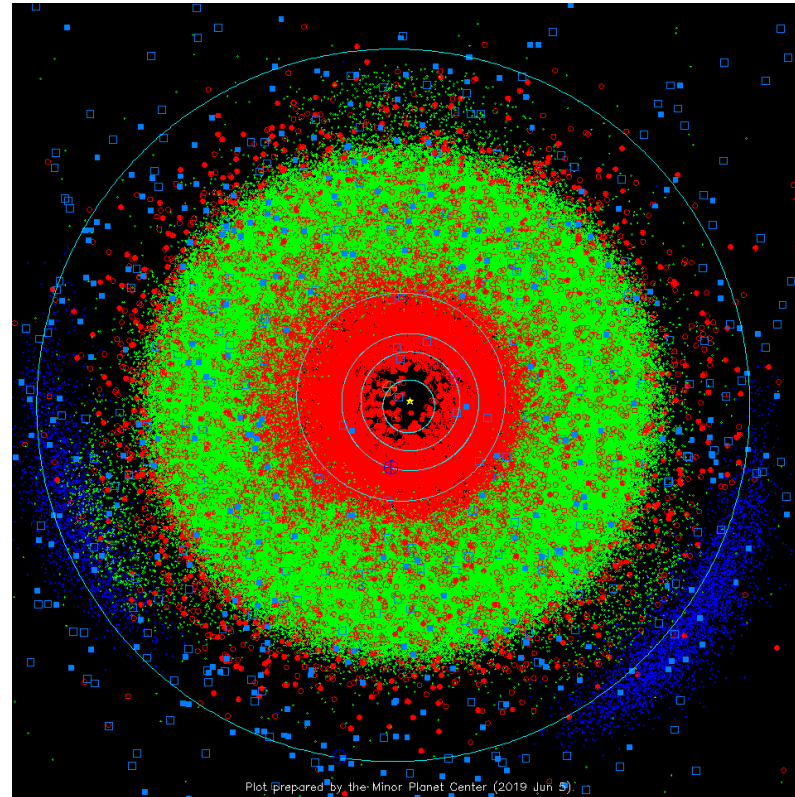
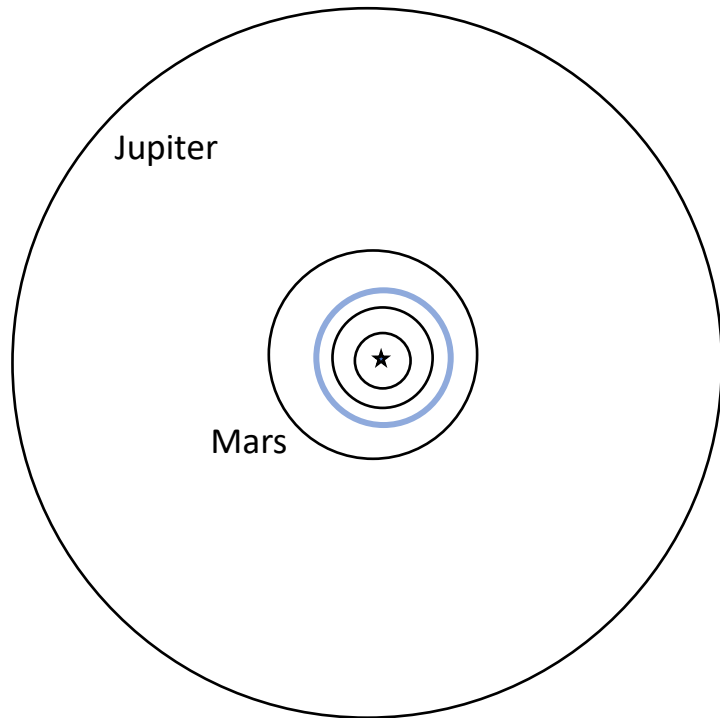


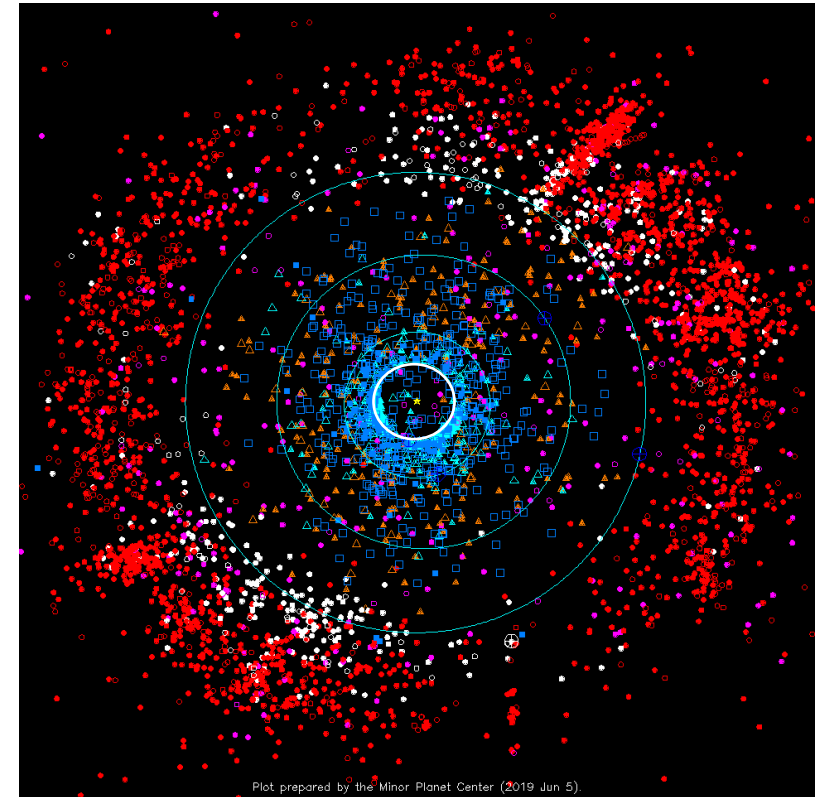
Rotational and physical properties of resonant minor planets

Adrian Bruno Şonka

OUR SOLAR SYSTEM

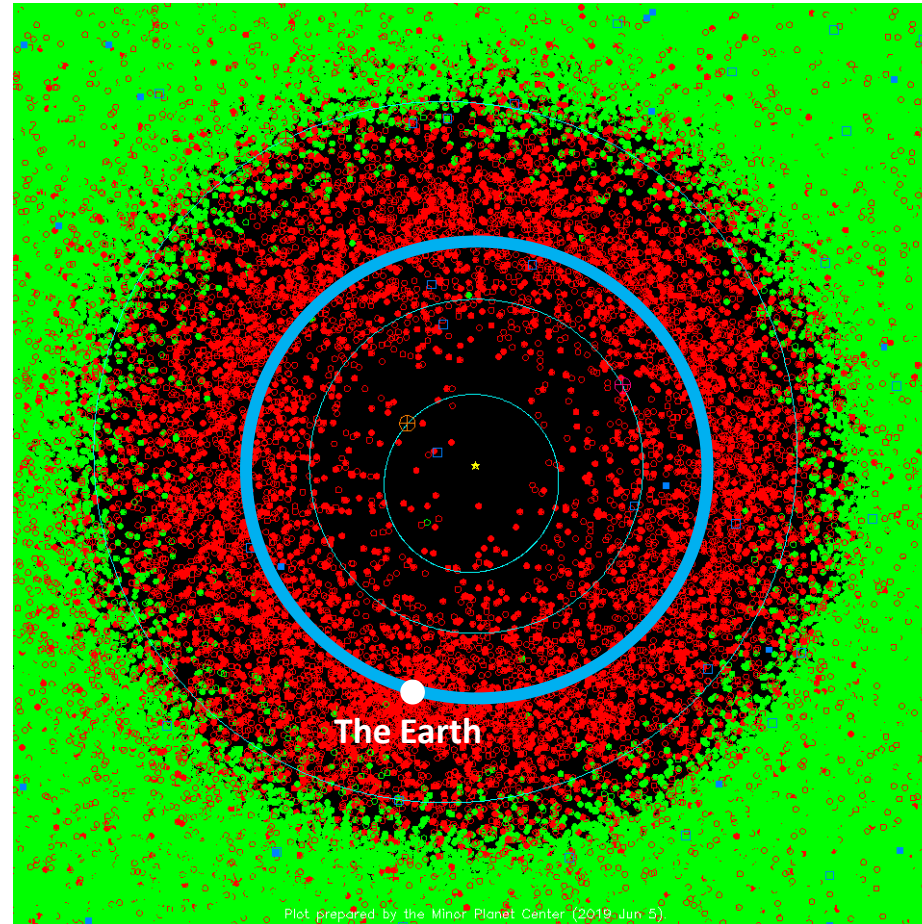


Inner solar system
Main belt asteroids: 1 092 980



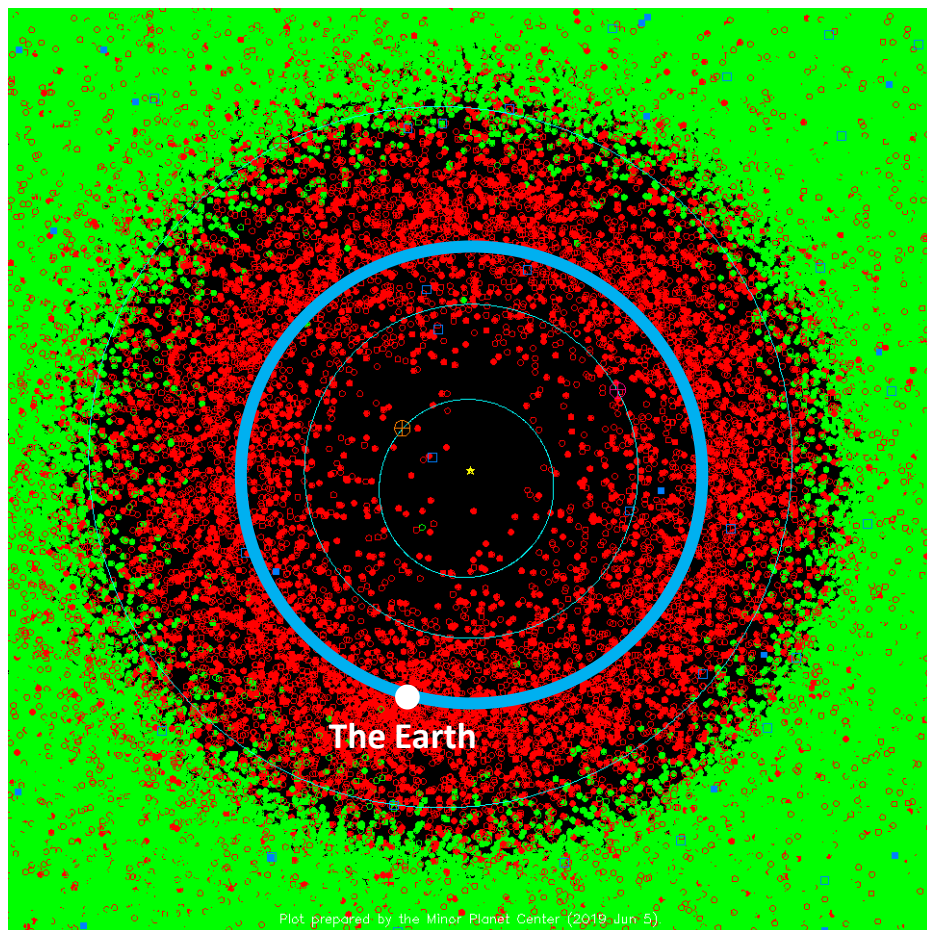
Outer solar system
Trans neptunian asteroids: 4686

OUR SOLAR SYSTEM



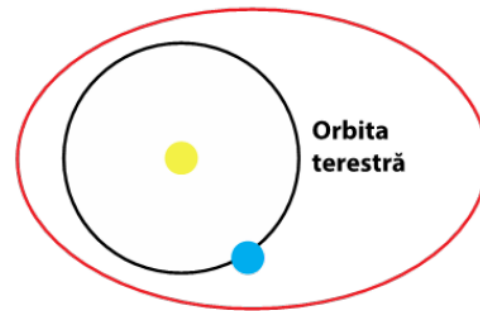
Inner solar system
Near Earth Asteroids – 28464
(as of 08.03.2022)

OUR SOLAR SYSTEM

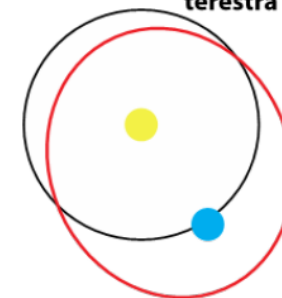


Inner solar system
Near Earth Asteroids – 28464
(as of 08.03.2022)

Orbită de asteroid geointersector de tip Amor

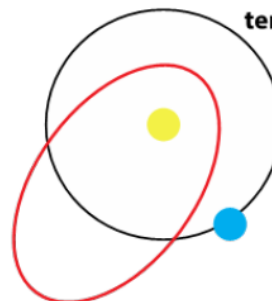


Orbita terestră



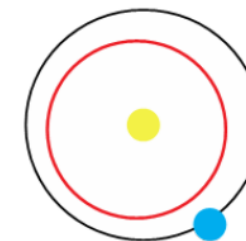
Orbită de asteroid geointersector de tip Apollo

