



UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI  
Facultatea de Fizică  
Școala Doctorală de Fizică



Adrian Bruno Șonka

---

PROPRIETĂȚI FIZICE ALE ASTEROIZILOR CU PERIOADĂ  
LUNGĂ DE ROTAȚIE

---

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific  
Prof. dr. Mirel Bîrlan

București, 2020



# Rezumat

Interesul acestei teze a fost acela de a studia fotometric asteroizii în scopul determinării structurii interne a acestora.

Există o strânsă legătură între populația de asteroizi din centura principală și cei geointersectorii, indusă de efectele gravitaționale ale planetelor mari, precum și de efectele non-gravitaționale. Rezultatul este reprezentat de transportul asteroizilor din centura principală în sistemul solar interior și modificarea parametrilor de rotație. Prin măsurători fotometrice putem determina perioada lor de rotație și implicit putem deduce între o structură internă monolitică sau granulară a asteroizilor observați.

Obiectivul tezei s-a focalizat pe identificarea asteroizilor care vor deveni în timp asteroizi geointersectorii și care au structură internă de tip conglomerat de fragmente, adică se pot dezagrega cu ușurință.

În cadrul tezei am observat 29 de asteroizi aflați în rezonanțele de mișcare medie, astfel măbind cu 57% numărul de obiecte cu perioade de rotație cunoscute. Am monitorizat 31 de asteroizi geointersectorii, iar perioadele lor de rotație și profilul formei derivat din curba de lumina au permis stabilirea unui procentaj de 71% ca fiind obiecte cu profilul conglomerat de fragmente.

Am desfășurat și campanii de observație specifice pentru un asteroid activ și pentru un obiect ce va fi survolat de viitoarea misiune spațială japoneză Destiny+.

Am participat egalmente la două campanii internaționale de observații, inițiate de International Asteroid Warning Network, pentru doi asteroizi care au trecut foarte aproape de Pământ.



# Mulțumiri

Elaborarea tezei de doctorat m-a făcut un om mai bun și este normal să le mulțumesc celor care m-au ajutat în acest demers. Țin să îi mulțumesc conducătorului meu de doctorat, dr. Mirel Bîrlan, fără de care teza nu ar fi existat. Este cel mai prompt om pe care îl cunosc și cel care nu mi-a dat niciodată un sfat greșit. În plus, m-a pus întotdeauna în situații din care am avut numai de câștigat.

Doresc să le mai mulțumesc colegilor dr. Alin Nedelcu și dr. Octavian Bădescu care și-au dedicat câțiva ani din viață să înființeze și să mențină în funcțiune o infrastructură de observații în cadrul Institutului Astronomic al Academiei Române, care mi-a permis să observ asteroizi. Practic, ei sunt printre puținii ctitori de observatoare astronomice din România.



# Cuprins

<b>1</b>	<b>Introducere</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Asteroizi în sistemul solar</b>	<b>3</b>
2.1	Orbite în sistemul solar . . . . .	7
2.2	Distribuția asteroizilor . . . . .	10
2.2.1	Asteroizi activi . . . . .	16
2.2.2	Asteroizi pe orbite cometare . . . . .	18
2.2.3	Asteroizi ca surse de meteori . . . . .	19
2.2.4	Rezonanțe de mișcare medie . . . . .	22
2.2.5	Rezonanțe seculare . . . . .	27
2.2.6	Durata de viață a asteroizilor geointersectori . . . . .	29
2.3	Efectele Yarkovsky și YORP . . . . .	32
2.4	Proprietăți fizice . . . . .	40
2.4.1	Mărimea asteroizilor . . . . .	41
2.4.2	Taxonomia asteroizilor . . . . .	48
2.5	Familii de asteroizi . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Rotația asteroizilor</b>	<b>63</b>
3.1	Bariera de rotație . . . . .	65
3.2	Distribuția perioadelor de rotație . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Selectarea obiectelor pentru observații</b>	<b>69</b>
4.1	Strălucirea asteroizilor . . . . .	70
4.2	Selecția asteroizilor . . . . .	73
4.3	Identificarea obiectelor folosind elemente orbitale proprii . . . . .	76
4.4	Identificarea obiectelor folosind elemente orbitale osculatoare . . . . .	79

4.5	Strategia de observații . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Tehnici de observații</b>	<b>91</b>
5.1	Telescoape și detectori folosiți . . . . .	92
5.1.1	Institutul Astronomic al Academiei Române . . . . .	101
5.1.2	Observatorul de la Berthelot . . . . .	101
5.1.3	Pic du Midi . . . . .	103
5.1.4	Le Makes Observatory . . . . .	103
5.2	Programe folosite . . . . .	103
5.3	Reducerea datelor . . . . .	112
5.4	Fotometrie diferențială . . . . .	112
5.4.1	Fotometrie diferențială . . . . .	118
5.4.2	Stele de comparație – cataloage . . . . .	119
5.5	Determinarea perioadelor de rotație - curbele de lumină . . . . .	121
5.6	Metoda de lucru . . . . .	126
<b>6</b>	<b>Rezultate obținute</b>	<b>129</b>
6.1	Asteroizi din rezonanțe și din familii . . . . .	137
6.1.1	Concluzii . . . . .	145
6.2	Proprietăți fotometrice ale asteroizilor geointersectorii . . . . .	152
6.2.1	Curbe de fază . . . . .	163
6.3	Asteroizi activi . . . . .	176
6.3.1	(6478) Gault: o suprafață de tip Q sub praf? . . . . .	176
6.4	Asteroizi din campanii observații . . . . .	184
6.4.1	Asteroidul (66391) 1999 KW4 . . . . .	184
6.4.2	Asteroidul (155140) 2005 UD . . . . .	192
6.4.3	Asteroidul 2012 TC4 . . . . .	197
<b>7</b>	<b>Concluzii și perspective</b>	<b>203</b>
<b>8</b>	<b>Lista contribuțiilor proprii</b>	<b>205</b>
8.1	Lucrări publicate în reviste . . . . .	205
8.1.1	Reviste cotate ISI . . . . .	205



8.1.2	Reviste indexate ISI . . . . .	205
8.2	Lucrări prezentate la conferințe . . . . .	206
8.2.1	Conferințe internaționale . . . . .	206
8.2.2	Conferințe naționale . . . . .	208
8.3	Cărți . . . . .	208

# 1. Introducere

Centura principală de asteroizi este cel mai dinamic loc din sistemul solar, zona în care milioane de corpuri cerești mici orbitează Soarele. Mărimea obiectelor variază de la sute de km la câțiva metri sau mai mici. Corpurile cerești din acea zonă, care poartă numele de *asteroizi* sau *mici planete*, sunt fie fragmente ale unor ciocniri de obiecte mai mari din timpul formării planetelor (denumite planetesimale), fie fragmente produse la ciocniri mai recente. Datorită numărului mare de obiecte cu masă mică, centura principală este locul care păstrează amprente migrăției planetelor mari din sistemul solar, dar și indicator a recentelor ciocniri produse între asteroizii mai mari. Perturbațiile gravitaționale seculare ale planetelor mari au adus asteroizi pe orbite care se intersectează cu orbitele planetelor interioare, creând o populație de asteroizi geointersectori.

Distribuția orbitelor asteroizilor ne arată perturbații induse de Jupiter și Saturn, iar taxonomia împreună cu proprietățile fizice ale acestora ne dau indicii cu privire la fenomenele fizice care au avut loc la formarea obiectului dar și cele care au apărut pe parcursul evoluției acestuia în jurul Soarelui. Chiar dacă numărul mare de obiecte dar și multiplele rezonanțe orbitale prezente în zonă amplifică dificultatea descifrării evoluției centurii principale de asteroizi, din studiul obiectelor individuale pot reieși nu doar informații cu privire la obiectul în sine, ci și despre istoria grupurilor de asteroizi cu parametri orbitali comuni, istorie strâns legată de formarea sistemului solar.

Compoziția asteroizilor, care poate fi determinată de la distanță sau prin studiul meteoriților, este diversă: există asteroizi metalici, primitivi și bazaltici. Distribuția în funcție de distanța față de Soare a diferitelor clase taxonomice este o măsură a gradientului de temperatură din sistemul solar, în timpul formării acestuia.

Asteroizii au suferit ciocniri în cei 4,5 miliarde de ani de existență, numeroase

cratere formându-se la suprafața acestora. Regolitul, stratul de praf de la suprafața acestora format în urma impacturilor, împiedică determinare precisă a compoziției asteroizilor. Unele ciocniri au dus la dezintegrarea asteroizilor, iar fragmentele acestora s-a unit în timp, ceea ce a dus la apariția asteroizilor cu structură poroasă, de tip *aglomerare de fragmente* (rubble pile). Forțele care țin laolaltă un asteroid de tip rubble pile sunt cele de coeziune a materiei și de atracție ale fragmentelor.

Ciocnirile au dus și la apariția fragmentelor cu elemente orbitale similare, grupate sub forma *familiilor* de asteroizi. Forțele non-gravitaționale care acționează asupra asteroizilor, precum efectul de încălzire și de radieră diferențială a căldurii, au perturbat orbitele membrilor din familii.

De pe Pământ, prin diferite metode putem descifra procesele care au dus la starea actuală a diferitelor populații de asteroizi, precum și proprietăților acestora. Spectroscopia și determinarea culorilor asteroizilor, împreună cu depărtarea de Soare, furnizează informații despre compoziția suprafeței și locul de proveniență al asteroizilor. Date de mărimea acestora se obțin prin studiul radiației termice în infraroșu, iar simulările de orbită ne permit să privim în trecutul și viitorul corpurilor mici din sistemul solar.

Fotometria, studiul variației de strălucire, furnizează informații despre perioada de rotație, formă și structura internă a asteroizilor. În această ultimă categorie se înscriu și rezultatele obținute în cadrul doctoratului, pe parcursul căruia am obținut date care mi-au permis să determin forme, perioade de rotație și structuri pentru 29 de asteroizi aflați în rezonanțe, 34 de asteroizi geointersectori și unul activ.

## 2. Asteroizi în sistemul solar

Subiectul tezei mele de doctorat este identificarea prin observații a asteroizilor care pot avea structură de tip conglomerat de fragmente.

Determinarea tipului de structură se face în urma determinării perioadei de rotație, care, dacă are o valoare peste un prag, împreună cu informații despre formă, infirmă sau confirmă dacă obiectul are o astfel de structură. În general, obiectele mari sau mici, cu formă sferică și cu perioade de rotație lungi sunt susceptibile în a avea o structură internă de tip de conglomerat de fragmente.

Acești asteroizi se pot afla în familiile de asteroizi și în centura principală, unde există fragmente mai multe care se pot suda în timp ce se rotesc împreună în jurul Soarelui sau se pot forma în urma reacumulării fragmentelor rezultate după ciocniri.

Asteroizi cu o asemenea structură se mai pot afla și în alte locuri în sistemul solar și chiar în apropierea Pământului, unde se află asteroizi aduși din centura principală pentru că orbitele lor sunt perturbate de rezonanțele seculare sau de mișcare medie datorate planetelor mari.

Totodată, pentru că în preajma planetei noastre există curenți de meteori, ne îndreptățeste să credem că o parte din curenți provin de la asteroizii de acest tip, care pierd materie sau se dezintegrează în urma forțelor mareice. Astfel, locurile potrivite în sistemul solar pentru căutarea de asteroizi fără perioade determinate sunt chiar rezonanțele de mișcare medie. La marginea rezonanțelor se întâlnesc și familii de asteroizi, iar condițiile menționate mai sus se îndeplinesc.

În teza mea de doctorat voi încerca să determin tipul de structură al asteroizilor situați în centura principală de asteroizi, aflați în rezonanțele de mișcare medie cu Jupiter de la 2,5 și 2,82 Unități Astronomice depărtare de Soare și a asteroizilor geointersectorii, de preferabil sursă de meteori. Din acest motiv este necesară o descriere generală a acestor obiecte precum și a orbitelor acestora.

De la descoperirea primului asteroidului (Piazzi, ianuarie 1801) au trecut peste două secole (Fig. 2.1), inițial observându-se că asteroizii se întâlnesc în spațiul dintre Marte și Jupiter (centura principală). La un secol după prima descoperire, au început să se descopere obiecte cu orbite perturbate, care intersectau orbitele planetelor sau se apropiau de acestea. Obiectele ale căror orbită intersectează sau se apropie de orbita terestră se numesc *asteroizi geointersectori*.

O altă clasă de obiecte este reprezentată de cea a asteroizilor îndepărtați, cu orbite situate în afara orbitei saturniene, precum și de cei care au orbite care traversează sistemul solar exterior, obiecte denumite *centauri*.

Noile posibilități tehnice permit observarea unor zone imense de cer și cartografierea în lungimi de undă diverse a multor clase de obiecte, printre care și asteroizii. Studiile culorilor acestora permit descoperirea obiectelor cu origine comună sau chiar ale asteroizilor de tip cometar, obiecte care pot fi și surse de meteori. Astfel, centura principală este un loc extrem de interesant, în care orbitele asteroizilor se modifică în decurs de milioane de ani din cauza forțelor gravitaționale și nu numai, un loc aparent inofensiv dar de care este strâns legat viitorul vieții de pe Pământ dar și al planetei ca întreg.

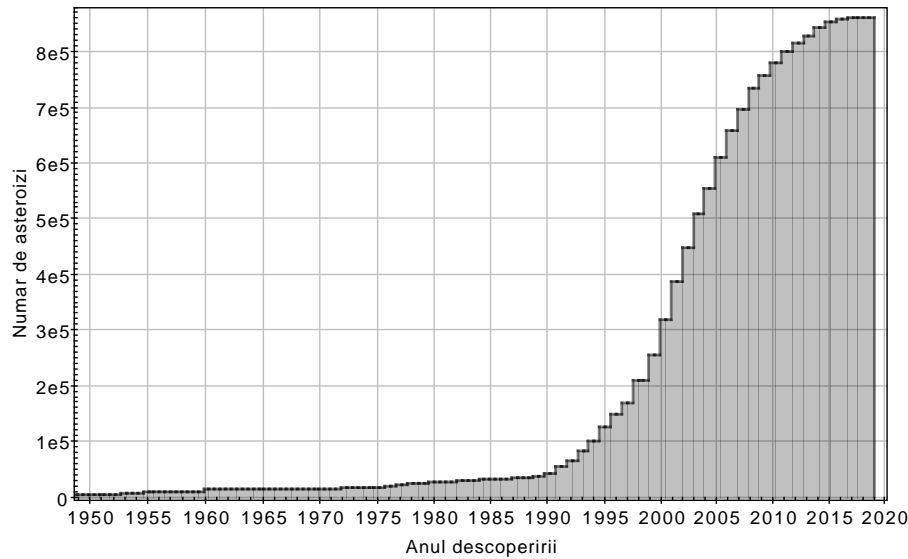
Informațiile despre asteroizi se regăsesc în marile baze de date construite din diferite tipuri de observații. Bazele de date sunt create și întreținute de instituții diferite, existând un flux continuu de modificări ale bazelor de date pe măsură ce noi observații apar. Există baze de date de proprietăți orbitale, fotometrice și fizice, câteva fiind folosite și în teza mea de doctorat.

Minor Planet Center<sup>1</sup> (MPC) este organismul internațional responsabil cu catalogarea și calculul de orbită pentru corpurile mici din sistemul solar. Observațiile de poziție (astrometrice) sunt raportate de observatori către MPC, iar orbitele obiectelor noi sunt calculate și comparate cu ale celor existente. Observațiile și noile orbite sunt publicate electronic zilnic în circulare electronice (Minor Planet Electronic Circulars), dar și lunar în publicațiile Minor Planet Circulars Supplement și Minor Planet Circulars Orbit Supplement.

Asteroizii noi primesc coduri provizorii după ce au fost observați mai mult de două nopți. După ce sunt observați îndeajuns (la minim două opoziții) și orbita este

---

<sup>1</sup><https://minorplanetcenter.net/>



**Figura 2.1:** Număr de asteroizi descoperiți. Sursa: Minor Planet Center.

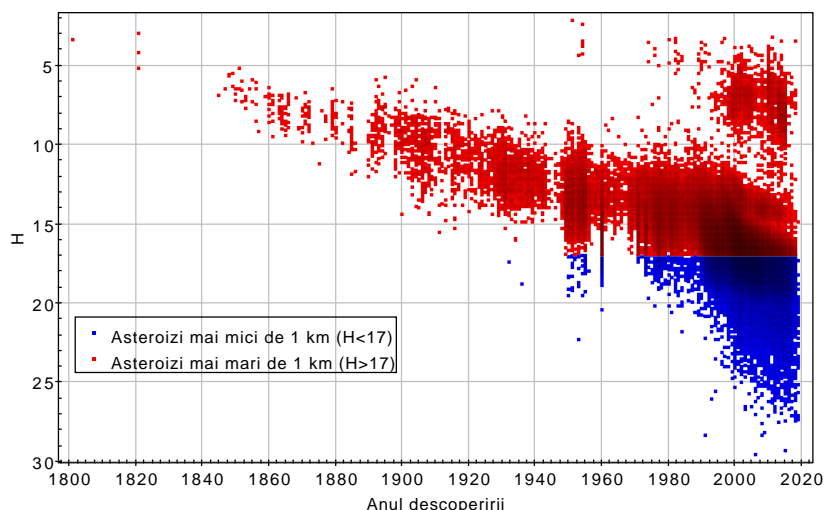
bine cunoscută, primesc un număr. La începutul anului 2020, baza de date de orbite asteroidale conține aproximativ 900.000 de orbite, dintre care aproximativ 500.000 sunt asteroizi numerotați (Fig. 2.2).

O altă sursă cu informații despre numărul și orbitele asteroizilor este The Asteroid Orbital Elements Database (ASTORB) menținută de Lowell Observatory<sup>2</sup>, care conține elemente orbitale osculatoare (calculate pentru o anumită epocă), cu ajutorul cărora se poate calcula poziția asteroizilor într-un interval de  $\pm 50$  de zile de la epocă. Baza de date ASTORB conține informații despre incertitudinea observațiilor și despre clasificarea fiecărui obiect, datele care conduc la calculul de orbită fiind obținute zilnic de la Minor Planet Center.

Ca o completare a bazelor de date de elemente orbitale, există baze de date care conțin date fotometrice, de culoare, ale asteroizilor. Two-Micron Sky Survey (2MASS) conține date fotometrice în trei culori pentru 11.865 de obiecte [232]. Sloan Digital Sky Survey Moving Object Catalogue<sup>3</sup> conține informații fotometrice în cinci filtre pentru 104.409 de obiecte, dintre care 10.592 de asteroizi cu orbite bine determinate [102]. Survey-ul The Wide-field Infrared Survey Explorer WISE/NEOWISE [290] conține informații de culoare pentru cel puțin 38.298 de asteroizi [140], luate în patru lungimi de undă din infraroșu (3,4, 4,6, 12 și 22  $\mu\text{m}$ ). Din anul 2013,

<sup>2</sup><http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?B/astorb>

<sup>3</sup><http://faculty.washington.edu/ivezic/sdssmoc/sdssmoc.html>



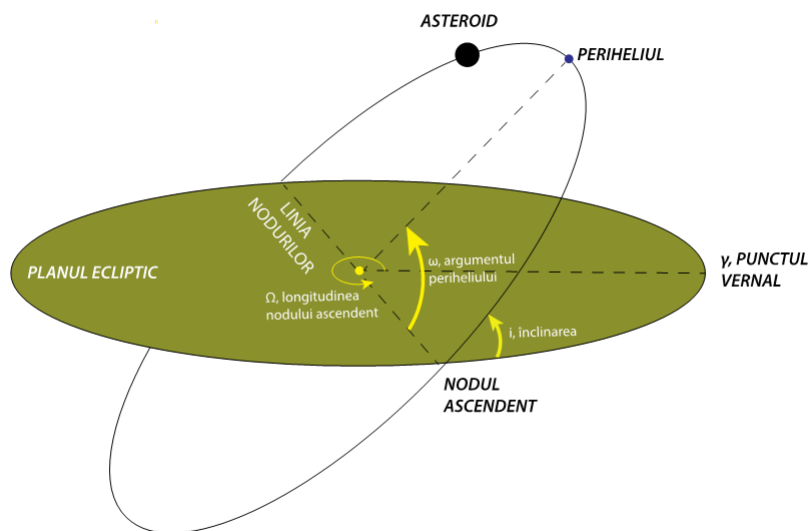
**Figura 2.2:** *Descoperirea asteroizilor în funcție de diametru. Exemplu de date aflate în baza de date MPCORB. Pe grafic poate fi observat faptul că numărul de asteroizi a crescut de la an la an, cu excepția perioadei primului război mondial. După 1980 a început descoperirea obiectelor mari care sunt asteroizi din centura lui Kuiper. După 1970 începe descoperirea asteroizilor mici, care continuă și în prezent, un rezultat direct al dezvoltării tehnicii de observații.*

după epuizarea agentului din sistemul de răcire al camerei sensibile în infraroșu, telescopul a fost folosit pentru caracterizarea asteroizilor doar în lungimile de undă 3,4 și 4,6 $\mu$ m, obținându-se rezultate de culoare pentru 36.505 asteroizi, dintre care 1.103 sunt geointersectorii <sup>4</sup>. Recent, din programul de monitorizare al cerului VISTA Hemisphere Survey, care își propune să acopere 20.000 de grade pătrate de pe cerul emisferei sudice [142], au fost extrase date fotometrice în două filtre pentru 39.947 de asteroizi [193]. Combinarea orbitelor cu caracteristicile fotometrice ale asteroizilor permite identificarea familiilor de asteroizi, adică a obiectelor care au origine comună.

O altă bază de date care conține informații despre asteroizi este Asteroid Lightcurve Photometry Database (ALCDEF)<sup>5</sup>, menținută sub verificarea Minor Planet Center. În această bază de date se găsesc informații despre perioada de rotație, împreună cu caracteristicile lor de formă și poziția axei de rotație. La data de 5 februarie 2020 se găseau date pentru 14.911 asteroizi. Observațiile făcute pe

<sup>4</sup><https://neowise.ipac.caltech.edu/>

<sup>5</sup><http://alcdef.org/>



**Figura 2.3:** În figură sunt ilustrate trei dintre elementele orbitale: longitudinea nodului ascendent, argumentul periheliului și înclinarea orbitei.

parcursul tezei de doctorat vor fi puse la dispoziție ALCDEF pentru a putea fi folosite și în alte studii, de către alți cercetători.

## 2.1 Orbite în sistemul solar

Fiecare asteroid care orbitează Soarele este caracterizat prin elementele orbitale, parametri care definesc orbita (Fig. 2.3). Planul la care se raportează orbitele obiectelor din sistemul solar este planul orbitei terestre, denumit *ecliptică*. Distanța standard folosită în sistemul solar se numește UA = Unitate Astronomică (1 UA = 149.597.870,7 km).

În cazul cel mai des întâlnit al orbitelor eliptice, vor exista două puncte diametral opuse pe orbită în care obiectul se află mai aproape și mai departe de Soare. Cele două puncte se numesc *periheliu* și *afeliu*.

