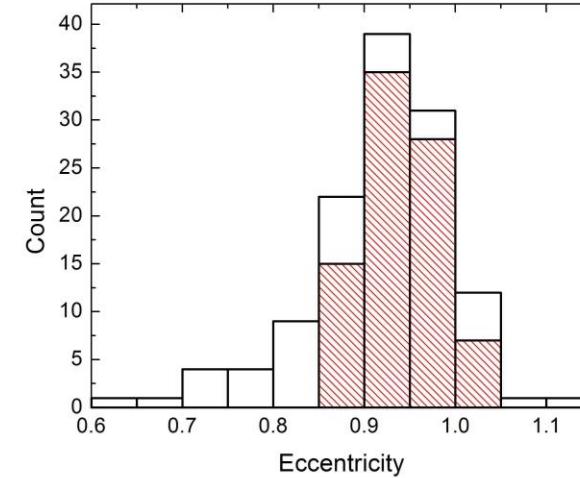
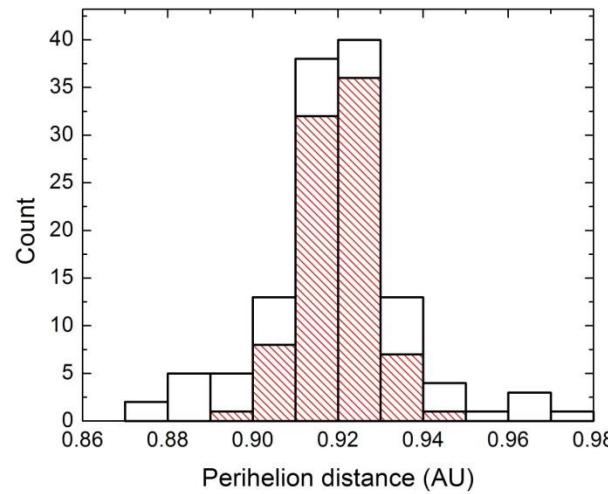
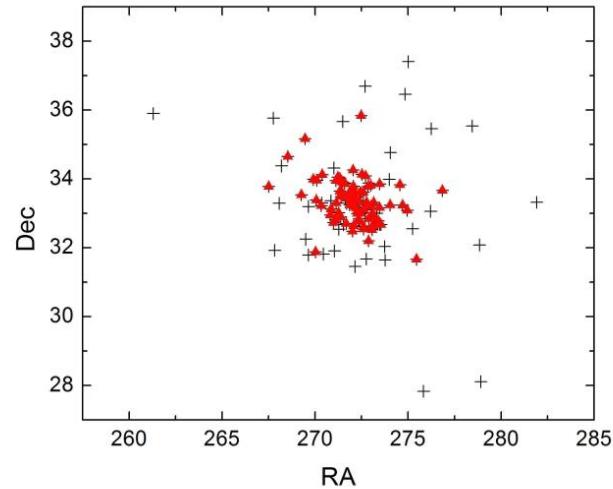
ρ_j - group density at point j in orbital element space

- weighted mean and SD

$$w_i = \left(1 - \frac{D_{ij}^2}{D_c^2} \right)$$

source	L_S	RA	D_c	V_g	q	e	ω	Ω	i
EDMOND	32.1	272.1	33.3	46.5	0.919	0.941	214.5	32.1	79.4
\pm	0.7	1.2	0.5	0.6	0.006	0.032	1.3	0.7	1.1
IAU MDC	32.4	272.0	33.3	46.6	0.921	–	214.3	31.8	79.6
Thatcher					0.921	0.983	213.4	31.9	79.8

Comparison of 125 and 85 orbits obtained by Welch method



Asteroidálne meteoroidy

- Pád meteoritu Neuschwanstein (2002) na identickej dráhe meteoritu Příbramu (1959)
- odlišné typy meteoritov a rozdielny kozmický vek

heterogénný prúd?
(*Spurný P. et al., 2003*).

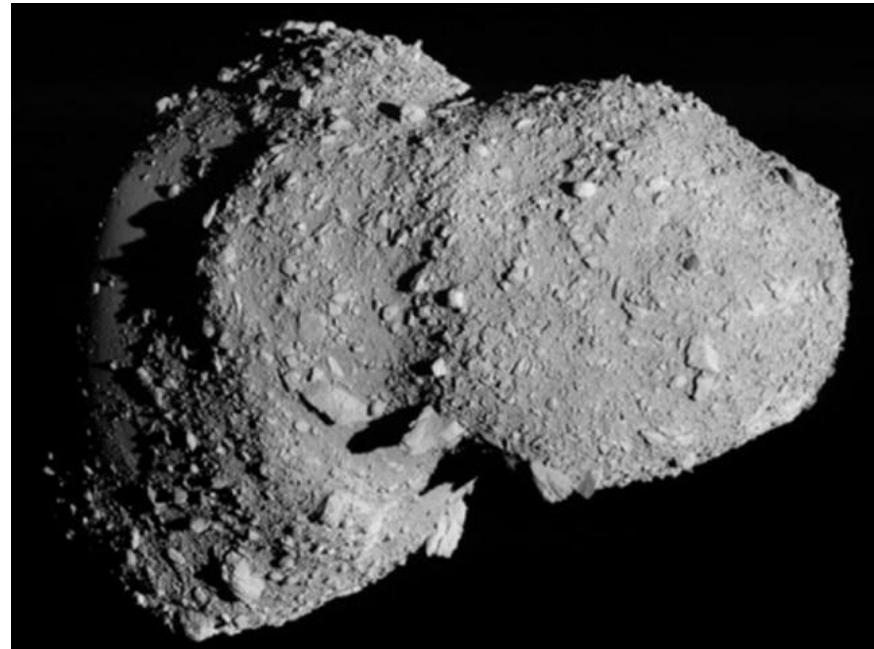


- Frekvencia veľmi tesných priblížení ($\sim 2R_{\text{Earth}}$) NEA s veľkosťou Itokawy (0,5 km) je ~ 1 za 25 000 rokov (*Ivanov, 2006*). (bez rotácie)

Prúd meteoroidov

Itokawa ~ 500 m

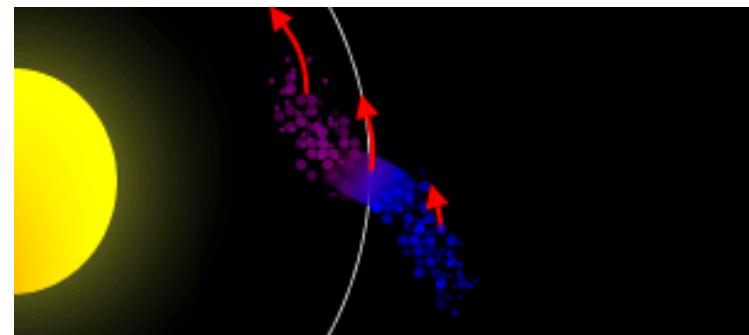
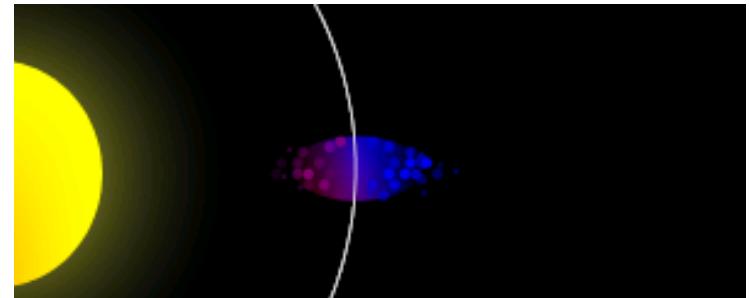
- dráha typu Apollo
- tesné priblženie k Zemi
Roche hranica $\sim 2R_{\text{Earth}}$ (13 min.)
podobný asteroidu **Itokawa**
únikové rýchlosťi $\sim 10 \text{ cm/s}$
- 100 testovacích častíc
- za niekoľko storočí distribúcia pozdĺž dráhy
 - veľmi kompaktný prúd
- Kornoš et al.: (2009), *Contrib. Astron. Observatory Skalnaté Pleso* **39**, 18-24



Jaxa

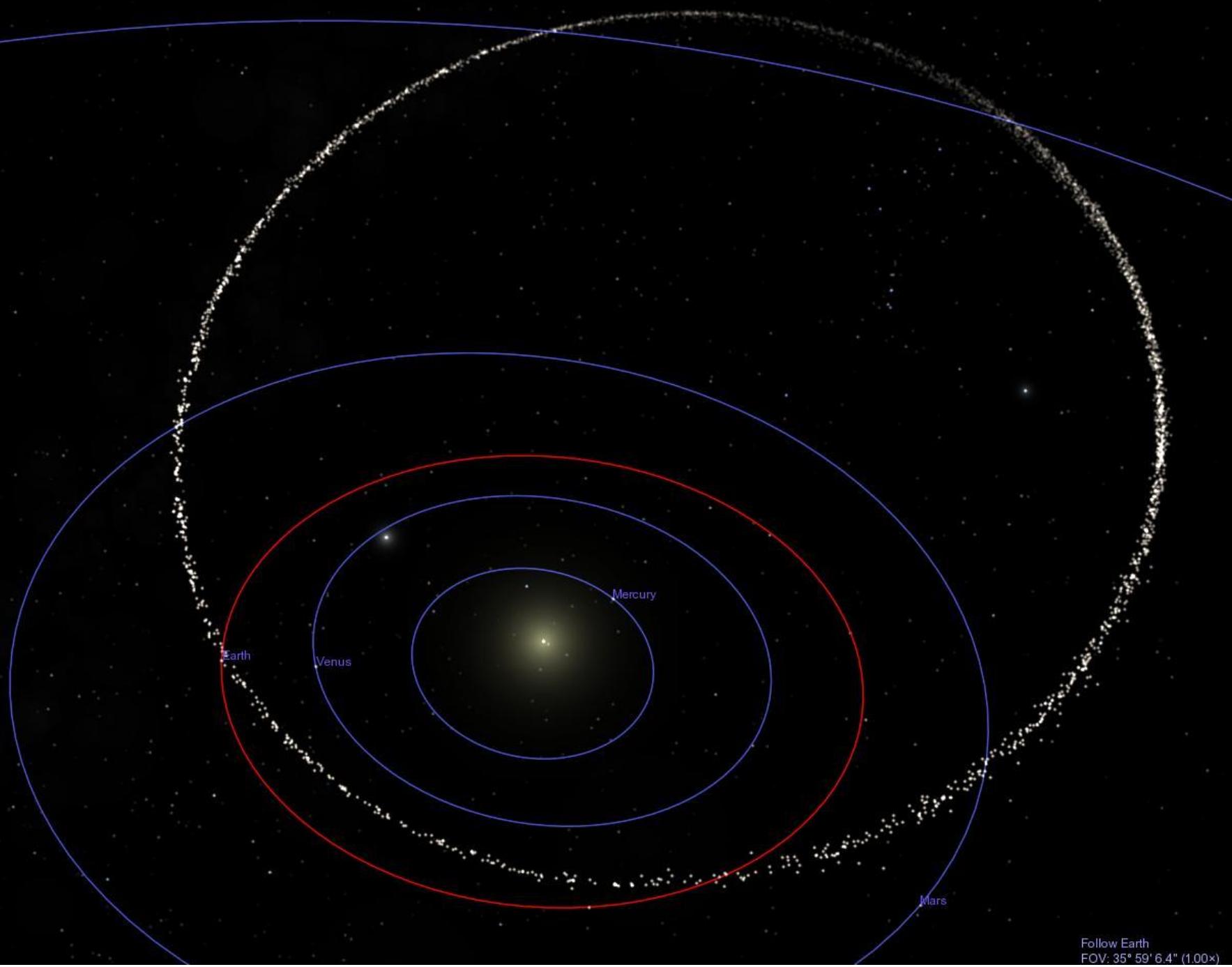
Prúd meteoroidov

- dráha typu Apollo
- tesné priblženie k Zemi
 - Roche hranica $\sim 2R_{\text{Earth}}$ (13 min.)
 - podobný asteroidu **Itokawa**
 - únikové rýchlosťi $\sim 10 \text{ cm/s}$
- 100 testovacích častíc
- za niekoľko storočí distribúcia pozdĺž dráhy
 - veľmi kompaktný prúd
- Kornoš, Tóth, Vereš: (2009), *Contrib. Astron. Observatory Skalnaté Pleso* **39**, 18-24



2009 Apr 07 14:37:25 UTC
Real time

9 au
km
er: 0° 00' 3.6"



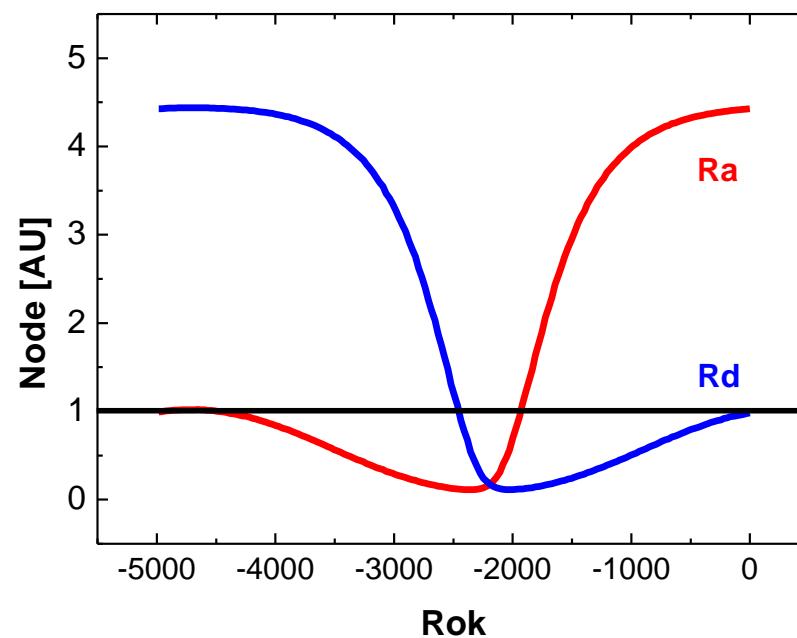
m/s

Follow Earth
FOV: 35° 59' 6.4" (1.00x)

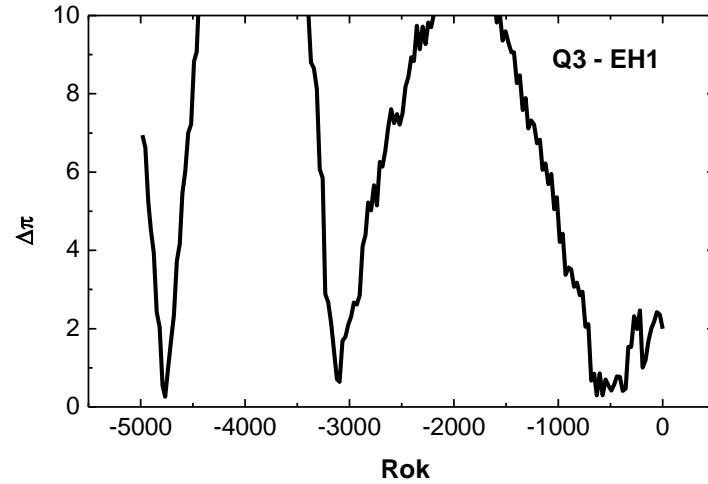
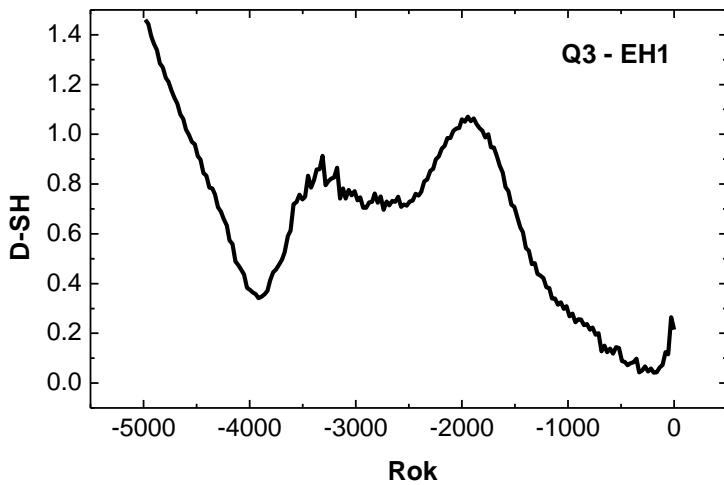
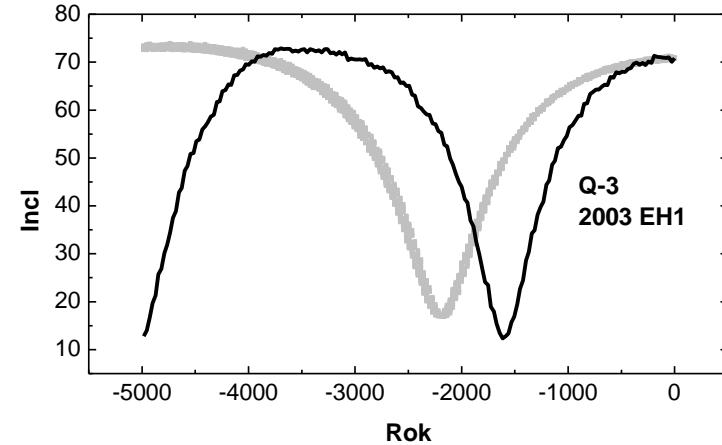
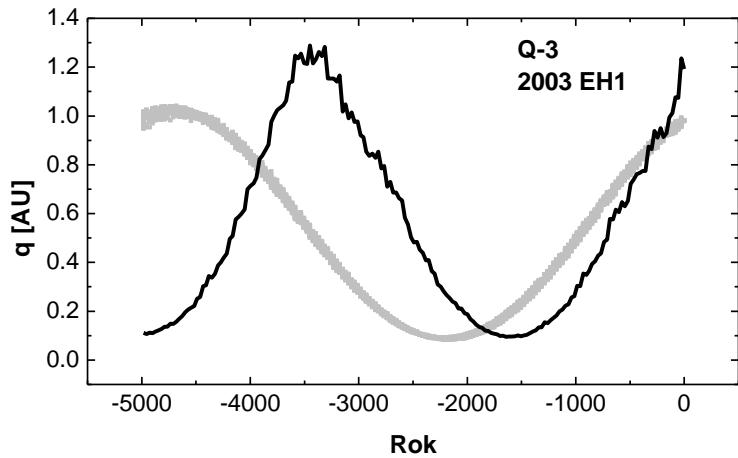


- dráhový vývoj filamentov a potenciálnych materských telies na 5000 rokov do minulosti

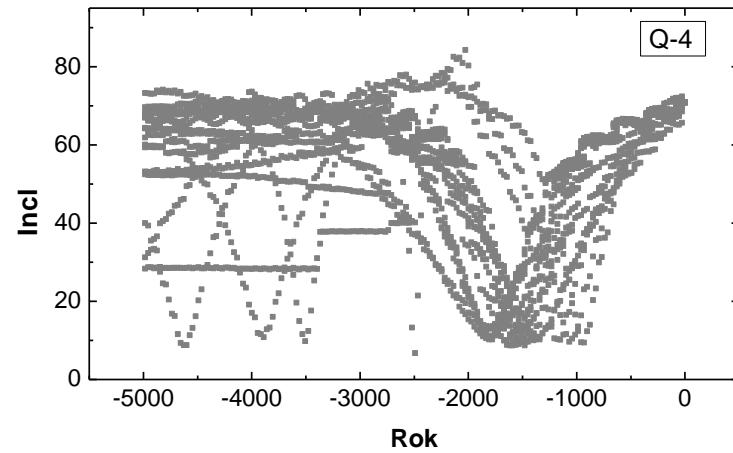
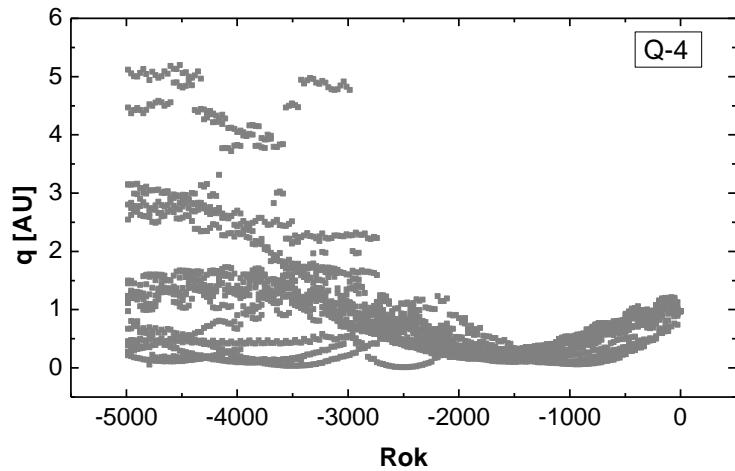
Časový vývoj výstupného a zostupného uzla