Orbita terestră



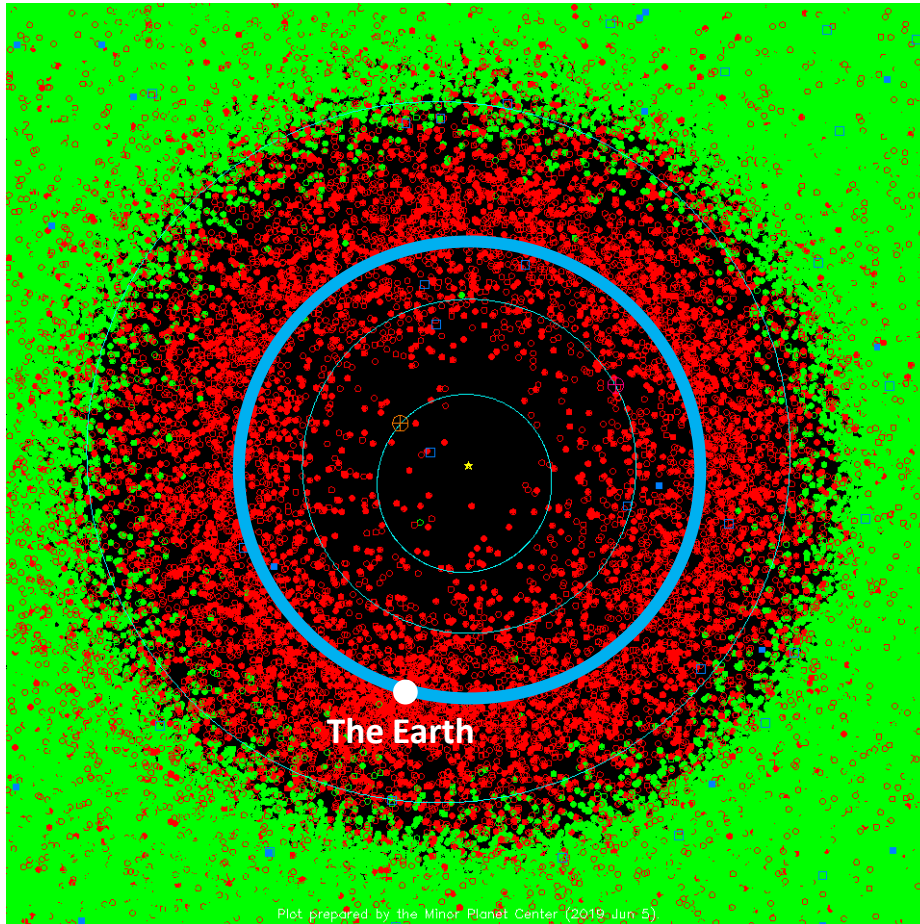
Orbită de asteroid geointersector de tip Aten

Orbită de asteroid geointersector de tip Atira



Orbita terestră

De unde vin asteroizii geointersectorii?



Inner solar system
Near Earth Asteroids – 28464
(as of 08.03.2022)

- Durata de viață a unui asteroid geointersector **nu este mare**
 - perturbații
 - apropieri
 - ciocniri
- Elementele orbitale **se modifică**: excentricitate și înclinarea orbitei
- Orbită haotică:
 - impact cu Soarele
 - expulzare din sistemul solar

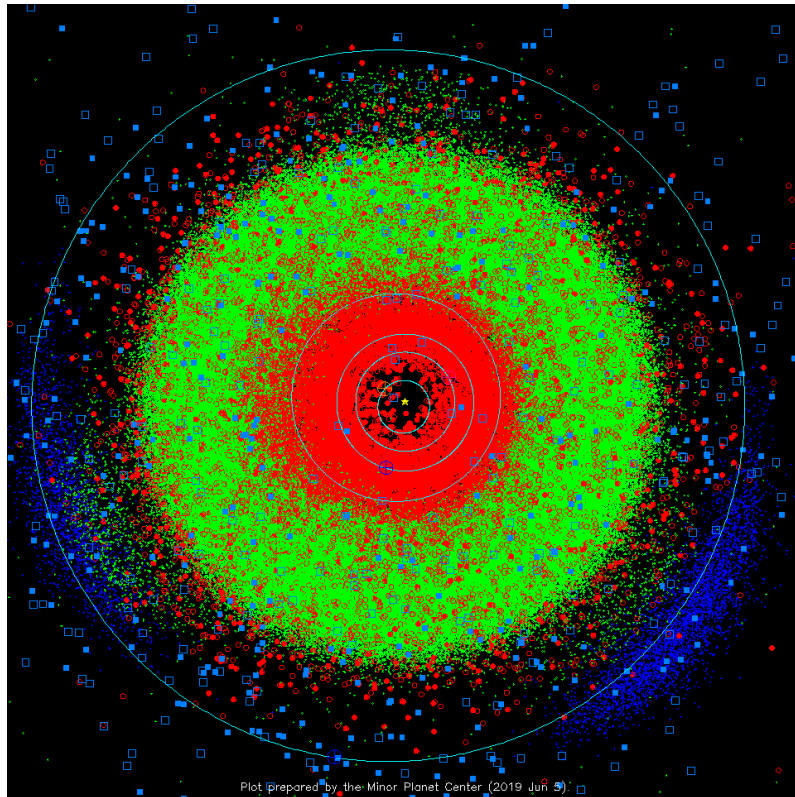
$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \cos i \sqrt{\frac{1 - e^2}{a_J/a}}$$

Parametrul Tisserand

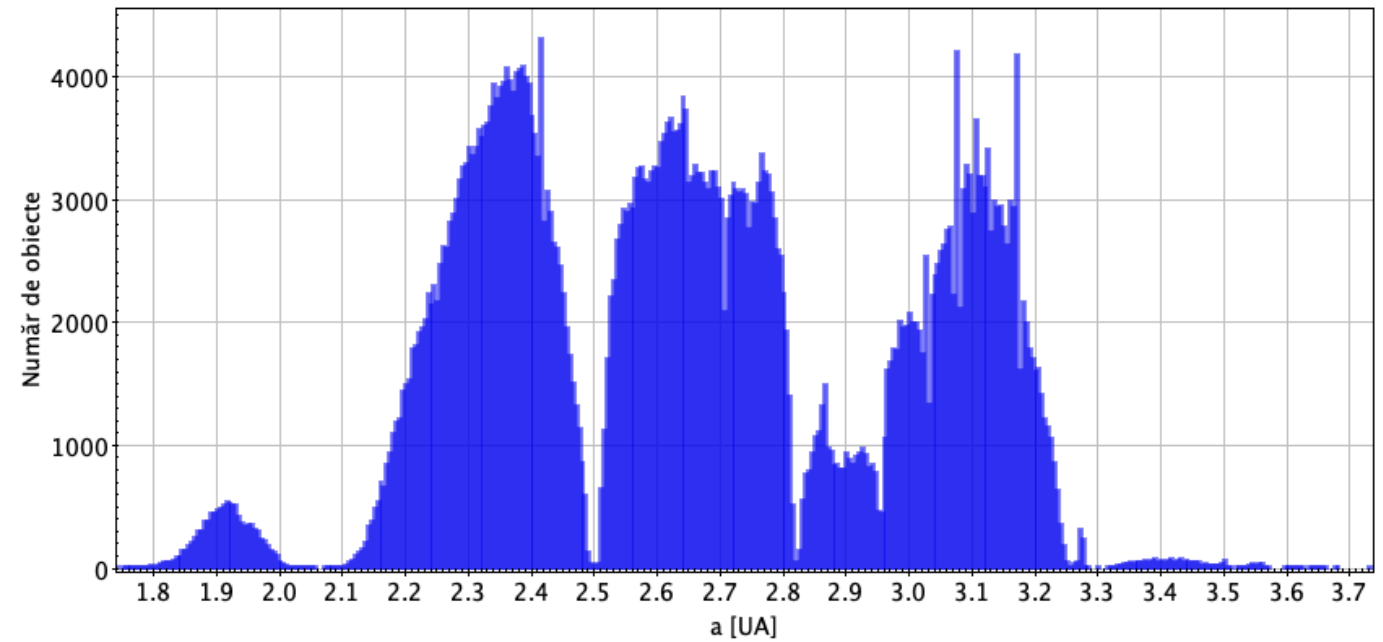
- Timp de viață între $0,1 - 2,2 \times 10^6$ ani
Gladman et al, 1997; Moons et al, 1998; Morbidelli and Moons, 1993

- Reiese că populația de asteroizi geointersectorii se consumă în timp, deci există o metodă prin care este **reîmprospătată**

OUR SOLAR SYSTEM

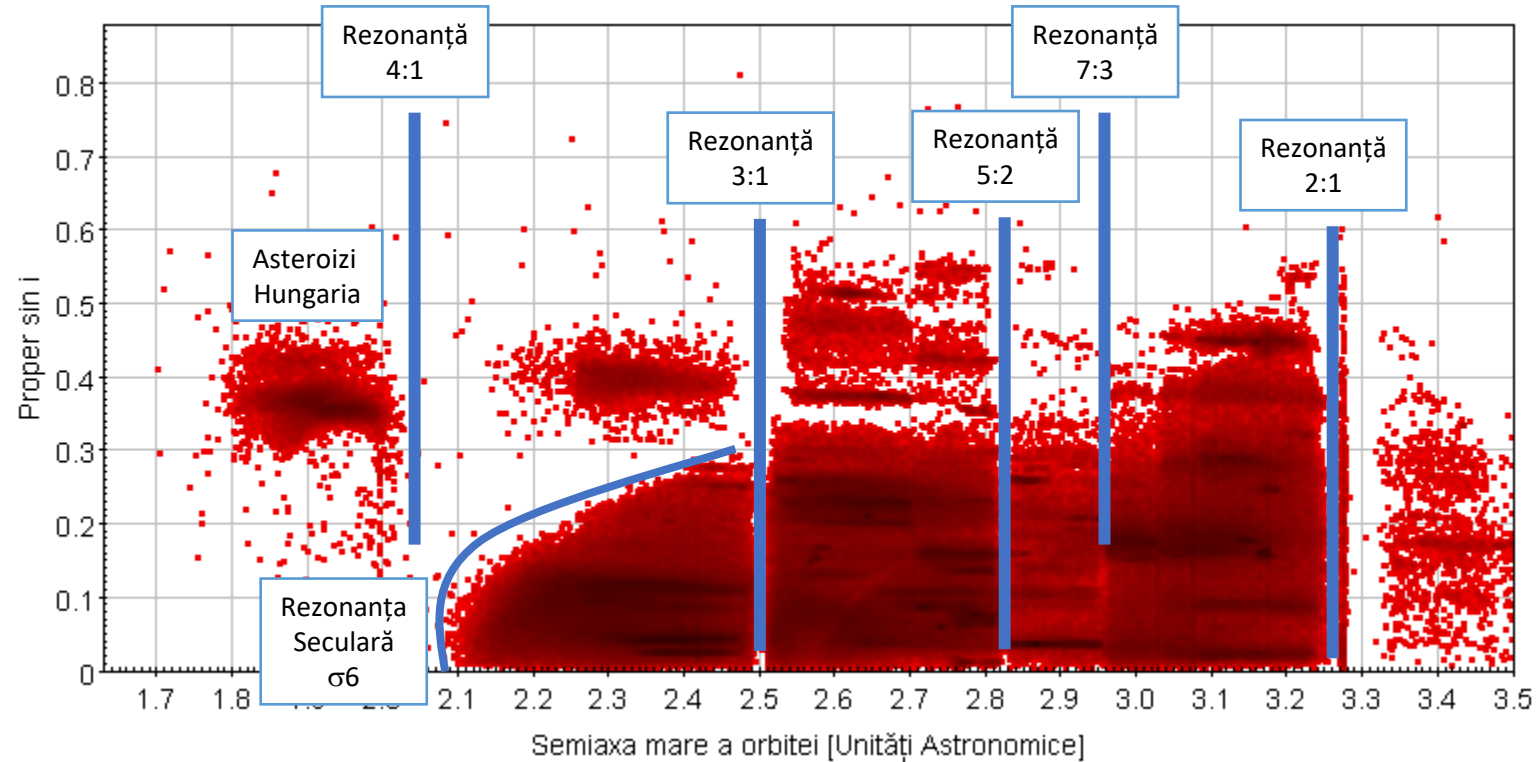


Inner solar system
Main belt asteroids: 1 092 980



Kirkwood Gaps – number of asteroids found at certain distances from the Sun

Centura principală de asteroizi



Centura de asteroizi – elemente proprii – rezonanțe

Date: ASTDYS

Calculul poziției rezonanțelor de mișcare medie

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM_\odot} \times a^3$$

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{4\pi^2}{GM_\odot} \frac{GM_\odot}{4\pi^2} \frac{a_p^3}{a_{MMR}^3}$$

$$a_{MMR} = a_p \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2/3}$$

Rezonanță	Semiaxa mare a orbitei
$P_{asteroid} : P_{Jupiter}$	[UA]
4:1	2,06
3:1	2,5
5:2	2,82
7:3	2,95
2:1	3,27

Durata de viață în rezonanțele de mișcare medie

- 3:1

- Durată: 2×10^6 ani
- Transfer în zona geointersectoare: 1×10^6 ani
- Bottke et al., 2002; Gladman et al., 1997; Morbidelli et al., 2002; Morbidelli and Moons, 1993

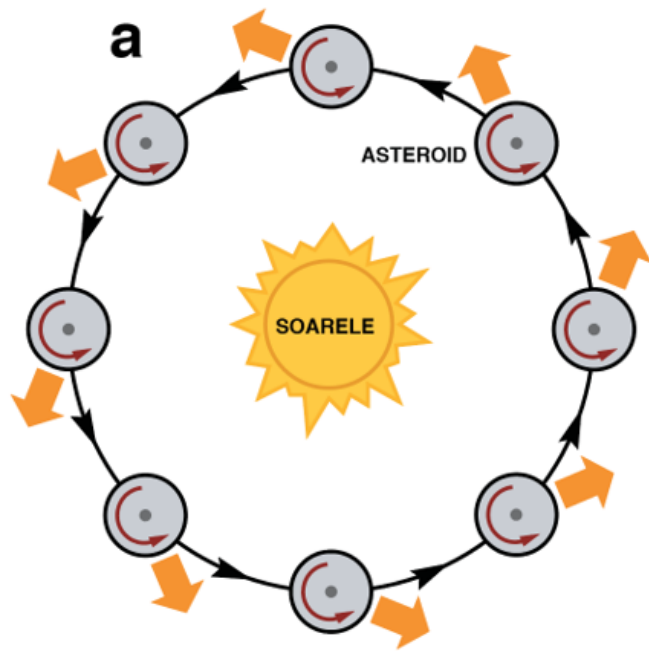
- 5:2

- Durată: $0,5 \times 10^6$ ani
- Transfer în zona geointersectoare: $0,3 \times 10^6$ ani
- Bottke et al., 2002; Gladman et al., 1997; Morbidelli et al., 2002; Morbidelli and Moons, 1993