Elementele orbitale sunt următoarele:

- semiaxa mare a orbitei ( $a$ ), termen care indică mărimea orbitei; este distanța medie a obiectului față de Soare; se măsoară în Unități Astronomice;
- excentricitatea ( $e$ ), termen adimensional care arată forma  $e = 0$  – orbită cir-



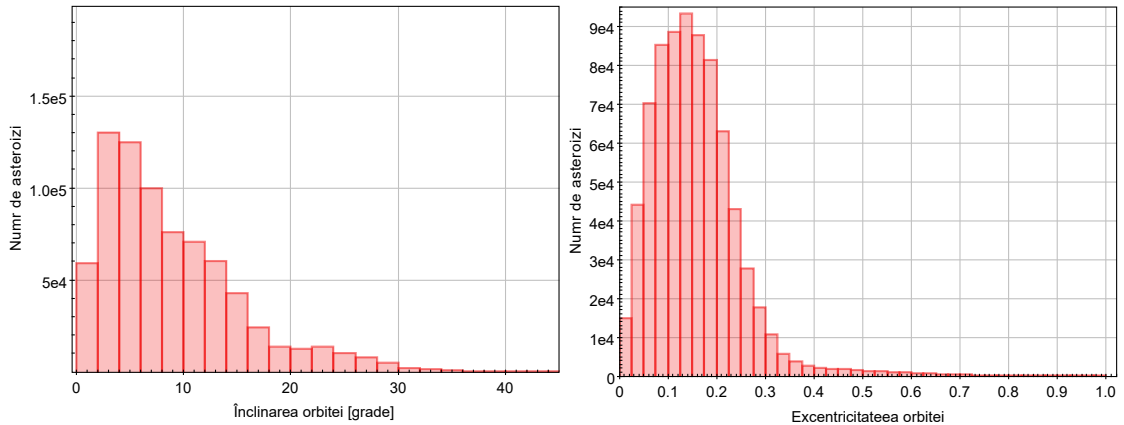
culară;  $0 < e < 1$  – orbită eliptică;  $e=1$  – orbită parabolică;  $e > 1$  – orbită hiperbolică;

- înclinarea orbitei ( $i$ ), termen care definește înclinarea orbitei asteroidului față de planul ecliptic (planul orbitei terestre); se măsoară în grade și poate lua valori de la  $0^\circ$  la  $180^\circ$ , o înclinare mai mare de  $90^\circ$  însemnând o mișcare retrogradă;
- longitudinea nodului ascendent ( $\Omega$ ), termen care definește locul pe orbită unde asteroidul trece din emisfera sudică ecliptică în cea nordică; se măsoară în grade și ia valori de la  $0^\circ$  la  $360^\circ$ ; se măsoară în sens trigonometric de la punctul vernal;
- argumentul periheliului ( $\omega$ ), termen care indică poziția periheliului pe orbită, măsurată de la nodul ascendent în sensul de rotație al asteroidului; se măsoară în grade și ia valori de la  $0^\circ$  la  $360^\circ$ ;
- perioada de revoluție ( $P$ ), indică timpul în care obiectul face o rotație completă în jurul Soarelui; se notează cu  $P$  și se măsoară în zile sau ani; conform legilor lui Kepler, perioada este mai scurtă pentru obiectele cu orbite aproximativ circulare, care au semiaxa mare a orbitei de valori mai mici;
- momentul trecerii la periheliu ( $T$ ), indică momentul când asteroidul a trecut la periheliu; se exprimă în dată iuliană sau calendarul gregorian;
- anomalia medie la epocă ( $M$ ), indică poziția pe orbită a asteroidului, la momentul pentru care s-au calculat elementele orbitale; se măsoară în grade și ia valori de la  $0^\circ$  la  $360^\circ$ .

În cazul real al unei orbite eliptice vor exista două puncte pe orbită unde obiectul se afla mai aproape și mai departe de Soare. Acestea se numesc *distanța periheliului*,  $q$  și *distanța afeliului*,  $Q$  și se calculează cu relațiile 2.1 și 2.2.

$$q = a(1 - e) \quad (2.1)$$

$$Q = a(1 + e) \quad (2.2)$$



**Figura 2.4:** Distribuția excentricității și a înclinăției orbitelor asteroizilor, folosind elementele orbitale osculatoare. În histogramele de mai sus s-au folosit datele din baza de date ASTORB, care conține aproximativ 900.000 de asteroizi. 85% dintre asteroizi au orbitele cu înclinări între 0 și 15 grade. 82% dintre asteroizi au semiaxe mari ale orbitelor între 2,1 și 3,2 UA.

unde  $a$  - semiaxa mare a orbitei,  $e$  - excentricitatea; cele două puncte se mai numesc și *puncte apsidale*.

Mai definim și *nodul ascendent* ca locul pe orbită de unde latitudinea ecliptică obiectului devine pozitivă și *nodul descendent* ca locul pe orbita de unde latitudinea devine negativă, în raport cu ecliptica. Dreapta care unește cele două noduri se numește *linia nodurilor*.

Distribuția înclinării orbitelor ne arată că majoritatea obiectelor au înclinări în domeniul de 0-20°, în apropierea planului ecliptic. Majoritatea excentricităților orbitelor au valori de până în 0,3, fiind preferate orbite cu excentricități în jurul valorilor de 0,2-0,3 (Fig. 2.4). Distribuția longitudinii periheliului dar și a nodului ascendent relevă așa-numitele *biasuri observaționale*, faptul că se descoperă mai mulți asteroizi în anumite zone de cer. Din cauza densității stelare mari din planul galactic este aproape imposibilă descoperirea de asteroizi.

Astfel, precizia de calcul de poziție a asteroizilor scade pe măsură ce ne îndepărtăm de epoca pentru care au fost determinate elementele orbitale, din cauza perturbațiilor planetare. Pozițiile trebuie mereu recalulate pe baza noilor observații, luându-se în considerare și perturbațiile. În cazul studiului orbitelor pentru un interval de

timp lung, acestea trebuie integrate la epocile dorite, prin aplicarea perturbațiilor planetare ale planetelor și ale asteroizilor mari.

Folosind elementele orbitale se poate reprezenta orbita asteroidului, care de cele mai multe ori este *osculatoare*, calculată pentru un anumit moment de timp (epocă). Pozițiile calculate în acest fel sunt valabile doar un anumit interval de timp, pentru epoci diferite fiind necesară integrarea lor, adică recalcularea poziției obiectelor care perturbează orbita asteroidului și apoi recalcularea orbitei acestuia.

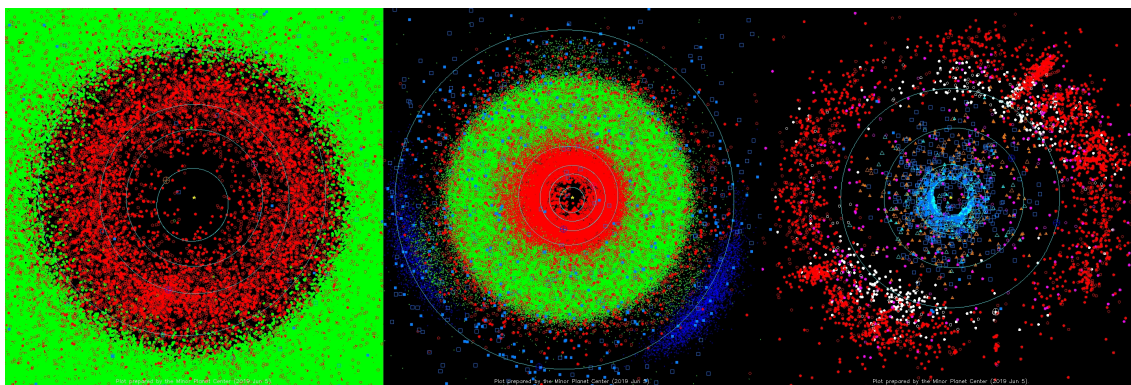
Pentru a se putea studia distribuția elementelor orbitale se calculează așa numitele elemente orbitale *proprie*, care, spre deosebire de cele osculatoare, pot fi considerate fixe în timp. După cum este sumarizat în [116], elementele orbitale se determină prin modelarea mișcării asteroidului, identificarea diverselor tipuri de perturbații care apar în mișcarea acestuia (seculare și de perioadă scurtă), eliminarea efectelor acestora din elementele orbitale. Astfel se determină elemente orbitale (proper a, proper i, proper e) care pot fi comparate cu cele ale altor obiecte, investigații care au dus la descoperirea asteroizilor cu origine comună sau la efectul cauzat de forța de atracție a planetelor Jupiter și Saturn.

## 2.2 Distribuția asteroizilor

Subiectul tezei de doctorat a fost orientat spre observația unui eșantion al asteroizilor geointersectorii (activi, posibile surse ale curenților de meteori și posibile ținte pentru sonde spațiale) și a celor din centura principală.

Asteroizii, sau mai bine spus, orbitele lor, se găsesc în aproape orice regiune din sistemul solar, cu precădere în zonele în care orbitele sunt stabile în timp, dar și în locurile în care au migrat din cauza forțelor gravitaționale și non-gravitaționale. Bazele de date actuale de orbite ne permit descoperirea anumitor grupuri de asteroizi, cea mai simplă clasificare fiind cea după depărtarea de Soare.

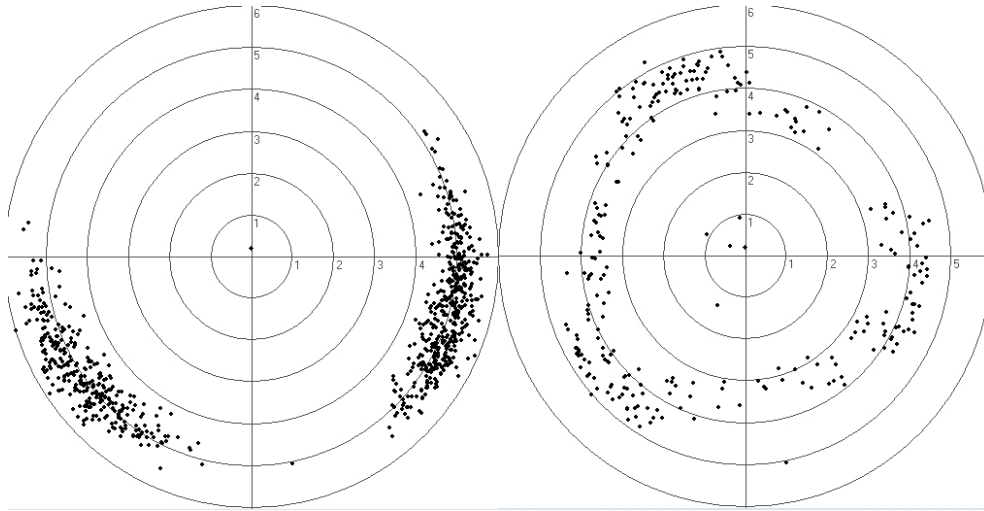
Este evident faptul că cea mai mare parte a asteroizilor descoperiți se află între planetele Marte și Jupiter, între 2 și 2,4 UA (Fig. 2.5). Aceasta este *centura principală* de asteroizi, în care s-au descoperit, până la data 1 martie 2020, aproximativ 900.000 de obiecte.



**Figura 2.5:** Distribuția asteroizilor în sistemul solar. La stânga se observă asteroizii geointersectorii (cu roșu), în mijloc cei din centura principală (cu verde), asteroizii troieni (cu albastru) și la dreapta se văd asteroizii trans-neptunieni (cu roșu). Sunt trecute pozițiile asteroizilor la data de 5 iunie 2019. Sursa: Minor Planet Center.

Centura principală este împărțită în trei regiuni prin zonele de rezonanță cu Jupiter [46]: centura principală *interioară* se întinde de la 2 la 2,5 UA, centura principală *de mijloc* este zona între 2,5 și 2,82 UA, iar centura principală *exterioară*, de la 2,8 la 3,3 UA. Înspre Marte se află grupul Hungaria, cu semiaxe mari ale orbitelor între 1,76 și 2,06 UA.

Înspre Jupiter, întâlnim asteroizii de tip Cybelle, cu semiaxa mare a orbitei între 3,27 și 3,7 UA. De la 3,8 la 4 UA se află grupul Hilda 2.6, iar centrați pe 5,2 UA se află asteroizii troieni ai planetei Jupiter. Asteroizii troieni se află în punctele Lagrange  $L_4$  și  $L_5$  ale orbitelor planetelor, până la data de 20 mai 2020 fiind descoperiți 8151 de asteroizi troieni aflați pe orbita lui Jupiter, 1 pe orbita lui Uranus, 28 pe orbita lui Neptun, 1 pe orbita Pământului și 9 pe orbita lui Marte (Fig. 2.6).



**Figura 2.6:** *Pozițiile celor mari mari asteroizi troieni (stânga) și hilda la data 1 martie 2020. În centru este Soarele.*

Mai departe de Jupiter întâlnim asteroizi cu orbite eliptice, cu semiaxe mari între 5,52 și 30,1 UA, denumiți *centauri*. O populație aparent numeroasă este cea a obiectelor trans-neptuniene, cu semiaxe mari între 30 și 50 UA. Obiectele care au periheliile mai mari de 30 UA și semiaxele mari cu valori mai mari de 50 UA sunt denumite *obiecte împrăștiate*, toți asteroizii îndepărtați fiind considerați ca parte a centurii lui Kuiper. Anumite obiecte din această parte a sistemului solar prezintă activitate cometară, fără să fie clasificate drept comete.

O populație asteroidală complexă și importantă este cea a asteroizilor *geointersectori*. Modificarea orbitelor asteroizilor din centura principală prin fenomenele de rezonanță a mișcării medii și de rezonanță seculară, duce la injecția de obiecte în sistemul solar interior [63], orbita Pământului fiind intersectată orbitele a numeroși asteroizi. Până la data de 1 martie 2020 se cunoșteau aproximativ 22.000 de asemenea obiecte, definite ca asteroizi care au distanța afeliului  $Q \geq 0,983$  UA și distanța periheliului  $q \leq 1,3$  UA [28].

În funcție de parametrii orbitali, asteroizii geointersectori sunt clasificați în patru grupe, după cum urmează:

- de tip Amor ( $1,016 < q < 1,3$  UA); orbita acestor asteroizi se apropia de orbita terestră dar nu o intersectează;
- de tip Apollo ( $a \geq 1,0$  UA;  $q \leq 1,016$  UA); orbita acestor asteroizi se inter-

sectează cu cea terestră;

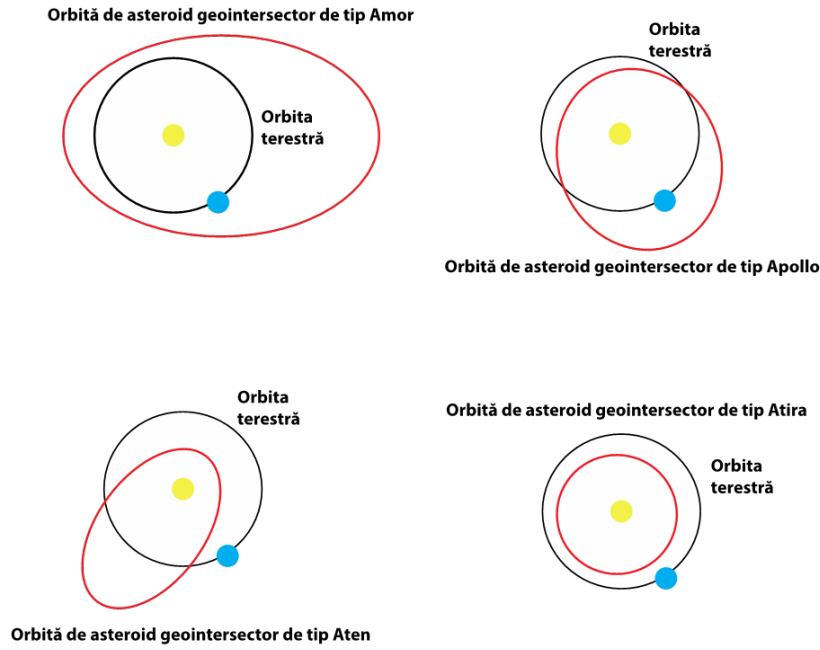
- de tip Aten ( $a < 1,0 \text{ UA}$ ;  $Q \geq 0,983 \text{ UA}$ ); orbita acestor asteroizi se intersectează cu cea terestră;
- de tip Atira ( $Q < 0,983 \text{ UA}$ ); orbita lor este interioară orbitei terestre.

Numele claselor de asteroizi geointersectori vin de la asteroizii (2062) Aten, (1862) Apollo, (1221) Amor și (163693) Atira, ai căror orbite sunt luate ca referință (Fig. 2.7).

Asteroizii de tip *Amor* au excentricități mari, cu afeliul în centura principală, dar cu un periheliu mai mare decât semiaxa mare a orbitei terestre. Orbitele acestora intersectează orbita planetei Marte dar nu și pe cea a Pământului. Asteroizii de tip *Apollo* au orbite cu semiaxa mai mare de 1 UA, care intersectează orbita terestră. Cei de tip *Aten* au semiaxa mare a orbitei mai mică decât cea terestră și intersectează orbita Pământului. O categorie rară de asteroizi geointersectori sunt cei de tip *Atira*, care au orbite interioare orbitei terestre. Obiectele ale căror orbite se apropie la mai puțin de 0,05 UA de orbita terestră și au o mărime mai mare de 150 m (magnitudinea absolută mai mare de 22) sunt intitulate *potentially hazardous asteroids (PHA)* [151]. O sub categorie a asteroizilor PHA este reprezentată de *potențialii impactori*, obiecte care au probabilitatea de impact cu Pământul mai mare de 0, în limitele incertitudinii cu care s-a determinat orbita.

O caracteristică importantă a asteroizilor geointersectori este accesibilitatea pentru misiuni spațiale. Fiind obiecte care se apropie de Pământ, se poate ajunge la ele folosind combustibil minim, dacă și viteza relativă a acestora față de Pământ este mică. Astfel există în populația de asteroizi geointersectori ținte ideale pentru explorare, clasificate în funcție de viteza relativă ( $\Delta v$ ). Aceasta este viteza totală necesară pentru ca o sondă spațială să treacă de la orbita terestră la cea a unui alt corp. Conform ecuației rachetei, modificarea liniară a vitezei produce o schimbare exponențială în consumul de combustibil, deci modificarea vitezei trebuie să fie cât mai mică [236].

Pentru o misiune fără întoarcere se ia în considerare viteza necesară modificării orbitei sondei și a manevrelor orbitale necesare rămânerii la asteroid, iar pentru o misiune care aduce înapoi pe Terra material asteroidal (sample return) se ia în



**Figura 2.7:** Tipuri de orbite ale asteroizilor geointersectori.

considerare și viteza necesară ajungerii la Pământ. Modelul matematic este elaborat în [223], unde se definesc *figura de merit* și  $\Delta v$ , după cum urmează:

$$F = U_L + U_R \quad (2.3)$$

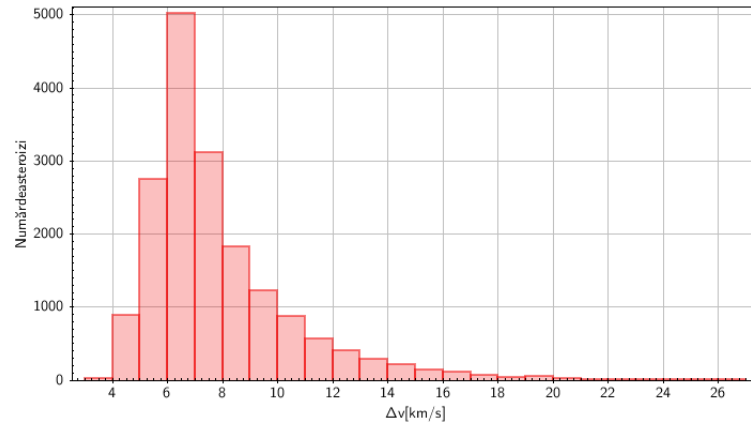
unde  $U_L$  este impulsul necesar pentru a pune sonda pe o traiectorie de interceptare a asteroidului, iar  $U_R$  este impulsul necesar ca sondă să se intersecteze cu asteroidul. Cele două valori se calculează în raport cu viteza orbitală a Pământului, luându-se în considerare valorile distanțelor afeliului și a înclinării orbitei asteroidului.

$$\Delta v = 30F + 0,5 \quad [km/s] \quad (2.4)$$

unde  $F$  este figura de merit iar 30 provine de la viteza orbitală a Pământului.

Ca o regulă generală, cele mai mici valori ale lui  $\Delta v$  se obțin la întâlnirea în punctele apsidale ale orbitei asteroidului [223], pentru asteroizii de tip Amor și Apollo fiind eficientă întâlnirea când aceștia se află la afeliu. O listă completă de valori  $\Delta v$  pentru asteroizii geointersectori se găsește în grupul observatorilor radar

ai asteroizilor<sup>6</sup>. O histogramă a lui  $\Delta v$  arată că majoritatea vitezelor sunt cuprinse în intervalul 5-8 km/s și că sunt doar 29 de asteroizi cu  $\Delta v < 4$  km/s.



**Figura 2.8:** *Histograma  $\Delta v$  pentru 17.607 asteroizi geointersectorii.*

În cadrul Near-Earth Object Human Space Flight Accessible Targets Study (NHATS)<sup>7</sup>, care, pentru explorarea asteroizilor cu echipaj uman, ia în considerare, în afară de parametri fizici ai acestuia, durata misiunii și ferestrele de lansare, s-a stabilit ca limită maximă de  $\Delta v$  valoarea de 12 km/s. În acest caz peste 16.256 de asteroizi geointersectorii pot fi vizitați, fiind nevoie de stabilirea parametrilor fizici pentru toate aceste obiecte (Fig. 2.8). Este de la sine înțeles că determinarea parametrilor fizici ai asteroizilor geointersectorii cu  $\Delta v$  mic reprezintă o activitate esențială cu pentru planificarea și pregătirea misiunilor spațiale.

Cometele sunt obiecte pe orbite cu excentricitate mare, care pot ajunge în preajma planetelor, pot fi captate și pot deveni obiecte geointersectoare, contribuind la populația de obiecte periculoase pentru planeta noastră sau care sunt surse de meteori. Cele mai susceptibile în a fi perturbate sunt cometele din familia lui Jupiter, obiecte care au o valoare a parametrului Tisserand între 2 și 3.

În urma simulărilor numerice ale orbitelor cometelor se estimează că între 0,1 și 6% din populația de asteroizi geointersectorii [23] [97] este compusă din comete din familia lui Jupiter (comete cu perioada de revoluție  $< 20$  de ani și cu înclinare orbitală mică) ale căror orbite au fost perturbate de forța de atracție ale planetelor

<sup>6</sup><https://echo.jpl.nasa.gov/>

<sup>7</sup><https://cneos.jpl.nasa.gov/nhats/intro.html>



terestre și de captarea în zonelor de rezonanță de mișcare medie cu Jupiter (vezi secțiune 2.3.1). Cele două tipuri de obiecte pot fi diferențiate din punct de vedere fizic prin observații astronomice și, din punct de vedere dinamic, prin parametrul Tisserand. Acest parametru postulează că următoarea cantitate se conservă în urma unor întâlniri planetare, cel mai des întâlnite fiind întâlnirile dintre obiectele mici și cea mai mare planetă din sistemul solar.

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \cos i \sqrt{\frac{1 - e^2}{a_J/a}} \quad (2.5)$$

unde:  $a_J$  este semiaxa mare a orbitei lui Jupiter (5,2 UA),  $a$ , semiaxa mare a orbitei obiectului,  $e$  este excentricitatea orbitei asteroidului iar  $i$  înclinarea orbitei asteroidului.

În urma unei întâlniri dintre o cometă și planeta Jupiter, conservarea parametrului Tisserand obligă la modificarea excentricității și a înclinării orbitei obiectului mai puțin masiv. S-a determinat că asteroizii au valoarea  $T_J$  mai mare de 3, cometele mai mică de 3, iar cometele din familia lui Jupiter au  $2 < T_J < 3$ . Întâlnirea cu Jupiter poate expulza cometa din sistemul solar, dar o și poate injecta în sistemul solar interior [23]. Pentru că la distanțe mari de Soare sunt inactive, având aspect stelar, și din cauză că cele care au perioade de revoluție scurte se consumă mai des prin sublimare, deseori cometele nu pot fi diferențiate decât dinamic, prin parametrul Tisserand. Și albedo-ul poate fi un indicator care poate separa observațional cometele de asteroizi. În prezent se face distincția între comete *adormite* și comete *stînse*. Primele sunt comete pe suprafața cărora s-a format o crustă de silicați care nu permite transferul energiei solare în interior spre materialele volatile care pot sublima, iar cele din urmă sunt cometele ale căror materiale volatile s-au consumat în totalitate [211].