Q-3 – 2003 EH1

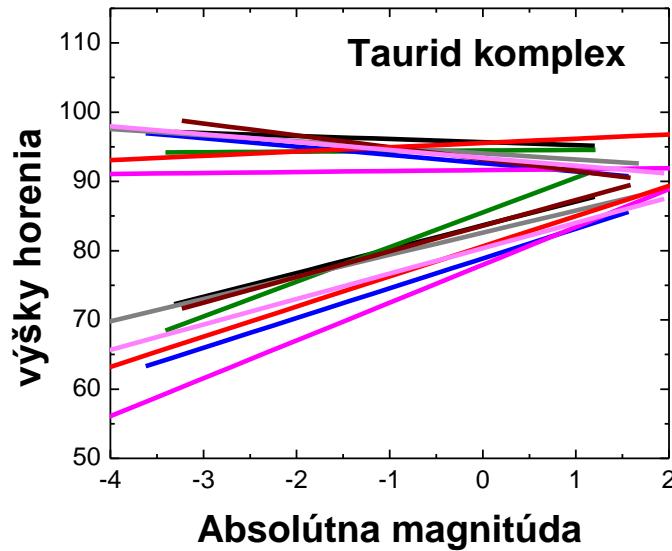


Q-4

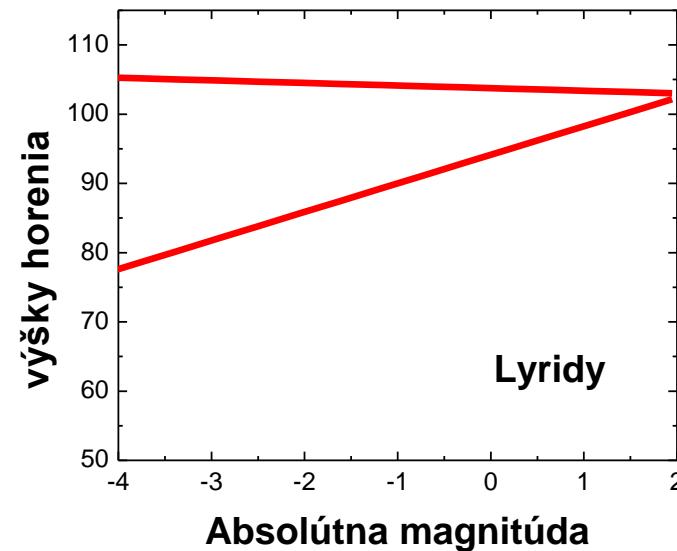


Výšky horenia meteorov

~ 28 km/s

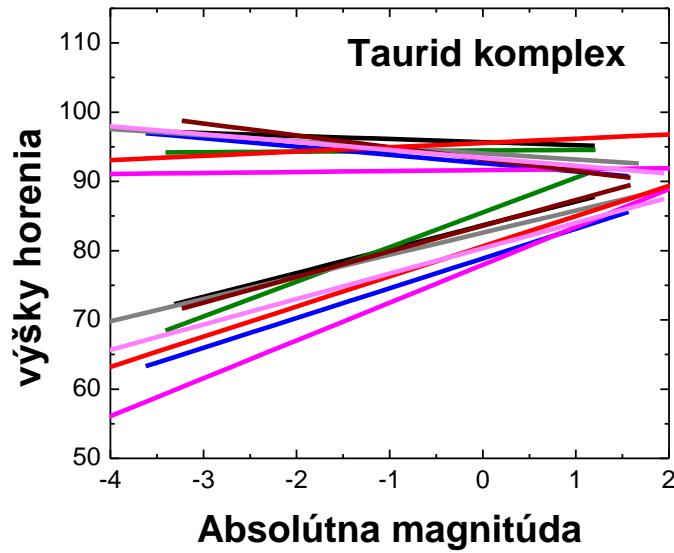


~ 47 km/s

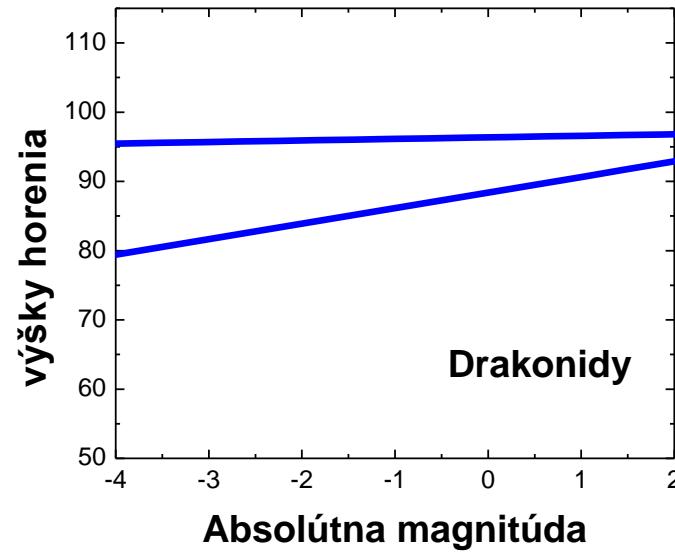


Výšky horenia

~ 28 km/s

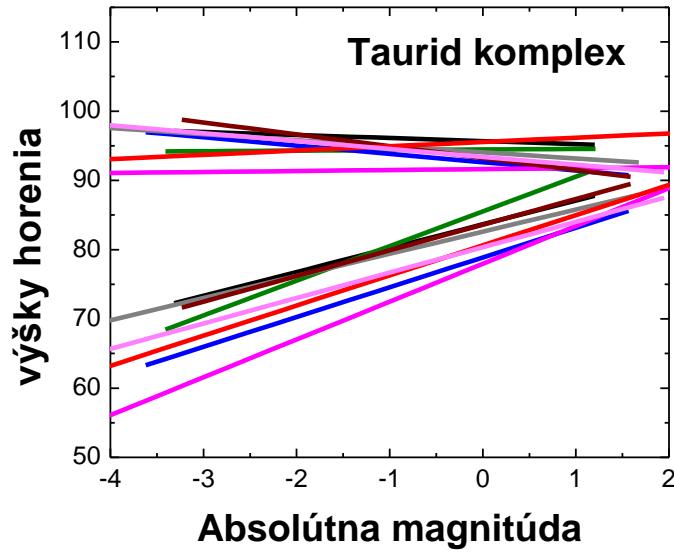


~ 20 km/s

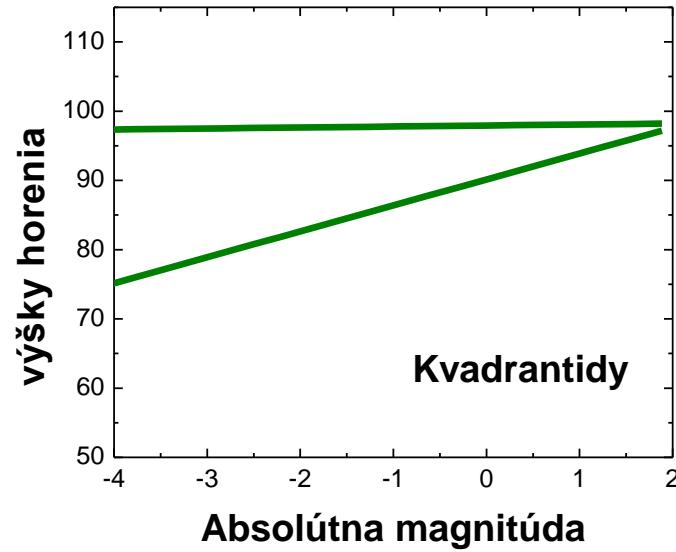


Výšky horenia

~ 28 km/s

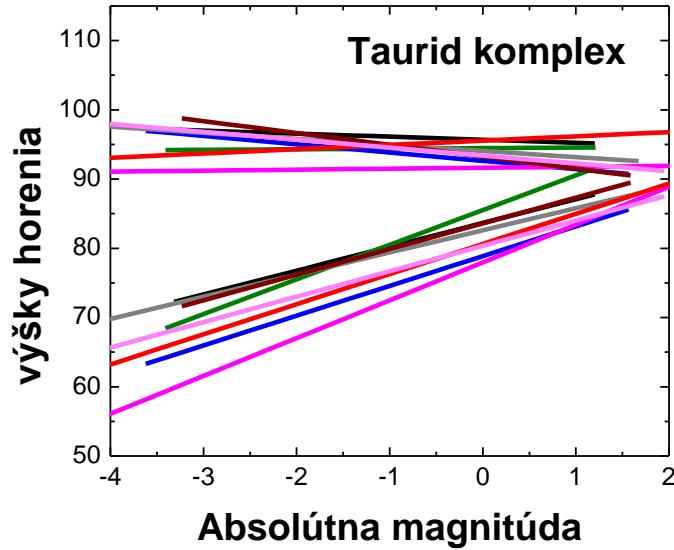


~ 41 km/s

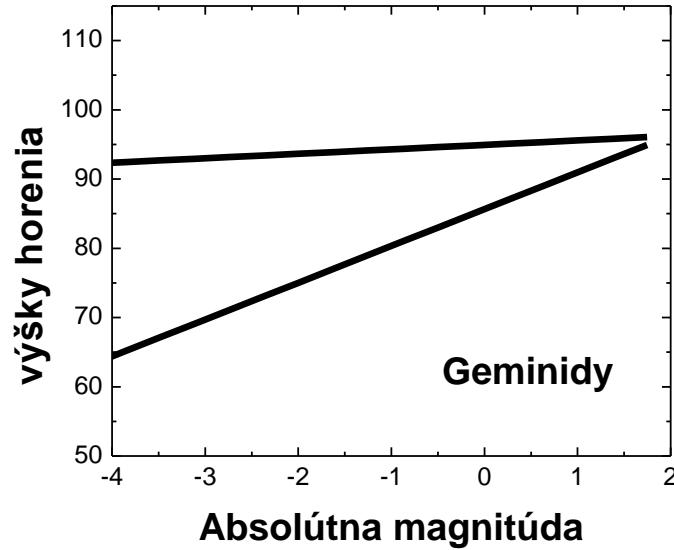


Výšky horenia

~ 28 km/s



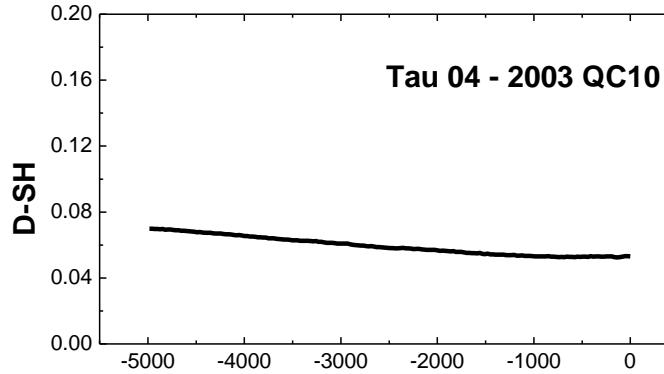
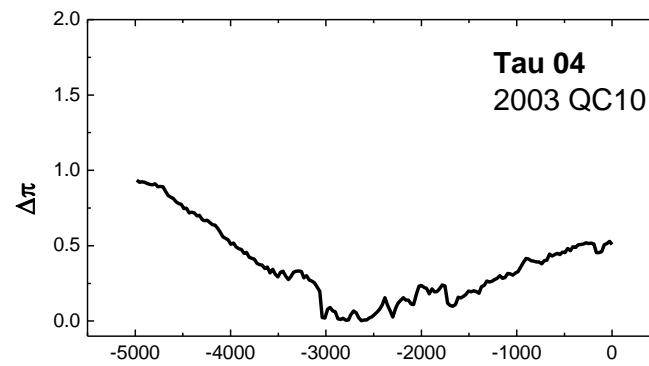
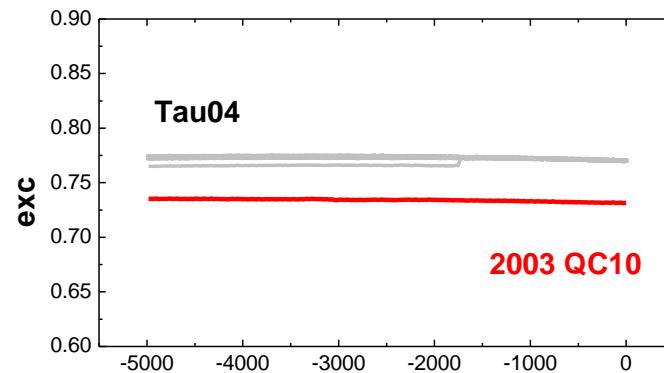
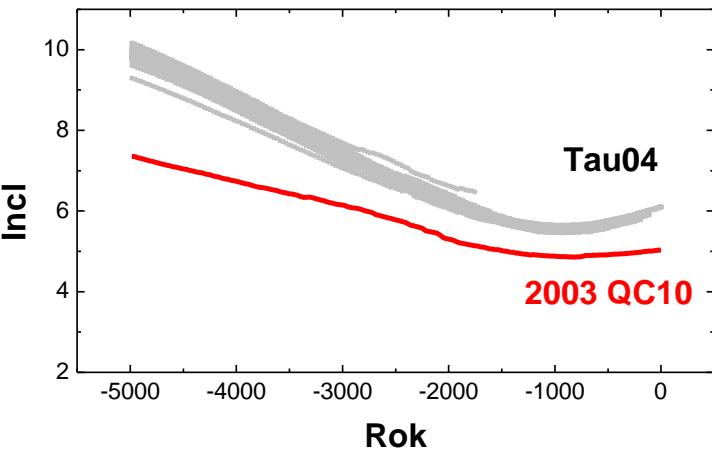
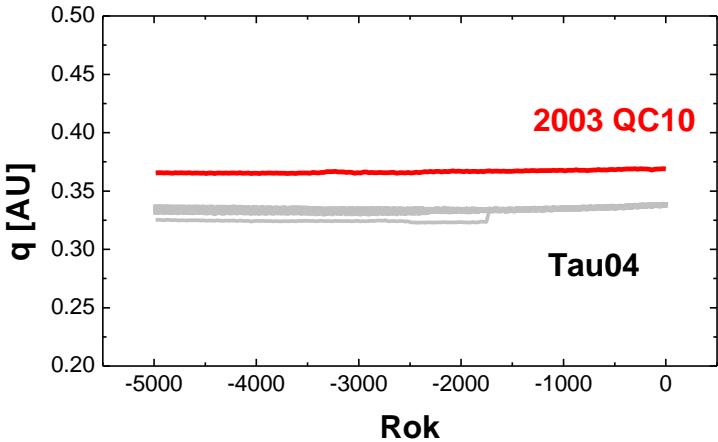
~ 35 km/s



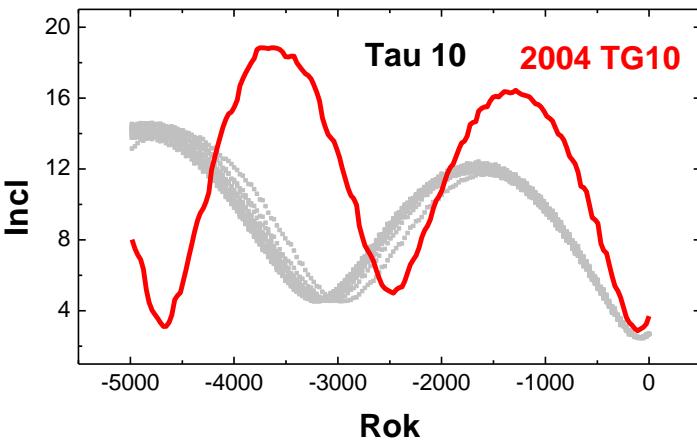
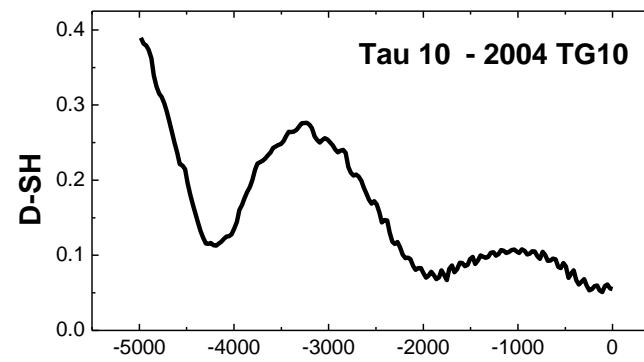
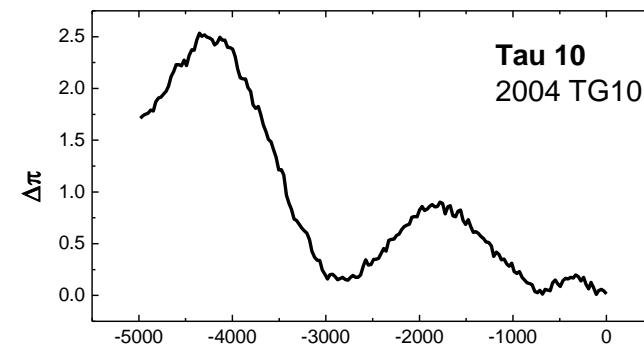
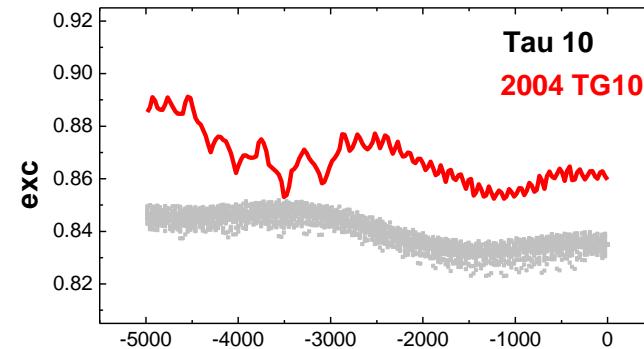
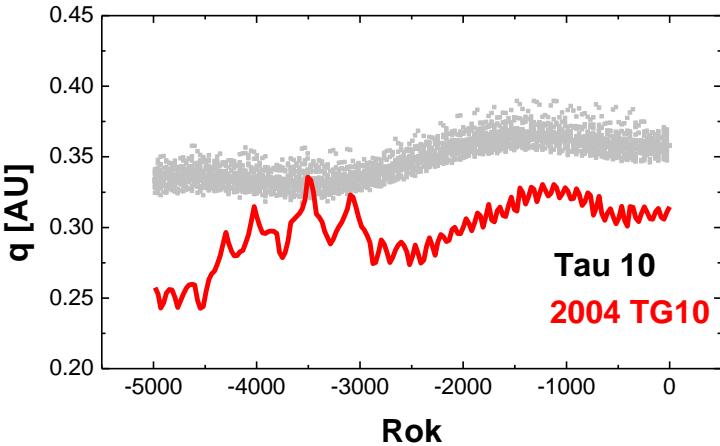
Materské telesá komplexu 4

asociácia	α (°)	δ (°)	V_g (km/s)	H (1,0)	Rozmer (m)	D_{SH}	perióda
Tau 05	16	1	26				
2003 QC10	16	2	24	17,83	800 – 1700	0,07 – 0,06	5000
Tau 10	58	22	28				
2004 TG10	55	22	30	19,40	390 – 880	0,25 – 0,05	4500
Tau 15	85	26	28				
2002 XM35	81	26	28	22,96	70 – 160	0,25 – 0,05	3300
Tau 16	77	18	27				
2002 XM35	81	26	28	22,96	70 – 160	0,25 – 0,05	3300
2003 UL3	67	22	26	17,85	700 – 1600	0,25 – 0,05	3200

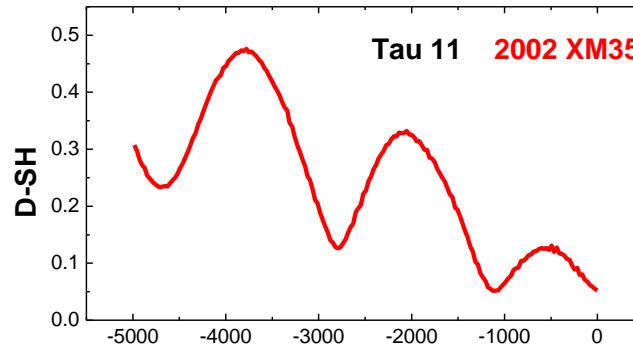
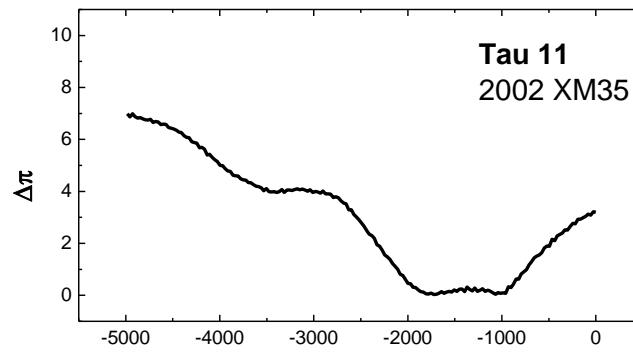
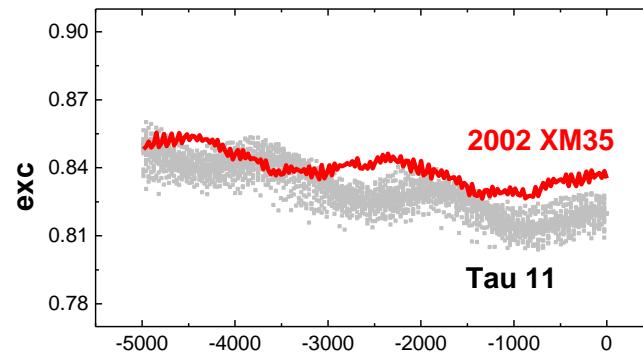
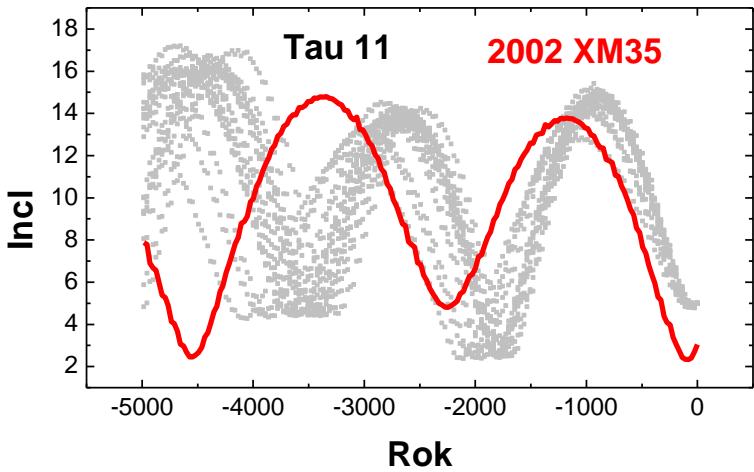
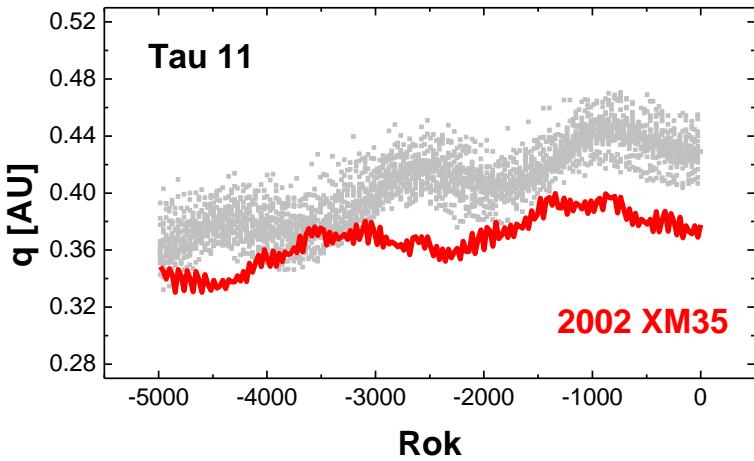
Tau 04 – 2003 QC10