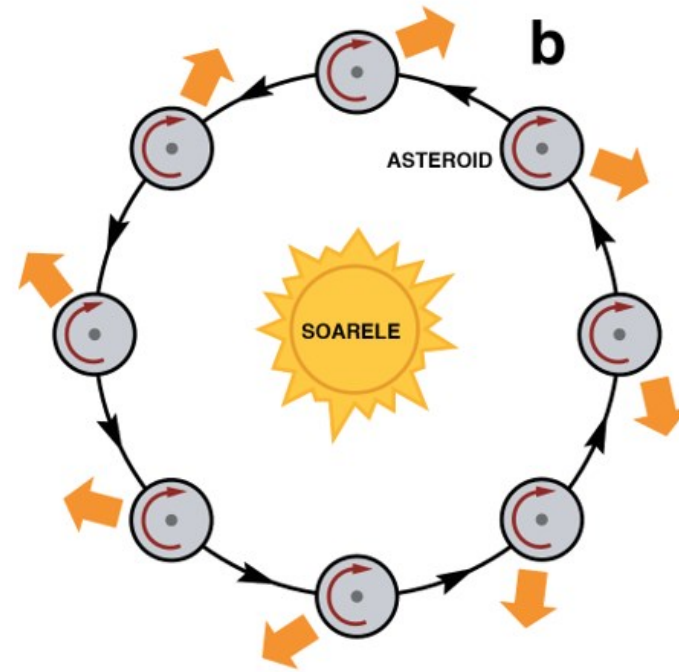
Din rezonanțe în vecinătatea Pământului

- Asteroizii vin din rezonanțe în vecinătatea Pământului
- Dar cum ajung ei în rezonante?
- Forțele non-gravitaționale

Forțele non-gravitaționale

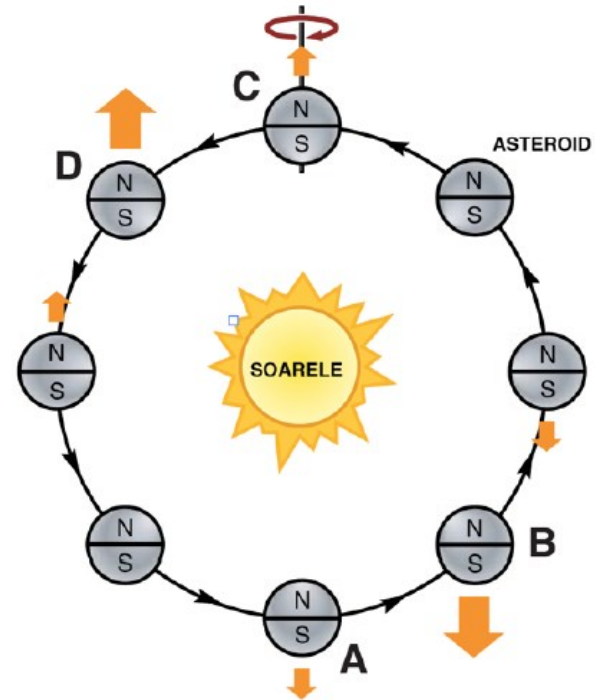


Efectul Yarkovsky diurn în cazul unui asteroid cu rotație în sens trigonometric



Efectul Yarkovsky diurn în cazul unui asteroid cu rotație în sens orar

Forțele non-gravitaționale



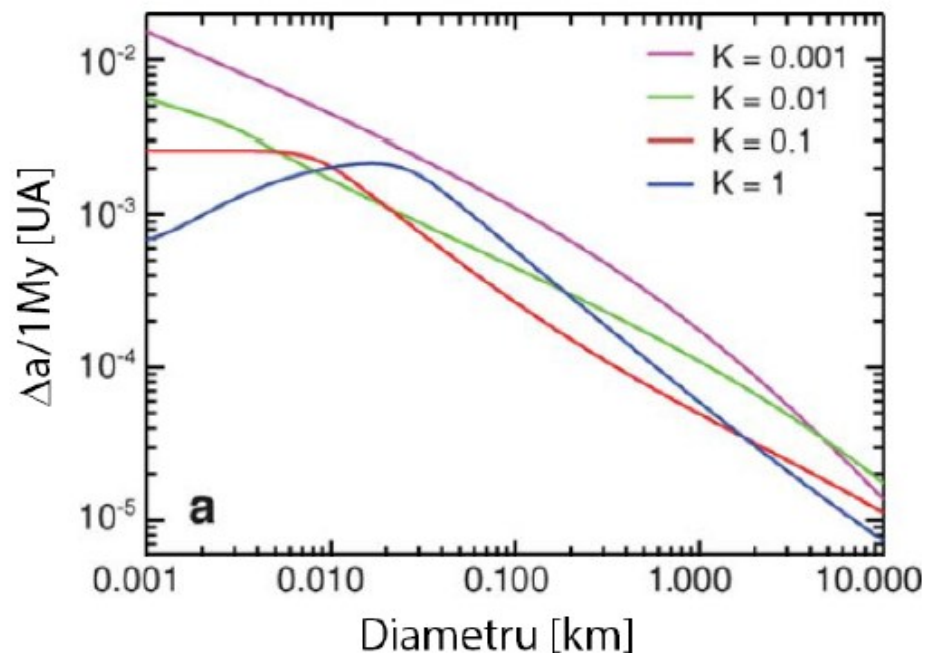
Efectul Yarkovsky sezonier

A. Morbidelli et al., 2002

Efectul Yarkovsky

$$\frac{da}{dt} = \pm \xi \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{1}{1-e^2} \frac{L_{\odot}}{c\sqrt{GM_{\odot}}} \frac{1}{D\rho}$$

Greenberg *et al.*, 2020

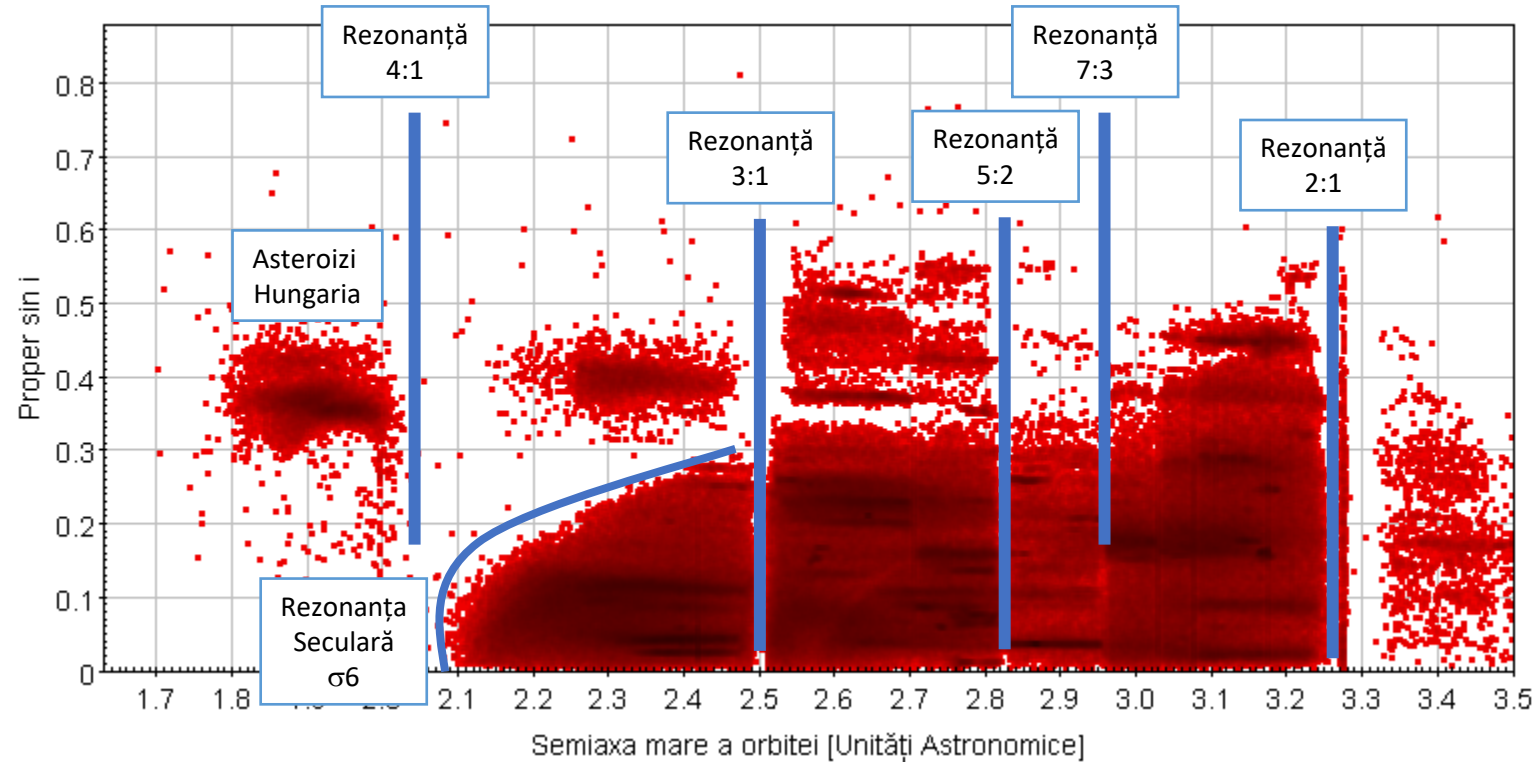


Rata medie de modificare a semiaxe mari a orbitei pentru o perioadă de 1 milion de ani, produsa de efectul Yarkovsky diurn și sezonier, pentru obiecte cu conductivități termice (K) diferite.

Pentru obiectele cu K mic efectul diurn este mai important, iar pentru cele cu K mare, efectul sezonier.