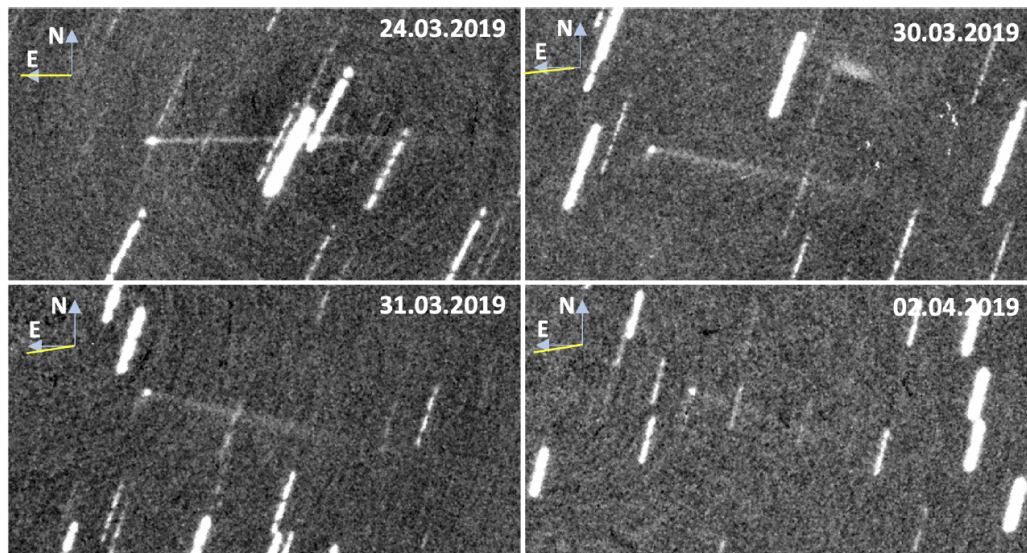
### 2.2.1 Asteroizi activi

O altă categorie de asteroizi sunt cei *activi*, obiecte care uneori au aspect cometar, prezentând halouri difuze luminoase (coma) sau cozi. O definiție aproximativă a asteroizilor activi îi definește ca asteroizi care au  $T_J \geq 3,08$ , prezintă pierdere de masă și o semiaxa mare a orbitei mai mică decât cea a planetei Jupiter [99].

Procesele fizice prin care asteroizii devin activi sunt diverse, așa cum se arată în [107]. Asteroidul poate fi lovit, impactul de mare viteză fiind responsabil pentru dezintegrarea acestuia și pentru apariția de fragmente mai mici. Instabilitatea rotațională poate duce la dezintegrarea unui obiect cu structură poroasă (conglomerat de fragmente), forțele non-gravitaționale fiind responsabile pentru accelerarea rotației asteroizilor. Activitatea poate proveni de la dezintegrarea mineralelor sub acțiunea radiației solare dar și de la sublimarea gheții[107], proces fizic dependent de depărtarea de Soare.

În funcție de aspectul asteroidului și de frecvența activității, se poate face diferența între procesele fizice care duc la apariția activității. Un asteroid care se activează periodic, mai ales în preajma trecerii la periheliu, poate fi activ în urma sublimării materialelor volatile sub acțiunea căldurii Soarelui sau de dezintegrare termică în preajma Soarelui. Dintre cei 27 de asteroizi activi descoperiți până la începutul anului 2020, doar pentru 324P/2010 R2 (La Sagra), 288P/(300163) 2006 VW<sub>139</sub>, (1) Ceres, 133P/(7968) Elst-Pizarro, 176P/(118401) LINEAR, P/2012 T1 (PANSTARRS), 238P/Read (P/2005 U1) și 313P/Gibbs (P/2014 S4) s-a pus în evidență acest proces fizic [107].

Pierderea de masă episodică este pusă pe seama unui impact suferit de asteroid, iar în acest caz se poate modela forma ejecției de masă care apoi se compară cu observațiile. La fel este și cazul ejecției de masă în urma instabilității rotaționale, adică situația în care perioada de rotație a asteroidului este prea mare, pierzându-se materie local sau, în cele mai drastice situații, apărând chiar dezintegrarea obiectului. Pentru a se studia aceste procese este nevoie să se determine cu precizie perioadele de rotație ale asteroizilor, informații care permit urmărirea celor pentru care forța centrifugă este mai mare decât forța de atracție generată de masa obiectului. Pentru câțiva dintre asteroizii activi descoperiți s-a scos în evidență acest proces: (3200) Phaethon, 311P/PANSTARRS (P/2013 P5), P/2010 A2 (LINEAR), P/2013 R3 (Catalina-PANSTARRS), (6478) Gault [107]. În cazul a doi asteroizi activi, P/2012 F5 (Gibbs) și 133P/(7968) Elst-Pizarro, două procese sunt active: sublimarea și rotația rapidă, particulele emise în timpul sublimării fiind accelerate de rotația rapidă. Dezintegrarea în urma rotație rapide poate fi recurentă dacă doar o parte a suprafeței obiectului se pierde în spațiu. Asteroizii (3200) Phaethon și



**Figura 2.9:** *Asteroidul activ (6478) Gault observat de autor. În imagini se observă coada asteroidului și nucleul luminos cu aspect stelar. Pe figuri este marcată orientarea câmpului precum și direcția antisolară.*

(6478) Gault au fost observați (Fig. 2.9) și în cadrul doctoratului [133]. Recurența asteroizilor activi în populația cunoscută de asteroizi este de 1 la 10.000 după cum se arată în [107] pe baze empirice. Un studiu realizat în 2018 confirmă acest rezultat, din 11.703 observați doar unul fiind activ [43] confirmă rezultatul anterior și faptul că asteroizii activi sunt o categorie de obiecte.

## 2.2.2 Asteroizi pe orbite cometare

În cazul asteroizilor geointersectori activi, fragmentele apărute în urma creșterii activității pot lovi Pământul, obiectele devenind o sursă de meteoriți. Astfel, studiul asteroizilor activi este de interes pentru umanitate, mai ales pentru cazul geointersectorilor în paradigma în care cea mai mare parte din apa de pe Terra este asemănătoare cu cea detectată pe asteroizi. Prin studiul statistic al orbitelor, mai exact prin determinarea parametrului Tisserand pentru asteroizii geointersectori și cei din centura principală, s-au identificat asteroizi aflați pe orbite cometare și anume, asteroizii care au  $T_J < 2$ . În urma raționamentelor descrise în paragraful anterior există o preocupare continuă [127] [60] [23] pentru identificarea asteroizilor pe orbite cometare și cu albedo scăzut (cometar), însă în prezent detecția activității acestora

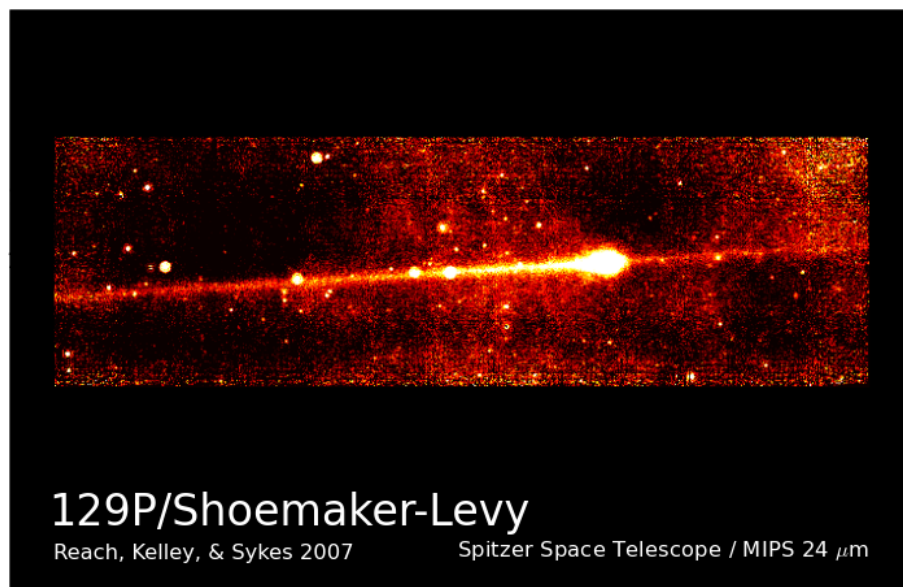
se face pur întâmplător. În 2005 s-a găsit [60] că 64% dintre asteroizii geointersectorii aflați pe orbite cometare au albedo cometar, considerat ca 0,075 în studiul respectiv. Totodată s-a detectat și o dependență a albedoului cometar în funcție de parametrul Tisserand, pentru o valoare a acestuia mai mică de 2,6 asteroizii având albedo cometar [60].

Pentru o mai bună selecție a asteroizilor aflați pe orbite cometare s-a introdus un criteriu de selecție în plus și anume, *distanța de intersecție orbitală minimă* sau MOID [235]. Aceasta arată cât de apropiate sunt două orbite, în cazul nostru cea a asteroidului și a lui Jupiter. S-a ales ca limită maximă de depărtare a orbitelor și anume de trei ori raza sferei Hill. Sfera Hill este acel volum în care efectele de maree ale corpului masiv pot rupe corpul de probă care se apropie de corpul masiv. Se poate defini o sferă Hill pentru toate planetele, pentru Soare, sateliți artificiali, etc., pentru toate corpurile a căror masă este cunoscută. Astfel s-au identificat 331 de asteroizi pe orbite cometare, dintr-un număr de 500.000 [235]. Studiul spectroscopic al proprietăților suprafețelor a 29 de asemenea obiecte a relevat că cel mai probabil sunt comete adormite sau stinse [129] cu spectre primitive.

### 2.2.3 Asteroizi ca surse de meteori

Interesul pentru studiul asteroizilor este potențat și de asocierea curenților de meteori cu anumite obiecte cosmice. Curenții de meteori sunt activi în anumite momente ale anului, când Pământul traversează o zonă bogată în materie interplanetară, fiind văzuți mai mulți meteori pe bolta cerească decât în alte momente. Sursele materiei interplanetare pot fi primordiale (praful zodiacal din planul eclipticii) și secundare, cometele. La sfârșitul secolului XIX s-a făcut prima identificare între elementele orbitale ale unei comete și cele ale meteorilor observați, când, în 1867, au fost asociate Perseidele cu cometa 109P/Swift-Tuttle [220] și Leonidele cu 55P/Temple-Tuttle [8]. Predicțiile au început să dea rezultate pe măsură ce s-au identificat curenți de meteori dar și comete asociate cu aceștia. Astfel s-a ajuns la modelul în care cometele, care conțin și praf în materialele volatile înghețate, atunci când încep să sublimeze emană pe orbită praf [286]. Pentru că viteza materiei expulzate este mai mică decât cea necesară părăsirii orbitei, materialul rămâne pe orbita come-

tei, suferind și perturbații gravitaționale planetare. Astfel se poate integra orbita în timp și se pot face predicții. La o nouă întoarcere la periheliu cometa lasă un alt nor de materie pe o orbită diferită cea a trecerii anterioare. Din acest motiv în diferiți ani Pământul se poate întâlni cu materie lăsată la treceri diferite la periheliu [287]. Legătura dintre meteori și comete este și mai sigură după observațiile în infraroșu, care au detectat emisia termică a prafului aflat pe orbită<sup>8</sup> (Fig. 2.10), deosebit de util a fiind telescopul spațial Spitzer, care a detectat zeci de comete și praful asociat [205].



**Figura 2.10:** *Cometa 129P și emisia termică a prafului aflat pe orbita sa.*

Prima asociere dintre un curent de meteori și un asteroid a fost realizată în 1983, când s-a observat că orbita meteorilor din curentul Geminide este similară cu cea a asteroidului de tip Apollo, (3200) Phaethon [62]. Asteroidul era nou descoperit iar orbita sa se potrivea cu cea a acestui curent de meteori, a cărui sursă cometară lipsea. Mai târziu s-a descoperit că (3200) Phaethon este un asteroid activ, posibil o cometă stinsă, fiind asemănător din punct de vedere dinamic cu alt asteroid, 2005 UD. Pe măsură ce mai mulți asteroizi geointersectorii au fost descoperiți s-au identificat similitudini între orbitele unora și ale altor curenți de meteori, cea mai evidentă situație fiind cea a curentului de meteori Quadrantide, unul dintre cei mai

<sup>8</sup><https://www.astro.umd.edu/msk/science/trails/>

activi curenți, și asteroidul de tip Amor, (196256) 2003 EH1 [105]. În urma acestor asocieri reiese clar că nu doar cometele pot fi surse de materie interplanetară.

Este de la sine înțeles că în lipsa parametrilor fizici ai meteorilor și ale eventualelor surse ale lor, singura modalitate în care se pot identifica sursele este similitudinea orbitelor. S-au elaborat mai multe metode care constau în cercetarea și verificarea similitudinii unor elemente orbitale și anume  $\omega$ ,  $\Omega$ ,  $a$ ,  $e$  și  $i$  [230] [110]. Pentru că valorile unor elemente orbitale ( $\omega$  și  $\Omega$ ) variază pe o scară de timp de mărimea duratei un curent de meteori, s-a elaborat o metodă de calcul simplificată, care ia în considerare doar  $a$ ,  $e$  și  $i$  [4]. Folosind relația 2.6 se poate calcula un parametru, care arată un grad mare de similitudine cu cât este mai mic.

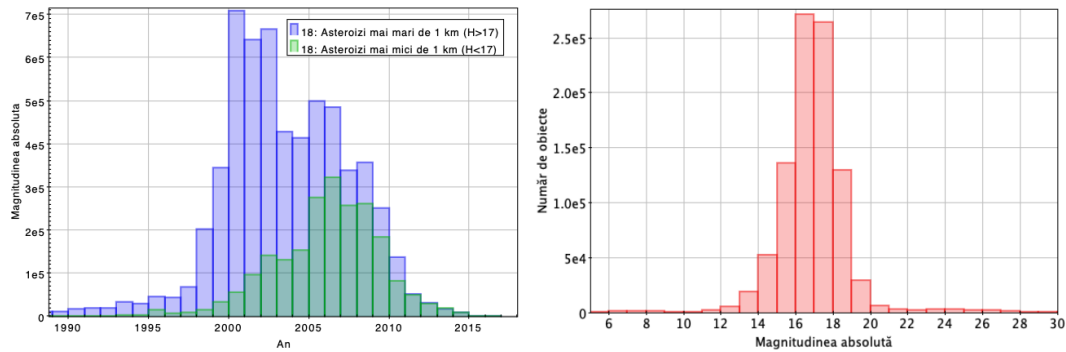
$$D^2 = \left(\frac{a_1 - a_2}{3}\right)^2 + (e_1 - e_2)^2 + \left(2 \sin \frac{i_1 - i_2}{2}\right)^2 \quad (2.6)$$

unde 1 și 2 denotă obiectele ale căror orbite sunt comparate,  $a$  este semiaxa mare a orbitei,  $i$  este înclinarea orbitei iar  $e$  este excentricitatea.

Valoarea limită acestui parametru, pentru ca două orbite să fie similare, a fost stabilită la 0,3, dar, pentru că s-au detectat prea multe surse, s-a redus la 0,12. A fost necesară introducerea și altor restricții, bazate pe poziția radiantului observat față de cel calculat și a vitezei pe care o au meteorozii în preajma Pământului pentru ca identificarea surselor curenților de meteori să fie cât mai precisă [169]. Un rezultat recent identifică 206 asteroizi geointersectori cu anumiți curenți de meteori, 50 de obiecte dintre cele 206 fiind catalogate ca surse prin folosirea a două tipuri de criterii de selecție [53] [52].

În urma determinării unor parametri fizici se poate exclude ca sursă un obiect, după cum urmează: tipul de suprafață poate indica un obiect primitiv, o cometă stinsă, adormită sau o suprafață clasică de asteroid; valoarea perioadei de rotație poate arăta structura obiectului; un asteroid cu structură poroasă poate fi sursă de meteori pentru că se poate dezintegra (total sau local) mai ușor decât unul cu structură monolitică. În plus, după descoperirea asteroizilor activi, se acordă o mai mare atenție surselor asteroidale de meteori. În cadrul doctoratului am observat șase asteroizi care sunt clasificați ca surse de meteori: (1566) Icarus, (3200) Phaethon, (155140) 2005 UD, (190166) 2005 UP156 și (503941) 2003 UV11.

În ciuda numărului mare de asteroizi, se estimează că masa totală a centurii principale este de  $3 \times 10^{21}$  kg [119], doar 0,05 din masa terestră. Masa mică a centurii în ciuda unui număr mare de obiecte se explică prin mărimea mică a asteroizilor. În lipsa informațiilor despre masele și densitățile asteroizilor, o histogramă a magnitudinilor absolute ne arată (Fig. 2.11) preponderența asteroizilor mici, cu magnitudini absolute cuprinse între 15 și 18,9 (diametre aproximative între 0,4 și 3 km).



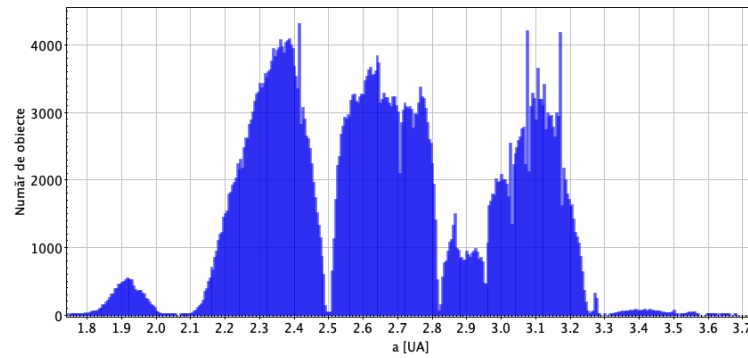
**Figura 2.11:** *Stânga: rata de descoperire a asteroizilor în funcție de magnitudinea absolută. În ultimii zece ani s-au descoperit mai mulți asteroizi mici decât mari. Dreapta: magnitudinea absolută a asteroizilor descoperiți până în prezent. Sursa datelor: baza de date ASTORB.*

La o privire atentă a distribuției elementelor orbitale (Fig. 2.12) se poate remarca existența unor zone speciale, în care numărul de asteroizi prezenți este foarte mic. Zonele acestea, care de fapt reprezintă un număr mic de orbite cu elemente orbitale specifice, sunt zonele de rezonanță, în care se află asteroizi studiați în cadrul doctoratului.

## 2.2.4 Rezonanțe de mișcare medie

Primul pas în descoperirea structurii centurii de asteroizi a fost făcut de Kirkwood în 1866 [114], care a identificat goluri în centura de asteroizi, semiaxe mari la care se află un număr foarte mic de asteroizi. Kirkwood a făcut o paralelă între golurile din inelele lui Saturn și cele ale centurii de asteroizi, folosind în studiul său doar 80 de obiecte (numărul de asteroizi cunoscut la acea dată). Golurile lui Kirkwood, cum le-a rămas numele, sunt locuri în sistemul solar golate de asteroizi de către Jupiter.

În Fig. 2.12 prezintă o histogramă a semiaxelor mari ale asteroizilor cunoscuți până în prezent în care se văd golurile de la 2,5 UA, 2,82 UA, 2,95 UA și 3,27 UA.



**Figura 2.12:** Număr de asteroizi în funcție de semiaxa mare a orbitei. Sursa datelor: baza de date de elemente orbitale proprii, Nesvornyy, 2015.

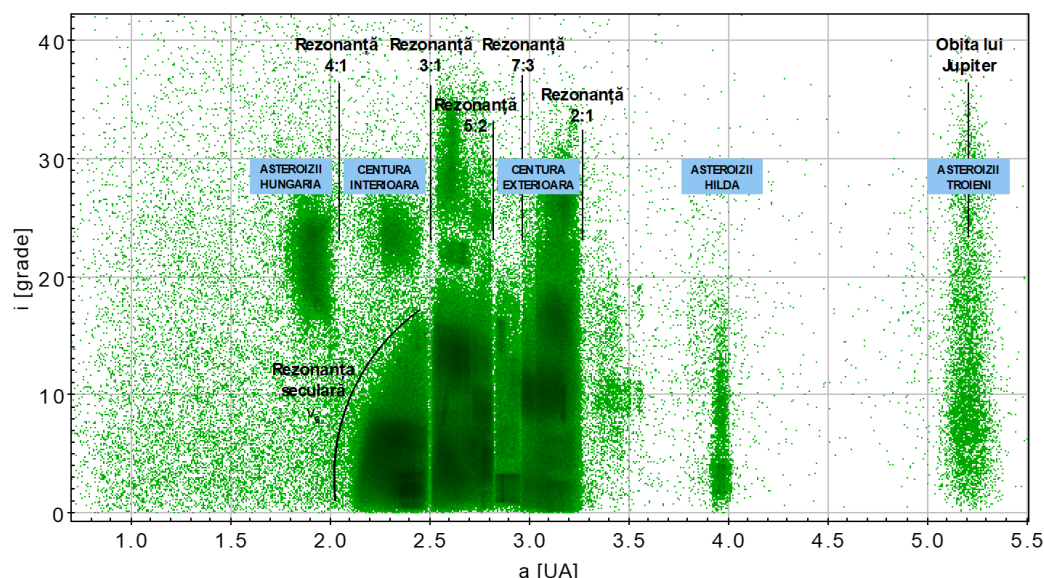
Disponerea semiaxelor mari ale orbitelor asteroizilor din centura principală este rezultatul fenomenelor de rezonanță, a comesurabilității perioadelor de revoluție, un subiect care va fi tratat în capitolul următor.

Pentru a studia modul în care se definesc diferitele regiuni din centura principală este nevoie să privim distribuția elementelor orbitale ale asteroizilor, în principal semiaxa mare a orbitei în funcție de înclinarea orbitei și excentricitate, spațiul  $(a, i, e)$ . Imperativă este folosirea elementelor orbitale proprii, cele care reprezintă orbita medie a asteroidului, pentru a obține un instantaneu al centurii principale ca și cum influențele gravitaționale nu ar exista.

La un studiu detaliat al distribuției elementelor orbitale în spațiul  $(a, i)$  pentru asteroizii de până la 6 UA, se observă că la anumite depărtări de Soare există goluri, regiuni în care se află un număr mic de asteroizi, fapt observat pentru prima oară de Kirkwood în 1886. Se observă o diminuare drastică a numărului de asteroizi la distanța de 2,1 UA de Soare pentru asteroizii care au orbite cu înclinare mică. Această graniță se îndepărtează de Soare pe măsură ce înclinarea orbitei crește, curbându-se înspre 2,6 UA. O altă regiune în care nu se regăsesc multe obiecte se află la 3,28 UA. Asteroizii care au depărtarea medie egală cu această valoare sunt în rezonanță cu Jupiter, adică valoarea perioadei de revoluție este comensurabilă cu cea a planetei. În cazul acestor asteroizi, perioada de revoluție este jumătate din perioada de revoluție a lui Jupiter. În interiorul centurii există alte goluri, cele mai



evidente fiind cele de la 2,5 și 2,82 UA, care se aplică și asteroizilor cu înclinări mari față de ecliptică (Fig. 2.13).



**Figura 2.13:** Distribuția semiaxelor mari în funcție de înclinarea orbitelor pentru 741.746 de asteroizi (distribuția în planul  $a, i$ ). Sunt marcate rezonanțele de mișcare medie, rezonanțele seculare și câteva grupuri de asteroizi. Date: Minor Planet Center.

Marginile și golurile centurii principale de asteroizi sunt produse de forța de atracție celor mai mari planete din apropierea centurii, care modifică orbitelor tuturor asteroizii atunci când aceștia se află la cea mai mică depărtare de planetă. Pentru majoritatea, apropierea se produce în locuri diferite pe orbită și influențele se anulează în timp. Însă pentru asteroizii care au perioade comensurabile cu cea a lui Jupiter, adică raportul dintre perioada planetei și cea a asteroidului este o fracție de numere întregi, influența gravitațională maximă se produce în același loc de pe orbita asteroidului, efectul fiind cumulativ. În plus, un obiect prins în rezonanță medie de mișcare cu o planetă (sau mai multe) va suferi modificări cvasi-periodice ale unor elemente orbitale, cu perioade de aproximativ  $10^3$  ani [157].