Tau 10 – 2004 TG10



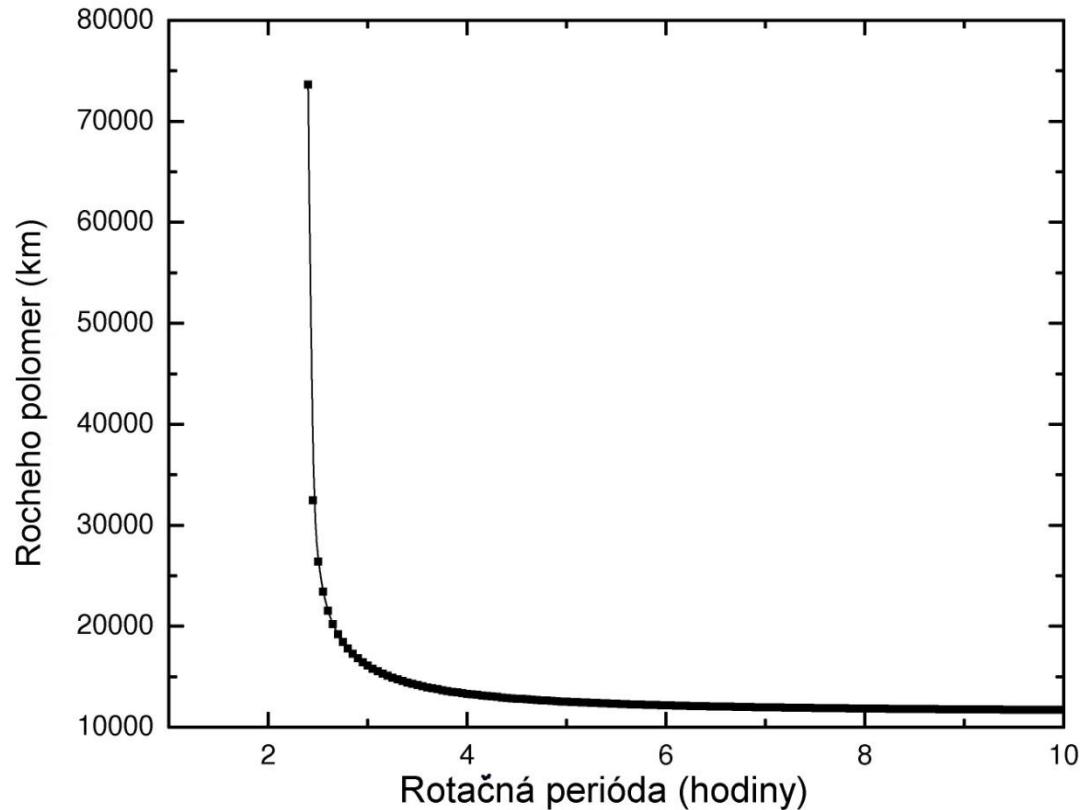
Tau 11– 2002 XM35





Rocheho hranica ako funkcia rotácie asteroidu

$$R_{Roche} = \sqrt[3]{\frac{GM_{\oplus}}{2\pi \left(\frac{G\rho}{3} - \frac{\pi}{P^2} \right)}}$$



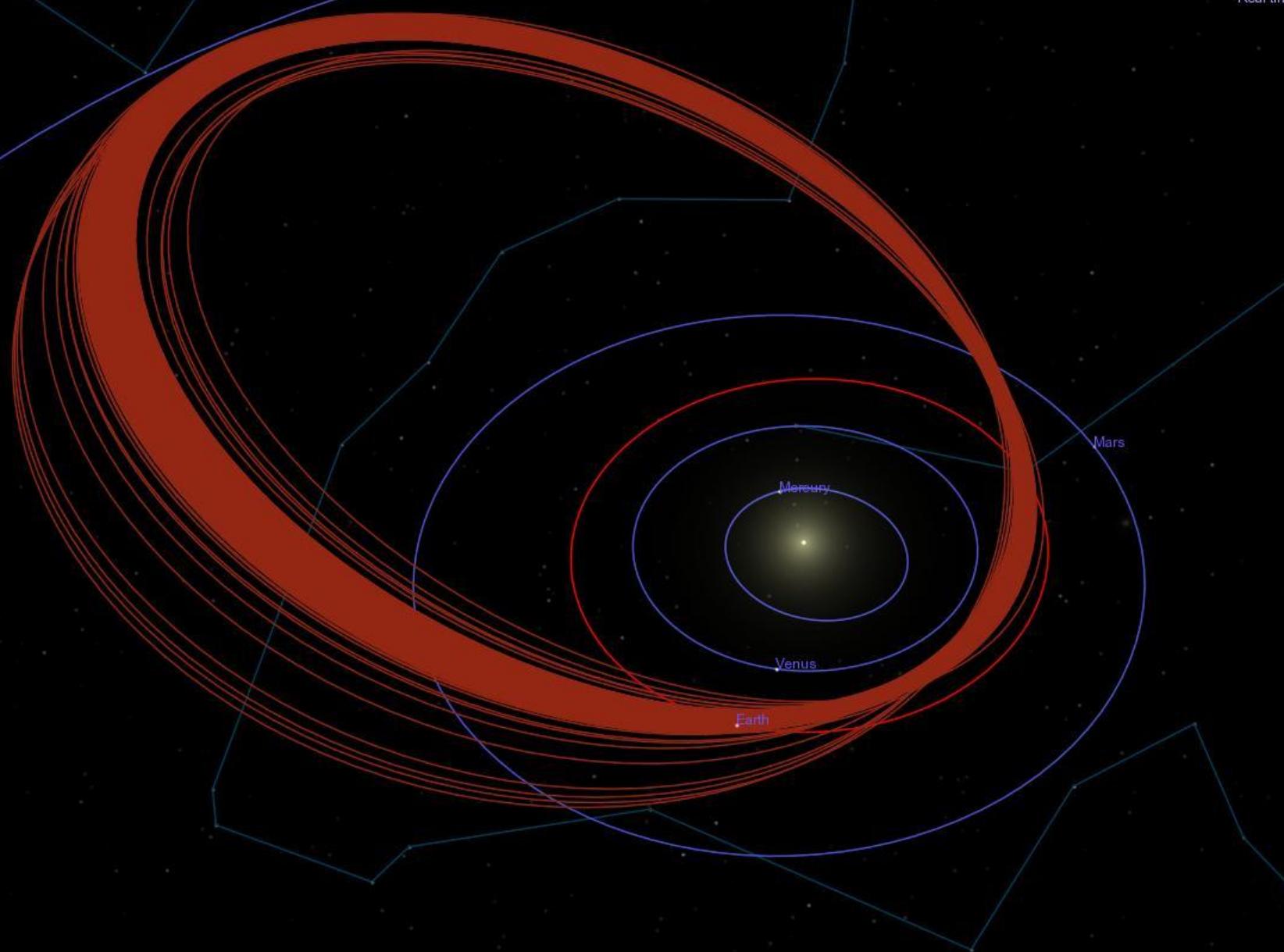
Tóth, Vereš, Kornoš: (2011), Mon. Not.R. Astron. Soc. 415, pp. 1527-1533

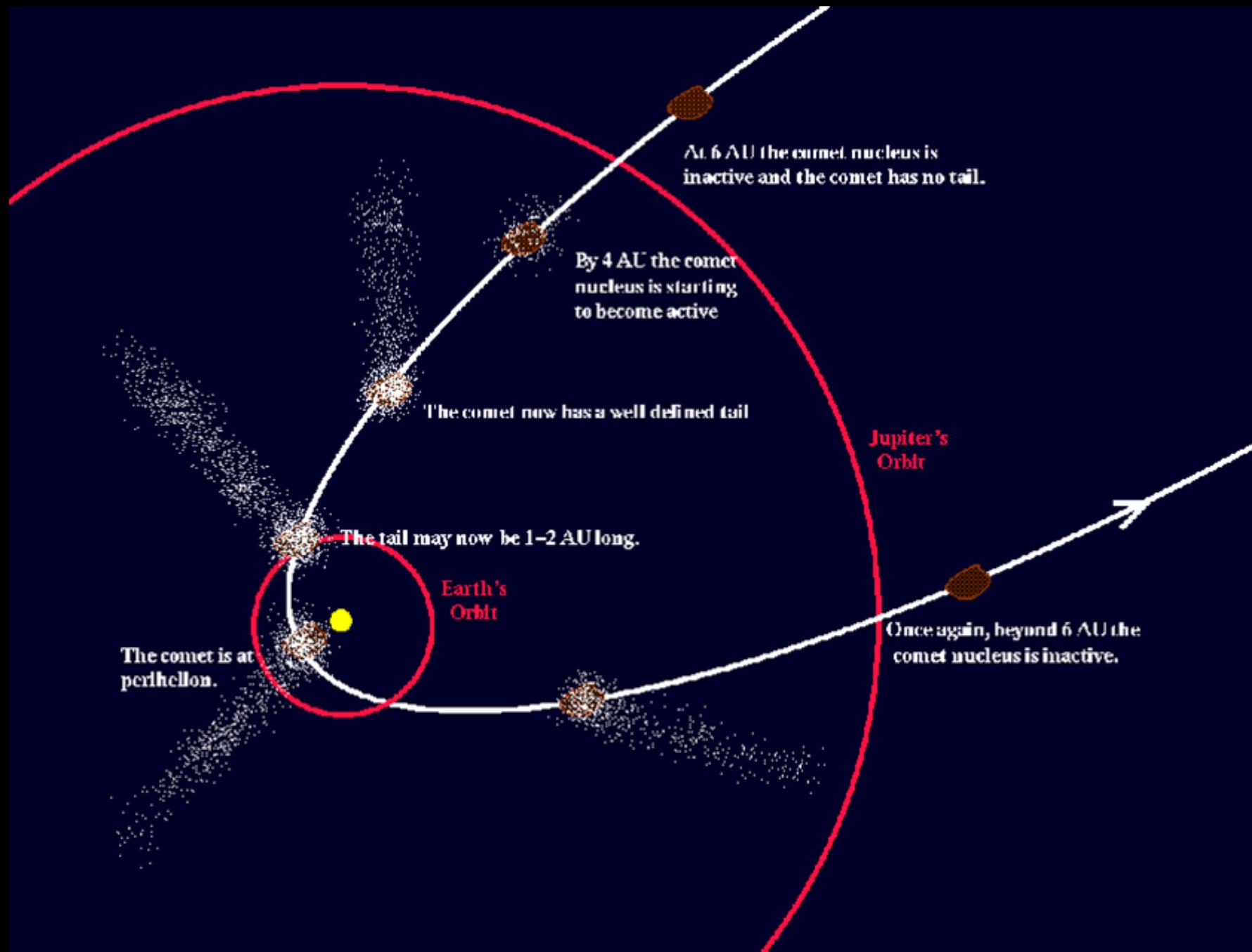
Earth

Distance: 8.6798 au
Radius: 6,378.1 km

Apparent diameter: 0° 00' 2.0"

2009 A
Real time





Model II

- orbit of Příbram integrated back
- close encounter with the Earth within Roche limit $\sim 2R_{\text{Earth}}$ (for 13 min.)
- Itokawa like asteroid $\sim 3,5 \cdot 10^{10} \text{ kg}$
- 3100 test particles released
3300 and 4200 years ago



Hayabusa - Jaxa

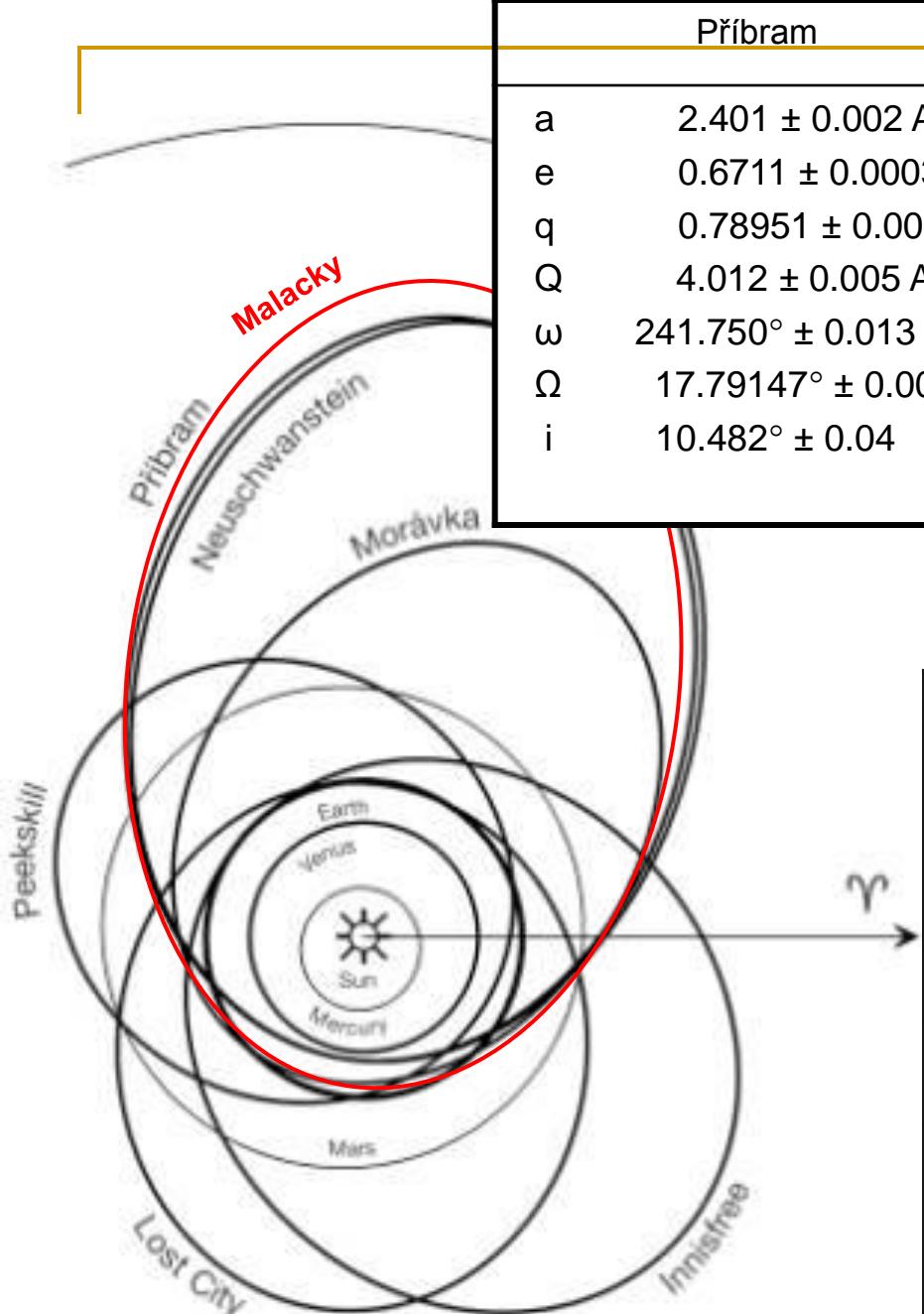
- presented on Bolides and Meteorite Falls in Prague 2009 (Tóth)
- presented on EPSC 2009 in Potsdam (Vereš)

Motivation

- The fall of Neuschwanstein meteorite (2002) & similar orbit of Příbram meteorite (*Spurný P. et al., 2003*).
- Different types of meteorites and cosmic-ray exposure time
 - **heterogeneous stream?**
- Evidence of internal porosity (Mathilde), detailed surface images (Itokawa), spin barrier of asteroids ($D > 200\text{m}$) – cracked interior or **rubble-pile** structure
 - movement of rubble and dust on the surface (Itokawa)
 - mass loss and tidal break-up – theoretical work
- Tidal disruption of small NEAs during close planetary encounter can produce meteoroid streams.
- Evidence or a chance - such a pair of orbits is a chance alone. Decoherence time for such a stream is $\sim 50\,000$ (*Pauls and Gladman, 2005*).
- The frequency of very close approaches (within $2R_{\text{Earth}}$) by NEAs size like Itokawa (0,5 km) is ~ 1 per 25 000 years (*Ivanov, 2006*).

	Příbram	Neuschwanstein	Malacky
a	2.401 ± 0.002 AU	2.40 ± 0.02 AU	2.60675 ± 0.02089
e	0.6711 ± 0.0003	0.670 ± 0.002	0.71816 ± 0.00233
q	0.78951 ± 0.00006 AU	0.7929 ± 0.0004 AU	0.73470 ± 0.00078
Q	4.012 ± 0.005 AU	4.01 ± 0.03 AU	4.47881 ± 0.04191
ω	$241.750^\circ \pm 0.013$	$241.20^\circ \pm 0.06$	248.68785 ± 0.11719
Ω	$17.79147^\circ \pm 0.00001$	$16.82664^\circ \pm 0.00001$	17.40482 ± 0.00002
i	$10.482^\circ \pm 0.04$	$11.41^\circ \pm 0.03$	9.46054 ± 0.05787

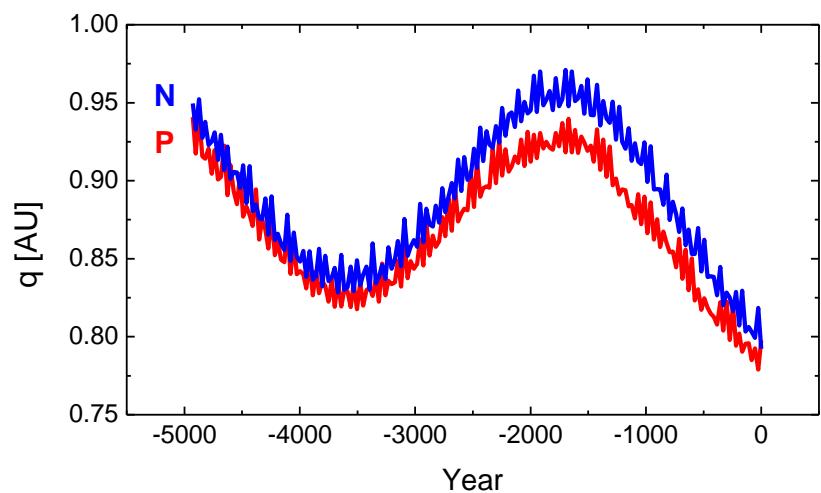
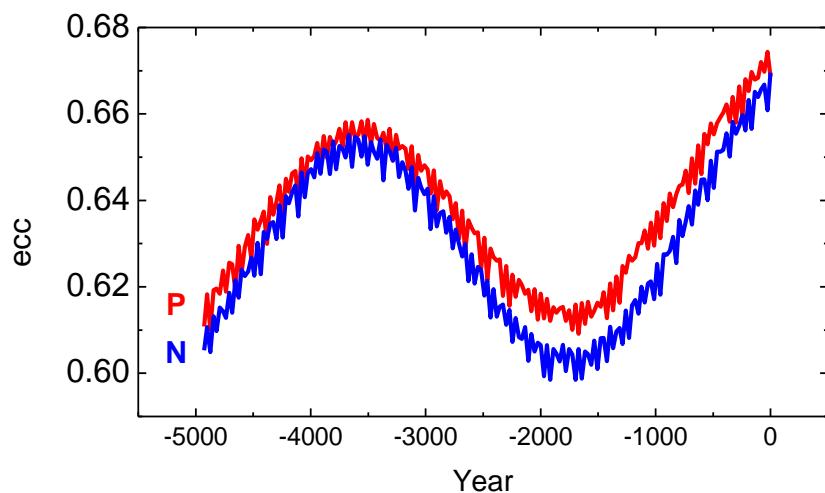
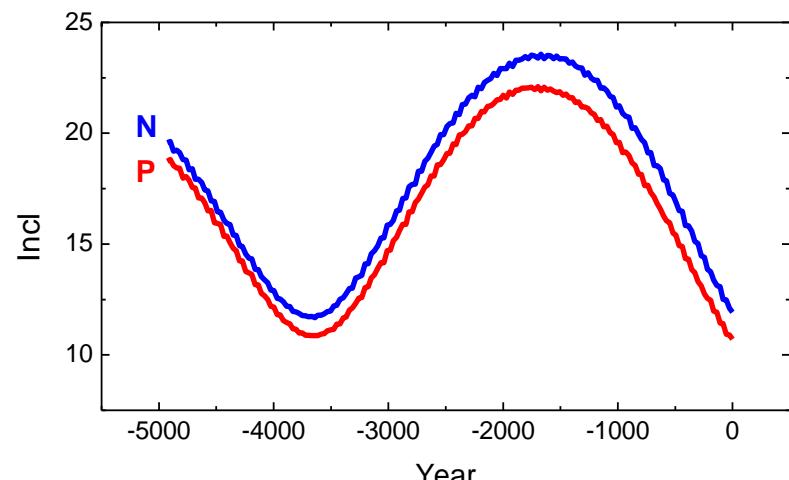
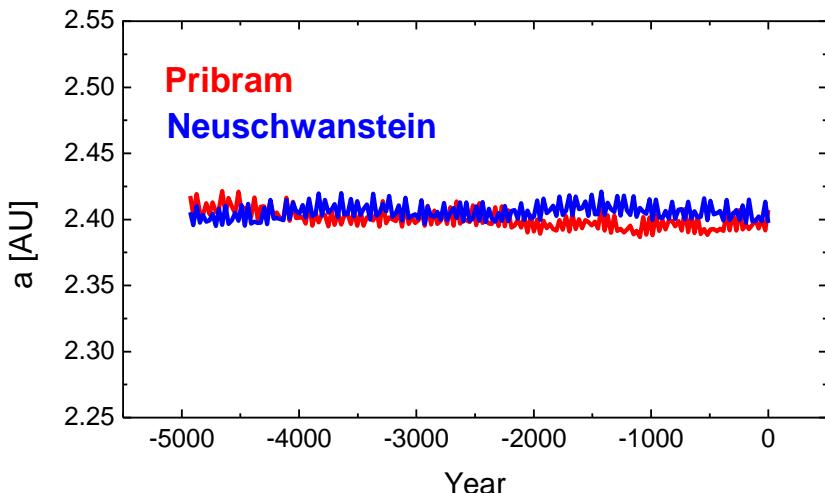
(Spurný et al., 2003, 2008)