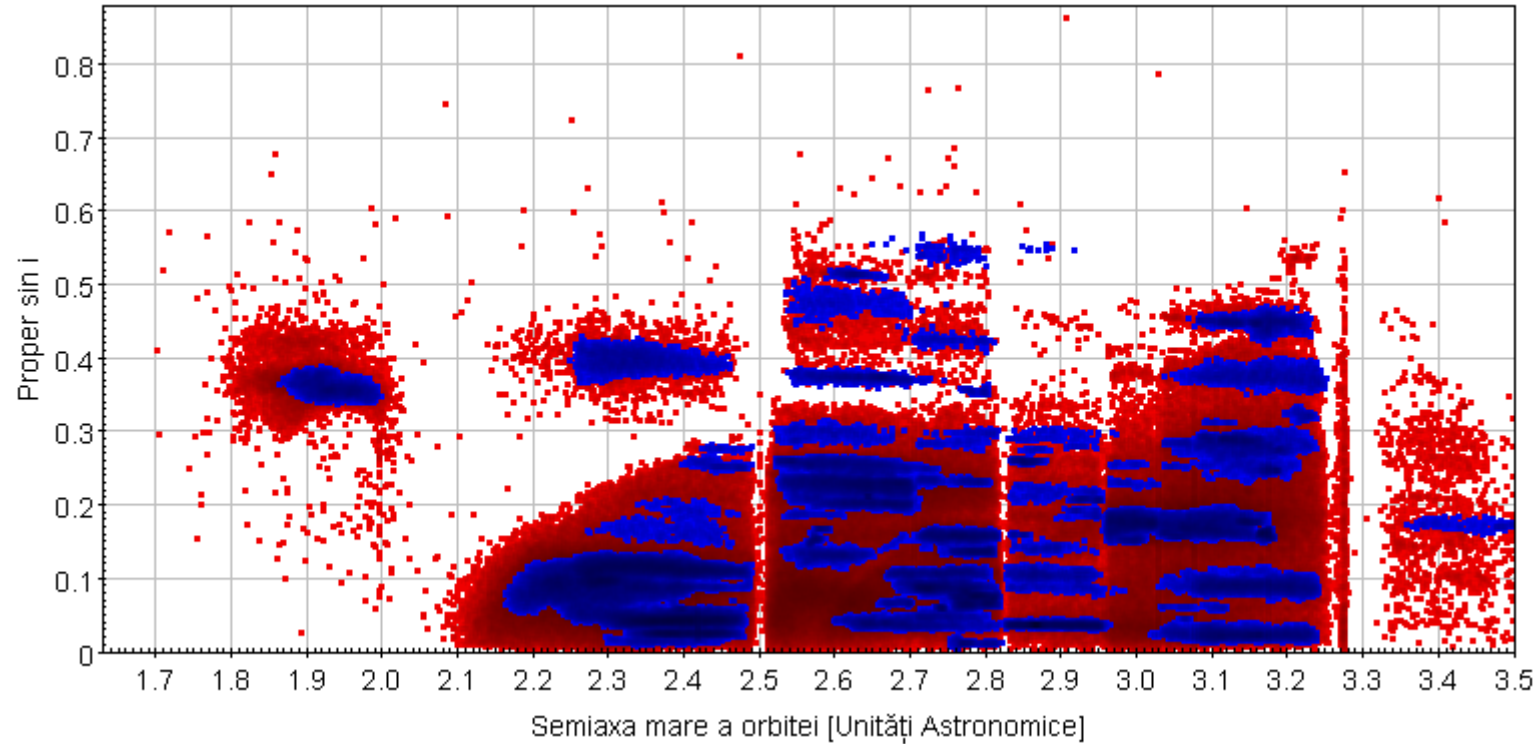
Bottke et al., 2006

Familii de asteroizi



Centura de asteroizi – elemente proprii – rezonanțe

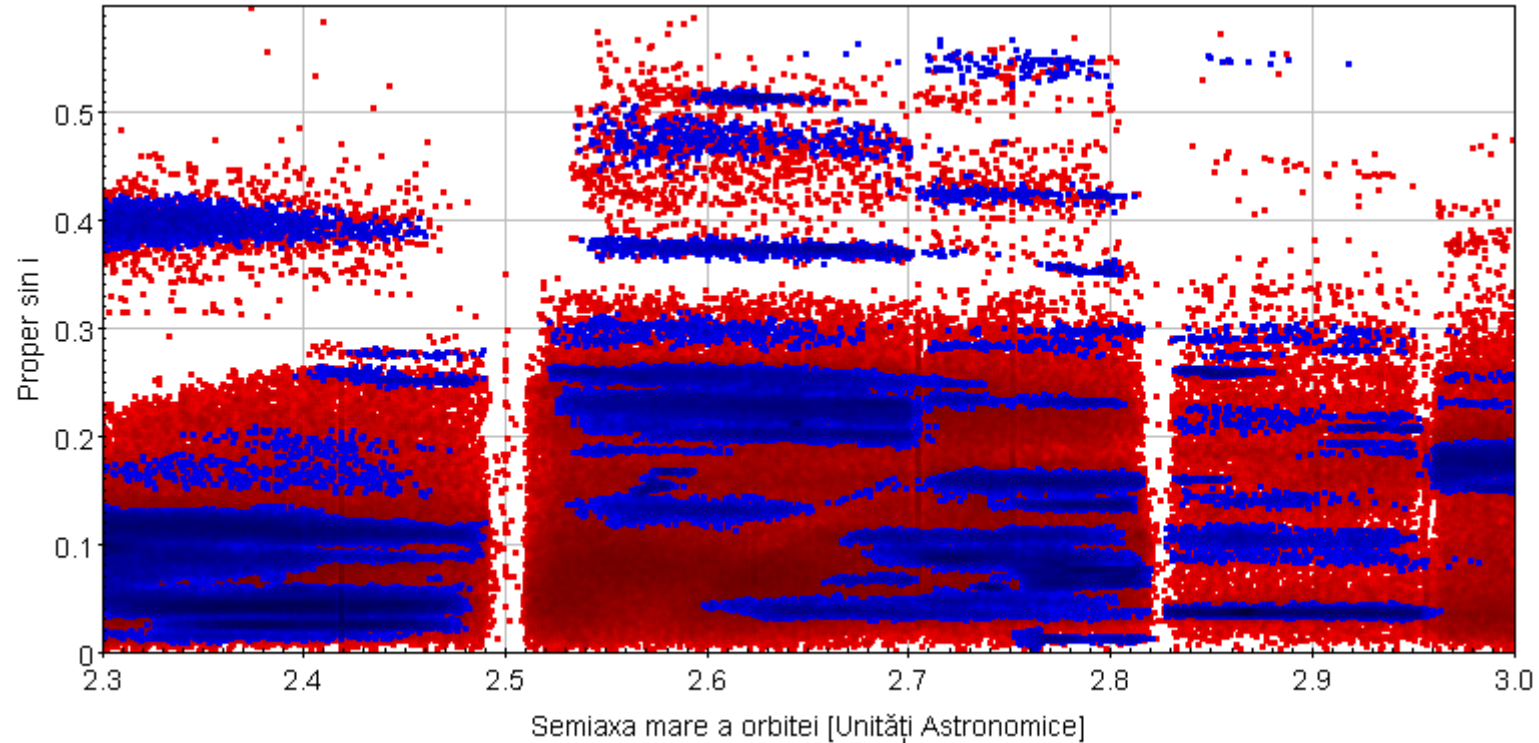
Centura principală de asteroizi



Cu **roșu** asteroizi
A. Milani et al. (2016)

Cu **albastru** familii asteroizi
Nesvorný et al. (2015)

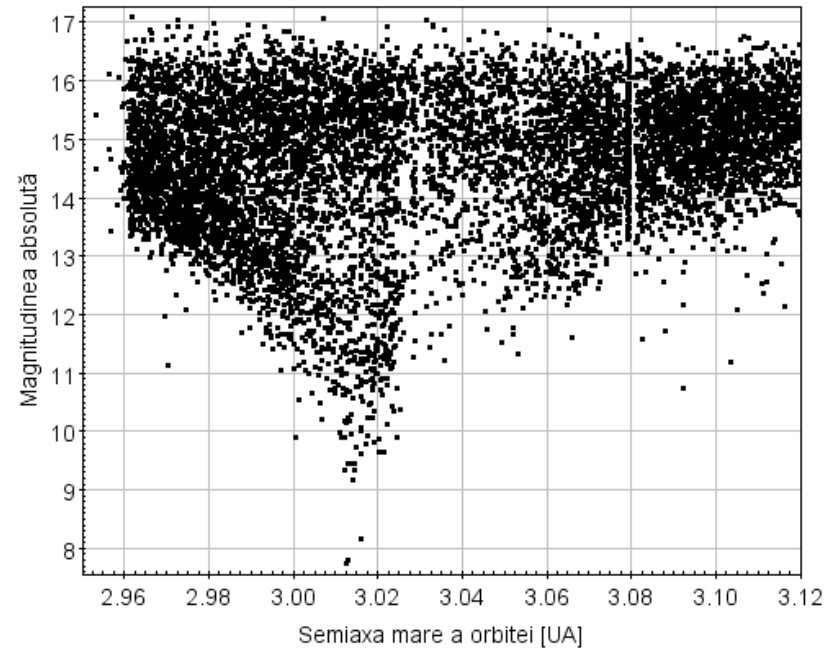
Centura principală de asteroizi



Cu **roșu** asteroizi
A. Milani et al. (2016)

Cu **albastru** familii asteroizi
Nesvorný et al. (2015)

Familii de asteroizi



Vokrouhlicky et al., 2006

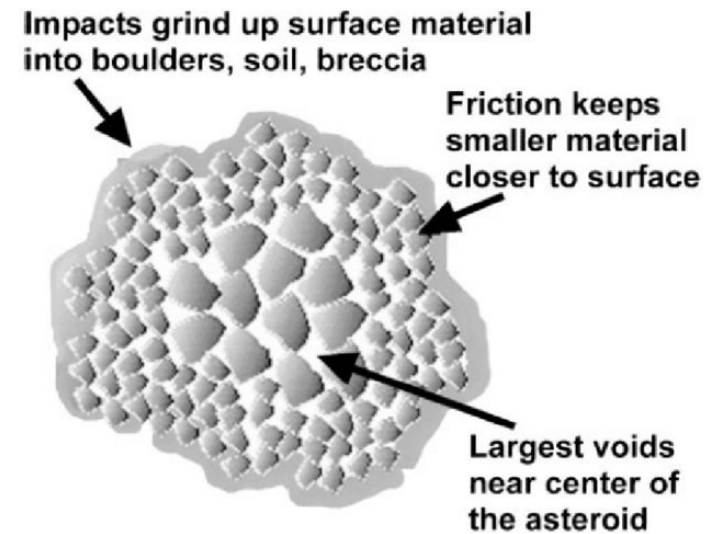
Familia Eos în spațiul (a,i). Se observa efectul celor doua rezonante de miscare medie cu Jupiter.

Centura de asteroizi – un loc dinamic

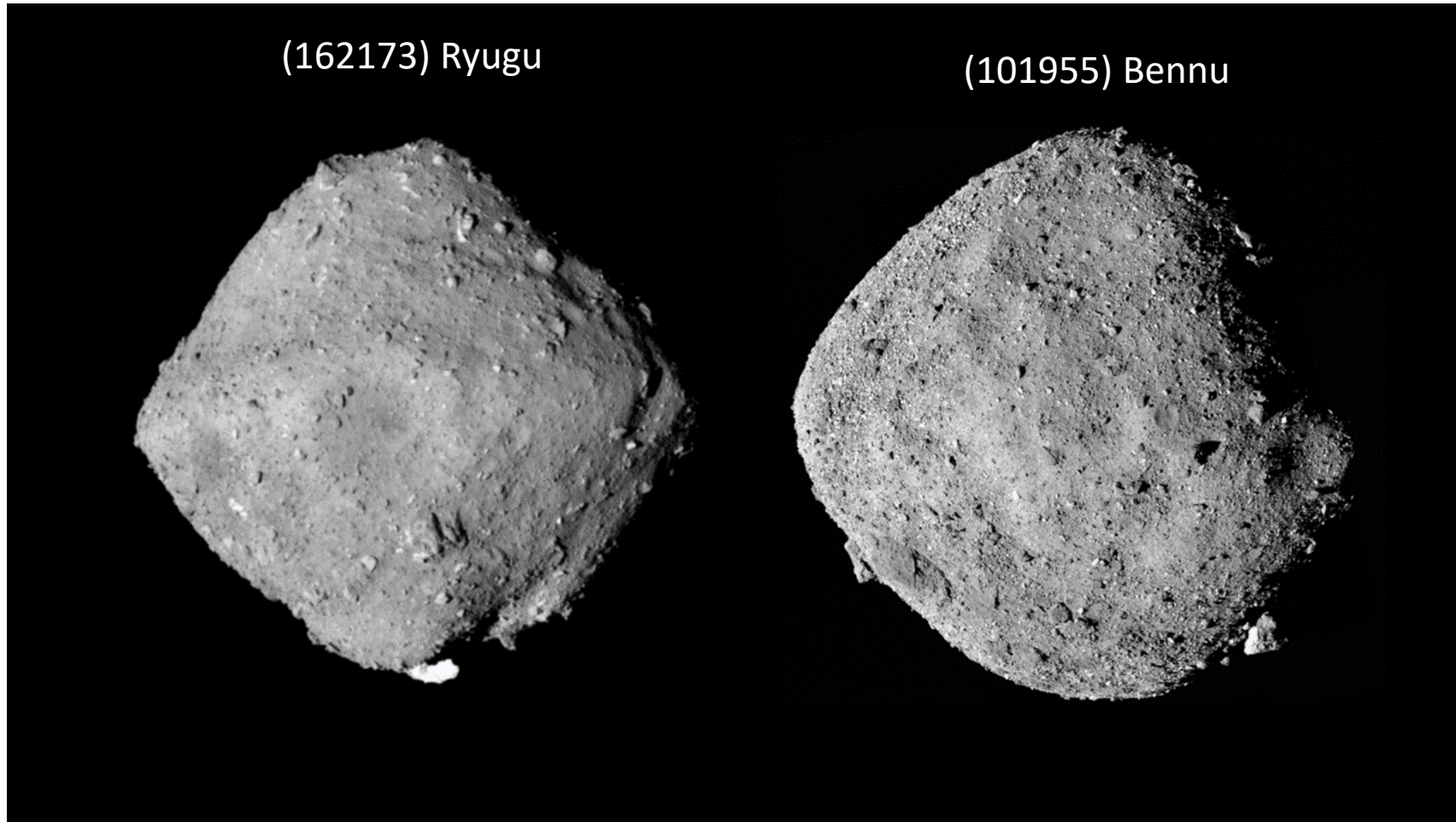
- Proprietățile fizice ale asteroizilor din rezonanțe
- Din familii de asteroizi
- De ce din familii?
- Pentru că acolo pot exista obiecte de tip „conglomerat de fragmente”

Asteroizi de tip conglomerat de fragmente

- evoluția orbitală a fragmentelor duce și la **ciocniri** între aceștia, cu viteze ordinul a 5 km/s
- în cazul ciocnirilor în care energia nu este suficientă pentru dispersarea fragmentelor, **reacumularea gravitațională** duce la formarea asteroizilor cu structura conglomerat de fragmente
- în urma impacturilor cu viteze mai mari de 1 km/s asteroizii se pot fragmenta în totalitate, dar fără ca fragmentele să se disperseze
- rezultatul este **formarea de asteroizi** sferici sau alungiți, compuși din o parte din fragmentele produse la impact



Grott et al., 2018

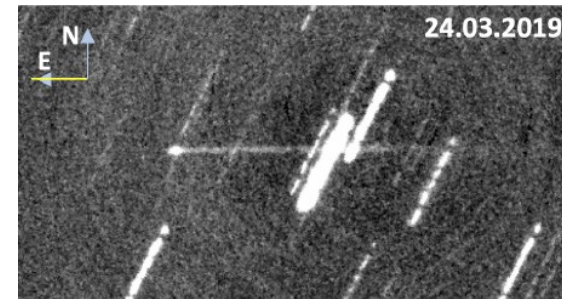


Doi asteroizi explorați în situ. Stânga, asteroidul (162173) Ryugu de 1,02 km în diametru. Dreapta, asteroidul (101955) Bennu de 0,565 km în diametru.

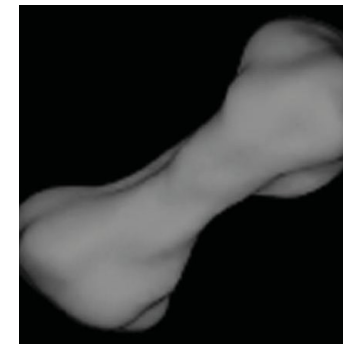
Foto: JAXA, University of Tokyo, Kochi University, Rikkyo University, Nagoya University, Chiba Institute of Technology, Meiji University, University of Aizu, AIST, NASA / Goddard / University of Arizona.