Acest fenomen poartă numele de *rezonanță în mișcare medie*. Un asteroid care are o perioadă de revoluție de 6 ani, jumătate din cea a lui Jupiter, va întâlni planeta la fiecare două revoluții (rezonanța 2:1). Un asteroid la rezonanță 3:1 va întâlni planeta la fiecare trei revoluții (timp în care Jupiter face una). Cele mai importante zone de rezonanță a mișcării medie sunt descrise în Tabelul 2.1.

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

**Tabelul 2.1:** *Cele mai importante zone de rezonanță din centura principală.*

Puterea unei rezonanțe este dată de ordinul ei ( $q$ ), care se calculează ca diferența dintre valorile rezonanței. De exemplu, rezonanța 3:1 cu Jupiter are gradul 3 ( $q = 3 - 1 = 2$ ). Astfel, există rezonanțe de ordinul 1, 2 sau mai mic, cele mai puternice fiind cele cu grad mai mic [67].

Locul în sistemul solar al unei rezonanțe se determină în felul următor:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.7)$$

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM_\odot} \times a^3 \quad (2.8)$$

unde  $P_i$  reprezintă perioadele de revoluție ale planetei și asteroidului,  $n$  numere întregi,  $G$  constanta gravitațională,  $M_\odot$ , iar  $a$  este semiaxa mare a orbitei.

După egalarea relațiilor de mai sus, rezultă:

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{4\pi^2}{GM_\odot} \frac{GM_\odot}{4\pi^2} \frac{a_p^3}{a_{MMR}^3} \quad (2.9)$$

$$a_{MMR} = a_p \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2/3} \quad (2.10)$$

Studiul fenomenelor de rezonanță au fost inițiate pentru identificarea motivelor pentru care există golurile lui Kirkwood, dar în prezent sunt modelate pentru a se determina cât mai precis rutele de injecție a asteroizilor din centura principală în

sistemul solar interior. Asteroizii ale căror elemente orbitale îi plasează în zonele de rezonanță, vor suferi modificări orbitale haotice prin creșterea excentricității și schimbări ale semiaxei mari și a înclinării orbitei. Astfel, orbitele asteroizilor vor intersecta orbita lui Marte, precum și ale altor planete interioare, devenind potențial periculoși pentru planeta noastră.

Inițial, dispariția asteroizilor din golurile lui Kirkwood a fost explicată prin ciocnirile dintre aceștia, dar s-a dovedit că viteza rezultantă a fragmentelor apărute la impact nu este atât de mare ca să producă modificări mari de orbită [285]. În 1979 s-a dovedit matematic [284] că asteroizii care se află în apropierea rezonanței seculare  $\nu_6$  prezintă oscilații seculare de excentricitate a orbitei mai mari de 0,25, drept pentru care periodic vor avea orbite care intersectează orbita planetei Marte [284]. Un alt studiu [289] a arătat că și obiectele aflate în rezonanța 3:1 prezintă modificări bruște de excentricitate mai mari de 0,3, la intervale neregulate de timp. Dezvoltarea mașinilor de calcul a permis integrarea mai precisă a orbitelor corpurilor mici, luându-se în considerare forța de atracție a mai multor planete, în special modificarea orbitei lui Jupiter sub acțiunea perturbatoare a forței de atracție a lui Saturn, în 1995 [159] fiind arătat faptul că asteroizii din rezonanțele 3:1,  $\nu_6$  și 2:1 pot suferi modificări mai mari de excentricitate față de cum se crezuse, ceea ce însemna că orbitele lor vor intersecta orbita Pământului și pe cea a lui Venus. Mai nou, a fost arătat [74] că ele mai puternice rezonanțe, adică cele care îndepărtează cel mai rapid asteroizii din centura principală înspre sistemul solar interior sunt  $\nu_6$  (rezonanța seculară cu Saturn) și 3:1, 5:2 și 2:1 (rezonanțe de mișcare medie cu Jupiter).

În centura principală se întâlnesc rezonanțe de mișcări medie difuze cu Jupiter dar și cu Pământul [75], după cum urmează: zone de rezonanță difuze cu Jupiter (5:1, 7:2, 11:4, 8:3, 9:4, 11:5); zone de rezonanță difuză cu Pământul (1:2, 2:5). Toate acestea contribuie la injecția de obiecte în sistemul solar interior, producând o populație numeroasă de asteroizi geointersectori.

Alte zone, care au același efect prin alungirea orbitei (mărirea excentricității), au fost teoretizate [23] și modelate numeric în 2017 [75] sunt cele rezonanță cu planeta Marte. Chiar dacă masa planetei Marte este de 3000 de ori mai mică decât cea a lui Jupiter, rezonanțele sunt capabile să transporte asteroizi de mari

dimensiuni pe orbite geointersectoare. Totuși, nu s-au observat până în prezent goluri la depărtările de Soare corespunzătoare, probabil din cauza mecanismului de alimentare cu alți asteroizi prin efecte non-gravitaționale. Zonele rezonante se găsesc între 2,1 și 2,31 UA, cu rapoartele (8:13, 11:18, 14:23, 3:5, 16:27, 13:22, 10:17, 7:12, 11:19, 4:7, 9:16, 5:9, 6:11, 7:13, 8:15, 1:2).

Un caz aparte al rezonanțelor de mișcare medie este reprezentat de *rezonanțele de mișcare medie a trei corpuri*. În acest caz obiectul mai mic poate intra în rezonanță cu suma sau diferența unor rezonanțe medii de mișcare ale altor două planete. Aceste rezonanțe sunt difuze, nu au un efect la fel de puternic precum cele cu Jupiter și au fost determinate analitic pentru toate depărtările de Soare [68] [69]. Una din cele mai dense zone în care se găsesc rezonanțe de acest tip se găsește la depărtări între 0,5 și 2 UA, unde se întrepătrund rezonanțe între Venus-Pământ, Pământ-Jupiter, Venus-Jupiter și Pământ-Marte [68]. Se întâlnesc de asemenea rezonanțe între 2 și 4 UA, precum și 4 și 35 UA.

În afară de rezonanțele de mișcare medie în sistemul solar forța de atracție a planetelor își face simțită prezența și mai subtil, în cadrul rezonanțelor seculare.

### 2.2.5 Rezonanțe seculare

Elementele orbitale ale planetelor prezintă variații cu perioade de ordinul miilor și milioanele de ani [64], fapt cunoscut încă de la sfârșitul secolului XIX [122] [186] [241], toți acești autori fiind preocupați de stabilitatea orbitelor planetelor din sistemul solar. Termenii generali folosiți în acest domeniu sunt următorii:  $g$  - frecvența precesiei longitudinii periheliului;  $s$  - frecvența precesiei longitudinii nodului ascendent; numerele care se atașează reprezintă planetele în ordinea depărtării față de Soare. Astfel, s-au identificat trei frecvențe fundamentale ale acestor variații:

- rata medie de precesie a longitudinii periheliului lui Jupiter, notată cu  $g_5$ ;
- rata medie de precesie a longitudinii periheliului lui Saturn, notată cu  $g_6$ ;
- rata medie de precesie nodurilor orbitelor celor două planete, notată cu  $s_6$ .

Toate aceste fenomene au fost grupate sub denumirea *rezonanțe seculare* și au început să fie studiate pentru a se putea determina cu precizie elementele orbitale

proprii ale asteroizilor [288], fiind știut faptul că planetele perturbă gravitațional corpurile mai mici, fie direct, prin forța de atracție (rezonanțe de mișcare medie), fie indirect și pe termen lung (seculare), prin apariția fenomenului de precesie a periheliului orbitei corpului mai mic. Efectul perturbațiilor seculare este și mai mare atunci când frecvența precesiei orbitei asteroidului este în rezonanță cu frecvențele  $g_5$ ,  $g_6$  și  $s_6$ , adică atunci când frecvența precesiei este un număr întreg dintr-una din frecvențele de mai sus sau din diverse sume ale acestora. Orbitele asteroizilor, ca urmare a variațiilor orbitelor planetelor, sunt forțate să se modifice, periheliul orbitei sau longitudinea nodurilor rotindu-se în jurul Soarelui [161]. Acest proces se numește *avansul periheliului*, *precesia argumentului periheliului* sau *precesia nodurilor orbitelor*.

După cum se vede în Fig. 2.13, marginea interioară a centurii principale de asteroizi este curbată spre obiectele cu înclinare mare. În acea gamă de semiaxe mari și înclinări ale orbitelor este activă cea mai puternică rezonanță seculară, din sistemul solar, rezonanță care se mai numește și  $\nu_6$ . În cazul marginii inferioare a centurii principale, media frecvenței precesiei periheliului orbitei lui Saturn este în rezonanță cu precesia orbitelor unor asteroizi. Efectul acestei rezonanțe scade cu distanța față de Soare și cu mărirea înclinației orbitei asteroizilor. În urma efectelor rezonanței, excentricitatea orbitelor asteroizilor crește, devenind din membri ai centurii principale asteroizi geointersectori sau obiecte ale căror orbite se intersectează cu orbita planetei Marte [131]. Această rezonanță influențează asteroidul indiferent de poziția sa pe orbită efectul său fiind cumulativ. Poziția în centura principală a acestei rezonanțe depinde de înclinarea orbitei asteroidului: pentru înclinări mici se află la 2,2 UA, iar pentru obiecte cu înclinări mari, se află mai departe de Soare (Fig. 2.13).

O altă rezonanță seculară este *rezonanța Kozai*, care se manifestă pentru obiectele cu orbite puternic înclinate [117]. În acest caz periheliul este stabil, semiaxa mare nu variază dar cantitatea din relația 2.11 rămâne constantă în timp.

$$K = (\sqrt{1 - e^2}) \cos(i) \quad (2.11)$$

unde  $i$  este înclinarea orbitei iar  $e$  este excentricitatea.

De aici rezultă că valorile excentricității și înclinării orbitei se modifică în timp, oscilând împreună. Pentru asteroizii aflați în rezonanța Kozai, argumentul periheliului oscilează în jurul valorilor de  $90-270^\circ$  ceea ce face ca afeliul și periheliul orbitei (poziții în care asteroizii se pot apropia mai mult de Jupiter) să se afle în afara planului eclipticii [145]. Astfel, asteroidul este ferit de apropieri care îi pot modifica orbita. Aceste obiecte au orbite stabile timp de zeci până la sute de milioane de ani [143].

Un asteroid aflat într-o zonă de rezonanță de mișcare medie sau seculară va prezenta modificări imprevizibile ale elementelor orbitale. În special excentricitatea poate căpăta o valoare care va face ca orbita asteroidului să se intersecteze cea a lui Marte ( $e > 0,3$ ) sau a planetelor Pământ ( $e > 0,6$ ) și Venus [156]. Dacă nu se produce niciun impact cu planetele, distanța periheliului scade iar cea a afeliului crește, alungându-se la situația în care asteroidul să se apropie foarte mult de Soare sau să fie ejectat din sistemul solar. Pe parcursul revoluțiilor, orbita asteroidului suferă de modificări haotice de înclinare și excentricitate, cantitatea  $(a(1 - e^2))^{1/2} \cos i$  conservându-se (a se vedea Cap. 2.2).

Existența fenomenelor de rezonanță în sistemul solar duce la transportul asteroizilor mai aproape sau mai departe de Soare, prin modificarea excentricității orbitei. În prezent se face distincția între rezonanțele puternice și cele difuze. Primele sunt cele în care sunt evidente golurile de obiecte și sunt cele mai eficiente rezonanțe. Rezonanțele difuze nu sunt la fel de eficiente și sunt numeroase, însă și acestea pot modifica orbitele asteroizilor. Un efect imediat al rezonanțelor este menținerea unei populații stabile de asteroizi geointersectori.

### 2.2.6 Durata de viață a asteroizilor geointersectori

Durata de viață a unui asteroid geointersector nu este mare pentru că suferă multe perturbații gravitaționale, prin fenomenele de rezonanță dar și în urma apropiierilor de planete. Cu când distanța MOID este mai mică, cu atât asteroidul se poate apropia mai mult de o planetă. Elementele orbitale se modifică în urma fiecărei apropieri, prin creșterea sau scăderea vitezei și modificarea semiaxe mari a orbitei, în funcție de geometria întâlnirii și masa planetei. În timp obiectul capătă o traiectorie

haotică prin sistemul solar interior, cu perioade de excentricitate mare, mică, sau de înclinare mare sau mică. Modificările elementelor orbitale sunt corelate prin conservarea parametrului Tisserand. În anumite cazuri apropierea de Jupiter duce la expulzarea din sistemul solar a asteroidului sau împingerea lui în sistemul solar interior [161], unde este posibil și un impact cu Soarele sau cu planetele interioare.

Timpul mediu pe care un asteroid îl petrece ca geointersector depinde de modul în care a ajuns în această stare [161]. În cazul rezonanței de mișcare medie 3:1 cu Jupiter s-au identificat două zone din care asteroizii sunt transportați în afara ei: zona centrală a rezonanței din care asteroizii suferă oscilații periodice de excentricitate care îi fac să intersecteze orbita marțiană. Mai departe, apropierile de Marte modifică orbita în așa fel încât asteroizii devin geointersectori. În cazul acestei rezonanțe există și zonele situate la marginea ei, unde variația excentricității este haotică, asteroizii devenind rapid geointersectori (cu posibilitatea ca aceștia să ajungă și în preajma Soarelui). Timpul median de trecere a unui asteroid din rezonanță în preajma Pământului este de aproximativ  $1 \times 10^6$  ani [161], iar durata de viață în rezonanță este de  $2 \times 10^6$  ani. Asteroizii au orbită geointersectoare un timp de  $2,2 \times 10^6$  ani [24]. Evoluția orbitei geointersectoare pune asteroizii în situație de ciocnire cu Soarele în 70% din cazuri sau pe o orbită hiperbolică (ejecție din sistemul solar) în restul cazurilor [72].

Asteroizii aflați oriunde în rezonanța 5:2 cu Jupiter suferă modificări haotice de excentricitate ceea ce îi aduce rapid pe orbite geointersectoare [159]. Durata de viață în rezonanțe este de  $0,5 \times 10^6$  ani iar cea de tranziție de  $0,3 \times 10^6$  ani. Durata medie ca asteroizi geointersectori este de  $0,4 \times 10^6$  ani pentru obiectele care provin din această rezonanță [24], iar rezultatul după evoluția orbitei este de ejecție din sistemul solar pentru 92% din cazuri și ciocnire cu Soarele pentru numai 2% [72].

Rezonanța situată la 2:1 nu este capabilă să modifice orbitele asteroizilor din ea în timp scurt, timpul minim în care obiectul devine geointersector fiind de câteva milioane de ani [158]. Durata de viață ca obiect geointersector este de numai  $0,1 \times 10^6$  ani [24], obiectele fiind aruncate din sistemul solar. Această rezonanță nu este printre cele mai eficiente care produc asteroizi geointersectori.

Rezonanța seculară  $\nu_6$  este printre cele mai eficiente. Timpul în care un asteroid aflat în această rezonanță devine geointersector este de  $0,5 \times 10^6$  ani. Timpul mediu

în care asteroidul se află în rezonanță este de  $2 \times 10^6$  ani, la finalul evoluției orbitale 80% din asteroizi fiind pe curs de ciocnire cu Soarele [72]. Pentru acești asteroizi durata cât sunt geointersectori este cea mai mare, de  $6,5 \times 10^6$  ani [24].

Rezonanțele difuze din centura principală sunt și ele responsabile pentru transformarea orbitelor asteroizilor în orbite geointersectoare, însă timpul mediu în care orbita se schimbă este de la  $10^7$  la  $10^9$  ani [165]. O populație interesantă de asteroizi este cea cu orbite care se intersectează cu cea a planetei Marte, care conține de 4 ori mai multe obiecte decât cea a asteroizilor geointersectori. Avem de-a face aici cu asteroizi ale căror orbite sunt în schimbare din cauza rezonanțelor difuze, obiecte ale căror orbite (excentricitate) se modifică lent. Depărtarea de Soare până la care întâlnim asemenea asteroizi este de 2,8 UA, ceea ce înseamnă că difuzia haotică produsă de rezonanțele difuze acționează până la acest interval de distanță heliocentrică. Timpul mediu în care orbita devine intersectoare este de  $60 \times 10^6$  ani, iar durata de viață ca asteroid geointersector este de  $3,75 \times 10^6$  ani [24].

Un asteroid geointersector este supus multor forțe. Apropierea de planete modifică semiaxa mare a orbitei prin creșterea sau scăderea vitezei orbitale. În acel moment, conservarea parametrului Tisserand față de planeta respectivă duce și la modificări de excentricitate și înclinare a orbitei. Rezonanțele în care se află obiectul duc și ele la modificări de înclinare și excentricitate dar nu și de semiaxă mare. Astfel asteroidul evoluează și în funcție de depărtarea de Soare. Obiectele aflate la  $a > 2,5$  UA sunt ejectate în afara sistemului solar prin faptul că excentricitatea lor mare le aduce în preajma lui Jupiter. Forța de atracție a planetei modifică semiaxa mare încât valoarea acesteia poate ajunge la infinit [147]. Obiectele cu  $2 < a < 2,5$  UA ajung să aibă excentricitatea aproximativ egală cu 1, drept pentru care ajung să lovească Soarele. În cazul în care semiaxa mare este mai mică de 2 UA, asteroizii ajung să fie perturbați doar de rezonanțele slabe ale planetelor Pământ și Venus, ceea ce le conferă o stabilitate orbitală mai mare decât în celelalte cazuri. Durata de viață ca geointersector crește la  $10^6$  ani [72]. Doar apropierea de o planetă poate modifica orbita, sau, pe o perioadă foarte lungă de timp, rezonanțele cu planetele terestre, asteroidul fiind prin din nou de rezonanțele puternice de mișcare medie cu Jupiter sau de rezonanțele seculare.

Evoluția dinamică a asteroizilor geointersectori ne arată că această populație



trebuie să se consume în timp. Totuși, pentru că observăm o asemenea populație trebuie să existe un mecanism de transfer de asteroizi din centura principală în spațiul apropiat terestru, mecanism descris mai sus.

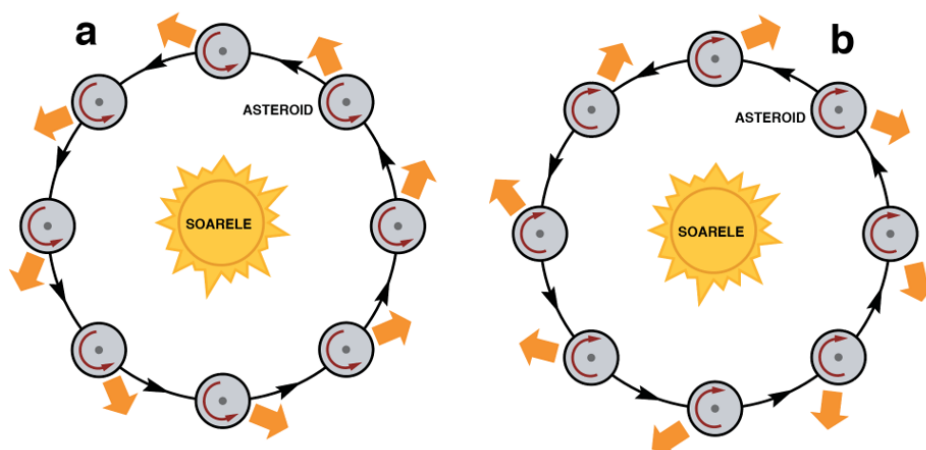
Chiar dacă la o primă privire sistemul solar pare ordonat, vedem că forțele de atracție ale planetelor modifică încet orbitele corpurilor mici, generând existența anumitor populații de asteroizi. Populațiile sunt reîmprospătate cu materie, fiind stabile în timp, iar orbitele asteroizilor din centura principală se deplasează înspre rezonanțe.

Am văzut că gravitația, una din forțele fundamentale din Univers, modifică orbitele asteroizilor. Însă, în plus față de această forță, există altele care încet dar sigur (efect cumulativ) modifică orbitele și chiar proprietățile fizice ale corpurilor mici din sistemul solar. Aceste forțe, grupate sub denumirea de *forțe non-gravitaționale*, sunt practic datorate efectelor de transport al energiei prin reflexie și radiație. Voi descrie în secțiunea următoare aceste forțe, responsabile în ultimă măsură pentru multe dintre caracteristicile asteroizilor dar și a distribuției acestora.

## 2.3 Efectele Yarkovsky și YORP

Studiile geologice și fizico-chimice au arătat că meteoriții găsiți pe Pământ au compoziție asemănătoare cu cea a asteroizilor din centura principală, fiind fragmente din aceștia care au ajuns pe Pământ. Modelul inițial preconiza că în urma unui impact între doi asteroizi, fragmente au ajuns în zonele de rezonanță, după care au fost transportate pe orbite geointersectoare. Cea mai mare problemă a acestui scenariu este durata de un ordin de mărime mai mică a transportării pe orbită geointersectoare față de expunerea la spațiul cosmic a fragmentelor. Durata expunerii la razele cosmice a meteoriților este de  $1 - 10^6$  milioane de ani pentru meteoriții bazaltici și de  $10^6 - 10^8$  ani pentru meteoriții feroși [35] [135], dar injecția pe orbite geointersectoare are o durată de doar câteva milioane de ani [72].

Un alt proces este activ, care poate transporta meteoriții de la locul impactului în zonele de rezonanță într-un timp îndeajuns de lung pentru a se obține o expunere îndelungată la razele cosmice. Acest proces, descoperit în 1900 de către Ivan Yarkovsky [181], constă în modificarea semiaxei mari a orbitei obiectelor între 0,01-

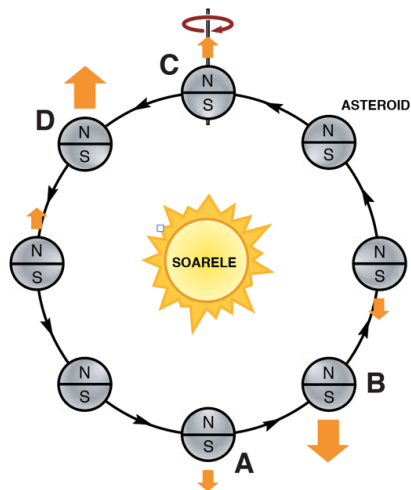


**Figura 2.14:** Efectul Yarkovsky în cazul unui asteroid cu rotație în sens trigonometric (a) și în sens retrograd (b). Săgeata indică direcția în care suprafața obiectului radiază energia termică. În cazul (a) semiaxa mare a orbitei se mărește. În cazul (b) se micșorează. În figurile de mai sus oblicitatea axei de rotație este de  $0^\circ$ . Sursa ilustrației: [161].

100 m în diametru în urma încălzirii și re-emiterii fotonilor în infraroșu. Încălzirea unui obiect cu rotație diurnă în spațiul cosmic, duce la apariția unei forțe de magnitudine redusă, care în timp duce la modificarea elementelor orbitale. Efectul Yarkovsky este de două feluri: diurn și sezonul.

Pentru o mai simplă explicație teoretică a efectului Yarkovsky diurn, se folosesc următoarele simplificări: asteroidul este sferic; axa de rotație este perpendiculară pe planul orbital. Pe măsură ce asteroidul se rotește în jurul axei proprii, emisfera îndreptată înspre Soare se va încălzi, dar căldura va fi radiată înapoi în spațiu, sub formă de energie termică (infraroșu). Pentru că fotonii dețin impuls ( $p = E/c$ , unde  $E$  este energia, iar  $c$  este viteza luminii), emisfera îndreptată înspre Soare va fi ușor împinsă în direcția opusă iluminării acestuia. Dacă suprafața nu ar avea inerție termică, căldura ar fi împrăștiată uniform pe emisfera îndreptată înspre Soare și radiată imediat în spațiul cosmic. În acest caz asteroidul s-ar îndepărta de Soare (Fig. 2.14).