Fireball “Malacky” from Modra station TV all-sky composite image

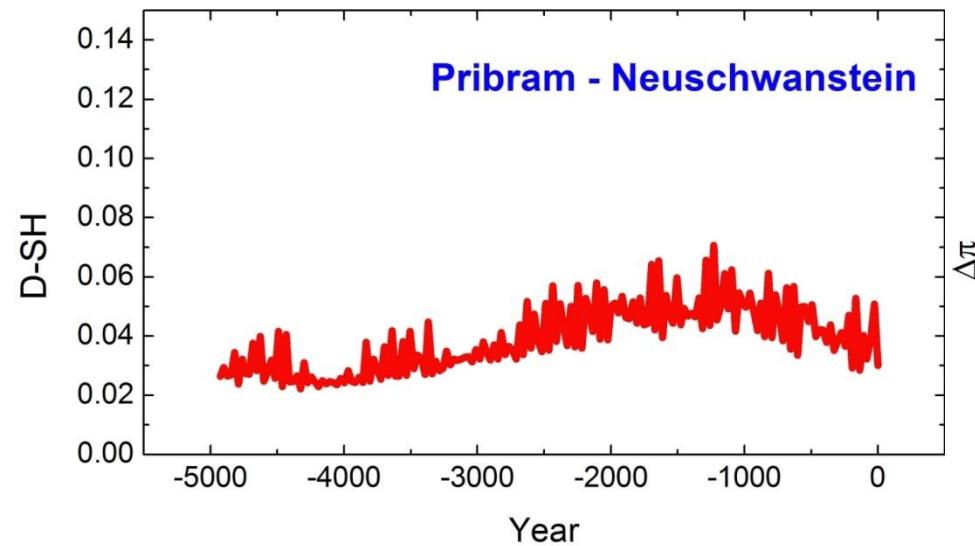


Příbram and Neuschwanstein orbital evolution

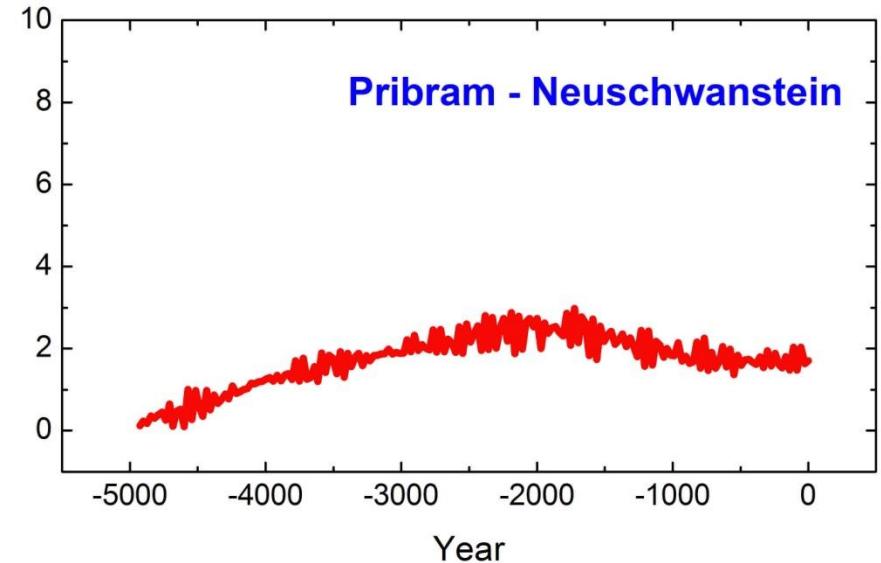


Příbram and Neuschwanstein orbital evolution

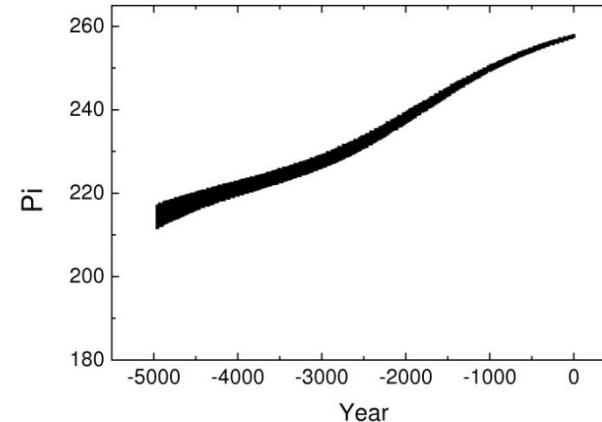
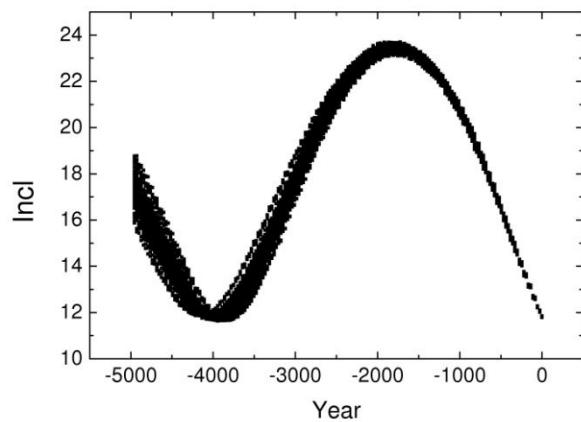
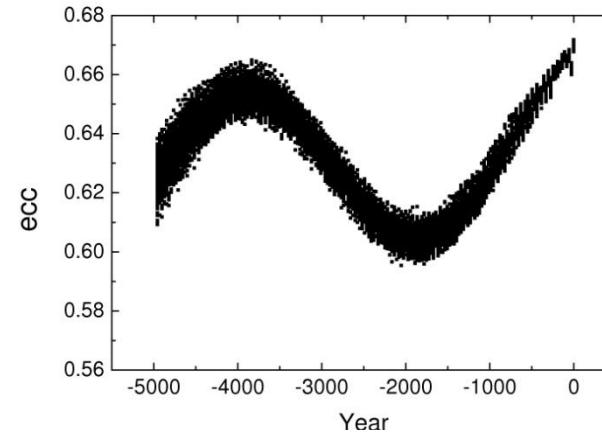
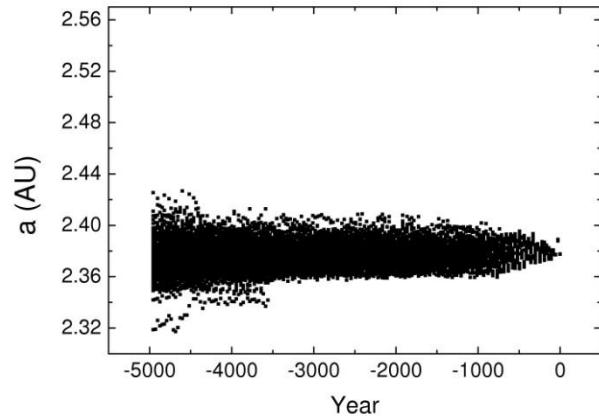
D-criterion



Longitude of perihelion



Orbital evolution of Příbram clones



Model

2 stages:

- 3-body problem: Earth – asteroid – particle
on hyperbolic orbit
definition of R_limit (particle does not return if
dist = 100 000 km)
asteroid mass: 1 or $\frac{1}{2}$ or 0 (total disruption)
- vectors (\mathbf{r} , \mathbf{v}) of particles to heliocentric ecliptic coordinates,
Adams-Bashforth-Moulton 12th order integrator,
Sun, planets, Earth-Moon, DE 406

Disruption results

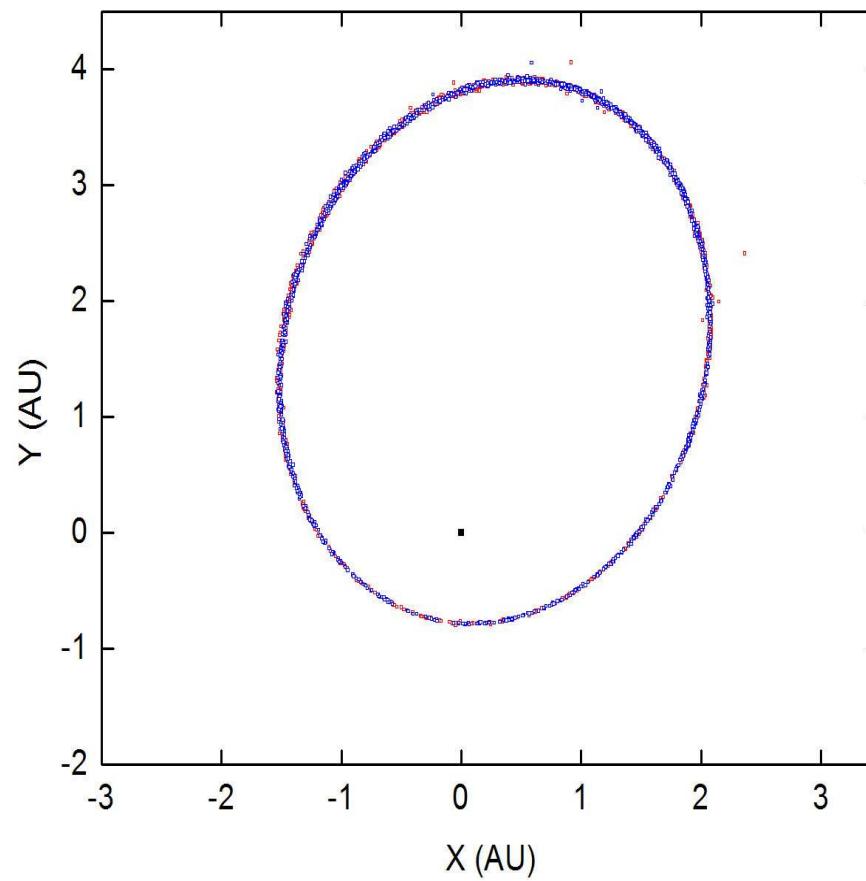
maximum escape velocity of the particle in the distance of 100 000 km from the Earth after the fly-by

Asteroid mass	1		0.5		0	
	velocity	dist.	velocity	dist.	velocity	dist.
	6 cm/s	430 m	6.7 cm/s	550 m	7.3 cm/s	665 m

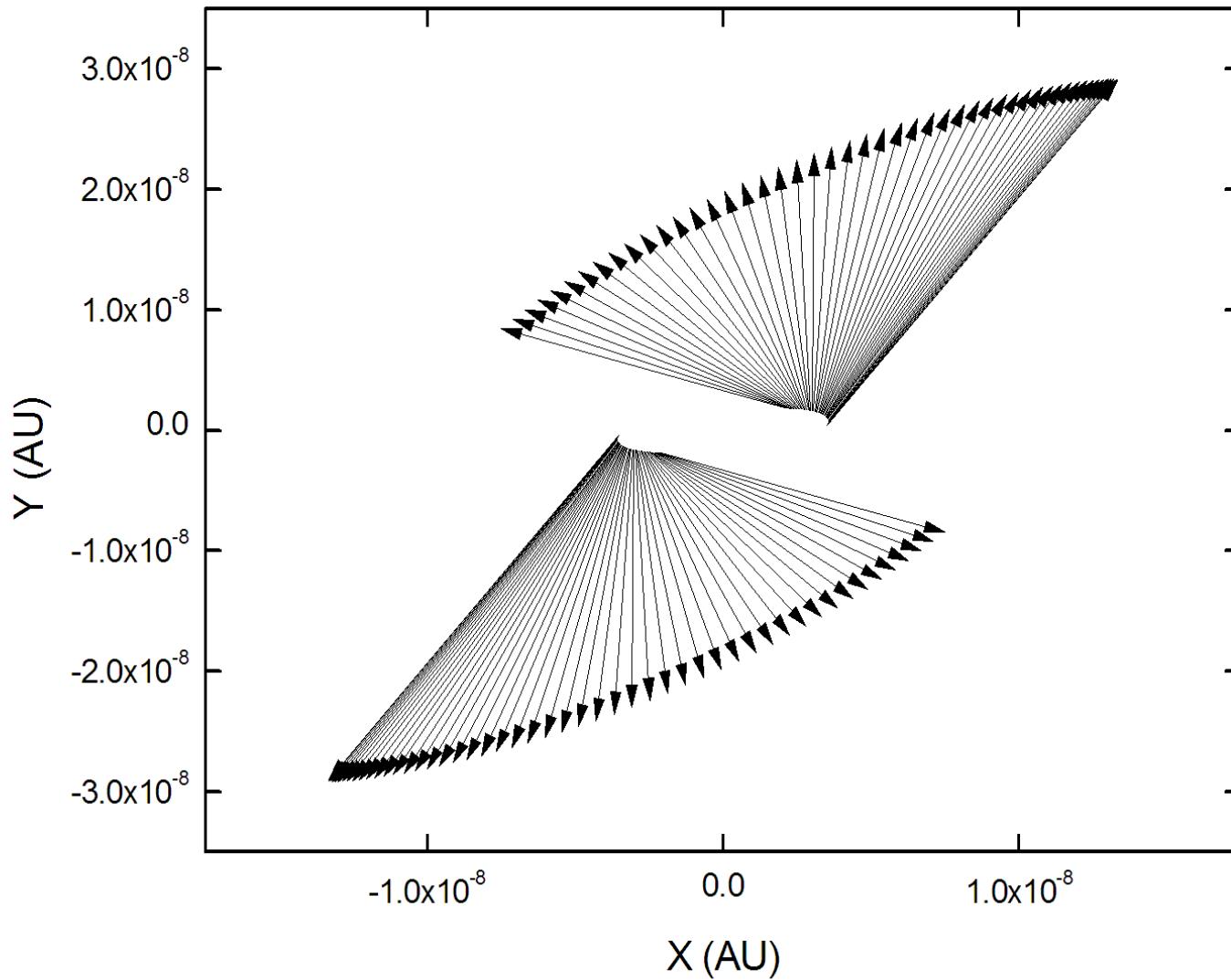
Roche limit (distance, when particle does not fall back onto surface)

Příbram orbit – 14 700 km (without rotation)

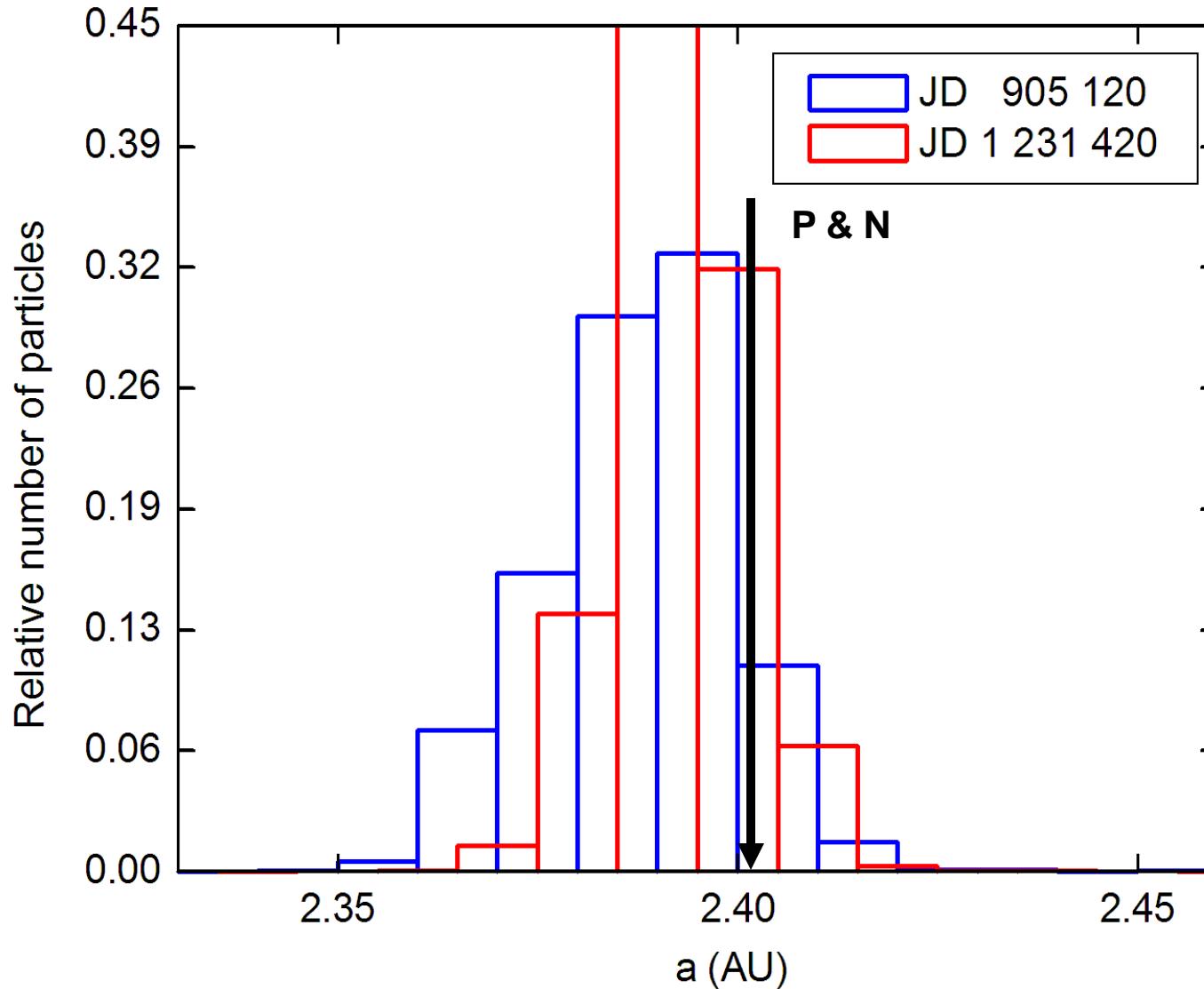
Orbital plain of Příbram stream 1000 years after the disruption



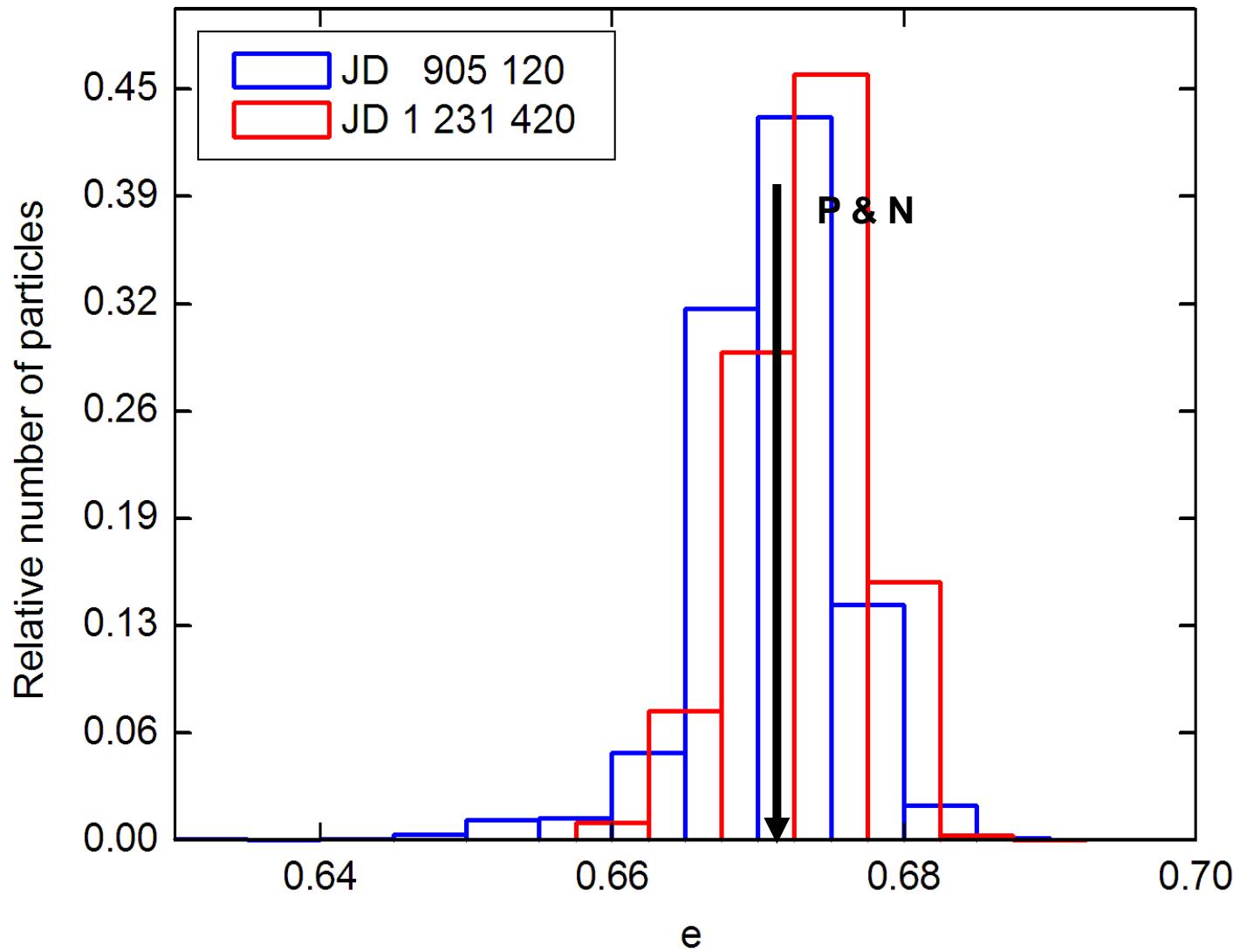
Positions and velocity vectors of released particles after the tidal disruption of Příbram