Cum știm că un asteroid are structură de tip conglomerat de fragmente?

- Cratere prea mari
- **Sateliți**
- Lanțuri de cratere pe planete
- Densitate mică a asteroizilor mari
- **Asteroizi activi – rotație prea rapidă**
- Forma de „os” a asteroizilor – fisiune
- **Asteroizi mici cu formă sferică**

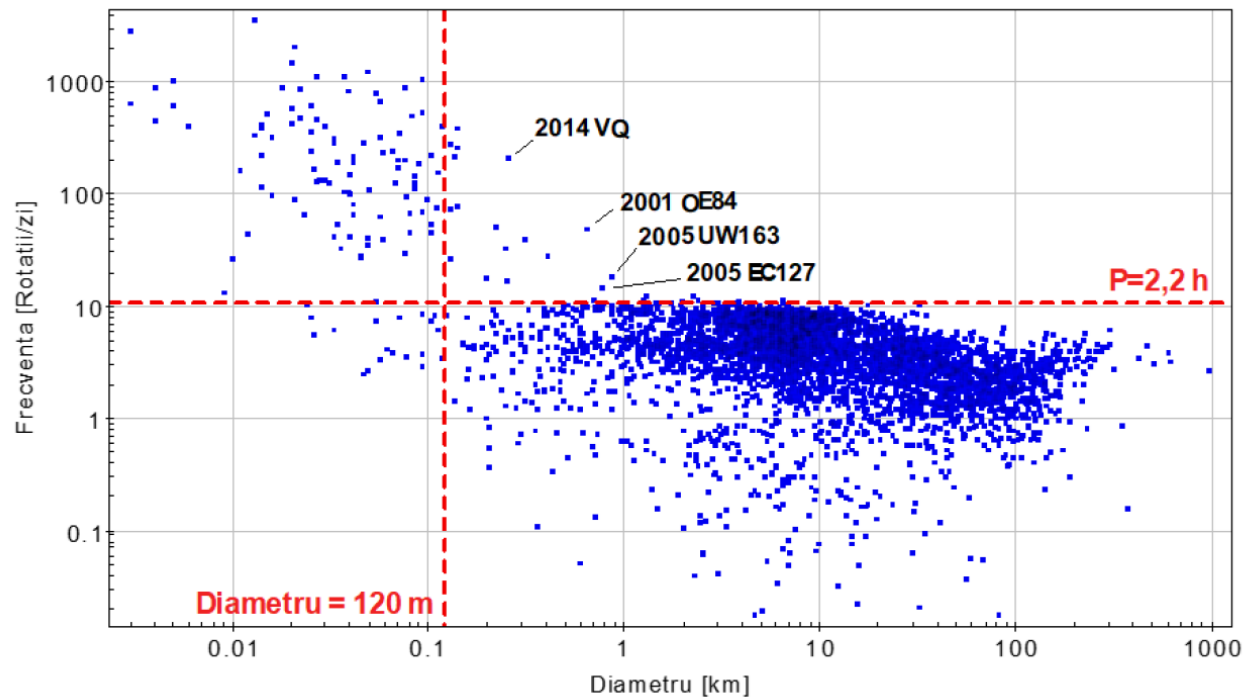


Asteroizidul activ Gault



Asteroizidul Kleopatra

rotația asteroizilor



$$T = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} = \frac{3,3h}{\sqrt{\rho}}$$

Perioada de rotație

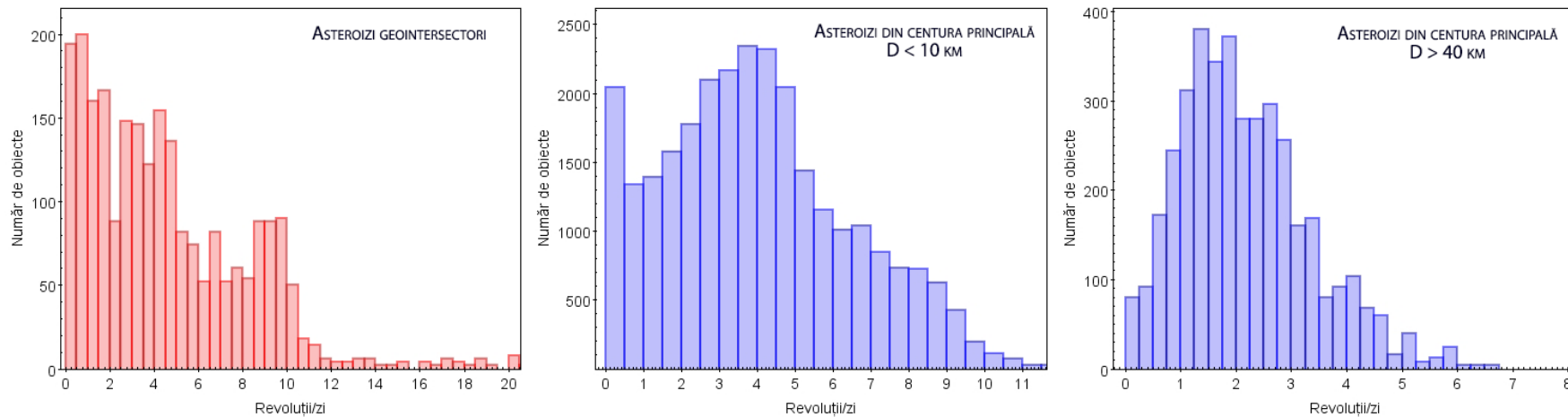
$$\rho_c = \left(\frac{3,3h}{P}\right)^2 \times \frac{a}{b} = \left(\frac{3,3h}{P}\right)^2 \times (1 + \Delta m)$$

Densitatea critică

Harris, 1996

Distribuția perioadelor de rotație

- O distribuție maxwelliana = o populație relaxată, specifică evoluției în urma unei ciocniri, fără efectele unor forțe non-gravitaționale



Sursa: Asteroid Lightcurve Photometry Database ALCDEF.

Centura de asteroizi – un loc dinamic

- durata de viață redusă a asteroizilor geointersectorii
- realimentare cu asteroizi din centură
- prin rezonanțele de mișcare medie și seculare
- asteroizii ajung din familii în rezonanțe prin forțele non-gravitaționale

Selecția obiectelor

- am folosit elementele orbitale proprii pentru a identifica asteroizii aflați în rezonanță și în familii
- am ales doar rezonanțele de la 2,5 și 2,82 UA, care sunt cele mai eficiente în transportul asteroizilor
- în intervalul 0,002 UA (~300.000 km)

Familie	Număr de asteroizi
Vesta	13
Sulamitis	10
Chimaera	2
Svea	2

Asteroizi din familiile de la rezonanta de 2,5 UA

Familie	Număr de asteroizi
Agnia	4
Astrid	3
Hoffmeister	6
Henan	2
Koronis	6
Charis	1

Asteroizi din familiile de la rezonanta de 2,82 UA

2,5 UA

2,82 UA

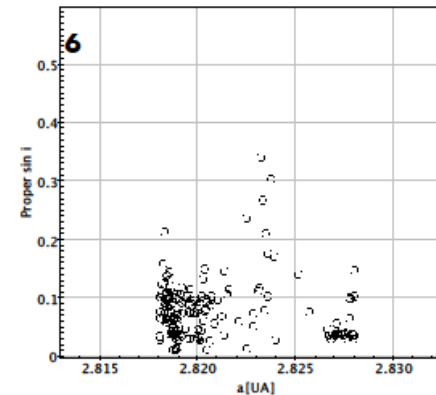
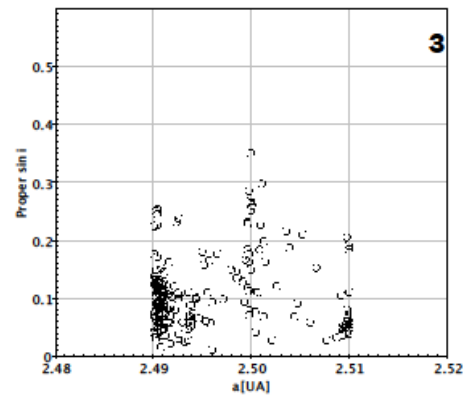
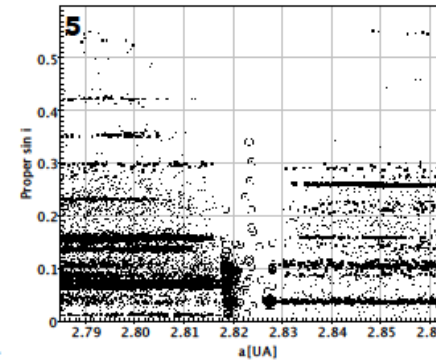
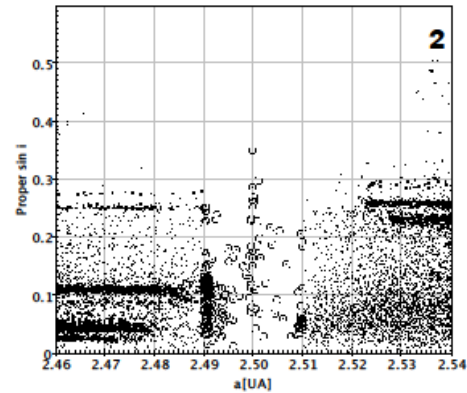
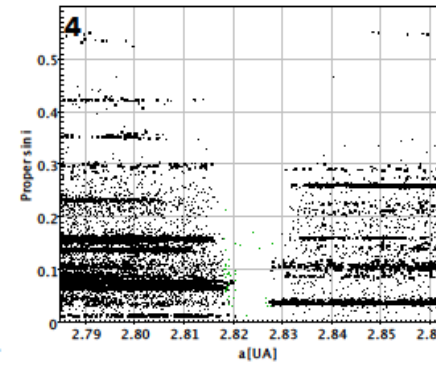
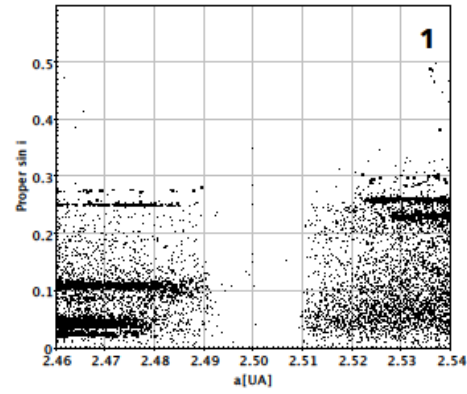
391 de obiecte

dintre care

27 în familii la 2,5 UA

și

22 în familii la 2,82 UA

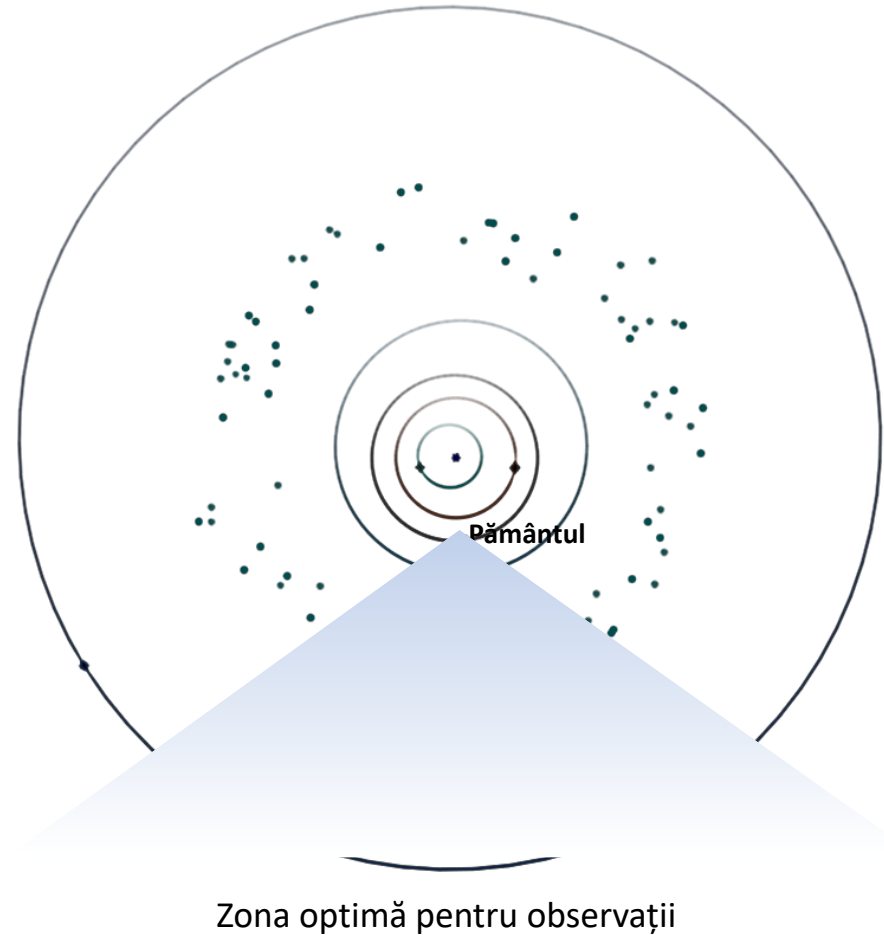


Reprezentarea grafică în spațiul (proper a, sin i) a asteroizilor din rezonanțele de mișcare medie situate la 2,5 și 2,82 UA