Inerția termică, inerentă oricărei suprafețe, face să existe o diferență între momentul în care emisfera este iluminată și cel în care energia termică este emisă în



**Figura 2.15:** *Efectul Yarkovsky sezonier. În punctul A emisfera nordică este încălzită de către Soare. Din cauza inerției termice a suprafeței, forța de împingere maximă se produce în punctele B și D. Sursa ilustrației: [161].*

spațiul cosmic. Din cauza rotației asteroidului, emisfera care radiază în spațiu se va afla în direcție diferită celei din care provine lumina Soarelui, emisia având două componente: una îndreptată înspre Soare și alta paralelă cu planul orbitei.

Efectul Yarkovsky diurn duce la apariția unei forțe care depinde de sensul de rotație a asteroidului: se află în direcția de deplasare a asteroidului, dacă acesta se rotește în sens trigonometric, cu efect, mărirea semiaxei mari a orbitei; se află în sensul opus de deplasare, dacă obiectul se rotește în sens retrograd, cu efect, micșorarea semiaxei mari a orbitei. În urma acțiunii acestui efect se modifică și excentricitatea orbitei, care crește dacă asteroidul are sens direct și scade dacă are sens retrograd. Efectul duce și la avansul în sens trigonometric al longitudinii periheliului. După cum se vede, efectul Yarkovsky poate modifica drastic orbitele anumitor asteroizi. Efectul este mai puternic când înclinarea axei de rotație este 0 și mai mic la înclinări mai mari. Totodată, dacă perioada de rotație este scurtă, distribuția temperaturii pe suprafața asteroidului este uniformă, efectul având intensitate minimă.

Efectul Yarkovsky sezonier apare în timpul revoluției asteroidului în jurul Soarelui. Pentru un asteroid a cărei oblicitate este  $90^\circ$ , într-o oarecare porțiune a orbitei una din emisfere va fi încălzită de către Soare. După o perioadă de timp în care o fracțiune din perioada de revoluție a trecut, din cauza inerției termice, emisfera va

radia energia termică, dar cu o forță care nu va fi în partea opusă Soarelui. În acest caz, efectul duce la o micșorare a orbitei. Puterea forței variază de-a lungul unei revoluții, asteroidul fiind împins periodic pe orbită. Ca și în cazul efectului diurn, excentricitatea orbitei se modifică (crește) iar argumentul periheliului va retrograda pe orbită (Fig. 2.15).

Tratarea teoretică a efectului Yarkovsky permite determinarea condițiilor în care acesta acționează. Din punct de vedere matematic, formalismul acestui efect este tratat diferit de către surse diferite, însă rezultatul este întotdeauna evaluarea forței apărute la emiterea energiei termice de către suprafața obiectului [262] [18] [258] [214]. Forța generată de efectul Yarkovsky este dependentă de diametrul obiectului. Este proporțională cu suprafața (cu  $D^2$ ), cu masa (cu  $D^3$ ), accelerația fiind invers proporțională cu diametrul.

O exprimare a forței efectului Yarkovsky diurn, folosită în integrări numerice [76] este următoarea:

$$\ddot{r} = \zeta \frac{3}{8\pi} \frac{1}{D\rho} \frac{L_{\odot}}{c} \frac{X_p(\Phi)r(t)}{r(t)^3} \quad (2.12)$$

unde  $\zeta$  este un factor de eficiență,  $D$  este diametrul,  $\rho$  este densitatea,  $L_{\odot}$  este luminozitatea Soarelui,  $c$  viteza luminii,  $X_P(\Phi)$  este matricea rotațională în jurul lui  $p$ , iar  $r$  este distanța heliocentrică la momentul  $t$ . De obicei valorile lui  $X_P(\Phi)$  nu se cunosc și se stabilesc la  $90^\circ$  și în antiparalel față de normala vectorului pe orbită, a.î. efectul să aibă intensitate maximă [76].

Pentru corpurile mici, din cauza diametrului mic împrăștierea energiei termice se face uniform, forțele de emisie fiind egale în regiunea iluminată și întunecată. Corpurile mari, din cauza masei mari, nu pot fi deplasate de forței emisiei energiei termice. Variația semiaxe mari a orbitei este proporțională cu cosinusul înclinării axei de rotație în cazul efectului Yarkovsky diurn, iar în cazul variantei sezoniere a lui, cu pătratul sinusului înclinării axei de rotație. Efectul sezonier este dependent și de perioada orbitală a asteroidului [258].

Efectul Yarkovsky depinde și de alți parametri fizici ai asteroidului.

- oblicitatea (înclinarea axei de rotație) – în cazul componente diurne, efectul este maxim la înclinări de  $0^\circ$  și  $180^\circ$ ; componenta sezonieră este maximă la

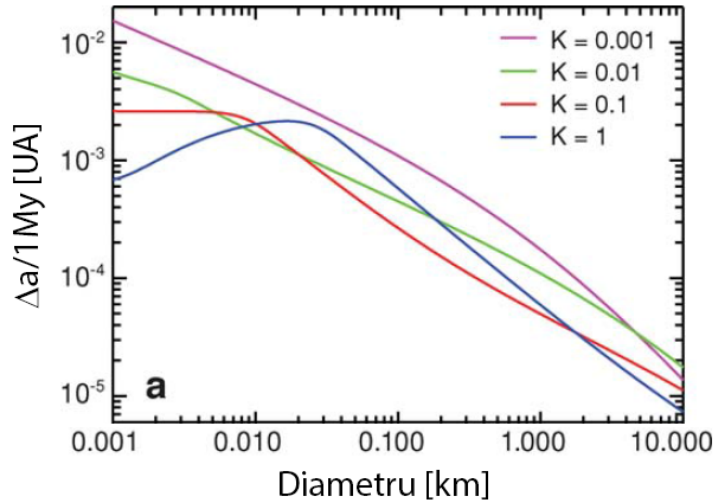
90° și nulă la 0-180° [225];

- mărimea asteroidului – obiectele foarte mari sunt prea masive pentru a fi mutate prin acest efect, iar cele foarte mici devin izoterme, forța devenind zero; efectul Yarkovsky influențează asteroizii cu mărime aproximativă de 10 m, fiind posibil și în gama de mărimi de 1-10 km; pentru corpurile mari, rata de modificare a semiaxe mari a orbitei  $da/dt$  este proporțională cu raportul dintre coeficientul de relaxare termică și pătratul valorii raportului dintre raza obiectului și adâncimea de penetrare a undei; pentru corpurile mici  $da/dt$  este proporțională inversul raportul anterior [19];
- conductivitatea suprafeței - aceasta este caracteristica cea mai importantă a materialului, care influențează efectul Yarkovsky; valoarea conductivității este mică pentru suprafețe poroase (acoperite de regolit) și mare pentru suprafețele bogate în fier; valorile sunt de  $0,001 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  pentru regolit,  $0,001 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  pentru suprafețe acoperite de gheață și  $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  pentru suprafețe metalice [161]; la conductivități mici valoarea coeficientului de relaxare termică este mică și egală cu cea a raportului dintre raza obiectului și adâncimea de penetrare a undei, adică efectul dispare;
- depărtarea de Soare – efectul scade cu depărtarea de Soare, cu excepția corpurilor cu rotație lentă;  $da/dt$  este proporțional cu inversul pătratului semiaxe mari a orbitei;

Pentru exprimarea mărimii ratei de modificare în timp a semiaxe mari a orbitei asteroidului se folosește relația 2.30:

$$\frac{da}{dt} = \pm \xi \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{1}{1-e^2} \frac{L_{\odot}}{c\sqrt{GM_{\odot}}} \frac{1}{D\rho} \quad (2.13)$$

unde  $e$  este excentricitatea, iar  $a$  semiaxa mare a orbitei. Restul valorilor sunt descrise la relația 2.29.  $\xi$  este factorul de eficiență a efectului Yarkovsky, care depinde de eficiența  $\zeta$ , oblicitatea și întârzierea emisiei termice datorată rotație și emisivității suprafeței.



**Figura 2.16:** Rata medie de modificare a semiaxei mari a orbitei pentru o perioadă de 1 milion de ani, produsă 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. Sursa ilustrației: [19].

Dintre fenomenele produse de efectul Yarkovsky menționez: transportul de meteoriți și asteroizi pe orbite geointersectoare, explicat prin durata bombardamentului cu raze cosmice; împrăștierea membrilor familiilor de asteroizi; transportul de asteroizi din rezonanțele seculare, în special din rezonanța  $\nu_6$ . Forțele non-gravitaționale descrise mai sus duc la modificări de orbită și de parametri de rotație pentru asteroizi, pentru cadrul tezei fiind important de clarificat împrăștierea familiilor de asteroizi și transportul asteroizilor din centura principală în zonele de rezonanță.

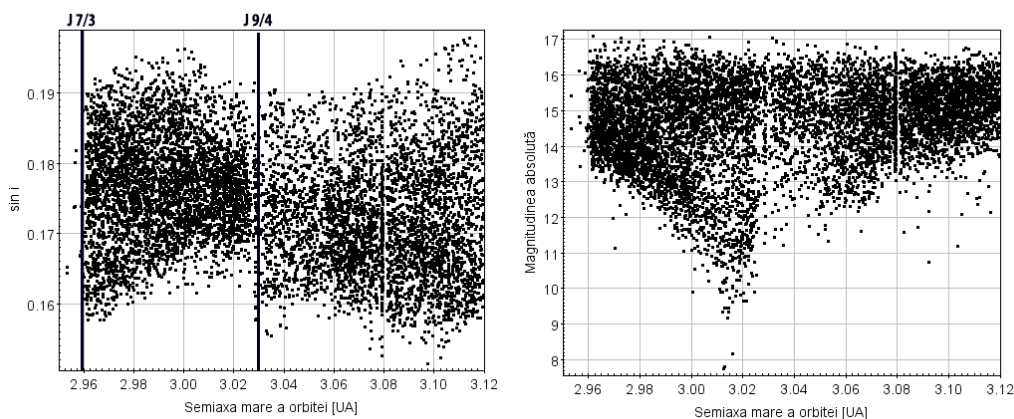
Efectul Yarkovsky duce la modificări de orbită și de parametri de rotație care pot explica o serie de necunoscute ale unor populații de asteroizi (Fig. 2.16). Forma unor familii de asteroizi poate fi explicată prin modificarea lentă a semiaxelor mari. După formarea unei familii, elementele orbitale ale membrilor cu dimensiuni mai mici, pentru care efectul acționează, se modifică, îndepărtându-se de cele ale obiectelor mari. Astfel familia se împrăștie în planul ( $a, e, i$ ), o parte din asteroizi ajungând în zonele de rezonanță, de la care capătă modificări importante și haotice de orbită, o parte ajungând să fie geointersectorii. Rata de modificare a semiaxei mari pentru un obiect de 5 km este de  $2 \times 10^{-5} UA/My$ , iar a unui asteroid de 20

km în diametru de  $6 \times 10^{-6}UA/My$  [19].

Durata medie de viață a asteroizilor geointersectori a fost investigată prin simulări numerice, găsindu-se că nu se poate explica numărul actual de obiecte, precum și mărimea lor [27] [26] [58]. În cazul în care ciocnirile din centura principală ar arunca asteroizi în sistemul solar interior, numărul de obiecte de mari dimensiuni ar trebui să fie mai mic decât cel observat pentru că un asemenea fenomen ar produce doar câteva zeci de fragmente de maxim 20 km în diametru [26]. Pentru că durata medie de viață a unui asteroid geointersector este de doar câteva milioane de ani, numărul acestora ar trebui să scadă în timp [149]. Totuși numărul de asteroizi de acest gen este constant, semn că există surse ale asteroizilor din centura principală, căile fiind chiar rezonanțele. Chiar și diversitatea taxonomică a asteroizilor geointersectori indică faptul că obiectele din centura principală ajung în sistemul solar interior, rezonanțele fiind esențiale pentru acest fapt [12]. Simulările numerice în care s-au folosit asteroizi pentru care efectul Yarkosvsky era pus în acțiune au avut ca rezultat faptul că asteroizii mai mici de 2 km au trecut rapid prin rezonanțe ajungând să intersecteze orbita planetei Marte [31], spre deosebire de cei fără efect. S-a mai găsit și faptul că prin efectul Yarkosvsky se poate explica numărul de asteroizi geointersectori prin fluxul de asteroizi care vin din centura principală [160].

În timp populația de asteroizi aflați în rezonanță de mișcare medie cu Jupiter ar trebui să scadă ca număr pe măsură ce orbitele asteroizilor se modifică, însă găsim mereu obiecte în acele regiuni. A fost identificat faptul că efectul Yarkovsky diurn este responsabil pentru aducerea asteroizilor din centura principală în rezonanțe, același efect care modifică și forma familiilor de asteroizi [244] [32]. Elementele orbitale ale asteroizilor din rezonanțe, precum înclinarea orbitei sunt similare cu cele ale asteroizilor din familiile alăturate, o altă dovadă că aceste obiecte nu sunt o populație primordială ci vin din centura principală. Același lucru s-a observat și din studiul distribuției de mărime a asteroizilor din rezonanțe, distribuție care se potrivește cu cea a obiectelor care pot fi transportate de efectul Yarkovsky [32].

Studierea familiilor de asteroizi (secțiunea 2.5) a dus la evidențierea faptului că formele acestora nu pot fi explicate prin simpla formare la impact pentru că vitezele de ejecție ale fragmentelor sunt prea mici. Membrii actuali ai unor familii se împrăștie pe un spațiu larg în planul  $(a, i, e)$  ceea ce înseamnă că efectele non-



**Figura 2.17:** *Stânga: familia Eos în spațiul  $(a,i)$ . Se observă efectul celor două rezonanțe de mișcare medie cu Jupiter. Dreapta: Familia Eos. Se observă cum asteroizii cu magnitudine absolută mai mare (mărime mai mică) sunt mai departe de corpurile mai mari.*

gravitaționale îndepărtează în timp asteroizii de regiunile centrale. Familia Eos de exemplu, este mărginită de două rezonanțe de mișcare medie cu Jupiter: 7:3 la marginea interioară a familiei și 9:4 la marginea exterioară. Familia se întrerupe brusc la marginea interioară, acolo unde rezonanța este mai puternică și aproape deloc la marginea exterioară. Asteroizii ale căror orbite se modifică în urma efectului Yarkovsky spre marginea interioară sunt ejectați rapid din familie, pe când ceilalți mai puțin, rămânând mai multe obiecte. Efectul depinde și de mărimea asteroizilor: orbitele celor mici se modifică mai ușor (Fig. 2.17). Astfel găsim asteroizi mai mari rămași în familie și mai mici în extremități [261].

Efectul YORP (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddac) constă în modificarea perioadei de rotație și a oblicității axei de rotație a obiectelor din sistemul solar [215]. Principiul este dat, ca și în cazul efectului descris anterior, de presiunea radiației, prin efectul pe care îl au ciocnirile fotonilor cu suprafața și radierea energiei termice de către suprafața obiectului. Emisia de fotoni transmite moment suprafeței, care simte un impuls. Asteroizii mari, cu formă aproximativ sferică și cu o suprafață uniformă, vor emite uniform de pe orice element de suprafață, efectul net resimțit fiind nul. Pentru obiectele mici însă, cu forme neregulate, formațiuni în relief și o suprafață este neregulată (regiuni ne-coplanare), emisia se poate face în direcții aflate la  $180^\circ$  față de sensul de rotație, caz în care viteza de rotație este accelerată.



Dacă sensul de rotație este invers, rotația este decelerată. Practic, obiectele sferice și cu formă de elipsoid de rotație, cu suprafața uniformă, nu vor fi influențate de efectul YORP [257].

Consecințele acestui efect pot fi observate numai dacă există date despre rotația asteroizilor. Determinarea perioadei de rotație la momente diferite în timp permite identificarea înclinării axei de rotație. Cei doi parametri sunt tocmai cei doi modificați de efectul YORP. O distribuție bimodală a perioadelor de rotație poate fi produsă de efectul YORP, pentru că distribuția perioadelor de rotație este aleatoare în cazul unei ciocniri. Efectul YORP a fost pus în evidență în cazul membrilor familiei Koronis, pentru care distribuția de perioade de rotație este bimodală [226].

Efectul YORP are o importanță deosebită nu numai pentru că modifică perioada axa de rotație a asteroizilor, ci și pentru că poate modifica mărimea și direcția efectului Yarkovsky.

Modificarea vitezei de rotație duce și la o modificare a oblicității. Pe măsură ce viteza crește, înclinarea se modifică, ajungându-se și în situațiile în care axa de rotație se inversează. O înclinare mare duce la o micșorare a vitezei de rotație, asteroidul trecând pentru o perioadă de timp printr-un regim de rotație haotică, în care axa de rotație nu rămâne îndreptată în aceeași direcție. Efectul YORP nu duce la modificarea orbitei asteroizilor, ci a parametrilor de rotație ai acestora. Totuși, o serie de fenomene sunt produse de către acest efect: în cazul asteroizilor constituiți din fragmente, mărirea vitezei de rotație poate duce la fisiunea acestor, formându-se asteroizii binari sau sateliții asteroizilor; rotația rapidă poate duce și la expulzarea de masă sau la schimbări de formă.

Am văzut în capitolul acesta că efectele non-gravitaționale pot modifica elementele orbitale dar și proprietățile fizice ale asteroizilor. Voi descrie în capitolul următor cum se determină anumite proprietăți fizice și cum se pot folosi acestea pentru caracterizarea acestor obiecte.

## 2.4 Proprietăți fizice

Observațiile făcute pe parcursul doctoratului au ca scop determinarea unor parametri fizici (în special perioada de rotație) pentru asteroizi, aceia care se pot obține în urma

observațiilor fotometrice.

Din cauza numărului mare de obiecte și a timpului limitat de observații nu se cunosc proprietățile fizice pentru toți asteroizii. Unele se pot determina de pe Pământ, altele doar in-situ, iar pentru aflarea anumitor proprietăți este nevoie de perioade lungi de observații.

Date despre culorile asteroizilor se pot obține pentru un număr relativ mare de obiecte prin observarea unor zone mari de cer prin filtre diferite, însă informații despre perioada de rotație se pot obține pe rând pentru fiecare asteroid prin observații susținute făcute timp de zile sau săptămâni. Și pentru că perioada de rotație poate fi folosită la estimarea altor parametri fizici, se poate spune că determinarea ei este de o importanță capitală, acesta fiind și scopul tezei mele de doctorat.

### 2.4.1 Mărimea asteroizilor

Unele proprietăți fizice ale asteroizilor sunt greu de determinat din cauza depărtării mari la care se află și a mărimii acestor corpuri cerești. Diametrul, de exemplu, se poate măsura cu greu în mod direct din cauză mărimii unghiulare mici a asteroizilor. Cel mai mare asteroid, (1) Ceres, are un diametru aparent variabil în funcție de depărtarea la care se află, mărimea unghiulară maximă fiind de  $0,8''$ . (4) Vesta, al doilea asteroid ca mărime este jumătate cât Ceres, iar următorii asteroizi apar și mai mici. Majoritatea asteroizilor au diametre aparente de ordinul sutimilor de secundă de arc deci pot cu greu fi observați direct. Cu cele mai mari telescoape terestre, folosind principiul opticii adaptive [239], s-a reușit observarea directă a unor asteroizi și determinarea diametrelor reale ale acestora [41] [134] [61]. Alte observații au fost făcute cu Telescopul Spațial Hubble [51] însă foarte puține diametre măsurate în mod direct se cunosc (Tabelul 2.2). Rezultate foarte bune au fost obținute recent în urma observațiilor realizate cu sistemul de optică adaptivă SPHERE/ZIMPOL și telescopul Very Large Telescope (VLT) al Observatorului Sudic European (ESO) [251] [134].

O altă modalitate prin care se pot determina diametrele asteroizilor este dată de observațiile *in situ* (Fig. 2.18). Aceste date sunt foarte prețioase însă raritatea lor nu permite studierea întregii populații de asteroizi, cel puțin în privința distribuției

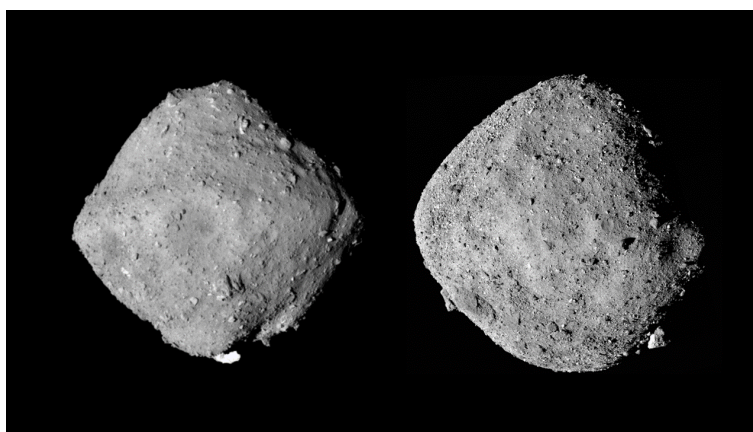
Asteroid	Diametru [km]	Referințe	Sursă
(1) Ceres	964,4 × 964,2,8	[184]	sondă spațială
(2) Pallas	568 × 532 × 448	[134]	optică adaptivă
(4) Vesta	572,6 × 557,2 × 446,4	[216]	sondă spațială
(7) Iris	268 × 234 × 180	[82]	optică adaptivă
(10) Hygiea	250 × 230 × 224	[249]	optică adaptivă
(16) Psyche	290 × 245 × 170	[256]	optică adaptivă
(21) Lutetia	121 × 101 × 75	[224]	sondă spațială
(41) Daphne	237,9 × 184,8 × 156	[39]	optică adaptivă
(89) Julia	89 × 80 × 62	[251]	optică adaptivă
(243)Ida	59,8 × 25,4 × 18,6	[7]	sondă spațială
(253) Mathilde	66 × 48 × 46	[255]	sondă spațială
(433) Eros	34 × 11 × 11	[254]	sondă spațială
(704) Interamnia	332 × 332 × 332	[80]	optică adaptivă
(4179) Toutatis	4,6 × 2,3 × 1,9	[98]	sondă spațială
(25143) Itokawa	0,535 × 0,294 × 0,209	[65]	sondă spațială
(101955) Bennu	0,565 × 0,536 × 0,498	[121]	sondă spațială
(162173) Ryugu	1,04 × 1,02 × 0,88	[282]	sondă spațială

**Tabelul 2.2:** *Selecție de asteroizi pentru care s-a determinat cu precizie mărimea.*

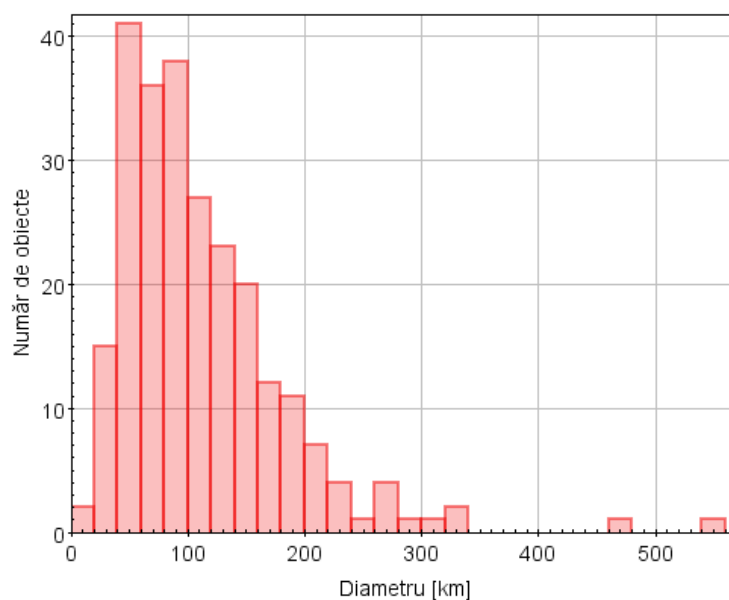
de mărime a asteroizilor (Fig. 2.19).