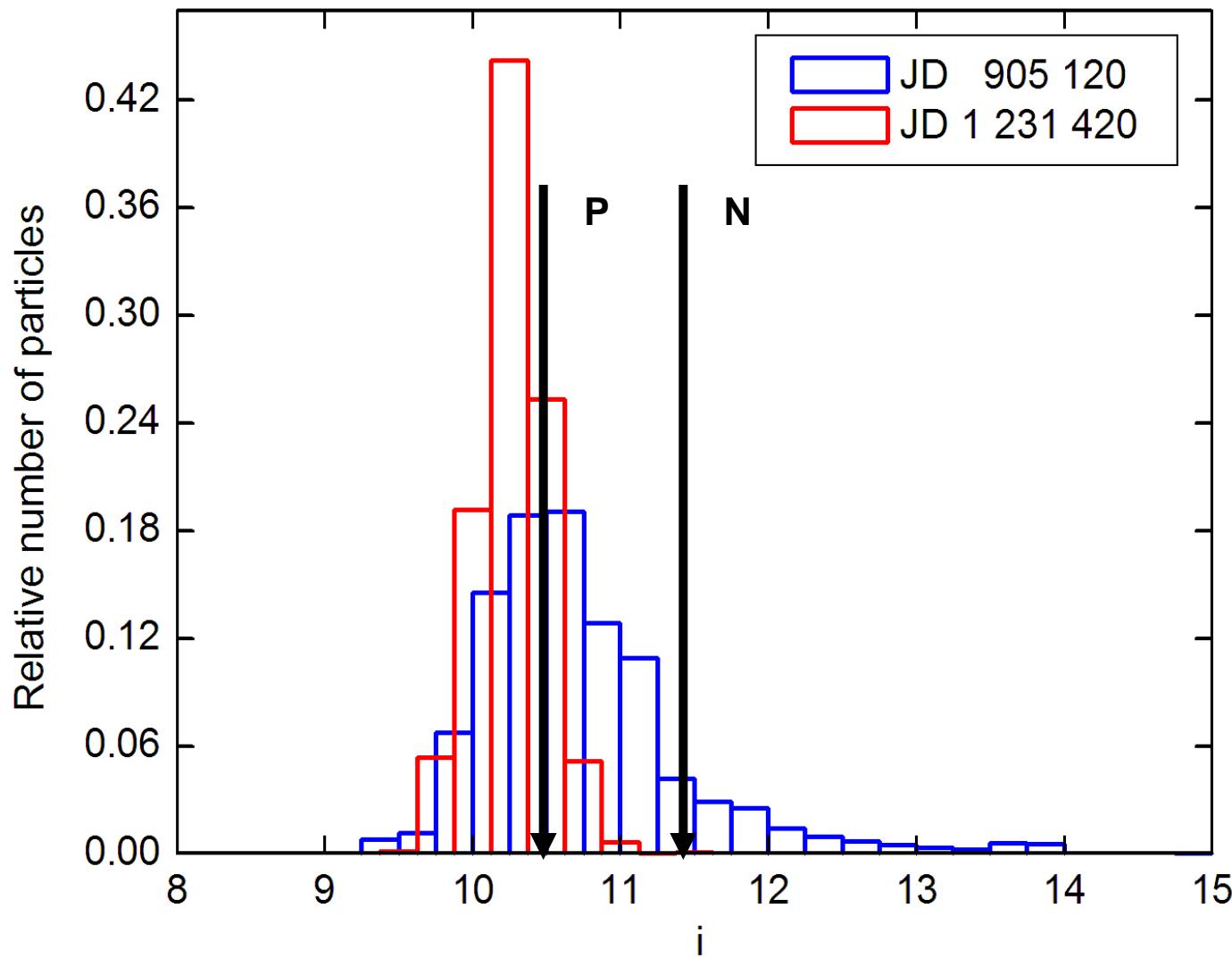
Distribution of Semimajor axis



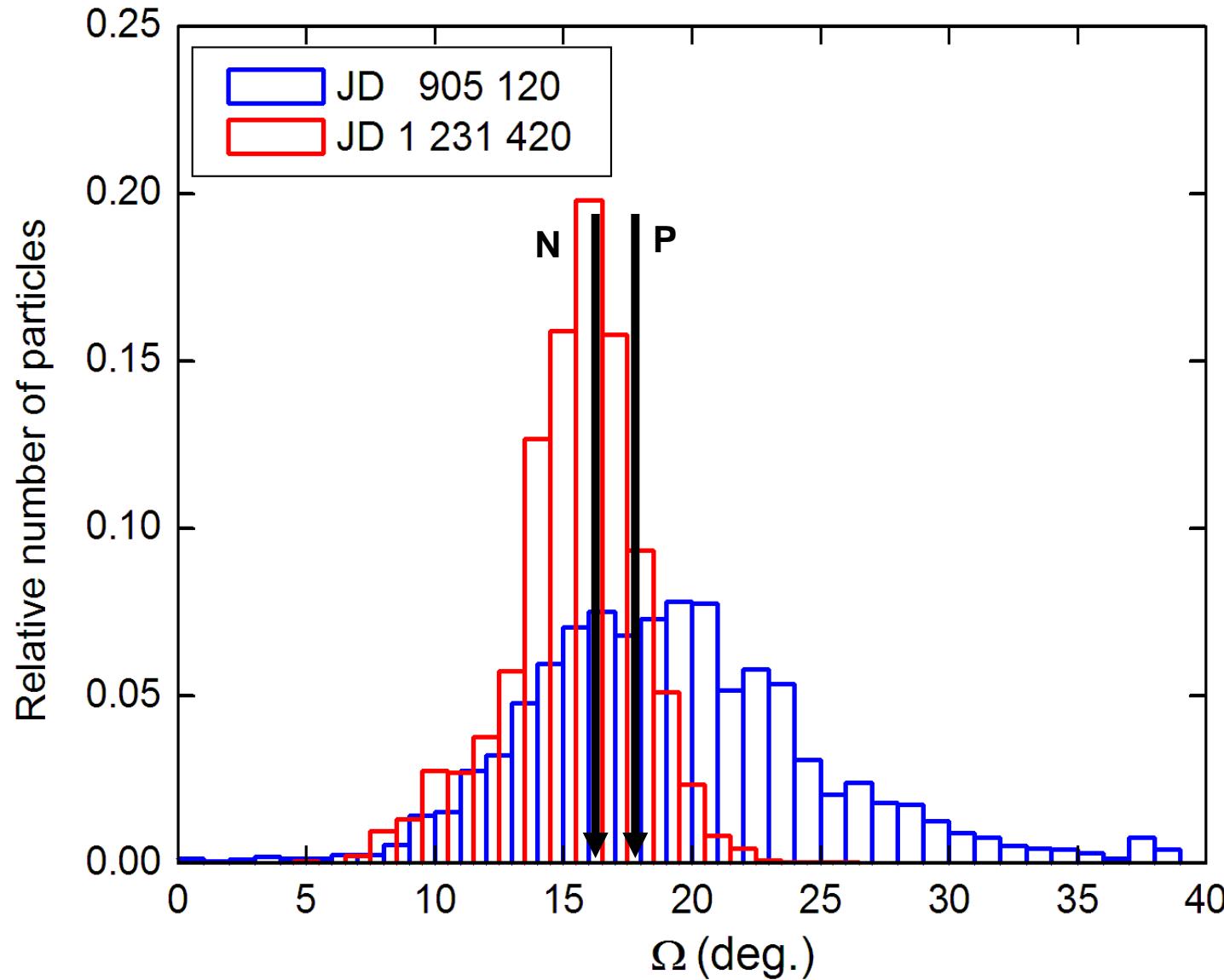
Distribution of Eccentricity



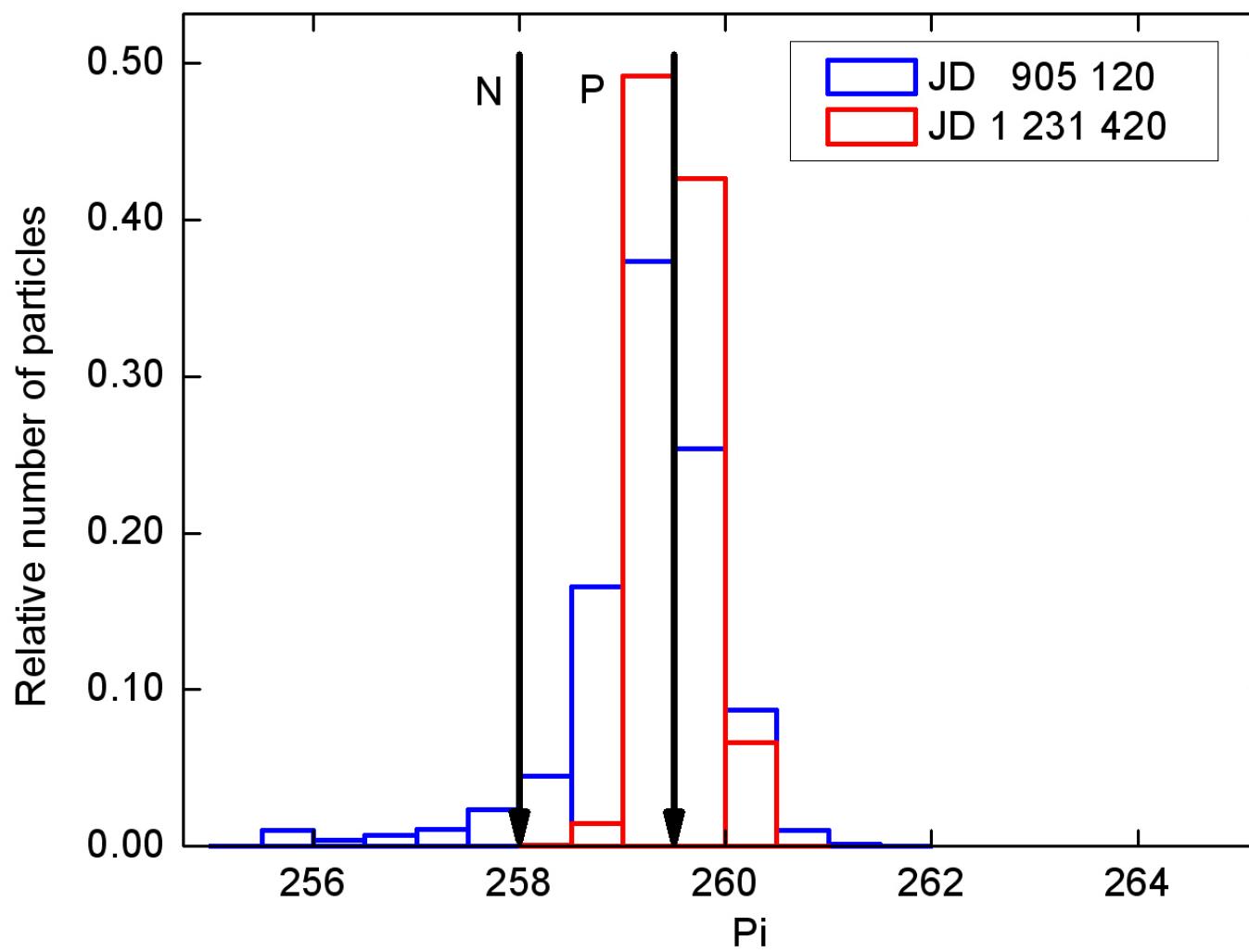
Distribution of Inclination



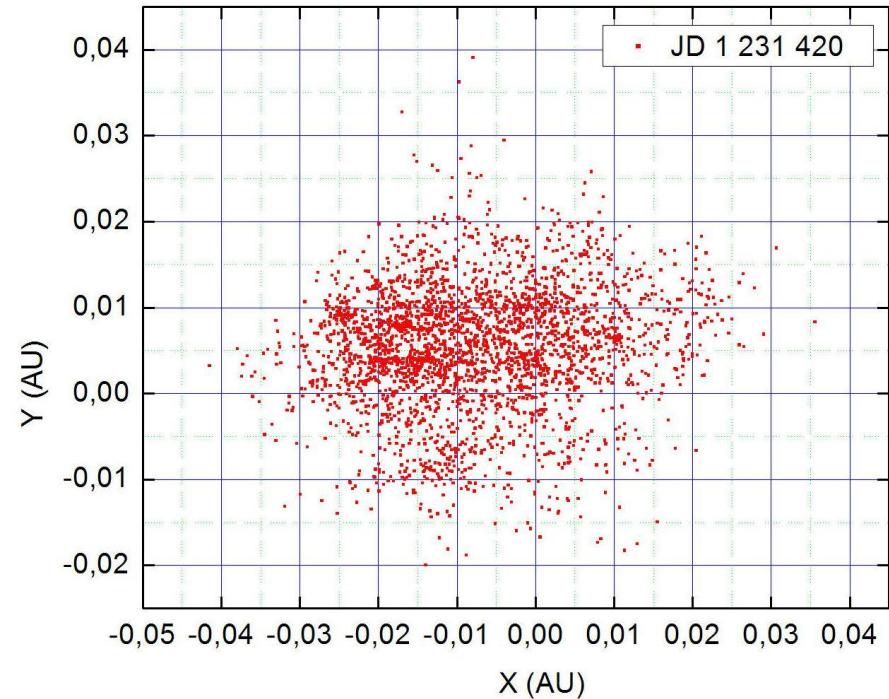
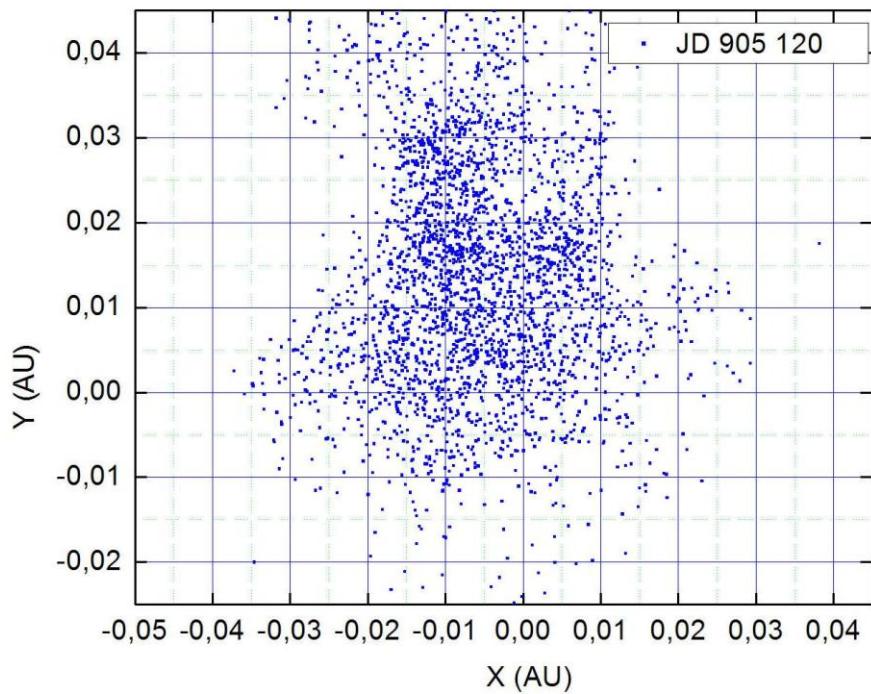
Distribution of Ascending Node

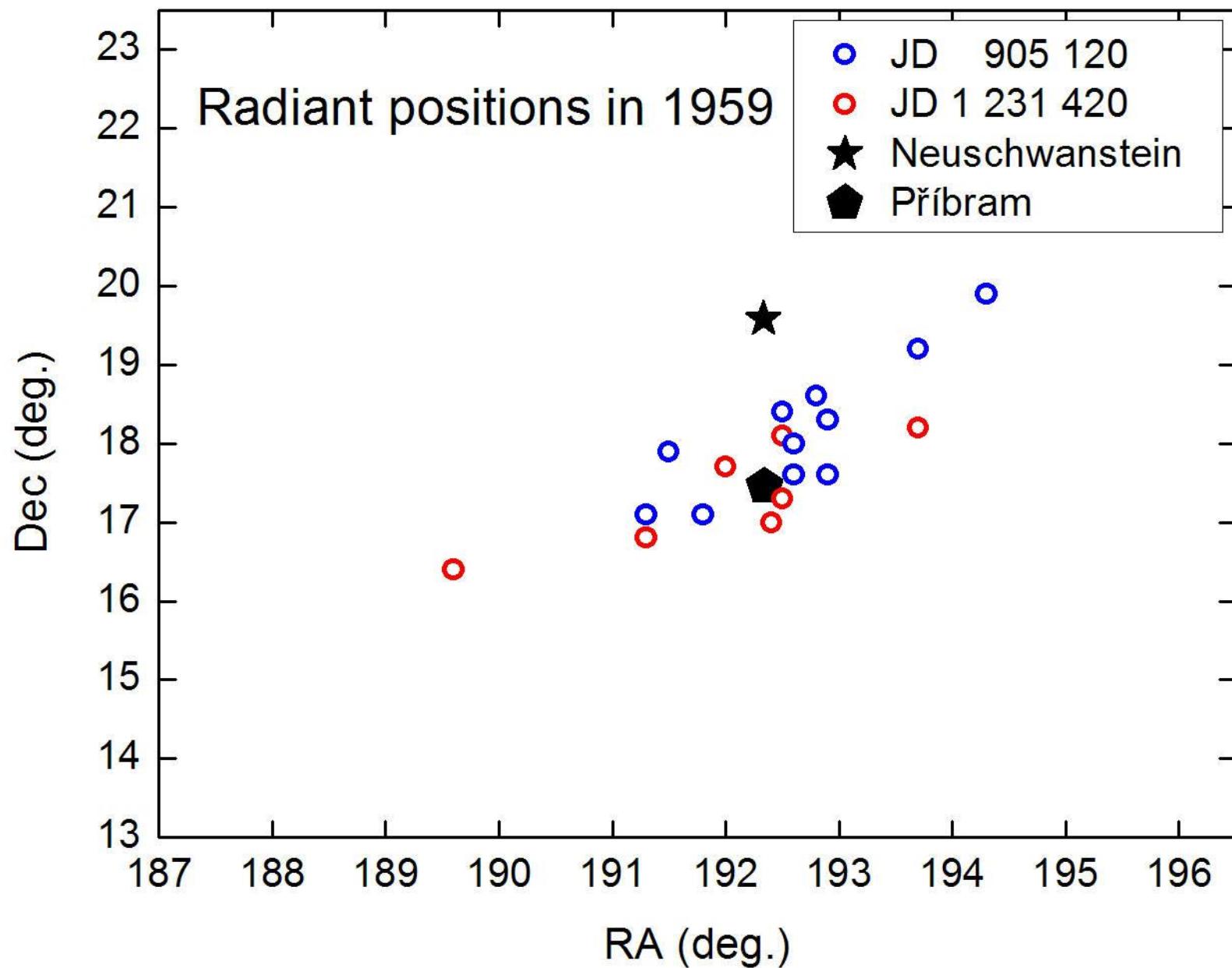


Distribution of Longitude of perihelion



Target plain of Příbram stream





Particles from Itokawa like asteroid

$$N(> D) = BD^{-2,8}$$

$$M = - \int_{0,01}^{30} 2,8BD^{-3,8}m(D, \rho)dD$$

- $\rho = 3250 \text{ kg m}^{-3}$, 40% porosity
- number of particles $D \geq 1 \text{ m}$ 9.5×10^5
- number of particles $D \geq 1 \text{ cm}$ $3,8 \times 10^{11}$

(Saito et al., 2006)