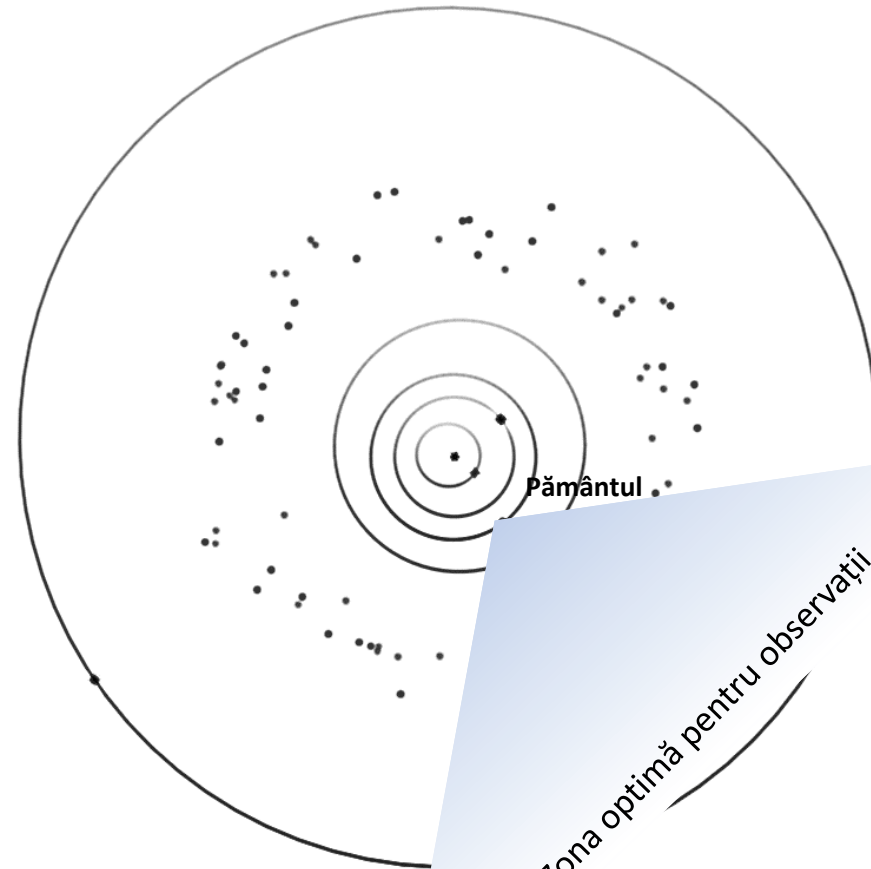
Selecția obiectelor – magnitudine

- A fost nevoie de o altă selecție, bazată pe magnitudinea asteroizilor
- Am ales ca limită magnitudinea absolută 14,5 (asteroizi mai mari de aprox. 4 km în diametru)
- Am rămas cu 167 de obiecte

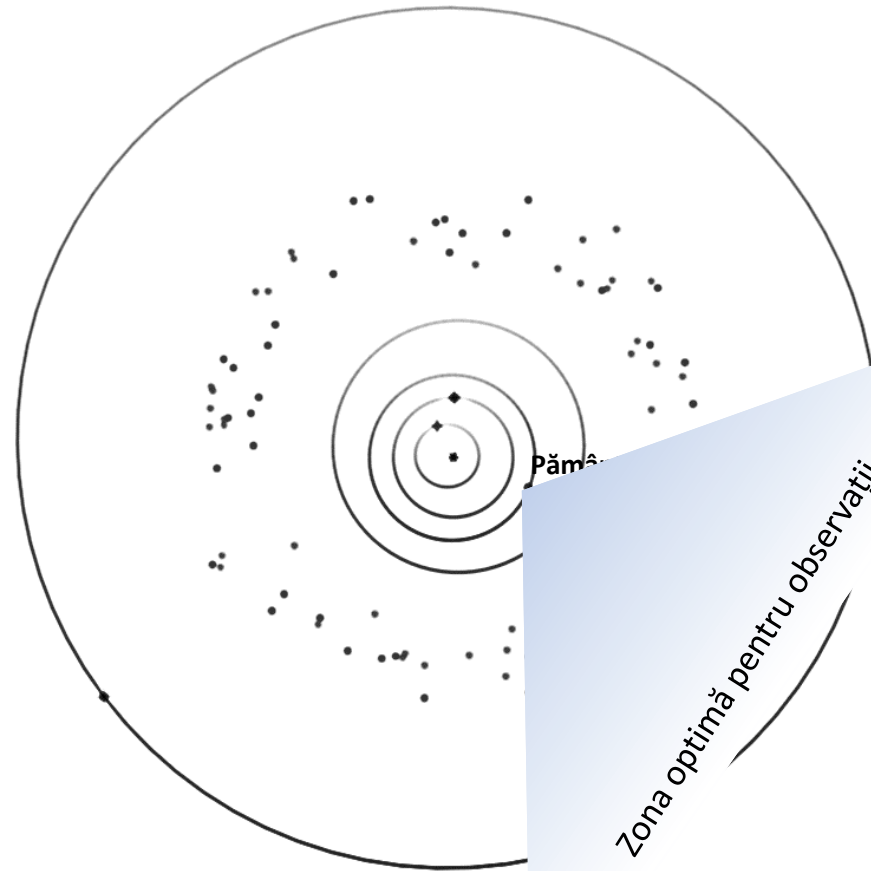
Opoziții – asteroizii la data de 28 sept 2020, ora 22



Opoziții – asteroizii la data de 28 sept 2020, ora 22



Opoziții – asteroizii la data de 28 sept 2020, ora 22



Am început observațiile

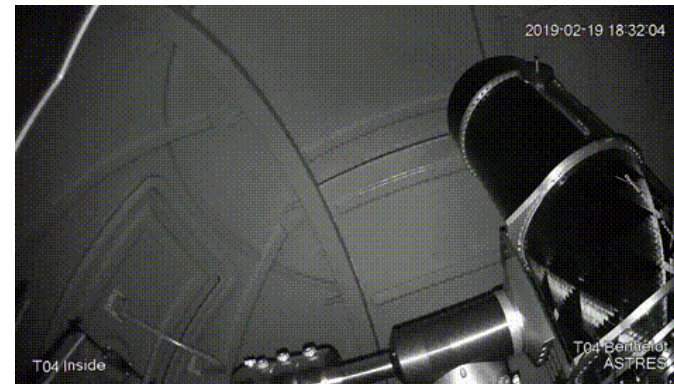
Institutul Astronomic al Academiei Române



0.38 m, F/8 Ritchey-Chretien



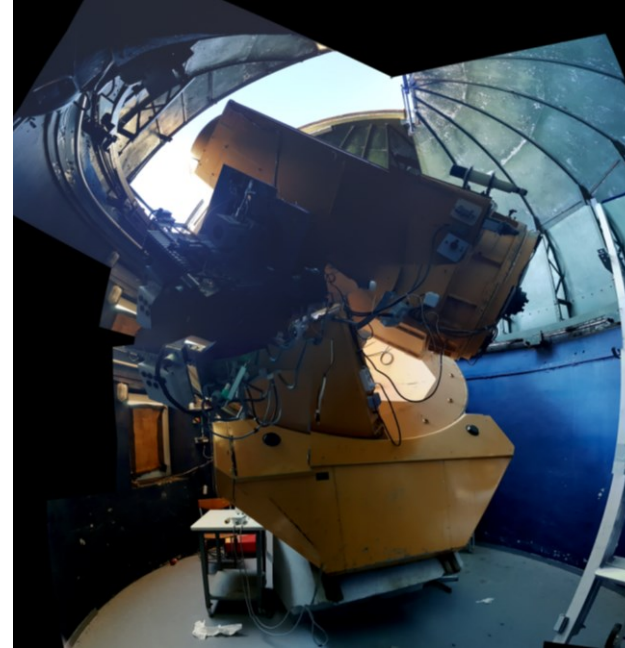
0.5 m, F/15 Cassegrain



Observatorul de la Berthelot 0.38 m, F/8 Ritchey-Chretien

Am început observațiile

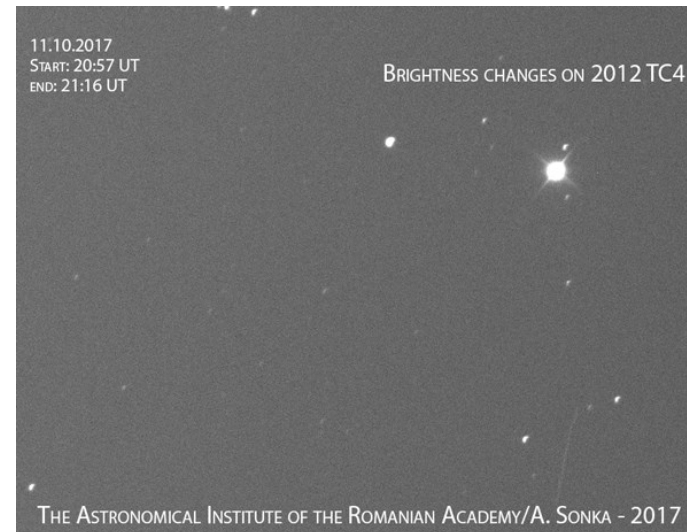
Pic du Midi în Munții Pirinei – Observatorul Astronomic de la Paris