Prin observații de pe Pământ se pot determina diametre precise în cadrul ocultațiilor asteroidale. Uneori asteroidul trece peste o stea care dispare pentru o perioadă de timp. Durata dispariției este diferită în funcție de poziția observatorului și dacă se fac observații din locuri diferite se poate determina forma și mărimea obiectului. Până în februarie 2020 s-au măsurat prin această metodă diametrele a 247 de asteroizi [93].

În lipsa altor modalități directe pentru a afla parametri fizici ai asteroizilor, cel mai des se folosește studiul emisiei termice a obiectului. În prezent determinarea diametrului asteroizilor se face cel mai des prin măsurarea emisiei termice, mai ales în prisma existenței telescoapelor spațiale și terestre de câmp larg precum IRAS [245] [237], WISE [141] [176], VISTA [194] și Pan-STARRS [248].



**Figura 2.18:** *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.*



**Figura 2.19:** *Histogramă a diametrelor măsurate în urma ocultațiilor asteroidale. Date: Asteroid Occultations V3.0.*

Practic, în urma încălzirii de către lumina Soarelui, suprafața asteroidului emite căldura absorbită sub formă de energie termică. Magnitudinea emisiei termice este diferită pentru lungimi de undă diferite iar distribuția ei poate fi măsurată. Determinarea valorii exacte a emisiei termice nu este simplă pentru că se cer măsurători pentru lungimi de undă diferite și compararea lor cu un model al obiectului. Spre deosebire de strălucirea asteroidului în domeniul vizibil, care este dependentă de albedo (o altă mărime fizică foarte greu de determinat), emisia termică depinde cel mai mult de mărimea obiectului. Emisia termică depinde și ea de anumite proprietăți fizice, precum inerția termică a suprafeței, rugozitate, formă și chiar unghiul sub care se vede suprafața, însă în urma modelării acestor parametri se pot obține valori ale diametrelor pentru un număr mare de asteroizi.

Energia termică emisă de un corp negru aflat la o anumită temperatură depinde de emisivitatea materialului, mărimea unghiulară a obiectului și este descrisă cu relația 2.14

$$F(\lambda) = \frac{A_p}{\Delta^2} \times \epsilon(\lambda) \times B(\lambda, T_{eff}) \quad (2.14)$$

unde  $\epsilon(\lambda)$  este emisivitatea,  $T_{eff}$  este temperatura,  $\Delta$  este depărtarea de observator iar  $A_p$  este aria care emite energia termică.  $B(\lambda, T_{ef})$  este funcția Planck, descrisă de relația 2.15.

$$B(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.15)$$

Pentru a se obține diametrul obiectului, mai precis aria acestuia (termenul  $A_p$ ), este nevoie să se măsoare distribuția emisiei termice pentru mai multe lungimi de undă, distribuție echivalentă cu temperatura de culoare a asteroidului. Emisivitatea depinde și ea de tipul de suprafață dar pentru gama de lungimi de undă între 5 și 20  $\mu\text{m}$  poate fi aproximată cu valoarea de 0,9, emisivitatea silicaților de mici dimensiuni stabilită în măsurători de laborator [96].

Măsurarea fluxului în infraroșu (5 - 20  $\mu\text{m}$ ) este dificilă de pe Pământ din cauza emisiei intrinseci a atmosferei și din cauza absorbției infraroșului îndepărtat, dar se poate face la altitudini mari cu instrumente aduse la temperaturi cât mai

joase. Chiar și așa, emisia termică a mediului ambiant și a obiectelor din zona de observație induce erori în măsurare, drept pentru care se preferă observațiile făcute din spațiul cosmic. Valoarea fluxului depinde de distanță cu proporția  $(D/\Delta)^2$ , de unghiul de fază, precum și de proprietățile suprafeței.

În cazul în care nu se poate măsura fluxul pentru mai multe lungimi de undă s-au elaborat modele termice pentru asteroizi, modele care descriu modul în care un asteroid emite energie termică. Cel mai simplu model, denumit *modelul termic standard* [85], presupune o inerție termică foarte mică a suprafeței asteroidului (lipsa emisiei după ce Soarele a trecut de orizont) și o formă sferică a asteroidului care trebuie să se afle la unghiul de fază  $0^\circ$ . Principiul pe care se bazează modelele termice este conservarea energiei, în particular egalitatea dintre energia absorbită și cea emisă de asteroid. Temperatura de la suprafața asteroidului e funcție de depărtarea față de Soare, de albedo, de emisivitate și de unghiul sub care cad razele Soarelui. Cantitatea totală de energie care cade pe un element de suprafață este:

$$dU_i = \frac{S_0}{r^2} \times \mu dS \quad (2.16)$$

unde  $\mu$  este cosinusul direcției normalei față de înălțimea Soarelui,  $S_0$  este constanta solară iar  $r$  este depărtarea de Soare.

Energia absorbită este:

$$dU_a = dU_i(1 - A) \quad (2.17)$$

unde  $A$  este albedoul Bond bolometric.

Energia absorbită este:

$$dU_e = \sigma \epsilon T^4 dS \quad (2.18)$$

unde  $\epsilon$  este emisivitatea,  $\sigma$  Boltzmann iar  $T$ , temperatura.

Conservarea energiei postulează că cele două cantități trebuie să fie egale, adică:

$$\frac{S_0(1 - A)}{r^2} = \sigma \epsilon (T_{SS})^4 \quad (2.19)$$

Din ecuația 2.17 se deduce temperatura, dacă se cunoaște albedo-ul și depărtarea de Soare și se consideră că unghiul sub care cad razele solare este 1.

$$T_{SS} = \left[ \frac{S_0(1 - A)}{\sigma \epsilon r^2} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (2.20)$$

Din cauza faptului că strălucirea asteroidului crește brusc în momentul opoziției s-a introdus [124] în relația 2.18 un parametru în plus,  $\eta$ , care ia în considerare efectul. Valoarea parametrului este 0,756, iar relația 2.20 devine:

$$T_{SS} = \left[ \frac{S_0(1 - A)}{\eta \sigma \epsilon r^2} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (2.21)$$

Necunoscuta cea mai mare din relația 2.21 este chiar albedo-ul. Albedo-ul bolometric este aproape imposibil de determinat, fiind raportul dintre energia solară incidentă și cea reflectată pentru toate lungimile de undă. Din acest motiv se folosește *albedo-ul geometric*, o parametru care se definește ca raportul dintre strălucirea unui obiect care se observă la opoziție și cea a unui disc *Lambertian* de aceeași rază, situat la aceeași depărtare ca și asteroidul. Cei doi parametri se caracterizează prin următoarea relație:

$$A \cong A_V = q \times \rho_V \quad (2.22)$$

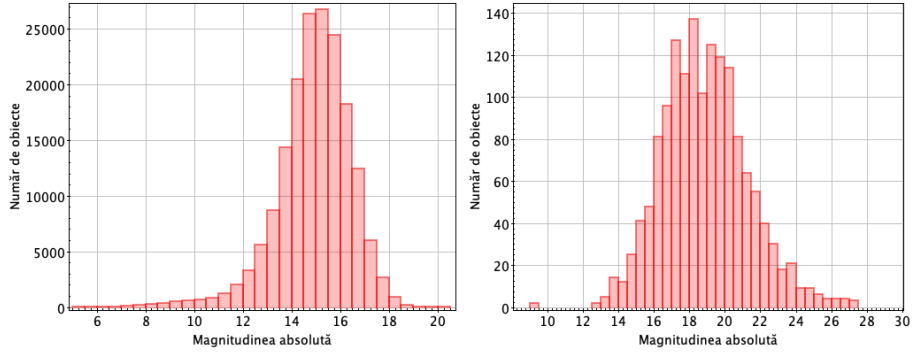
unde  $q$  este un termen stabilit empiric [30] prin relația:

$$q = 0,290 + 0,684 \times G \quad (2.23)$$

unde  $G$  este panta.

După ce se determină valoarea fluxului, aceasta se poate compara cu cea a unui asteroid referință (un model pentru care se stabilește diametru și albedo-ul), diametrul asteroidului observat fiind calculat cu relația [87]:

$$D^2 = \frac{F_{masurat}(\lambda)}{F_{referinta}(\lambda)} \quad (2.24)$$



**Figura 2.20:** Distribuția magnitudinilor absolute a asteroizilor din catalogul NEOWISE. Stânga: valori pentru asteroizi din centura principală. Dreapta: valori pentru asteroizi geointersectorii.

Un alt model termic este cel în care se ia în considerare rotația rapidă a asteroizilor, precum și inerția termică mare [123]. Fără a elabora acest model, menționez doar faptul că temperatura se consideră a fi funcție de latitudine. Acest model dă rezultate mai bune în cazul asteroizilor geointersectorii, pentru care modelul anterior subestimează diametrele și supraestimează albedo-urile [85]. Chiar și așa, un alt model termic a fost elaborat, special pentru asteroizii geointersectorii, care consideră că parametrul  $\eta$  este variabil, funcție de unghiul de fază [88].

Pentru o mai bună estimare a diametrelor asteroizilor se folosește și relația care ia în considerare magnitudinea absolută a obiectelor [238], relație valabilă numai pentru observații în domeniul vizibil al spectrului electromagnetic.

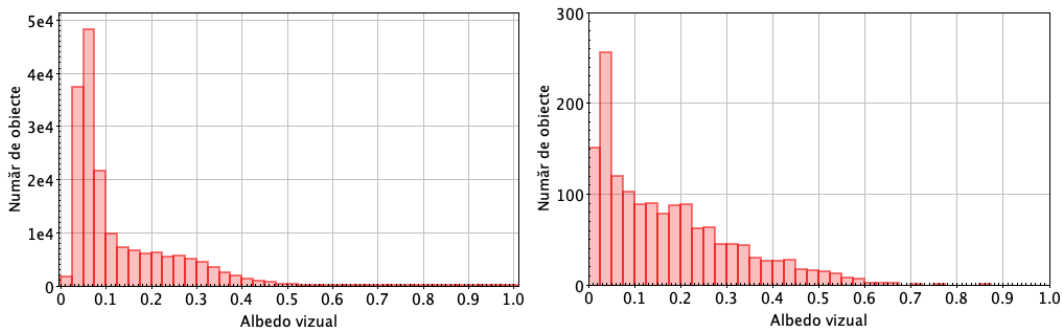
Pentru un asteroid cu o anumită magnitudine absolută (care este magnitudinea măsurată sau calculată în vizual pentru un asteroid aflat la 1 UA de Soare și Pământ), la unghi de fază  $0^\circ$ , care are albedo-ul vizual  $\rho_v$ , diametrul se calculează cu relația:

$$D = \frac{1329}{\sqrt{\rho_v}} \times 10^{-\frac{H}{5}} \quad (2.25)$$

Aceasta este relația pe care se bazează estimările de mărime ale asteroizilor din bazele de date mari (ASTORB și MPCORB). Valoarea diametrului calculat în acest mod depinde de albedo, care dacă nu se cunoaște cu precizie duce la valori supraestimate sau subestimate ale mărimii. În prezent pentru un asteroid descoperit



se menționează intervalul de mărimi pe care l-ar avea, dacă albedo-ul ar fi situat între două mărimi extreme, 0,3 - 0,05.



**Figura 2.21:** Distribuția de albedo a asteroizilor din catalogul NEOWISE. Stânga: valori pentru asteroizi din centura principală. Dreapta: valori pentru asteroizi geointersectorii.

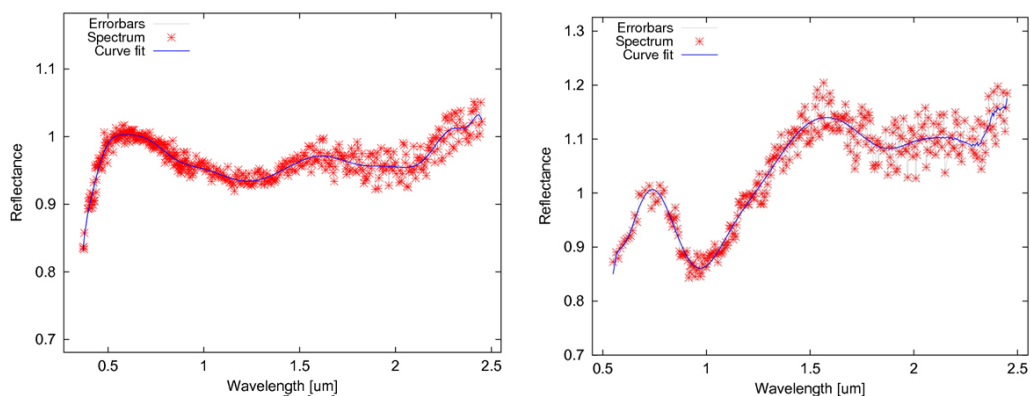
Determinarea directă a albedo-ului este foarte dificilă, fiind folosită o metodă indirectă: prin măsurarea emisiei termice în infraroșu (emisie care depinde numai de mărimea asteroidului) se poate determina diametrul obiectului. Apoi, prin compararea magnitudinii absolute cu valoarea diametrului, se poate calcula albedo-ul. Această metodă s-a folosit cu succes în cazul rezultatelor obținute cu telescoapele spațiale WISE [138] și IRAS [237] (Fig. 2.20 și 2.21).

Ca o concluzie, se poate aproxima faptul că strălucirea în domeniul vizibil a unui asteroid este proporțională produsul dintre aria care reflectă lumina și albedo-ul vizual, pe când strălucirea în infraroșu este proporțională cu cantitatea de lumină absorbită de suprafața obiectului. Pentru același diametru, un asteroid cu albedo mai mic va avea o strălucire mai mare în infraroșu decât în vizibil.

În domeniul vizibil doi asteroizi cu albedo diferit situați la aceeași distanță pot avea aceeași strălucire în funcție de diametru, dar cel cu albedo mai mic va fi mai strălucitor în infraroșu.

## 2.4.2 Taxonomia asteroizilor

La fel ca și alte corpuri cosmice (și nu numai), asteroizii pot fi împărțiți în câteva clase taxonomice, pe baza modului în care reflectă lumina Soarelui. Pentru clasificarea lor se studiază modul în care se reflectă lumina pentru o gamă de lungimi de undă, situate de obicei între 0,4 - 2,5  $\mu\text{m}$  (Fig. 2.22). Nu se observă la lungimi de



**Figura 2.22:** Spectre diferite de asteroizi (*1996FG3* - stânga; *(99942) Apophis* - dreapta). Se observă minimul centrat pe  $0,95 \mu\text{m}$ , precum și emisia termică de după  $2,4 \mu\text{m}$ . Sursă: Baza de date *M4AST* [192].

undă mai mari de  $2,5 \mu\text{m}$  pentru că emisia termică a obiectului devine detectabilă (în funcție de albedo, emisia termică poate fi detectată la lungimi de undă mai mari sau mai mici de  $2,5 \mu\text{m}$ ). Practic se studiază spectrul asteroidului (reflectanța în diferite lungimi de undă), care conține lumina reflectată și împrăștiată de suprafața acestuia precum și liniile de absorbție ale mineralelor de pe suprafață. Compararea spectrelor de asteroizi cu cele de meteoriți duce la asocierea lor și la determinarea, cel puțin aproximativă, a compoziției interne a asteroidului (se consideră că suprafața este reprezentativă pentru întreaga compoziție internă și că obiectul este omogen în interior). Pentru a se obține informațiile care sunt specifice asteroidului, spectrele acestora se raportează mereu la o stea de referință care trebuie să aibă tipul spectral al Soarelui.

Preocuparea pentru categorisirea asteroizilor a început încă din anii 1970 când au fost împărțiți în două clase: bogați în siliciu și bogați în carbon [44], tot pe baza spectrelor. O clasificare mai complexă a fost făcută în 1984, când s-au identificat 14 tipuri de spectre de asteroizi [293] pe baze fotometrice, prin observarea asteroizilor prin filtre diferite. În 2002, în urma observării spectrelor a 1500 de asteroizi s-a reușit clasificarea acestora în 26 de clase [34], o clasificare nu foarte diferită de cea folosită în prezent.

Taxonomia actuală a asteroizilor, denumită *taxonomia Bus-DeMeo*, clasifică asteroizii (Fig. 2.23) în clase prin combinarea observațiilor în infraroșul apropiat

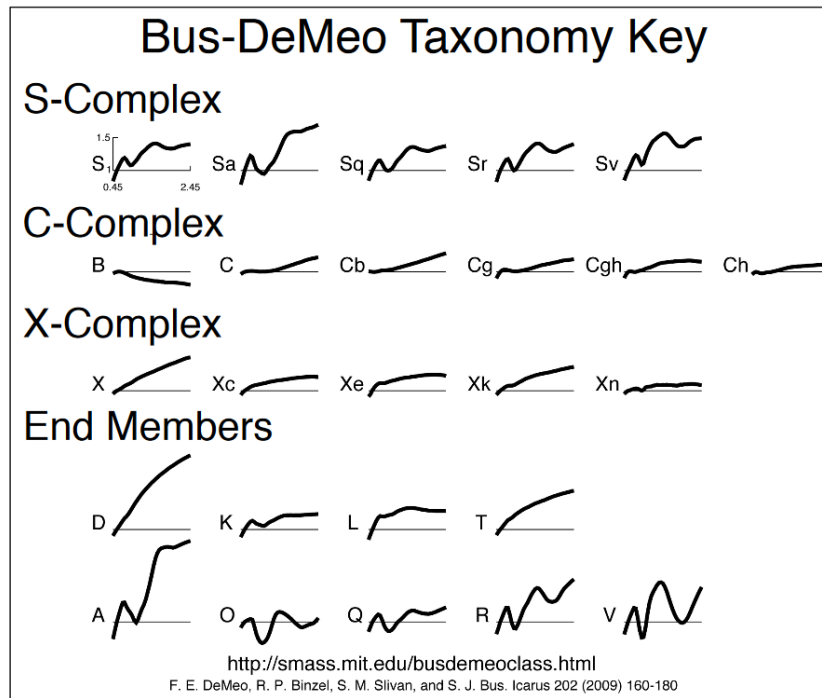
și vizibil [47]. Unele clase, S, C și X, sunt mai complexe și conțin subgrupuri, cele mai simple fiind descrise cu o singură literă, după cum urmează: complexul S (cu subclasele S, Sa, Sq, Sr, Sv), complexul C (cu subclasele B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch), complexul X (cu subclasele X, Xc, Xe, Xk, Xn), A, D, K, L, O, Q, R, T și V.

Asteroizii de tip S sunt cel mai des întâlniți, în proporție de aproximativ 40% din cei descoperiți [47]. Spectrele în infraroșul apropiată prezintă absorbții de piroxen și olivină, iar în domeniul vizibil absorbție la  $1 \mu\text{m}$  și în partea de UV. Spectrele lor pot fi asociate cu cele ale meteoriților condritici, ai căror sursă pare a fi asteroidul (6) Hebe [57] [66], situat în preajma rezonanței 3:1 cu Jupiter și a rezonanței seculare  $\nu_6$ . Asteroizii de tip C reprezintă aproximativ 13% dintre asteroizii clasificați [47]. Benzile de absorbție din spectru nu sunt foarte intense însă în regiunea de la  $3\mu\text{m}$  la majoritatea se găsește o bandă atribuită mineralelor hidratate [212]. Acest tip de asteroizi poate fi asociat cu meteoriții condritici bogați în carbon sau supuși forțelor termice [59], câțiva de dimensiuni mari fiind situați în preajma rezonanțelor. În principiu, la suprafața asteroizilor se pot găsi materiale volatile sub forma mineralelor hidratate sau a compușilor din carbon, precum și materiale refractare din silicați și metal. Asteroizii de tip M prezintă în general benzi de absorbție a fierului și nichelului, au albedo în gama 0,1 - 0,18. Asteroizii de tip P au albedo foarte scăzut (0,02 - 0,06) și suprafețe care prezintă o abundență de materiale organice. Cei de tip D se aseamănă cu tipul P dar se găsesc mai departe de Soare. Asteroizii cu albedo ridicat (0,25 - 0,6) sunt cei de tip E, care se găsesc la depărtări mici de Soare.

O împărțire din punct de vedere geologic evolutiv îi găsește în trei stări [45]:

- asteroizi primitivi, care conțin materiale organice, carbon și silicați; clase: C, X, T, D;
- asteroizi parțial topiți, care conțin olivină, piroxen (rocă vulcanică) și metale;
- diferențiați, care sunt fragmentele unor corpuri mai mari, care conțin bazalt, olivină și metale; clase: V, A, M;

În centura principală găsim și o distribuție a claselor taxonomice în funcție de depărtarea de Soare [46]. Asteroizii de tip E și S se găsesc în partea interioară



**Figura 2.23:** Diversitatea spectrelor asteroizilor în intervalul 0,45 - 2,45  $\mu\text{m}$ . Sursă: [47].

a centurii, iar cei de tip M în partea centrală. Asteroizii de tip C se găsesc la marginea exterioară a centurii iar cei de tip D și P la extremitatea ei. Clasificați din punct de vedere evolutiv, asteroizii diferențiați se găsesc la depărtări mai mici de 2,7 UA, cei primitivi la depărtări mai mari de 3,4 UA, iar cei parțial topiți se întâlnesc în toată centura. În acest caz există și o problemă de tip observațional (bias observațional): asteroizii cu albedo scăzut sunt mai greu de observat și de descoperiți decât cei cu albedo ridicat, dar asta nu înseamnă că nu se găsesc în număr la fel de mare ca și ceilalți. În populația asteroizilor geointersectorii se întâlnesc toate clasele taxonomice, ceea ce indică faptul că asteroizii sunt transportați în preajma Pământului din mai multe locuri din sistemul solar.

Chiar dacă sunt transportați din centura principală, asteroizii din acea zonă au ceva în comun: elemente orbitale. Există grupuri de asteroizi care ies în evidență, așa-numitele *familii de asteroizi*.

## 2.5 Familii de asteroizi

În 1918, astronomul japonez Hirayama [94], calculând elementele orbitale proprii ale asteroizilor, a identificat obiecte cu elemente orbitale asemănătoare. A găsit că anumiți asteroizi au orbite asemănătoare și chiar dacă nu se află în același loc pe orbită aparțin unor grupuri, pe care le-a denumit familii. Familiile sunt grupuri de asteroizi cu elemente orbitale comune (semiaxe mare ale orbitelor, înclinații și excentricități) care pot fi vizualizate în spațiul elementelor orbitale ( $a, i$ ) și ( $a, e$ ). Asteroizii dintr-o familie sunt rezultatul dezintegrării unui obiect în urma unui impact, sau dezintegrării suprafeței în urma unui impact care a produs un crater de mari dimensiuni în comparație cu asteroidul. Asteroizii mari din familiile de asteroizi se formează prin regruparea fragmentelor mai mici [146], dacă la impact viteza fragmentelor rezultate nu este mai mare decât viteza orbitală.

Formula vitezei pe care trebuie să o aibă un corp ca să scape de forța de atracție a altuia se află descrisă mai jos:

$$v_E = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (2.26)$$

Viteza medie de impact în centura principală este de 5-10 km/s, crescând pentru asteroizii cu înclinări și excentricități mari [21] dar, în cele mai multe din cazuri fragmentele rezultate în urma unui impact se deplasează cu viteze de metri/secundă până la zeci de m/s. Acest lucru înseamnă că pot apare grupuri de fragmente ale asteroizilor care au suferit impacturi. Imaginile cu asteroizii mari arată cratere enorme pe suprafața lor, semn că au avut loc procese fizice care duc la apariția fragmentelor. Un exemplu este asteroidul (4) Vesta, care este sursa unei familii foarte numeroase și care are pe suprafață un crater cu diametrul de 505 km [219].