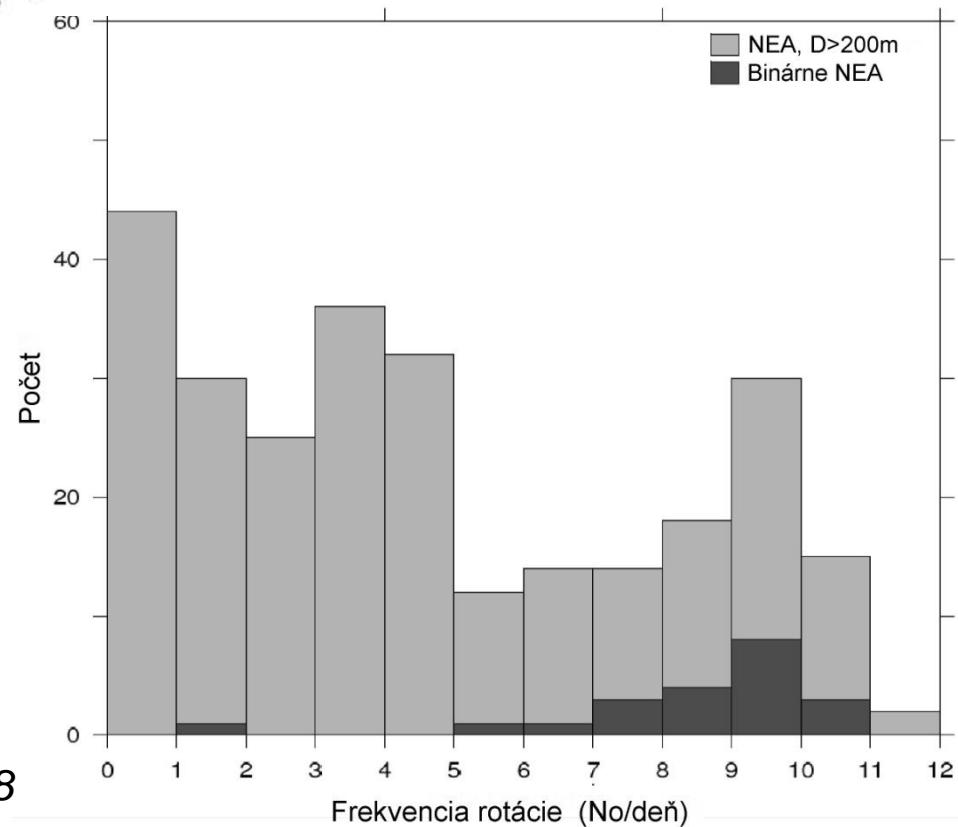
Contribution of asteroid rotation

$$\frac{F_{tidal}}{F_{impact}} = \frac{\sum_i P_{intr} N_{D(i)} \pi R_{Roche(i)}^2 (1 + \frac{v_{esc(i)}^2}{v_\infty^2})}{P_{intr} N_D \pi R_\oplus^2 (1 + \frac{v_{esc,\oplus}^2}{v_\infty^2})}$$

$D(>200m) \Rightarrow 1$ per $\sim 11\ 000$ y
(within $2R_{Earth}$)

$$\frac{F_{tidal}}{F_{impact}} \sim 7$$

Pravec et al. 2008



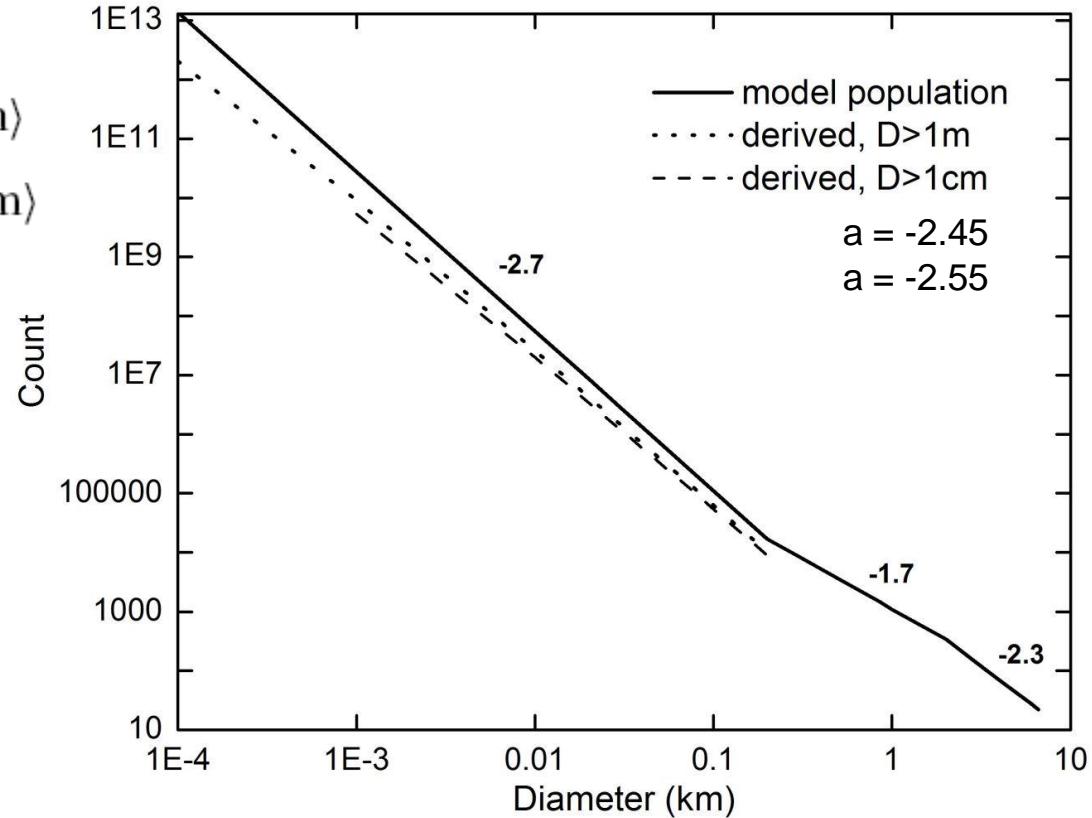
Contribution of tidal disruption

mean life time $\sim 4 \times 10^6$ y

$$N(> D) = BD^{-1.7}; D \subset (200 \text{ m}; 2 \text{ km})$$

$$N(> D) = BD^{-2.3}; D \subset (2 \text{ km}; 6.6 \text{ km})$$

$\sim 4\%$ tidal disruption



Stuart, Binzel (2004), Werner et al. (2002), Brown et al. (2002)

Logical consequence

IF every 43 years the fall of meteorite from the stream
(~ 0.6 m)

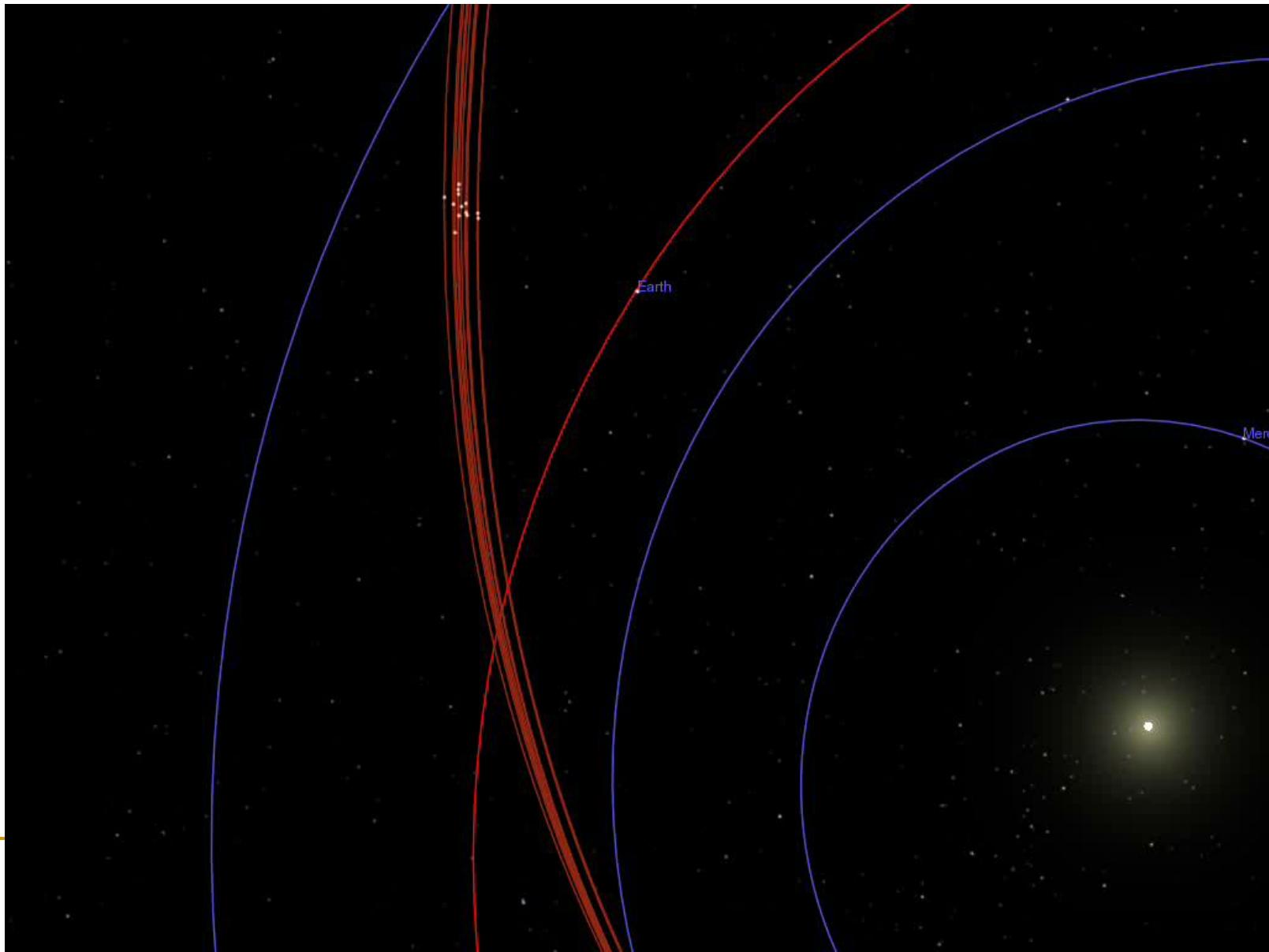
- global observation
 - parent body ~ 1 km (1 per 50-90 000 y)
 - ~ 1 meteor / hour
- identification of the stream is problematic

Ďakujem za pozornosť

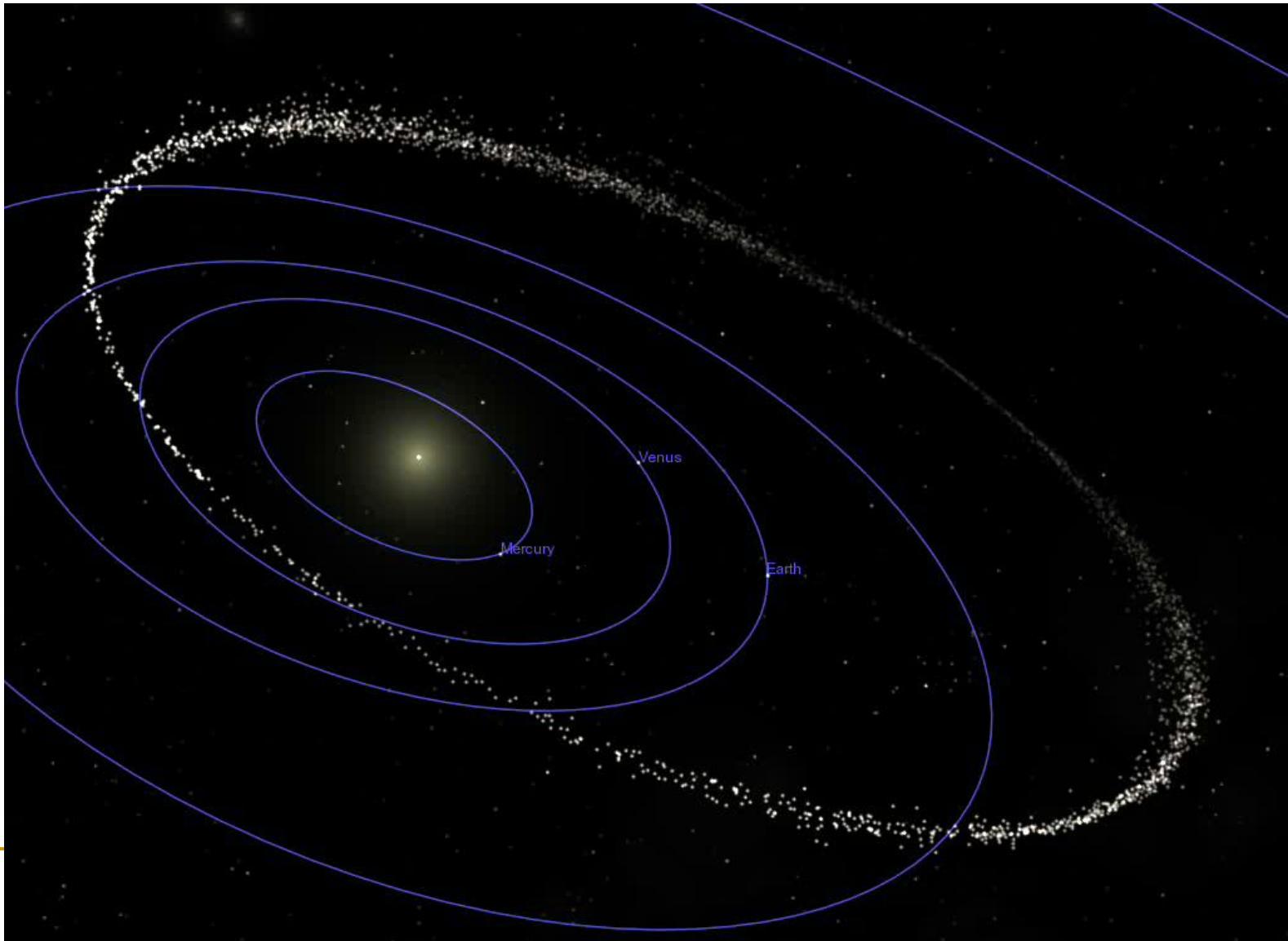




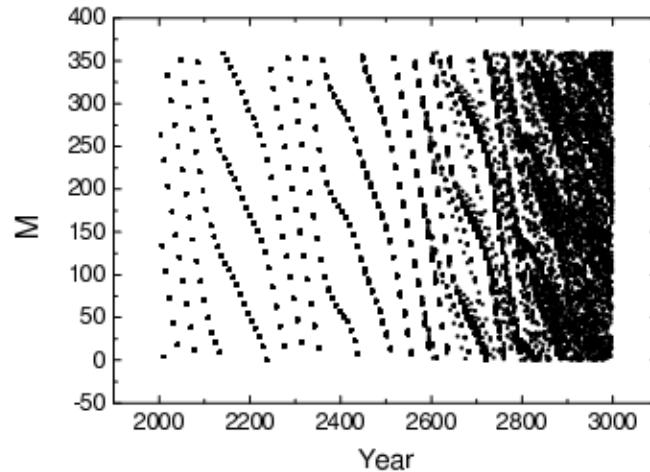
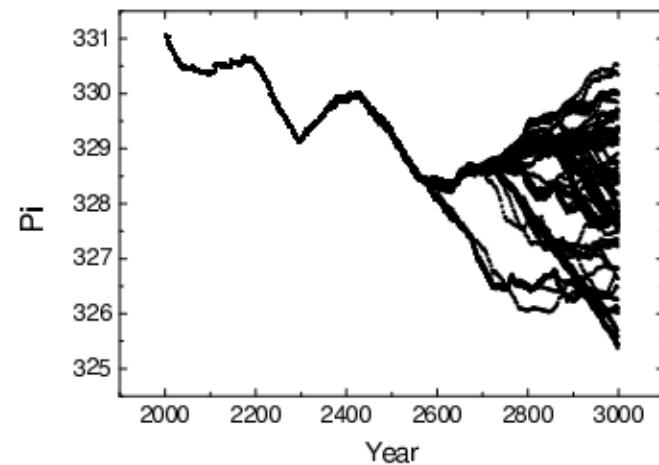
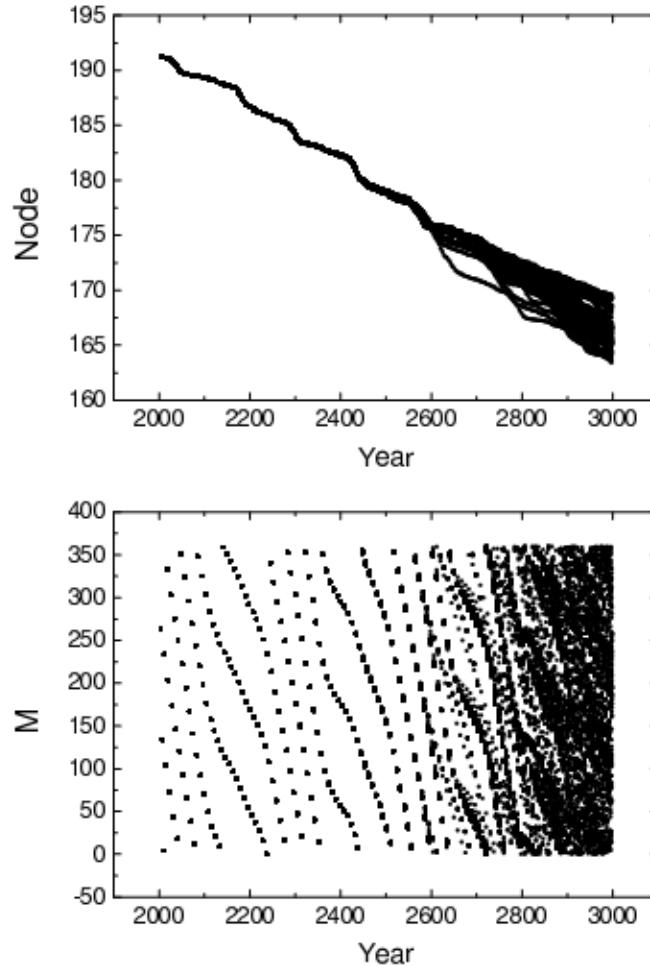
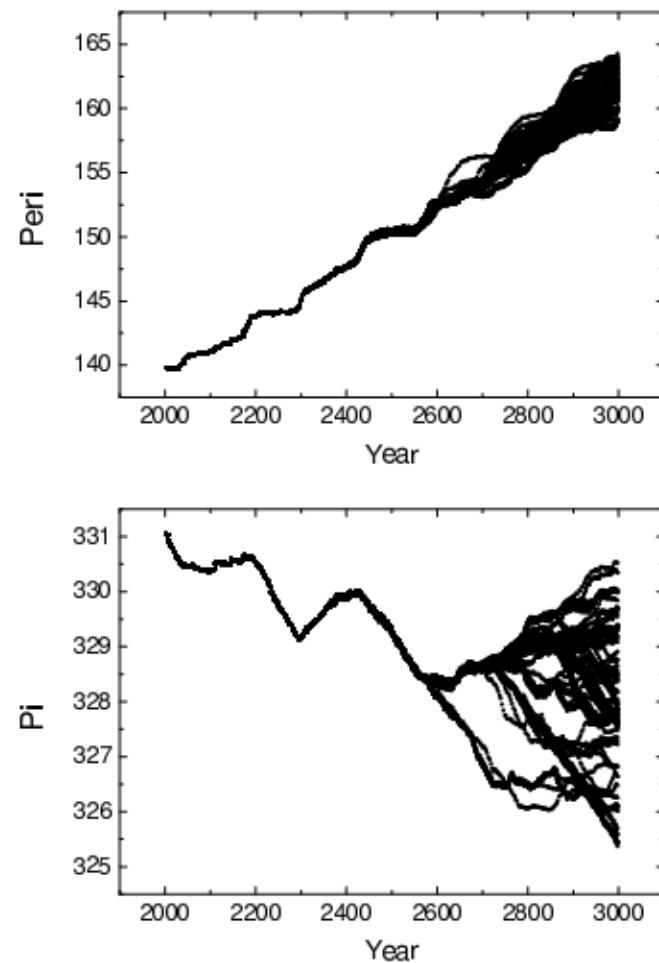
Video - 1959