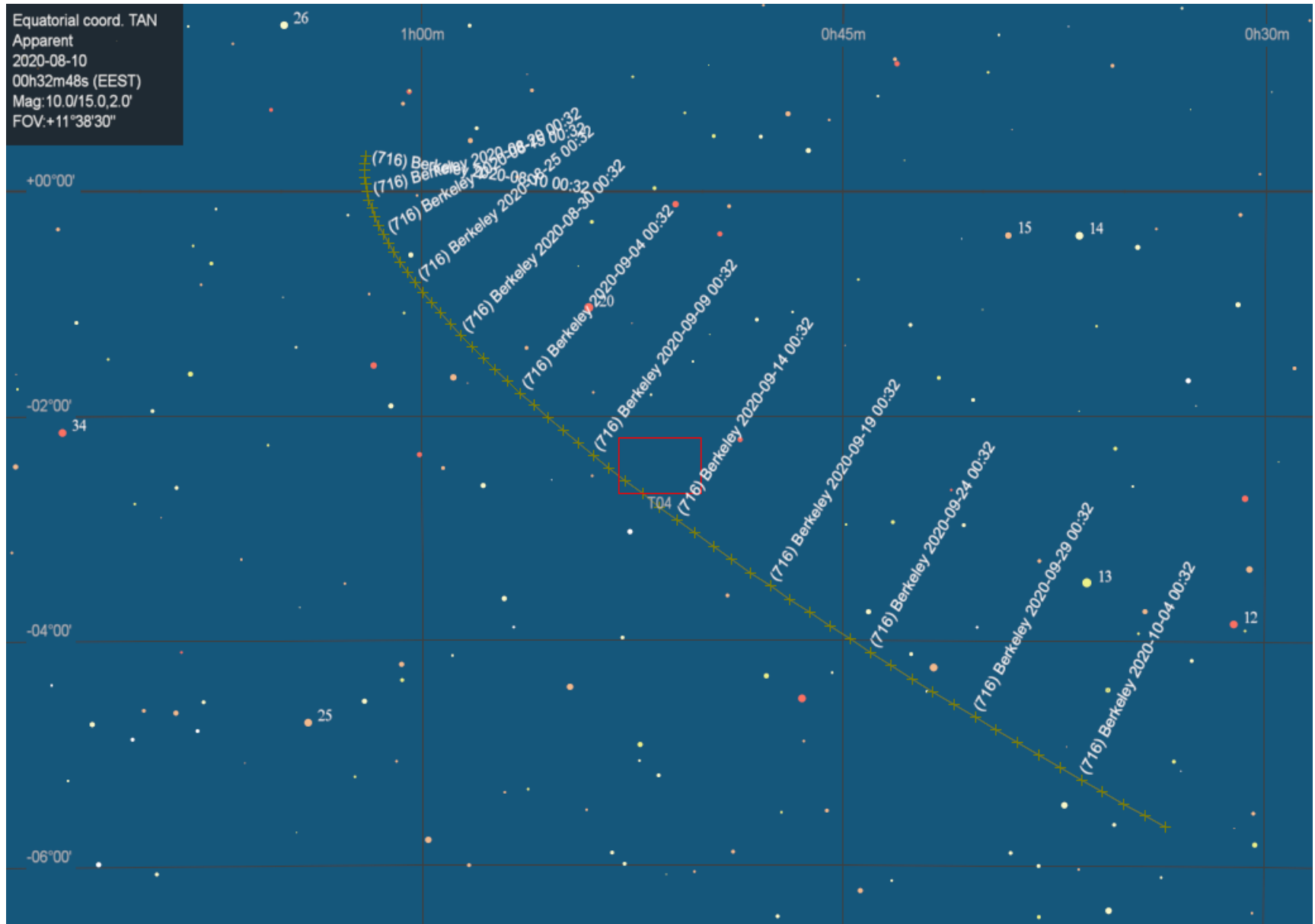


Observatorul Le Makes din Insulele Reunion

Achiziție de imagini și fotometrie

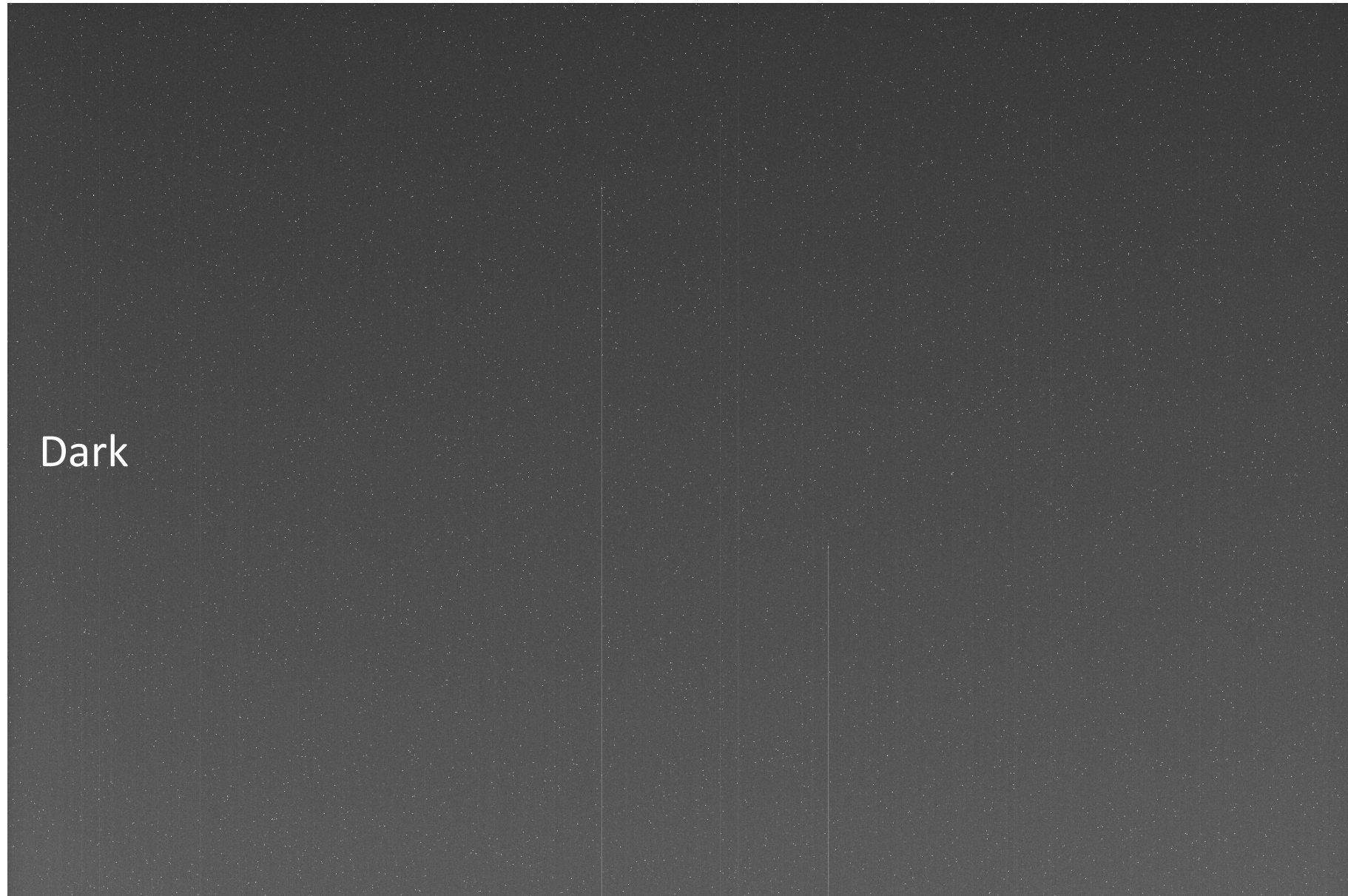
- determinarea perioadei de rotație și formei curbei de lumină
- observarea asteroidului timp de câteva nopți
- imagini cu timp de expunere de la 15 la 60 s
- reducerea imaginilor
- măsurarea strălucirii asteroizilor în fiecare imagine