Inițial fragmentele nu se îndepărtează prea mult de corpul principal, dar forțele non gravitaționale duc la o împrăștiere în timp a obiectelor, elementele orbitale începând să aibă valori diferite.

Diametrul corpului principal poate fi estimat cu ajutorul relației următoare [171]:

$$D_{PB} = (D_{LM}^3 + D_{frag}^3)^{\frac{1}{3}} \quad (2.27)$$

unde  $D_{LM}$  este diametrul celui mai mare membru și  $D_{frag}$  este diametrul unei sfere cu un volum echivalent cu cel al tuturor fragmentelor.

Dacă  $D_{LM} > D_{frag}$ , familia a fost creată în urma unui impact care a produs un crater [251]; dacă  $D_{LM} < D_{frag}$ , familia a fost produsă în urma unui impact care a dus la dezintegrarea obiectelor [171]. Estimările nu țin cont de eventualii asteroizi care doar se suprapun peste cei din familie (intruși).

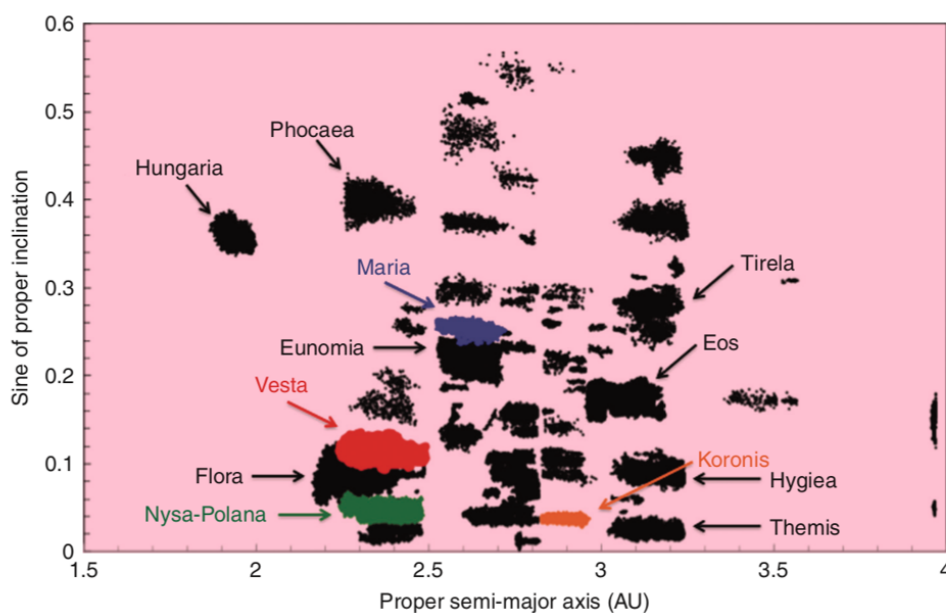
Primele familii de asteroizi au fost identificate de Hirayama prin comparația între excentricitățile, înclinările și mișcările medii ale asteroizilor cunoscuți în acea perioadă. A identificat astfel familiile Koronis, Eos, Themis, Flora și Maria, denumite în prezent *familiiile Hirayama*. De la o simplă comparație între elementele orbitale, identificarea modernă a membrilor unei familii a început în 1994 [297] [296] [295] prin folosirea Hierarchical Clustering Method (HCM) pentru elementele orbitale proprii. Cu această metodă se determină o distanță limită de la care asteroizii nu mai sunt considerați membri ai unei familii, distanța se exprimă în m/s pentru că depinde de vitezele relative ale fragmentelor. Relația care permite relaționarea orbitală a doi asteroizi este următoarea:

$$d = na_P \frac{5}{4} \sqrt{(a_{p2} - a_{p1})^2 + 2(e_{p2} - e_{p1})^2 + 2(\sin i_{p2} - \sin i_{p1})^2} \quad (2.28)$$

unde  $a_p$ ,  $e_p$  și  $i_p$  sunt elementele orbitale proprii ale celor doi asteroizi, iar  $n$  mișcarea proprie.

Până în prezent au fost identificate 122 de familii de asteroizi [171], cele mai bogate fiind (44) Nysa–(142) Polana cu 19.073 membri, (4) Vesta cu 15.525 membri și (8) Flora, cu 13.876 membri, denumirea unei familii venind la cel mai mare asteroid care face parte din familie (Fig. 2.24).

O altă modalitate pentru identificarea membrilor comuni ai unei familii de asteroizi este caracterizarea suprafețelor acestora prin spectrofotometrie. Astfel s-au identificat 76 de familii [139], folosind metoda HCM combinată cu valoarea albedourilor măsurate de misiunea NEOWISE și IRAS (Fig. ??). Orice asteroid care nu

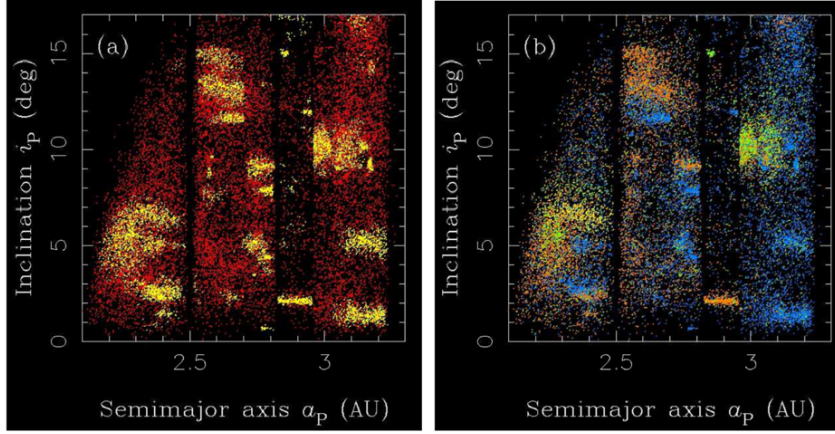


**Figura 2.24:** Familii de asteroizi identificate de Nesvorny [171].

are proprietățile spectrofotometrice asemănătoare cu ale celorlalți membri, dar se regăsește în spațiul unei familii, se numește *intrus*. Tehnica este foarte utilă în descoperirea familiilor în care membrii acestora au proprietăți spectrale semnificative, diferite de cele ale majorității asteroizilor din centura principală, precum familia Koronis, Eos sau Vesta.

Vârsta unei familii de asteroizi reprezintă o componentă importantă în studiul formării și evoluției sistemului solar, istoria familiilor fiind de fapt istoria centurii principale, supusă proceselor non-gravitaționale și a influențelor gravitaționale planetare. Pentru cele mai tinere familii, vârsta poate fi estimată prin integrarea înapoi în timp a elementelor orbitale  $\Omega$  (longitudinea nodului ascendent) și a longitudinii periheliului ( $\omega$ ). Nesvorny și Bottke [173] au determinat vârsta familiei Karin ca fiind  $5,8 \pm 0,2$  My. Molnar și Haegert [155] au descoperit un impact cu vârsta de la  $14,97 \pm 0,12$  My a asteroidului (832) Karin cu asteroidul (158) Koronis care a dus la suprapunerea unei părți ale familiei Karin peste familia Koronis, însă pentru familiile mai vechi, trebuie luat în considerare efectele nongravitaționale care duc la împrăștierea membrilor familiilor [173].

Vârsta unei familii de asteroizi mai poate fi estimată în funcție de împrăștierea membrilor față de corpul principal. Împrăștierea este datorată efectului Yarkovsky,



**Figura 2.25:** Familii de asteroizi identificate de Nesvorny și proprietățile lor spectrofotometrice.

care are forță maximă la înclinări ale axelor de rotație de 0 și 180°. Împrăștierea membrilor [171] poate fi descrisă cu formula:

$$(a_P - a_c) = C_0 \times 10^{\frac{H}{5}} \quad (2.29)$$

unde  $a_P$  este semiaxa mare a orbitei și  $a_C$  semiaxa mare a orbitei centrului familiei (a celui mai mare fragment sau semiaxa mare medie a membrilor familiei),  $H$  este magnitudinea absolută, iar  $C_0$  este un parametru care depinde de vârsta familiei, după cum urmează:

$$t_{varsta} = 1 \times 10^8 \times \left( \frac{C_0}{10^{-4}UA} \right) \left( \frac{a}{2,5UA} \right)^2 \left( \frac{\rho}{2,5g/m^3} \right) \left( \frac{0,2}{\rho_V} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

unde  $t$  este în ani,  $C_0$  este constanta descrisă mai sus,  $\rho$  este densitatea asteroidului, iar  $\rho_V$  este albedo-ul vizual.

Imediat după crearea unei familii, după ce forța de atracție dintre fragmente devine neglijabilă, fragmentele se dispersează în timp, pe măsură ce se rotesc în jurul Soarelui. Inițial orbitele acestora for avea elementele orbitale  $\Omega$ ,  $\omega$  de valori asemănătoare, însă din cauza vitezelor de ejecție diferite și a perturbațiilor gravitaționale, se vor dispersa [172].

Dispersia familiilor se face în timp [172], cu rate diferite în funcție de elementul



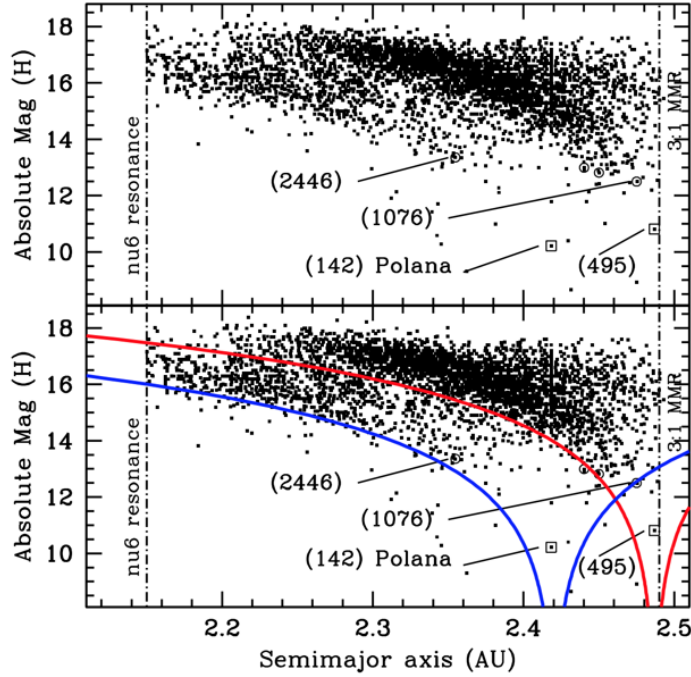


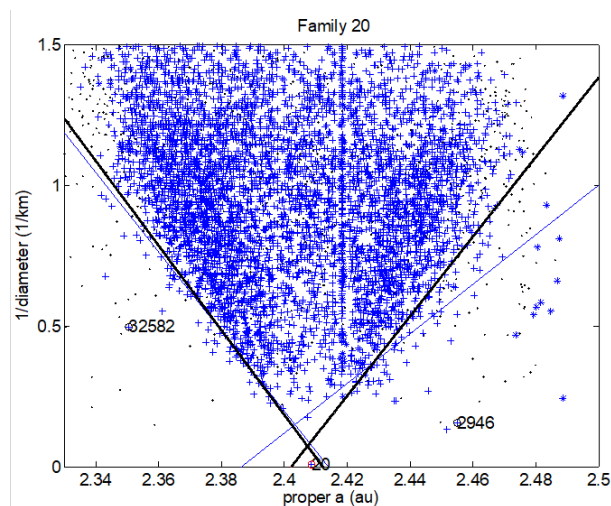
Figura 2.26: Diagrama în  $V$  pentru două familii de asteroizi. Sursa: [263].

orbital considerat,  $\Omega$ ,  $\omega$  sau  $i$ . În funcție de perioada de revoluție, de viteza de ejeție și cea medie, se poate calcula timpul de dispersie, caracteristic fiecărei familii [172].

În practică, se reprezintă grafic distribuția magnitudinii absolute ( $H$ ) a asteroizilor dintr-o familie în planul semiaxei mari a orbitei (elemente orbitale proprii). Pe marginile distribuției se fitează parametrul  $C$ , iar cea mai potrivită valoare a acestuia se folosește în formula de mai sus, unde ceilalți termeni reprezintă proprietățile celui mai mare membru (Fig. 2.26).

Dintre toate cele peste o sută de familii de asteroizi, câteva interacționează cu rezonanțele de mișcare medie și cu cele seculare. Hirayama a găsit că familia Flora se află în preajma rezonanței  $\nu_6$  și, odată cu posibilitatea calculului elementelor orbitale proprii pentru un număr mare de asteroizi s-au identificat și alte familii în preajma rezonanțelor. Necesitatea explicării dispunerii unor familii în spațiul  $(a, e)$  sau  $(a, i)$ , forma familiilor, a dus la descoperirea importanței efectelor non-gravitaționale în lumea corpurilor mici [25].

Unele familii de asteroizi se află în preajma rezonanțelor de mișcare medie cu Jupiter, care le-au afectat structura în timp. În cazul acesta, membrii unei familii



**Figura 2.27:** *Diagrama în  $V$  pentru familia asteroidului (20) Massalia. Au fost reprezentați asteroizii considerați a fi parte din familie față de semiaxa mare proprie a orbitei lor. Liniile negre reprezintă împrăștierea în semiaxa mare generată de efectul Yarkovsky pentru diferite diametre ale asteroizilor, luându-se în considerare rotația directă (stânga) și retrogradă (dreapta). Asteroidul sursă se află în apropierea intersecției celor două linii drepte. Sursa: [152].*

pot deveni și fi în prezent asteroizi geointersectori și surse de meteoriți. Acest aspect a fost demonstrat de Bottke et al. (2001). Efectul Yarkovsky induce modificări ale semiaxei mari și înclinații ale orbitelor, asteroizii membri ajungând în zonele de rezonanță (Fig. 2.28).

În familia (163) Erigone de exemplu, numărul de asteroizi din zona centrală este mai mic decât la extremități, efect pus pe baza migrației asteroizilor într-o rezonanță seculară și îndepărtarea lor din familie în urma efectelor forțelor non-gravitaționale [37]. Iată cum apropierea extremității unei familii de o rezonanță poate duce la evaporare prin dispariția membrilor.

Familia (130) Elektra prezintă o densitate mai mare de asteroizi într-o regiune și este compusă din obiecte aflate într-o rezonanță seculară [37]. Rezonanțele pot acționa ca o barieră care ține asteroizii dintr-o familie în același spațiu de elemente orbitale.

O familie izolată este (25) Phocaea, situată într-o rezonanță seculară și una de mișcare medie cu Jupiter care acționează prin îndepărtarea membrilor din jurul părții centrale a familiei [37]. În acest caz, din cauza rezonanțelor, familia devine

mai săracă în obiecte.

Familia (4) Vesta se află în centura principală interioară și este compusă din asteroizi de tip V. Conține aproximativ 15.000 de membri [171], caracteristica principală a acestei familii fiind faptul că a fost produsă în urma unui impact care a dus la apariția unui crater și nu la dezintegrarea asteroidului sursă. Obiectele denumite *vestoizi* sunt asteroizi situați între această familie și rezonanța de mișcare medie 3:1 sau a rezonanței  $\nu_6$ . Această familie este o sursă de meteoriți [150].

Familia Flora are ca asteroid principal pe (8) Flora, un obiect de tip S, aflat la 2,2 AU de Soare. Cu peste 13.000 de membri, această familie are o vârstă 1 miliard de ani și poate fi sursă a meteoriților condrite LL [250]. Situația în preajma puternicei rezonanțe  $\nu_6$  a modificat distribuția orbitală a membrilor și face ca această familie să fie o sursă puternică de asteroizi geointersectorii [250].

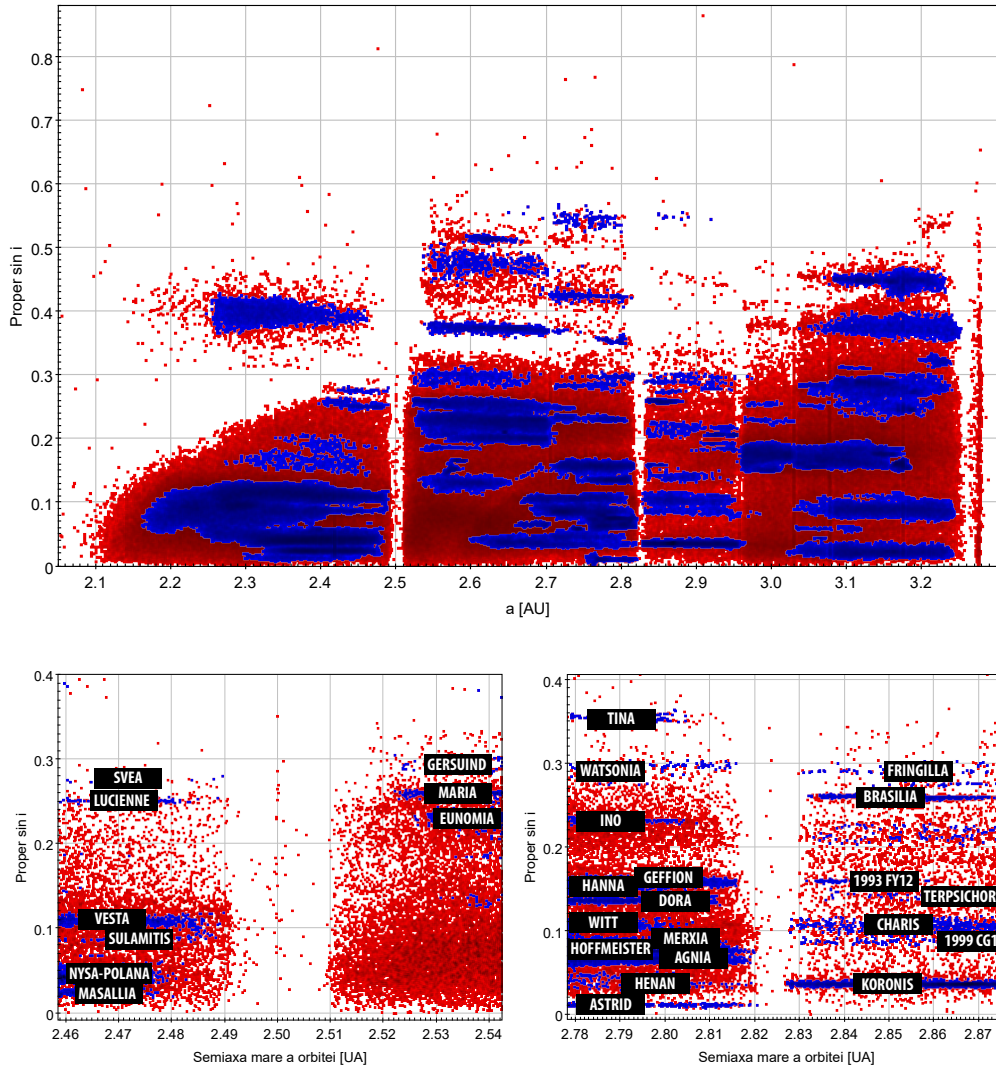
Familia (158) Koronis este o familie aflată în partea exterioară a centurii de asteroizi, care conține peste 6.000 de membri. Vârsta acesteia este de 2 miliarde de ani [137], membrii având proprietăți spectrale similare cu ale micrometeoriților dar și ale condritelor ordinare [71].

O altă familie aflată în partea exterioară a centurii principale este (221) Eos, care are peste 9.000 de membri cu proprietăți spectrale similare cu cele ale obiectelor care provin din mantaua unui corp diferențiat [163].

Familia (298) Baptistina conține 2.500 de membri și este situată în partea interioară a centurii de asteroizi [171]. Botke [22] a identificat, din distribuția orbitală a membrilor, un impact în această familie care duce la ideea că asteroidul care a dus la extincția din Cretacic-Paleogen, a provenit din această familie. Un meteorit descoperit, care provine de la impact, este condrită carbonată, iar tipul spectral predominant al membrilor familiei este S [207].

Familia (1272) Gefion conține peste 2500 de membri și se află în preajma rezonanței 5:2. Este considerată sursa meteoriților de tip condrite L [174]. Vârsta familiei este de aproximativ 485 milioane de ani.

Familia (24) Themis este relativ numeroasă, mărimea asteroidului sursă fiind estimată la 300 km. Din punct de vedere dinamic, familia se află la marginea rezonanței 2:1 cu Jupiter, una din cele mai puternice rezonanțe din centura principală.



**Figura 2.28:** *Sus:* Asteroizi în spațiul  $(a, i)$  al elementelor orbitale proprii. Cu albastru sunt marcate familiile de asteroizi. Se disting ușor zonele de rezonanță de mișcare medie cu Jupiter, ca zone în care să găsim mai puține obiecte. *Jos stânga și dreapta:* pe zonele de rezonanță sunt reprezentate și marcate familiile de asteroizi cu obiecte situate în preajma rezonanțelor.

La rezonanța 3:2 cu Jupiter se află regiunea asteroizilor Hilda. În această zonă, într-un interval de doar 0,035 UA se află familia (1911) Schubard, care conține peste 508 membri [152]. În aceeași zonă se întâlnesc și familiile (6124) Mecklenburg și (3561) Devine, toate aflate în preajma asteroidului (153) Hilda.

Familia (1362) Griqua se află în preajma rezonanței 2:1 cu Jupiter, într-o gamă îngustă a semiaxelor mari de 0,02 UA. Membrii acestei familii sunt dispersați pe jumătate de grad de sinus al înclinației și pe o gamă largă de excentricități.

Așa cum am prezentat mai sus, unele familii de asteroizi se află în preajma rezonanțelor de mișcare medie cu Jupiter, care le-au afectat structura în timp. În cazul acesta, membrii unei familii pot deveni și fi în prezent asteroizi geointersectorii și surse de meteoriți [17]. Efectul Yarkovsky induce modificări ale semiaxei mari și înclinării orbitelor, asteroizii membri ajungând în zonele de rezonanțe.

Evoluția orbitală a fragmentelor duce și la ciocniri între aceștia, cu viteze ordinul a 5 km/s [56]. Există mai multe aspecte ale ciocnirilor dintre membrii unei familii. În primul rând, ciocnirile duc la eliminarea obiectelor inițiale ale unei familii și la înlocuirea lor cu fragmente noi. Ca o consecință, particularitățile orbitale și fizice ale membrilor se modifică în timp. În al doilea rând, în cazul ciocnirilor în care energia nu este suficientă pentru dispersarea fragmentelor, reacumularea gravitațională duce la formarea asteroizilor cu structura *conglomerat de fragmente* (rubble pile). Suprafețele asteroizilor sunt acoperite de regolit în urma ciocnirilor succesive și, în anumite cazuri, material din interior este expus, ceea ce face ca asteroidul să aibă o suprafață tânără.

Richardson [209] arată că numeroase simulări duc la concluzia că în urma impacturilor cu viteze mai mari de 1 km/s asteroizii se pot fragmenta în totalitate dar fără ca fragmentele să se disperseze și că obiectele mai mari de 100 m sunt predispușe la a se reacumula în urma unui impact. Mai mult, un obiect de tip rubble pile se poate dispersa mai greu în urma altor impacturi, din cauza propagării dificile a energiei prin golurile create în structuri.

Istoria evolutivă a unui asteroid include apropieri de alte corpuri și multe impacturi cu asteroizi mai mari sau mici. În urma unui impact, fragmentele mai mari de 100 m se pot regrupa sub acțiunea forței de atracție și se pot suda în timp [209]. Simulările de impact dintre obiecte cu mărimi diferite, de ordinul zecilor de

kilometri, au ca rezultat formarea de asteroizi sferici sau alungiți, compuși din o parte din fragmentele produse la impact [54]. Se formează în acest mod asteroizi cu structură internă poroasă care absorb mai bine energia unui impact și pot rezista mai mult în sistemul solar. Astfel este explicată forma asteroizilor vizitați de sonde spațiale, sferică, precum cea a asteroizilor (101955) Bennu și (162173) Ryugu, fie una mai complicată ca cea a asteroidului (25143) Itokawa [144]. Reacumularea fragmentelor după un impact explică și mărimea asteroizilor a două familii, simulările numerice având ca rezultat asteroizi de mărimi asemănătoare cu cele ale celor mai mari asteroizi din familiile Eunomia și Koronis [148].