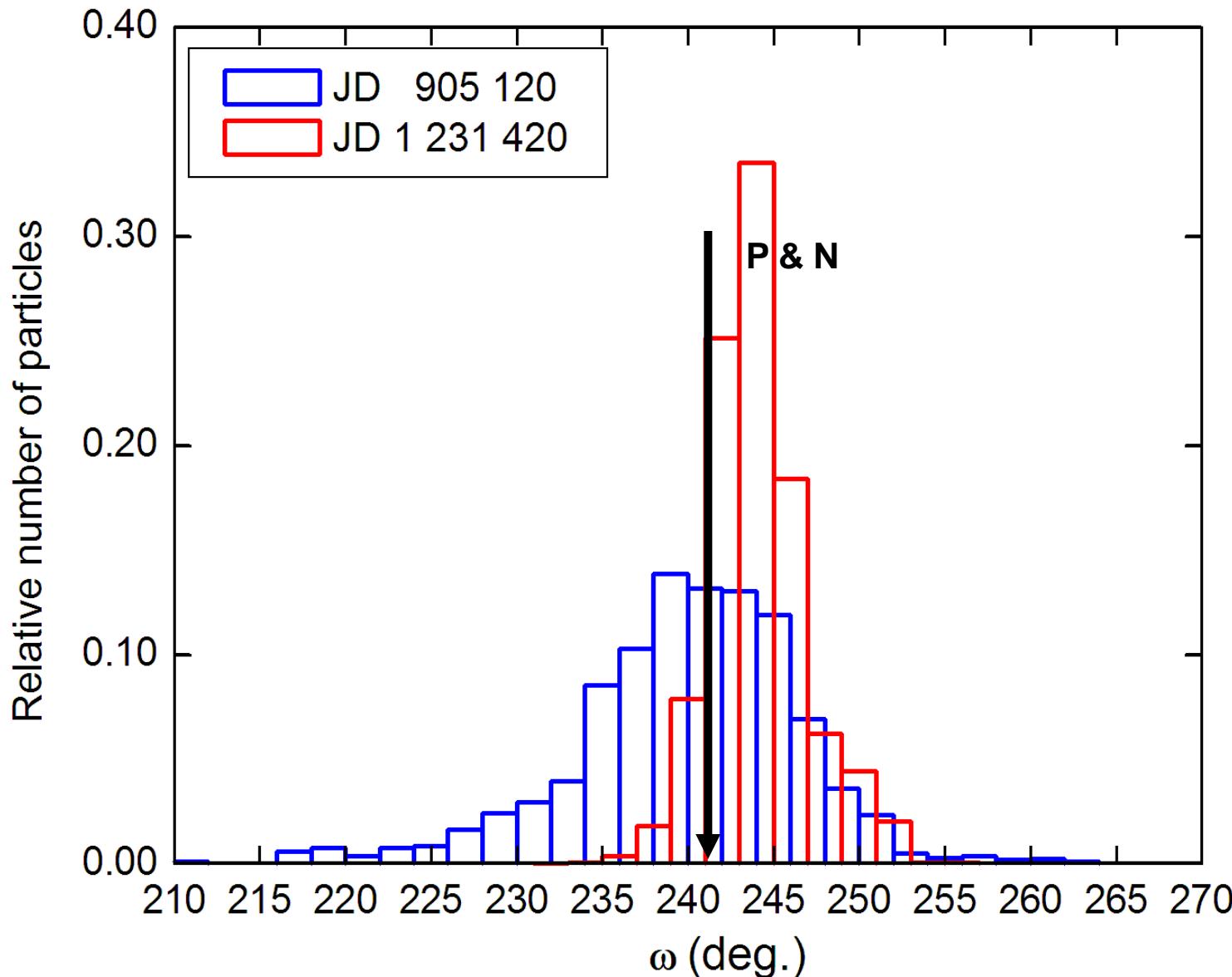
Video

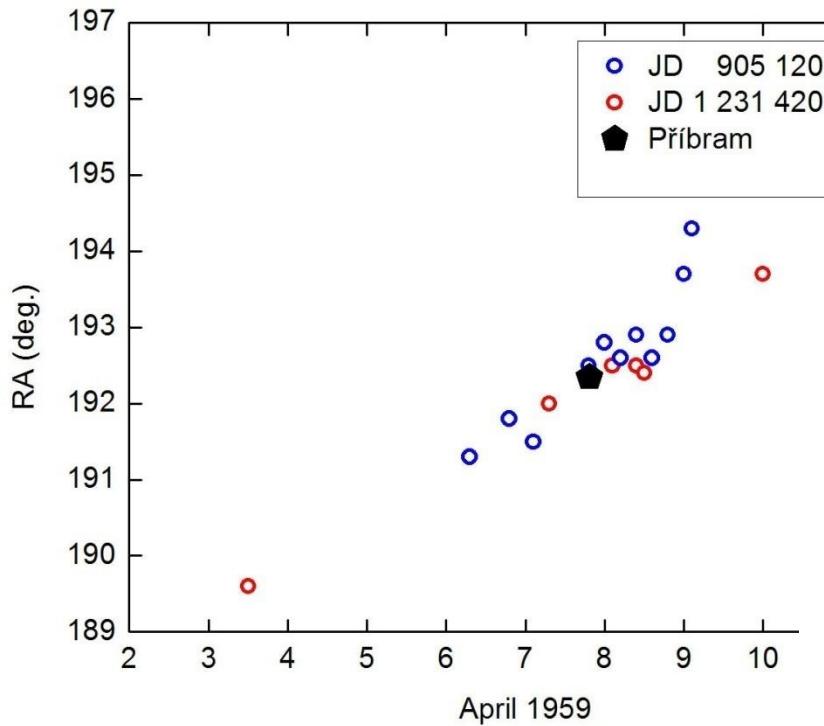


Orbital evolution of released stream



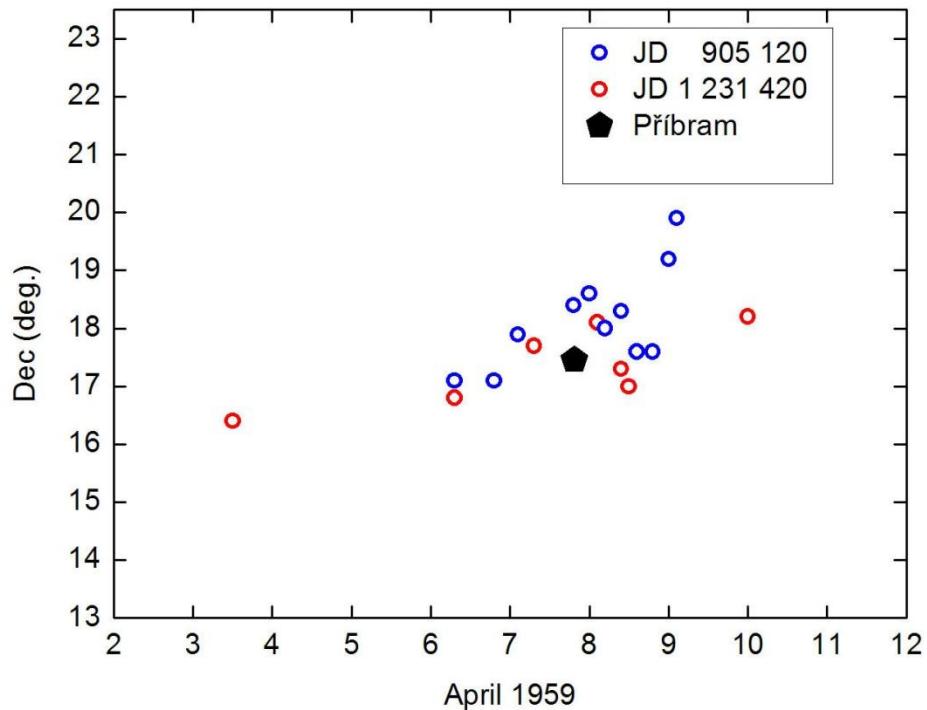
Distribution of Argument of perihelion





1959

Příbram



$$N(> D) = BD^{-1.7}; D \in \langle 200 \text{ m}; 2 \text{ km} \rangle$$

$$N(> D) = BD^{-2.3}; D \in \langle 2 \text{ km}; 6.6 \text{ km} \rangle$$

Tidal disruption of NEAs – a case of Příbram and Neuschwanstein

Tóth, J., Vereš, P. and Kornoš, L.

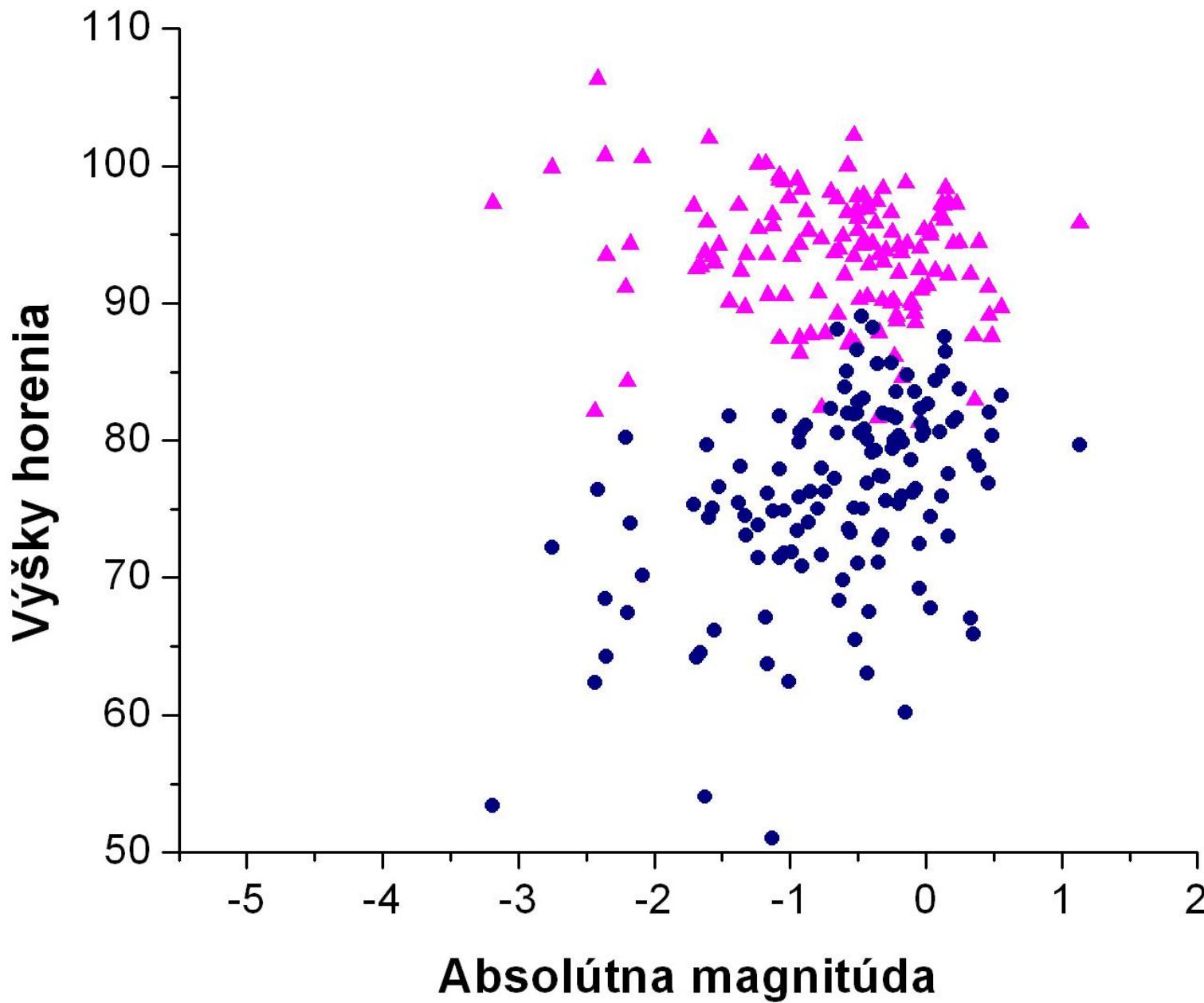
**Department of Astronomy, Physics of the Earth and Meteorology
Faculty of Mathematics, Physics and Informatics,
Comenius University in Bratislava,
Slovak Republic**

Logical consequence

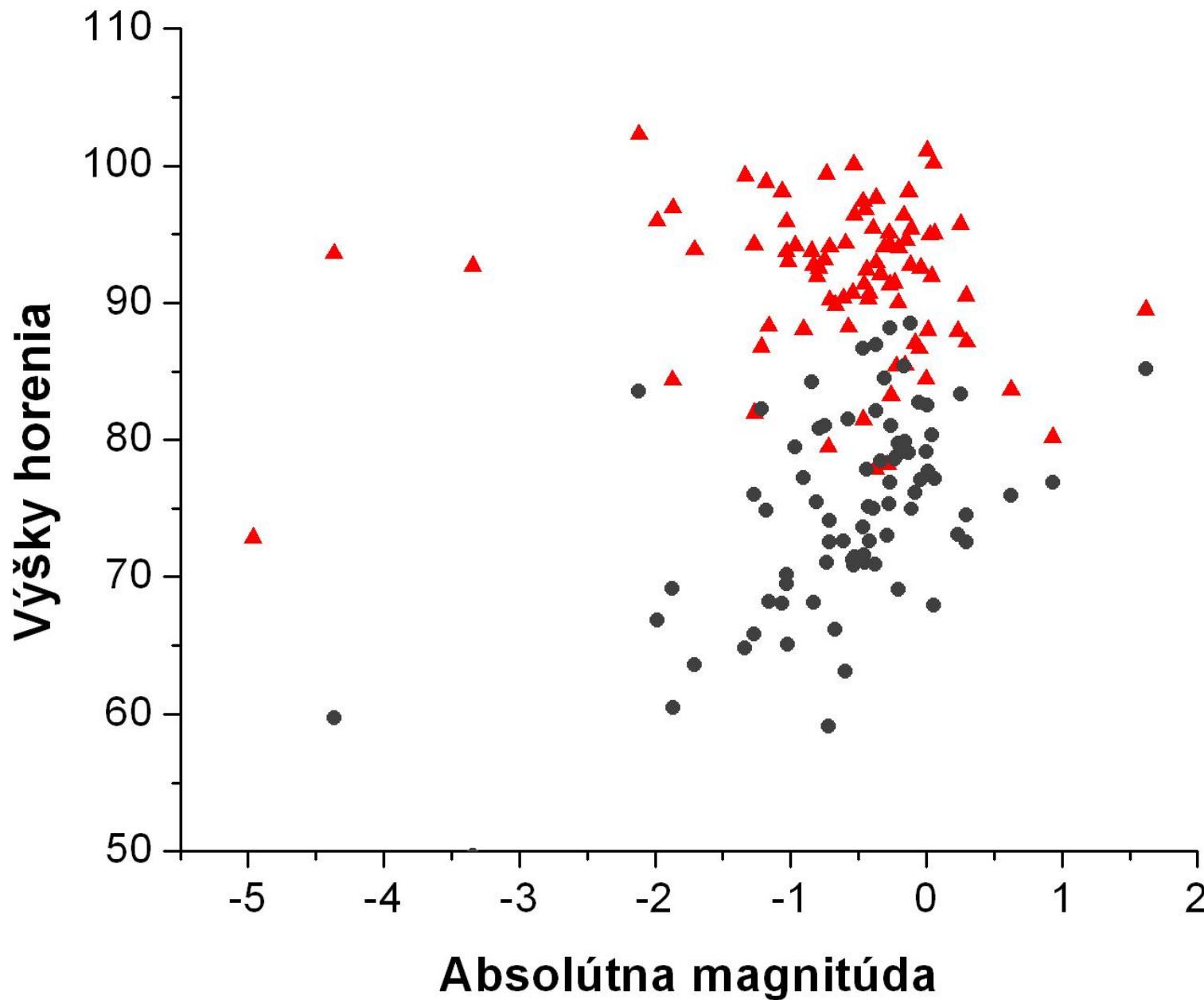
IF every 43 years the fall of meteorite from the stream

- observed by EN :
 - parent body have to be several *km* in diameter
 - meteor activity is not observed
- global observation
 - parent body < 1 km (1 per 50-90 000 y)
 - < 1 meteor / hour
- identification of the stream is problematic