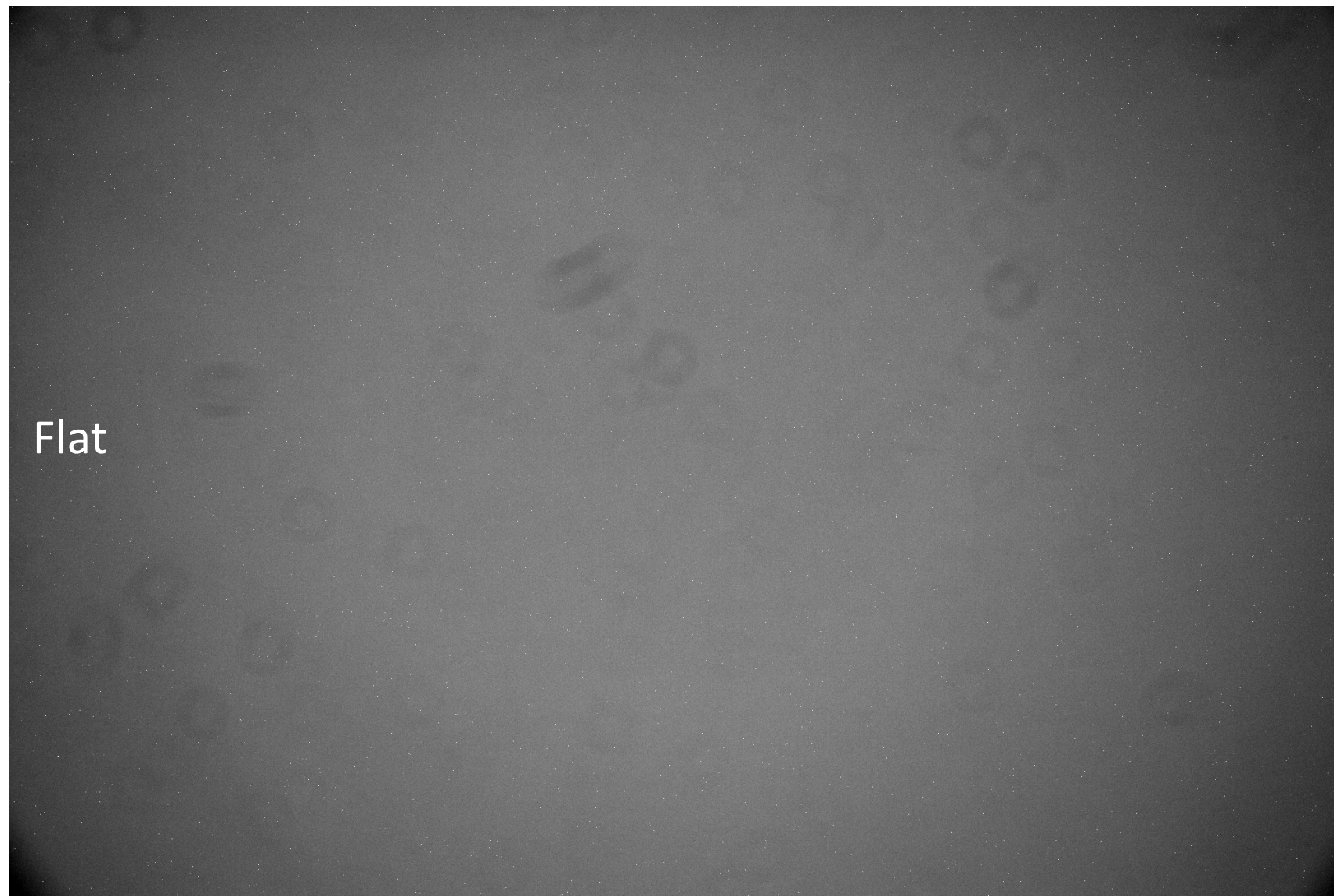




Asteroidul (34060) 2000 OZ45 – 11 august 2019

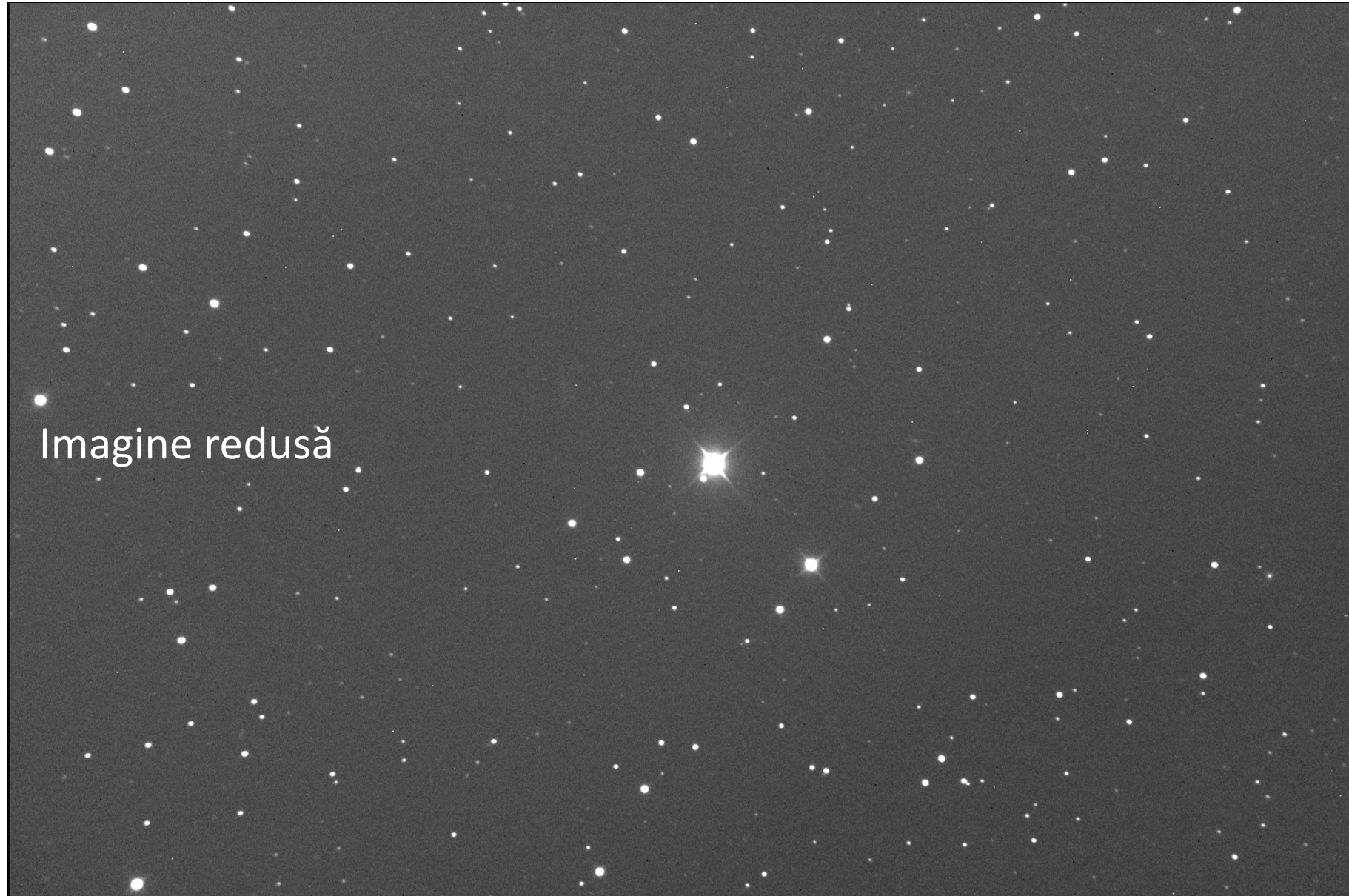






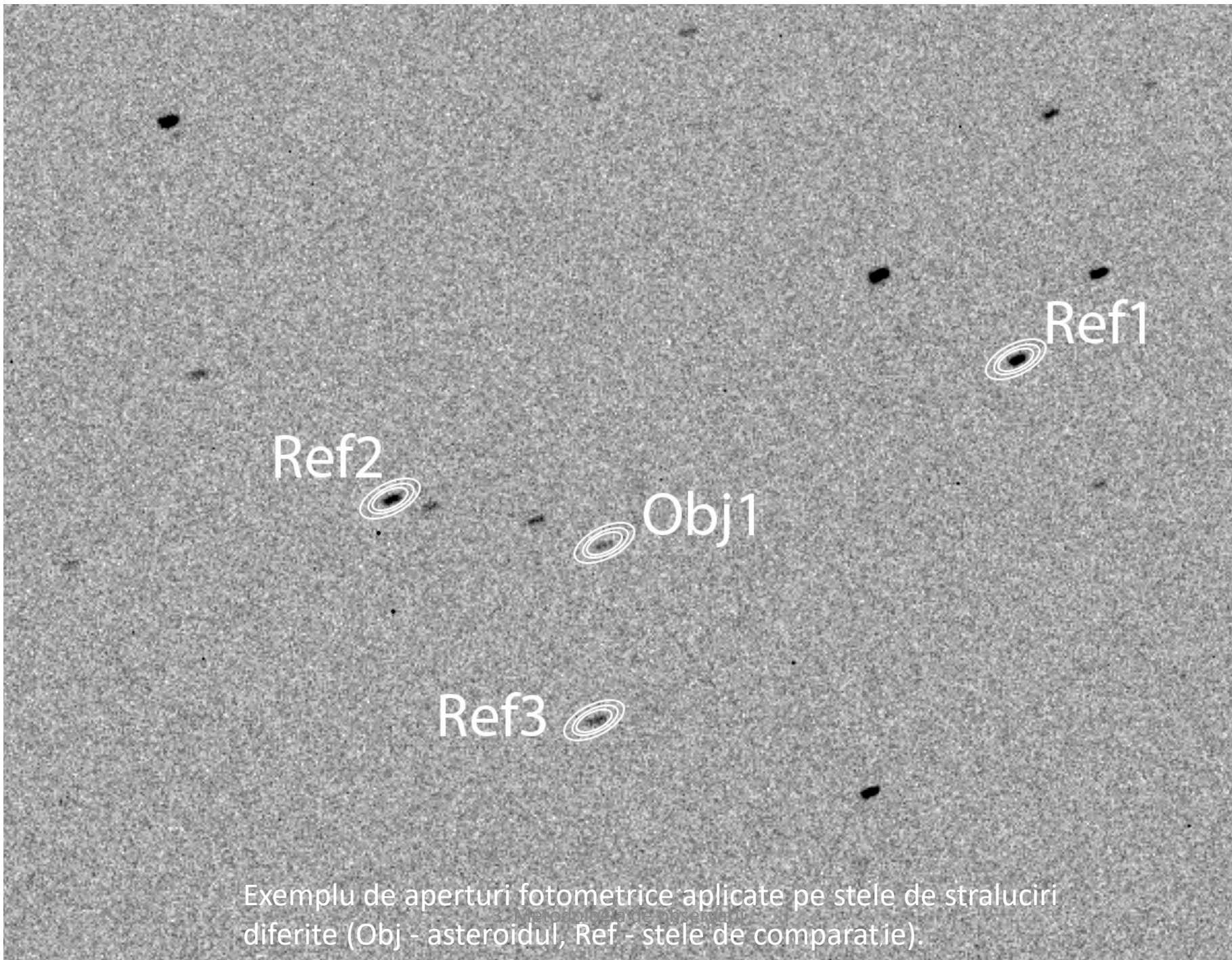
Flat

Asteroidul (34060) 2000 OZ45 – 11 august 2019



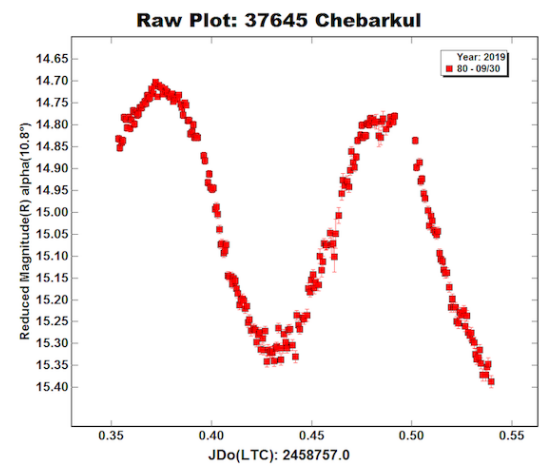
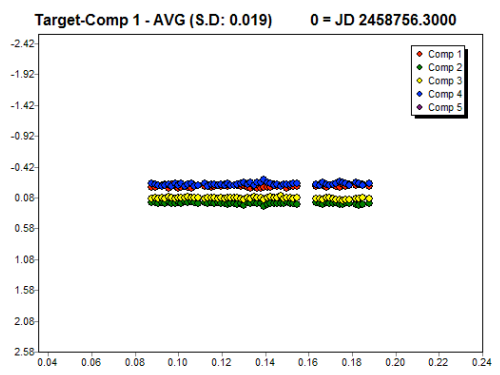
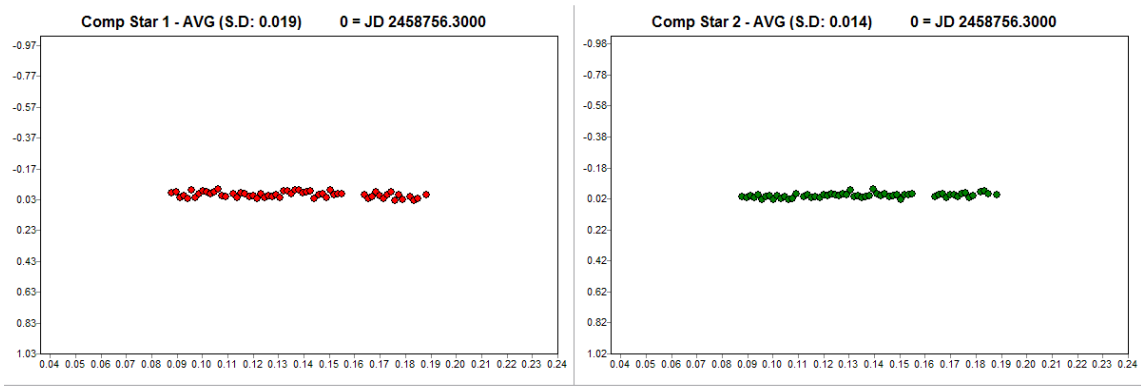
Asteroidul (34060) 2000 OZ45 – 11 august 2019





Exemplu de aperturi fotometrice aplicate pe stele de straluciri diferite (Obj - asteroidul, Ref - stele de comparatie).

Luminozitatea
stelelor de
comparație



Stânga - comparație între
magnitudinea stelelor

Dreapta- strălucirea
asteroidului

$$m_i = -2,5 \log \left(\frac{N_{ap} - A_{ap} S_{sky}}{t_{exp}} \right)$$

Valoarea magnitudinii instrumentale

Rezultate – asteroizi din rezonanță

BERTHELOT

- 24 de asteroizi observați
- 119 nopți de observații
- 365 de ore de observații

BUCUREȘTI

- 9 asteroizi observați
- 44 nopți de observații
- 100 de ore de observații

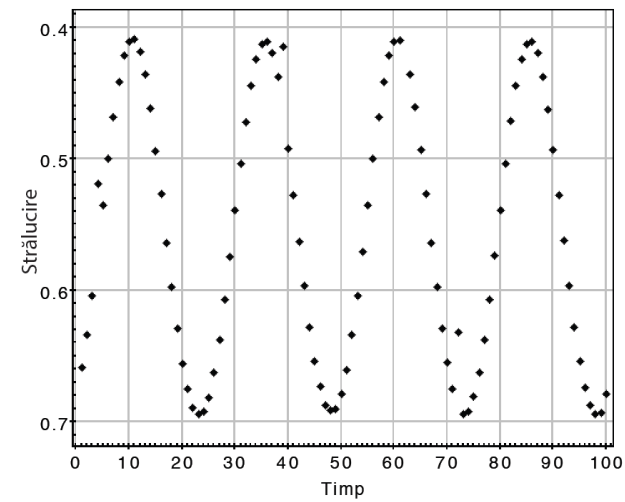
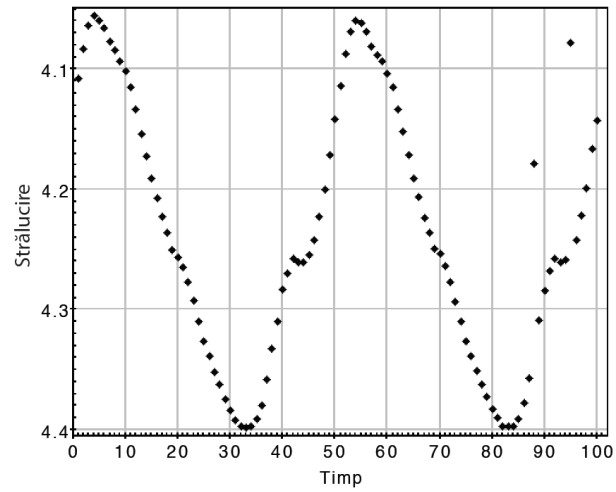
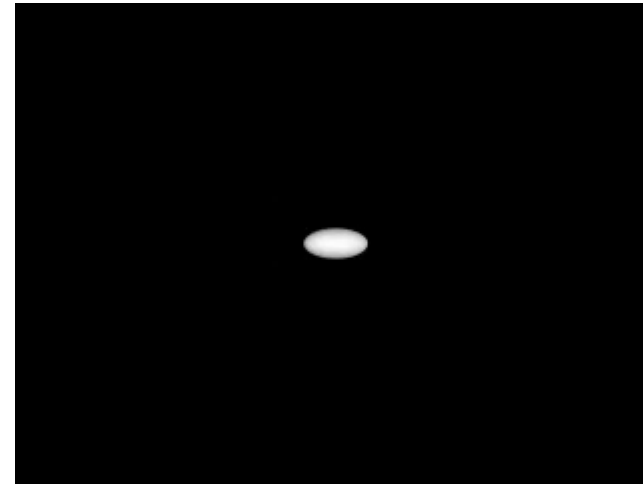
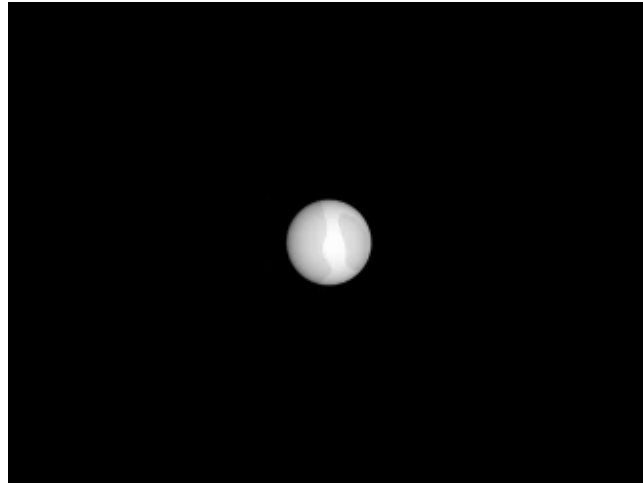
PIC DU MIDI

- 3 asteroizi observați
- 4 nopți de observații
- 14 ore de observații

LE MAKES

- un asteroid observat
- 3 nopți de observații
- 8 de ore de observații

Curbele de lumină



Curbele de lumină

- Reprezintă variația strălucirii asteroidului în timp
- Forma variației depinde de forma asteroidului și de diferențele de albedo

$$\Delta m = 2,5 \log \left(\frac{a}{b} \right)$$

$$\frac{a}{b} \geq 10^{0,4\Delta m}$$

Thirouin et al., 2016
Binzel et al., 1989

Δm – amplitudinea magnitudinii
a și b – axele elipsoidului

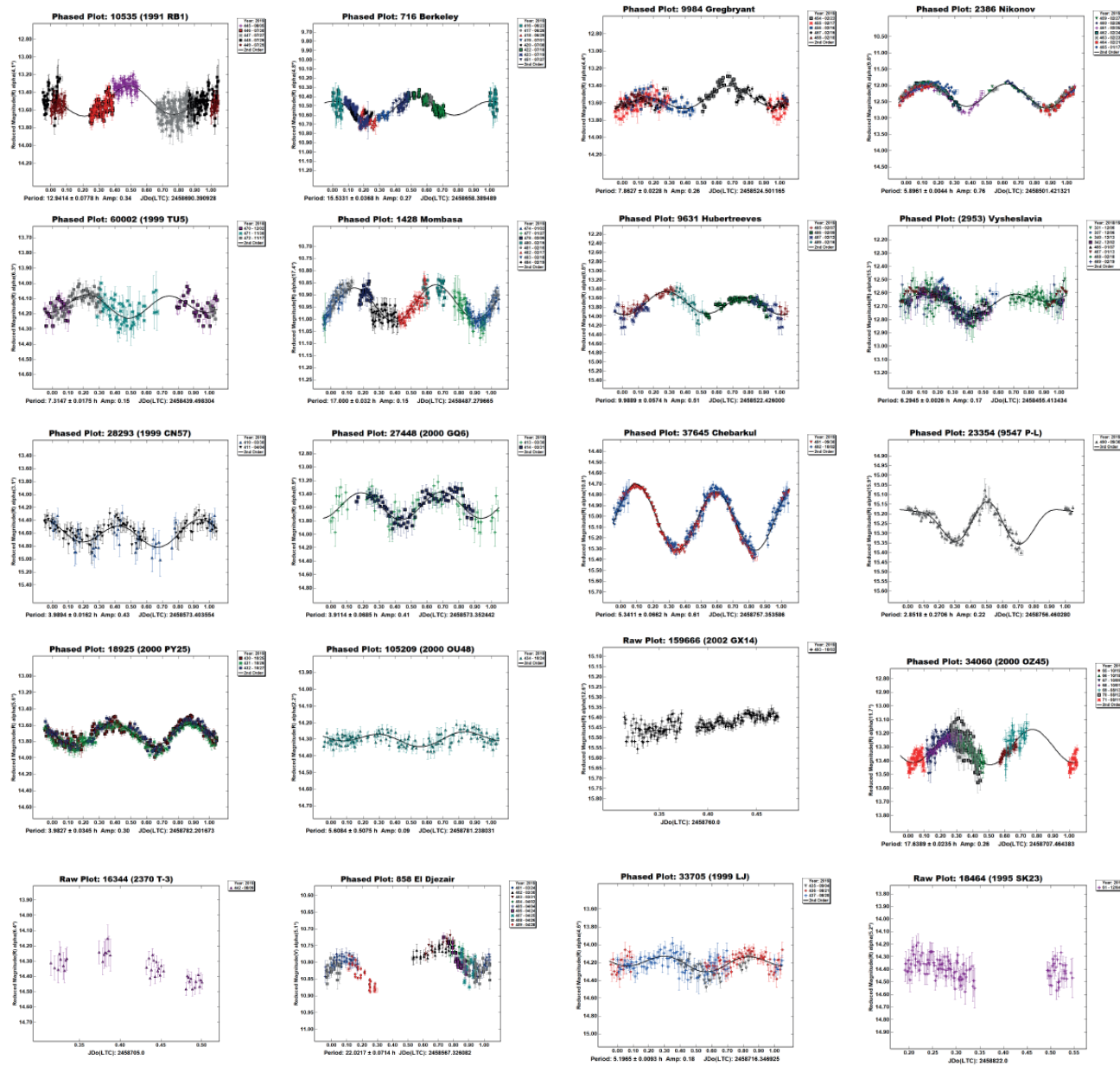
4. Rezultate obținute

Rezultate obținute

- 29 de asteroizi aflați în rezonanțe
- 31 de asteroizi geointersectori
- Un asteroid activ
- Trei campanii internaționale pentru asteroizi geointersectori

Rezultate

- Am observat 29 de asteroizi din centura principală
- 17% din numărul de obiecte propuse
- 80% din obiecte au fost observate pentru prima oară pe parcursul acestei teze
- Creștere cu 42% a numărului de obiecte observate în rezonanța de la 2,82 UA
- Creștere cu 15% a numărului de obiecte observate în rezonanța rezonanța de la 2,5 UA
- Am observat 10 asteroizi din patru familii



Curbe de lumină
pentru asteroizii
situați în rezonanță