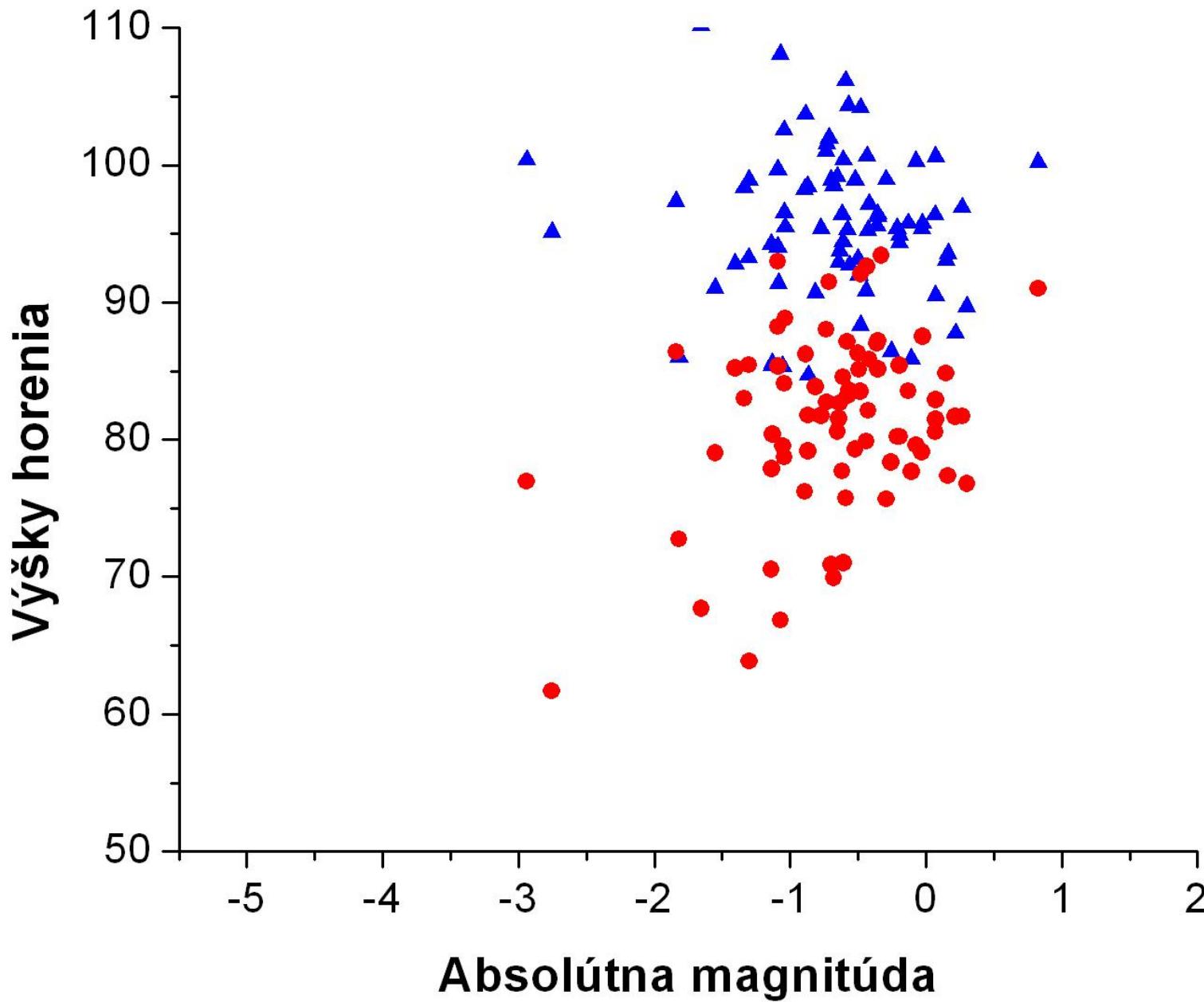
ORN



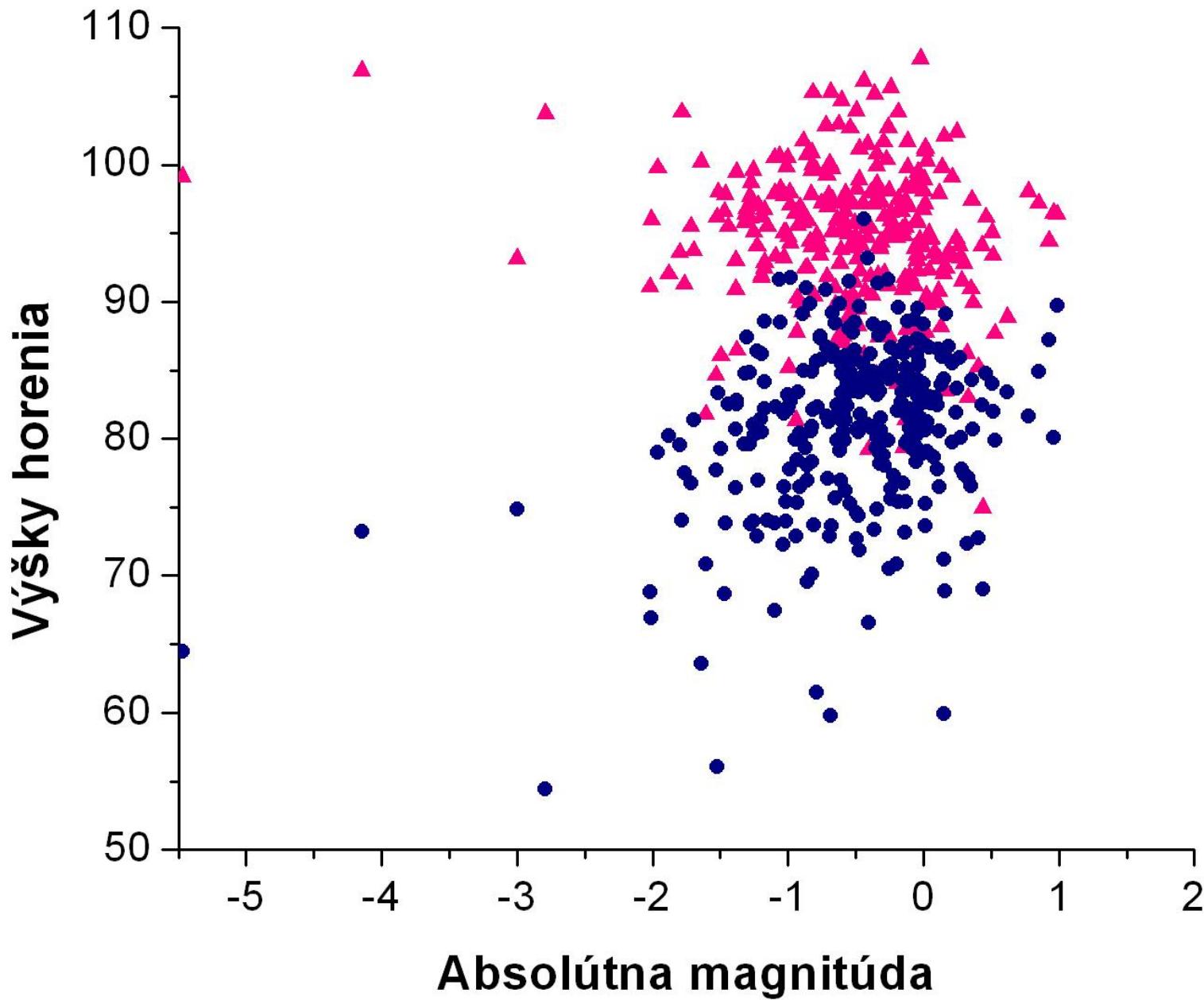
ORS



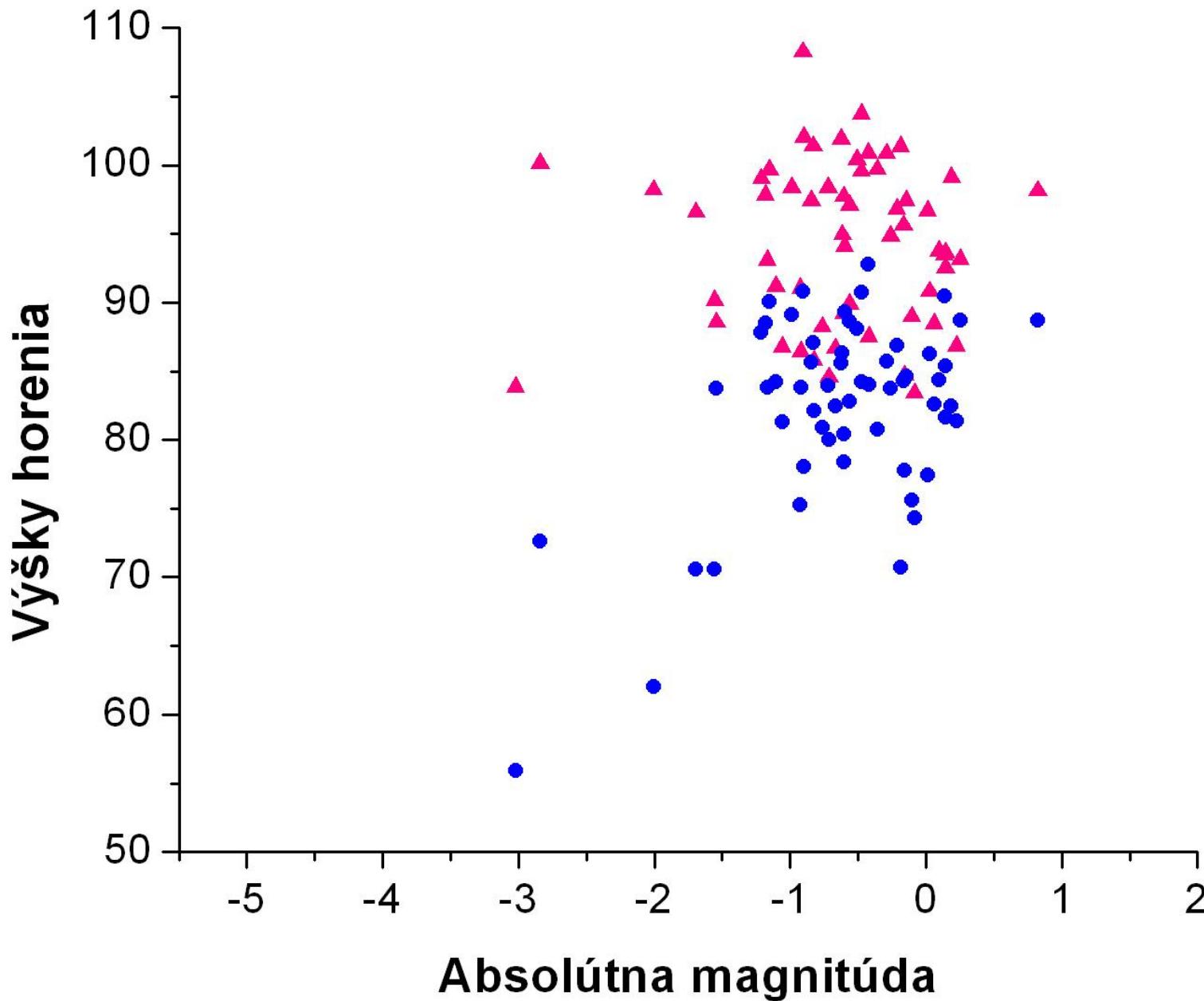
NOA



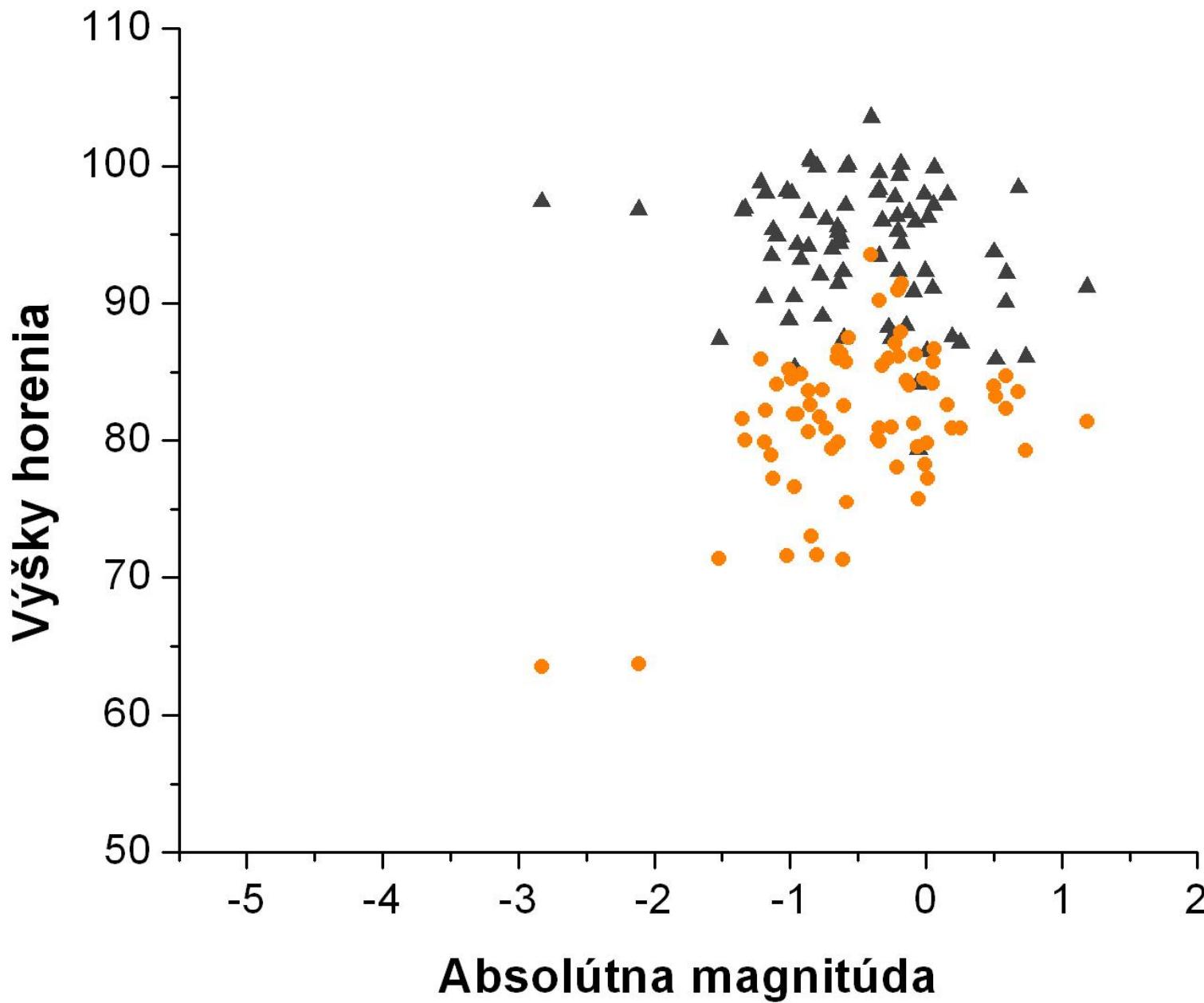
SOA



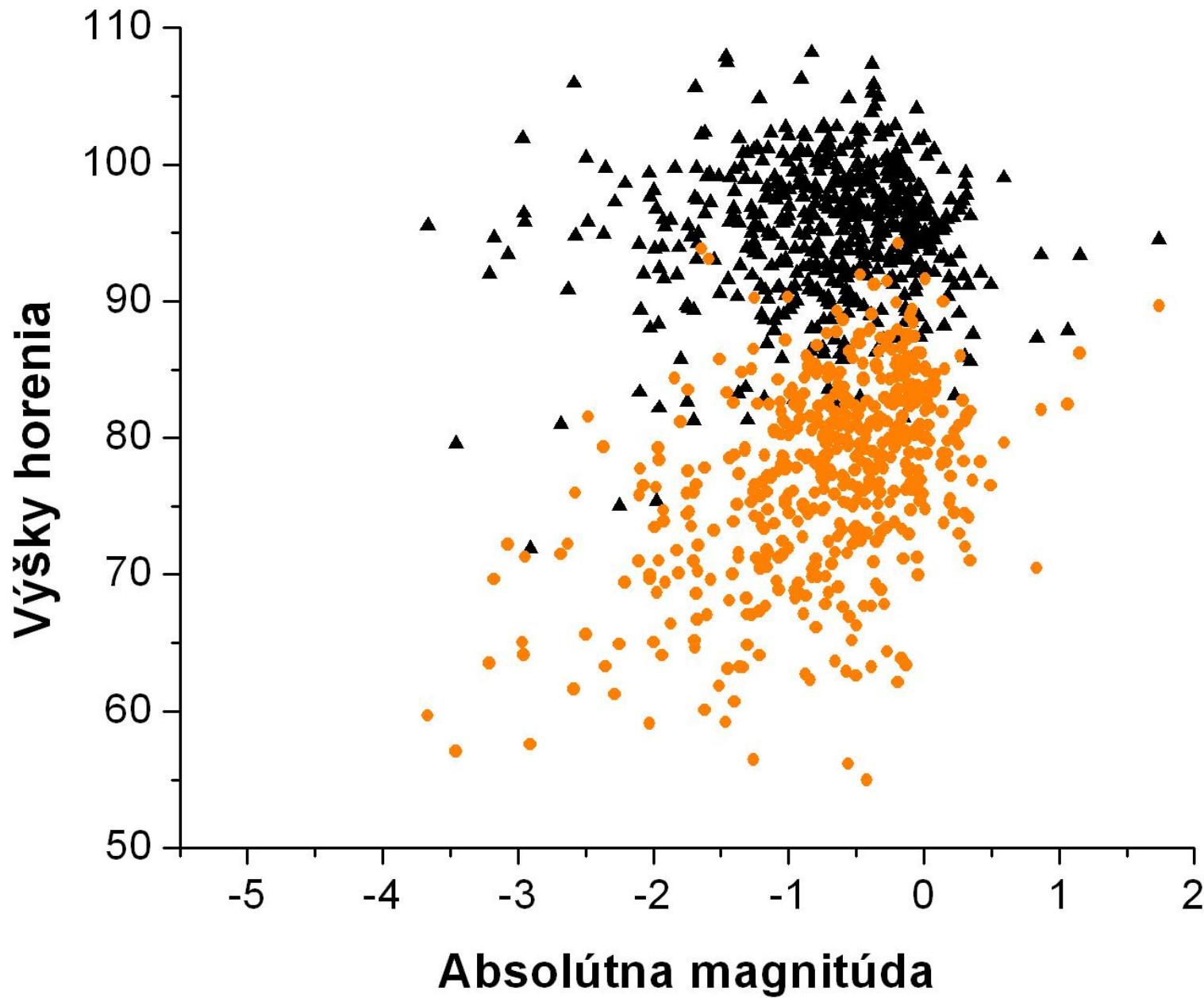
NPI



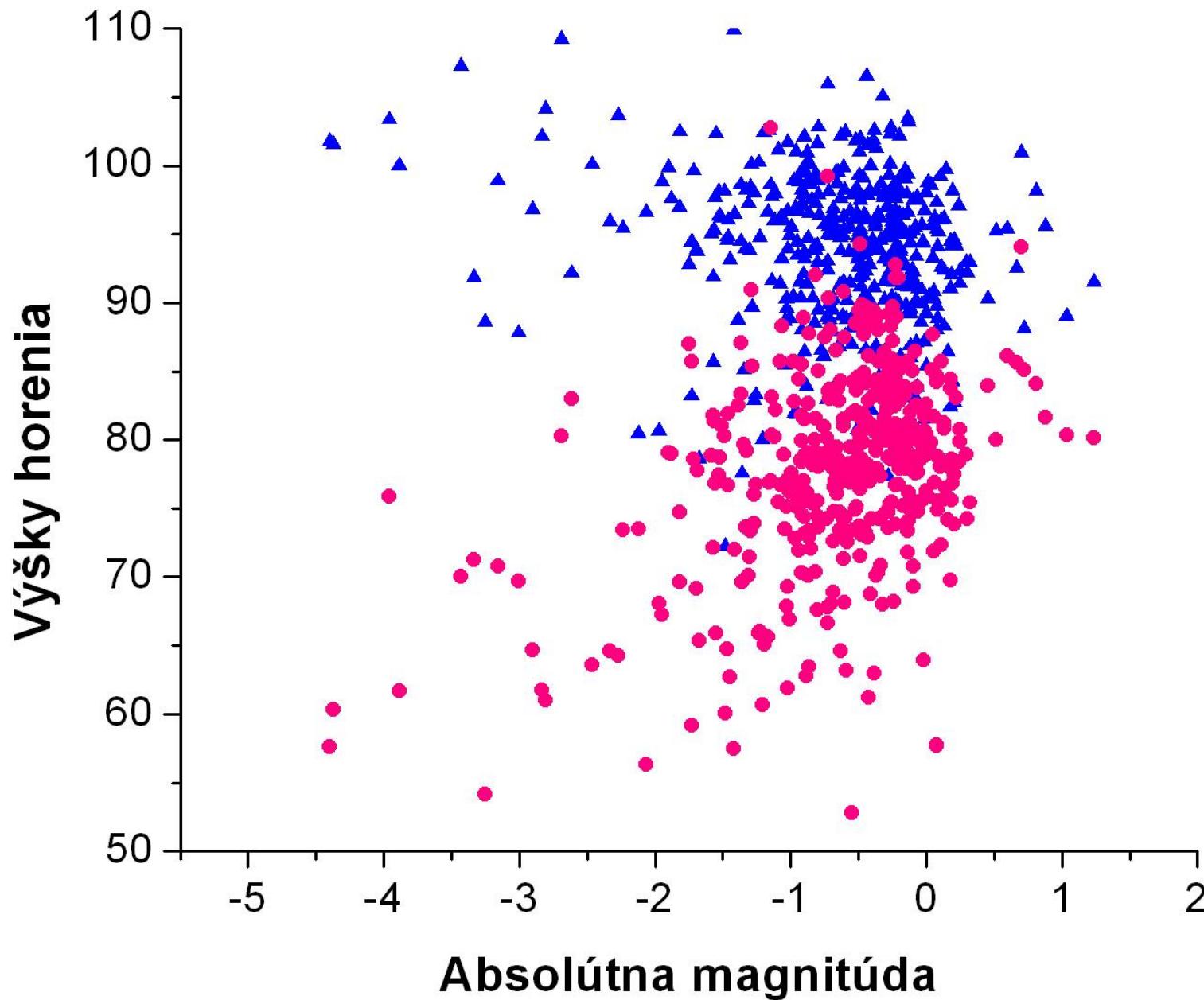
SPI

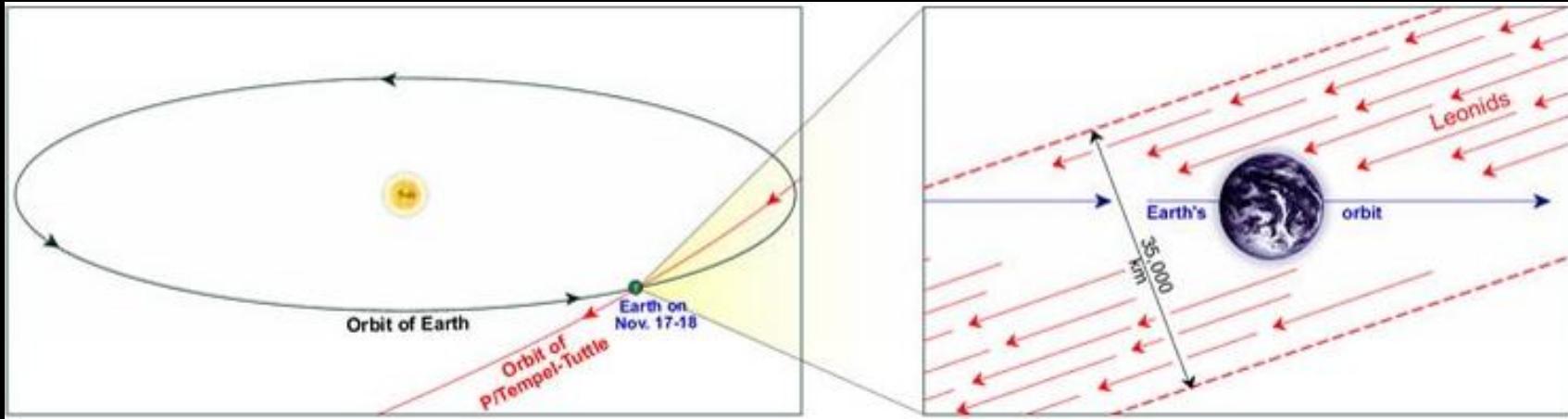


NTA

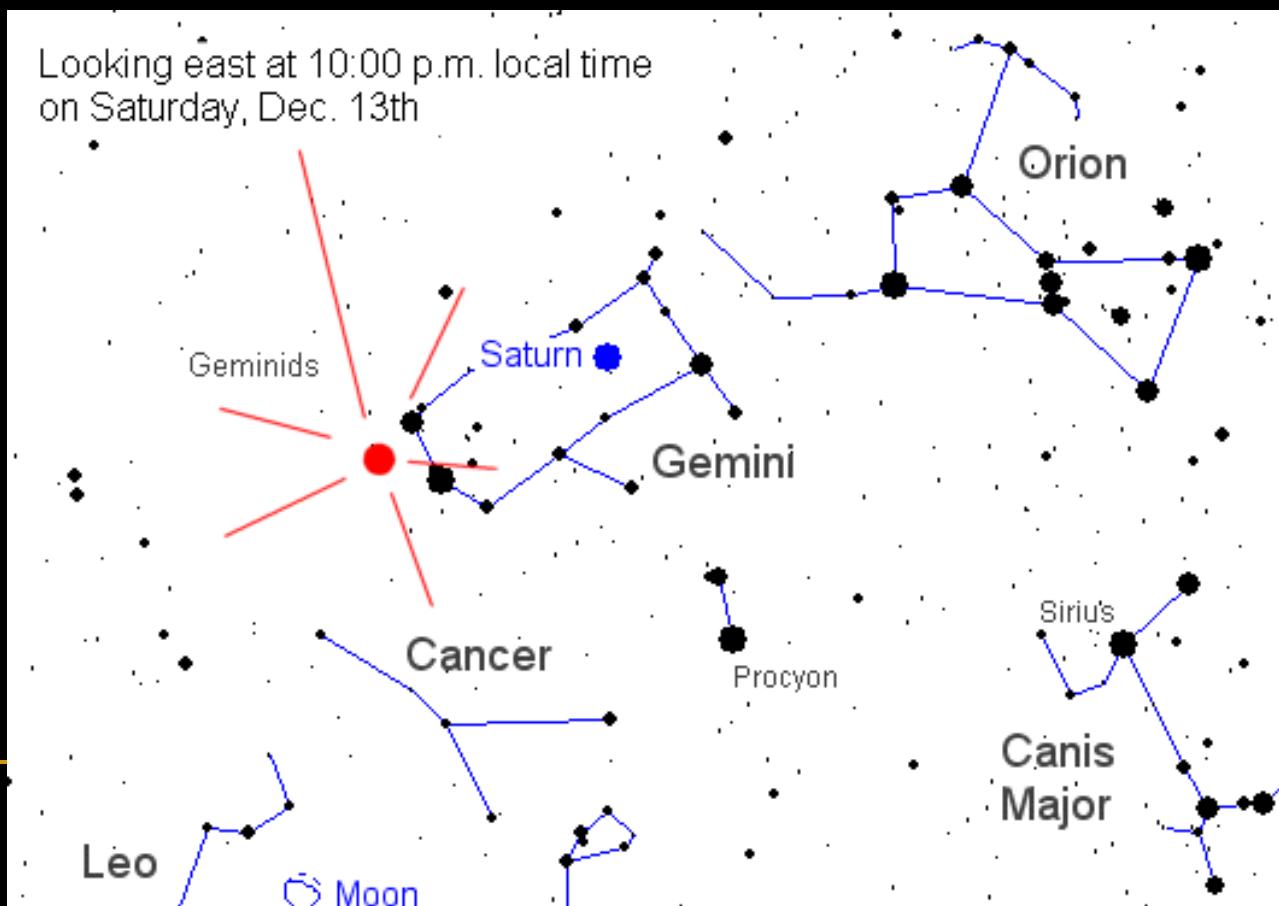


STA





Looking east at 10:00 p.m. local time
on Saturday, Dec. 13th



Dráhový vývoj filamentov

- každý filament → 18 testovacích častíc v strednej dráhe
- dráhový vývoj na 5000 r. do minulosti
 - bez negravitačných efektov (fotografické odolnejšie)
- Adams-Bashforth-Moulton, 12. rád, premenný krok
 - prediktor-korektor
- implementované efemeridy JPL DE406
 - roky -3000 až 3000
 - 8 planét, Zem – Mesiac samostatne

Typický dráhový vývoj