În prezent se consideră că un număr mare dintre asteroizii cu mărimi între 0,1 și 100 km sunt de tipul conglomerat de fragmente [209], fapt dovedit de observații.

Un exemplu este dat de craterele mari care se întâlnesc pe unii asteroizi. Asteroidul (253) Mathilde, de numai 50 km în diametru, are un crater de 33 km în diametru. Un impact cu un asteroid de tip monolit ar fi dus la distrugerea acestuia, însă o structură poroasă, care absoarbe mai bine energia dar nu o transmite mai departe, permite ca obiectul în sine să nu fie distrus. Alți asteroizi, precum (243) Ida și (951) Gaspra prezintă crateres cu ordin de mărime asemănător cu cel al diametrului, ceea ce indică o structură poroasă.

Asteroidul (253) Mathilde are o perioadă de rotație lentă, 17,5 zile, precum și o densitate de numai  $1,3 \text{ g/cm}^{-3}$ , un al indicator al unei structuri interne poroase. O densitate mică poate fi explicată și printr-o compoziție de materiale volatile însă acestea nu au fost detectate în urma survolului sondei spațiale. Densitatea mică mai poate fi explicată prin existența spațiilor goale interne, intercalate printre fragmentele cu densitate normală ( $2,6 \text{ g/cm}^{-3}$ ) din care este compus asteroidul.

Fragmentarea cometelor sub acțiunea forței de atracție a unei planete poate fi rezultatul unei structuri interne poroase. Se cunosc până în prezent câteva cazuri, interesant fiind faptul că obiectele se pot fragmenta și la depărtări mari de planete, adică la forțe gravitaționale foarte mici [222]. Doar o structură internă foarte firavă poate explica fragmentarea, rămășițele fiind cele mai mari obiecte prinse în corpul inițial care a fost cometa. Și asteroizii se pot fragmenta, mai ales în urma rotației rapide, după cum este explicat în secțiunea despre asteroizi activi (secțiunea 2.2.1). Fragmentarea corpurilor mici este vizibilă și în numărul și forma craterelor aflate

pe planete. Există așa-numitele *lanțuri de cratere*, șiruri de cratere, care nu pot fi formate decât la impactul cu un corp fragmentat.

Formele asteroizilor indică acțiunea unor forțe care poate apare dacă structura internă este poroasă. Obiectele care au două extremități relativ sferice, unite de o zonă mai lină, pot fi produsul *fisiunii mareice*, adică separarea a două emisfere supuse unei forțe centrifuge mari. Sateliții asteroizilor pot apărea în urma fisiunii mareice, însă acest fenomen nu se produce dacă obiectul este un corp compact. Asteroizii mici, cu rotație rapidă sau lentă, dar cu o variație mică de strălucire sunt obiecte sferice care nu se pot forma prin alt proces decât prin reacumulare gravitațională, în ipoteza că axa de rotație nu este îndreptată înspre observator (ceea ce ar genera tot o variație mică de strălucire).

Viteza de rotație a asteroizilor poate fi considerată o măsură pentru studiul structurii interne a unui asteroid, dacă se ia în considerare și mărimea acestuia. S-a observat că nu există asteroizi mai mari de 200 m care au perioade de rotație mai mici decât 2,2 ore, semn că obiectele mari se dezintegrează la rotații rapide. Dezintegrarea rotațională apare la asteroizii cu structură internă fragilă.

Studiul rotațiilor asteroizilor din familii poate descoperi obiecte de tip conglomerat de fragmente, iar dacă aceștia se află în zonele de rezonanță pot deveni viitori asteroizi geointersectori, posibil surse de meteori. Chiar dacă nu se află în familii ci doar în rezonanțe, asteroizii pot proveni dintr-o familie în urma împrăștierei membrilor în semi-axa mare a orbitei. Și pentru că într-o familie de asteroizi obiectele pot suferi mai des ciocniri, sunt șanse mai mari ca aceștia să aibă structură internă fragilă.

În cadrul doctoratului am observat 10 asteroizi care fac parte din familii, după cum urmează: 5 membri ai familiei Gefion, un membru al familiei (847) Agnia, 3 membri ai familiei (158) Koronis și un membru al familiei (4) Vesta. Pentru toți aceștia am determinat perioada de rotație, stabilind cel puțin raportul dintre axele mari și mici ale lor, precum și dacă se află în rotație haotică. Descriu în capitolul următor caracteristicile principale ale rotației asteroizilor.

### 3. Rotația asteroizilor

La data de 20 martie 2020 se cunosc valorile perioadelor de rotație pentru 19.943 de asteroizi [279], dintre care 4.226 de obiecte au perioada de rotație măsurată fără ambiguitate. Aceste date, coroborate cu informații despre mărime, ne oferă o imagine despre structura internă și consistența asteroizilor. Perioadele de rotație variază de la 0,004389 ore (15,8 secunde, asteroidul 2014 RC) până la 990 de ore pentru asteroidul 1999 FH.

La rotația unui asteroid apare o forță centrifugă de inerție, îndreptată înspre exterior. În timpul rotației, dacă forța centripetă este egală sau mai mică decât forța de atracție (îndreptată înspre interior), orice particulă de pe suprafața asteroidului va rămâne pe acesta, nefiind aruncată în spațiu.

Pentru o particulă aflată la ecuatorul unui asteroid, forța centrifugă este:

$$F_c = \frac{m_2 v^2}{R} \quad (3.1)$$

unde  $m_2$  este masa particulei,  $v$  este viteza de rotație ( $2\pi R/T$ ),  $T$  este perioada de rotație, iar  $R$  este raza asteroidului. Forța de atracție la suprafața asteroidului este:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{R^2} \quad (3.2)$$

unde  $G$  este constanta gravitațională,  $m_1$  este masa asteroidului. Masa asteroidului este  $m_1 = \rho V$ , unde  $V$  este volumul. Volumul este  $(4/3)\pi R^3$ .

Egalizând cele două forțe, rezultă dependența perioadei de rotație de densitatea asteroidului:



$$T = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} = \frac{3,3h}{\sqrt{\rho}} \quad (3.3)$$

Perioada de rotație este invers proporțională cu pătratul densității unui asteroid, pentru un asteroid cu densitatea de  $2250 \text{ kg/m}^3$ , perioada de rotație fiind de 2,2 ore. Aceasta este o limită pentru care, pentru un asteroid sferic cu densitatea respectivă, structura nu va fi modificată de viteza rotație. Asteroizii însă nu sunt sferici, diferența dintre forța de atracție și forța centripetă fiind diferită pentru zone diferite de la suprafață.

Densitatea critică a unui asteroid, care are perioada de rotație  $P$  și variația de strălucire  $\Delta m$  este dată de relația de mai jos [84]:

$$\rho_C = \left(\frac{3,3h}{P}\right)^2 \times \frac{a}{b} = \left(\frac{3,3h}{P}\right)^2 \times (1 + \Delta m) \quad (3.4)$$

Dacă densitatea este mai mică decât valoarea critică, un asteroid se poate distruge. Pentru un obiect alungit, a cărei axă de rotație coincide cu dimensiunea minimă, accelerația gravitațională la capetele dimensiunii maxime este redusă cu raportul axei mari și mici a asteroidului ( $b/a$ ).

Pentru cazul unui elipsoid de rotație, cu formă de elipsoid tri-axial, cu axele  $a$ ,  $b$ ,  $c$  și condiția ca  $a \geq b = c$ , s-a găsit faptul că perioada de rotație critică ( $P$ ) depinde și de formă [210], după relația:

$$P = F \times T \quad (3.5)$$

unde  $T$  este perioada calculată cu relația 2,26, iar  $F$  este:

$$F = \sqrt{\frac{2\epsilon^3}{3(\epsilon^2 - 1)(2\epsilon + \ln \frac{1-\epsilon}{1+\epsilon})}} \quad (3.6)$$

iar  $\epsilon$  este

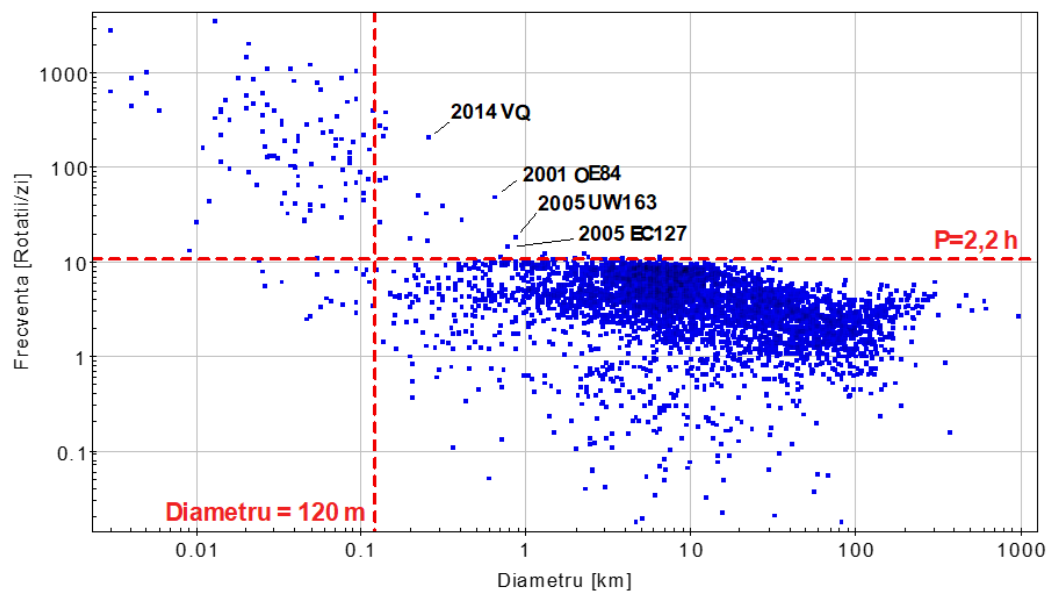
$$\epsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (3.7)$$

Astfel se poate determina forma și viteza de rotație pe care o pot avea asteroizii de densități diferite pentru ca să nu apară fenomenul de dezagregare rotațională.

Studiul perioadelor de rotație ale asteroizilor devine și mai interesant în urma observării asteroizilor activi, care pot avea activitate cometară în urma rotației prea rapide. Aceștia se pot sfărâma sau pot suferi modificări locale, după cum s-a stabilit în cazul celor câtorva obiecte descoperite până în prezent.

### 3.1 Bariera de rotație

O reprezentare grafică a perioadelor de rotație în funcție de diametrele asteroizilor, indică existența unei *limite de dezagregare*, care depășită, duce la dezagregarea asteroidului. În graficele de mai jos s-au folosit datele acumulate în baza de date LCDB<sup>1</sup>, care conține determinări de perioadă obținute prin studiul curbelor de lumină ale asteroizilor. Sunt reprezentate perioadele care au un grad de certitudine ridicat.



**Figura 3.1:** Distribuția perioadelor de rotație în funcție de diametrul asteroizilor. Perioada este dată ca frecvența (rotații pe zi).

Din Fig. 3.1 se observă limita de rotație de 2,2 h (11 cicluri pe zi) pentru asteroizii mai mari de 120 m [200]. Foarte puțini asteroizi mai mari de 120 m cu rotații mai mici de 2,2 h au fost descoperiți, aceștia fiind marcați în Fig. 3.1.

Perioada de rotație limită crește dacă densitatea asteroidului crește. Un sumar al cunoștințelor actuale despre densitățile asteroizilor [38], arată că valorile acestei

<sup>1</sup><http://www.minorplanet.info/lcdbquery.html>

caracteristici variază în funcție de clasa taxonomică a acestor obiecte. În același timp, pentru a se determina masa unui asteroid, este nevoie de măsurarea masei și volumului acestuia. În cazurile rare, când clasa taxonomică a unor meteoriți se aseamănă cu cea a asteroizilor, se poate estima densitatea prin simpla comparație a claselor taxonomice. Masa unui asteroid se poate determina prin modul în care masa Pământului sau a unei alte planete îi modifică traiectoria (în timpul unei apropieri), prin determinarea precisă a orbitei unui eventual satelit, prin modul în care traiectoria unei sonde spațiale se modifică în urma unei apropieri de un asteroid, sau (pentru asteroizii cei mai masivi) prin determinarea diferenței pozițiilor planetelor sau a altor corpuri față de efemeridele de mare precizie. Determinarea volumului constă de fapt în măsurarea diametrului, care poate fi obținut din ocultății stelare (acoperirea unei stele de către asteroid), din determinarea cantității de energie termică emisă de asteroid (observații în infraroșu), prin observații in situ sau prin observarea variației de strălucire la mai multe geometrii.

Densitatea asteroizilor poate fi determinată cu greutate din cauza structurii interne a acestora. În cazul unui obiect de tip monolit, cantitatea de metale și cea de minerale hidratate sunt factorii care stabilesc densitatea, însă în cazul asteroizilor complicația este dată de macroporozitate.

Porozitatea este de două tipuri: microporozitatea, care se referă la spațiile dintre particulele din care sunt formate rocile și macroporozitatea, care este dată de spațiile și golurile aflate între volumele mari de materie din care este constituit un asteroid. Macroporozitatea pentru asteroizii de tip S este mai mică de 30%, iar pentru cei de tip C mai mică de 50% [38]. Și porozitatea asteroizilor observați de aproape are valori mari: 40% porozitatea asteroizilor Itokawa, vizitat de sonda Hayabusa și Steins, vizitat de sonda Rosetta.

O explicație simplă pentru rotația rapidă a asteroizilor mici este că sunt obiecte monolitice, blocuri de rocă sau metalice, care nu se pot dezintegra în urma unei rotații rapide, însă a fost arătat faptul că forțele de coeziune ale materialelor din care sunt compuși pot oferi rezistență [95]. Distincția între asteroizi de aceeași mărime cu structură monolit și conglomerat de fragmente nu se mai poate face cu ușurință pentru că un obiect mic ( $D \leq 10$  km), pentru că forțele de coeziune moleculară se pot opune forțelor centrifuge, în special dacă mărimea fragmentelor conglomerate

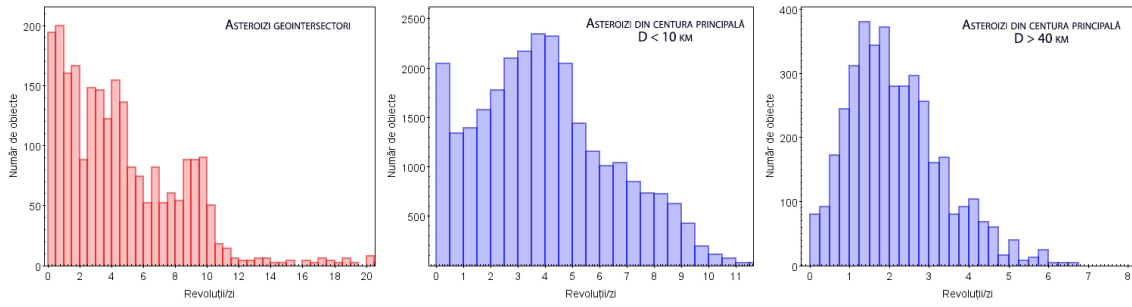
din care este compus asteroidul este mică [95].

## 3.2 Distribuția perioadelor de rotație

Pentru studiul populațiilor de asteroizi geointersectori, din rezonanță, din familii, sau ale oricăror alte grupuri cu elemente orbitale similare, este foarte util de determinat distribuția perioadelor de rotație. O distribuție maxwelliană a perioadelor de rotație ne arată o populație relaxată, specifică evoluției în urma unei ciocniri care a dat naștere fragmentelor, fără efectele unor forțe non-graviționale. Orice surplus de viteze de rotație este generat de modificarea acestora în timp. Studiul distribuției vitezelor se face de obicei prin realizarea de histograme.

Distribuția perioadelor de rotație a asteroizilor geointersectori diferă de cea a celor din centura principală (Fig. 3.2), existând un exces de obiecte care se rotesc lent și rapid [197]. Distribuția perioadelor de rotație a asteroizilor geointersectori este relativ asemănătoare cu cea a asteroizilor mici din centura principală ( $D \leq 5km$ ), însă și aici se observă același surplus de rotații lente [188]. Asteroizii din centura principală pentru care s-au determinat perioade de rotație sunt mai mari decât cei geointersectori, acesta fiind un efect observațional: nu se pot observa asteroizi foarte mici în centura principală. Pentru obiecte mai mici excesul de perioade lungi și scurte este mai mare decât pentru cele mari, fapt datorat probabil efectului YORP, care acționează mai puternic asupra obiectelor mai mici [188] și a celor mai apropiate de Soare. Pentru cazul asteroizilor geointersectori s-a observat un exces de rotații rapide, de 8-11 revoluții/zi, și lente, de 0-2 revoluții/zi. Pentru obiectele mai mari nu se observă niciun exces, distribuția putând fi aproximată cu o distribuție maxwelliană a vitezelor de rotație.

Un exces de rotații lente a fost observat și în populația de asteroizi ai căror orbite se intersectează cu cea a planetei Marte [197], fapt datorat cel mai probabil efectului forțelor non-graviționale induse de efectul YORP. În general, rotațiile asteroizilor mai mici de 15 km par să fie influențate de efectul YORP, efect care șterge rotația inițială a obiectelor, pe când perioadele de rotație a asteroizilor mai mari de 40 km sunt relaxate din puncte de vedere colizional [197]. În cazul asteroizilor cu diametre între 10 și 40 km începe să se observe un exces de perioade lungi, exces care crește



**Figura 3.2:** Distribuția normalizată a perioadelor de rotație a asteroizilor. Stânga: asteroizi geointersectorii; mijloc - asteroizi din centura principală cu diametre mai mici de 10 km; dreapta - asteroizi din centura principală cu diametre mai mari de 40 km. Sursa: Asteroid Lightcurve Photometry Database ALCDEF.

cu cât diametrul asteroidului scade. La asteroizii mai mici începe să apară și un exces de perioade de rotație scurte [200].

Studiul perioadelor de rotație ale asteroizilor ne ajută să determinăm populații relaxate colizional și să identificăm acțiunea forțelor non-gravitaționale. Mergând în urmă pe firul evolutiv, cu aceste date putem afla starea rotațională în care se aflau în trecut asteroizii și să modelăm evoluția viitoare a obiectelor care în prezent se află în aceeași stare.

Iată cum determinarea perioadei de rotație este esențială în studiul acestor obiecte, fiind în același timp un rezultat al evoluției orbitale generată de efectele gravitaționale și non-gravitaționale.

## 4. Selectarea obiectelor pentru observații

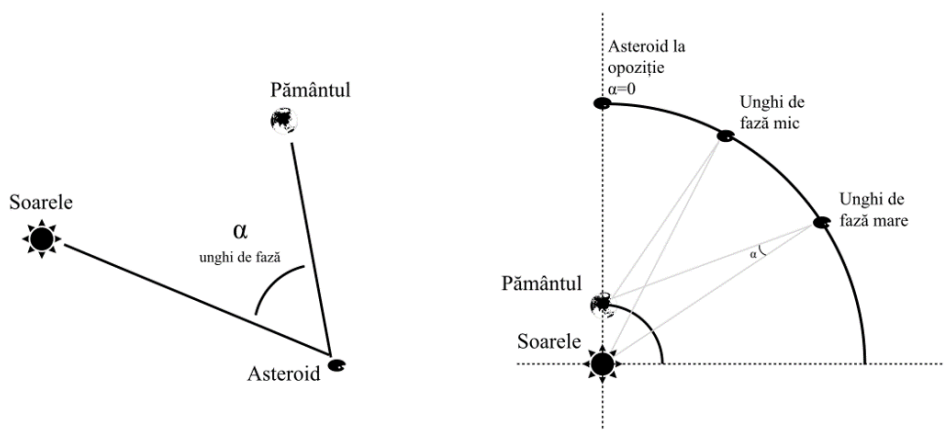
Subiectul tezei mele de doctorat este observarea asteroizilor și identificarea celor care pot avea structură de tip conglomerat de fragmente. Determinarea tipului de structură se face în urma determinării perioadei de rotație, care, dacă are o valoare peste un prag, indică tocmai acest tip de structură. Acești asteroizi se pot afla în familiile de asteroizi, unde există fragmente mai multe care se pot suda în timp ce se rotesc împreună în jurul Soarelui, dar se mai pot afla și în alte locuri din centura principală și chiar în apropierea Pământului, pentru că orbitele lor sunt perturbate de rezonanțele seculare sau de mișcare medie datorate planetelor mari. Totodată, pentru că în preajma planetei noastre există curenți de meteori, este util să credem că o parte din curenți provin de la asteroizii de acest tip, care pierd materie sau se dezintegrează în urma forțelor mareice. Astfel, locurile potrivite în sistemul solar pentru căutarea de asteroizi fără perioade determinate sunt chiar rezonanțele de mișcare medie. La marginea rezonanțelor se întâlnesc și familii de asteroizi, iar condițiile menționate mai sus se îndeplinesc.

Pentru a putea selecta asteroizii de observat a trebuit să îi identific pe cei care se află în rezonanțe și în același timp pe aceia dintre ei care au fost observați. Am ales să observ și asteroizi care au mai fost observați pentru a verifica toată procedura de reducere a datelor și găsim de perioadă. Dacă perioada găsită de mine se potrivește cu cea din literatură înseamnă că metodele alese funcționează.

Am ales asteroizi situați în rezonanțe, destul de strălucitori pentru a putea fi observați cu echipamentul disponibil, iar în cazul asteroizilor geointersectorii am ales obiecte aflate într-o perioadă favorabilă de observații (strălucire mare sau depărtare mică de Pământ). Voi descrie procesul de identificare și de lucru în secțiunile următoare.

## 4.1 Strălucirea asteroizilor

O problemă non-trivială, esențială în astronomia de observație, este strălucirea aparentă a asteroizilor. Strălucirea unui asteroid depinde de mărimea sa, depărtarea la care se află, albedo, dar și de unghiul de fază, adică procentul de iluminare, notat cu  $\alpha$  (Fig. 4.1). Un asteroid aflat la unghiul de fază  $0^\circ$  este analog Lunii Pline, suprafața vizibilă fiind iluminată în totalitate. Dacă unghiul de fază este  $90^\circ$ , avem un procent de iluminare a suprafeței de 50%. În cazul observațiilor de pe Pământ, doar asteroizii geointersectori pot fi observați la unghiuri de fază mari, cei din centura principală fiind observați la unghiuri de fază mai mici de  $30^\circ$ . Asteroizii cu înclinări mari față de ecliptică nu pot fi observați la unghiuri de fază 0.



**Figura 4.1:** Unghiul de fază al asteroizilor. În figură nu se ia în considerare înclinarea orbitelor.

Strălucirea unui asteroid depinde de mărimea lui, albedo și distanțele față de Soare și Pământ. În astronomie strălucirea se numește *magnitudine* și când se calculează în vederea observațiilor se numește *magnitudine aparentă* pentru că se iau în calcul toate variabilele de mai sus. Dacă se dorește compararea strălucirilor intrinseci ale asteroizilor, se calculează *magnitudinea absolută*, care este magnitudinea pe care asteroidul la depărtarea de 1 UA față de Soare și de Pământ. În acest caz, diferența de strălucire este dată numai de diametrul obiectului și de albedo. În observațiile fotometrice, pentru analiza variației de strălucire a asteroidului, magnitudinile ob-

servate se transformă prin calcul în magnitudini reduse, care nu sunt altceva decât magnitudinile observate din care se scad efectele produse de modificarea distanței față de asteroid în timpul observațiilor.

$$V_R = V - 5\log(R\Delta) \quad (4.1)$$

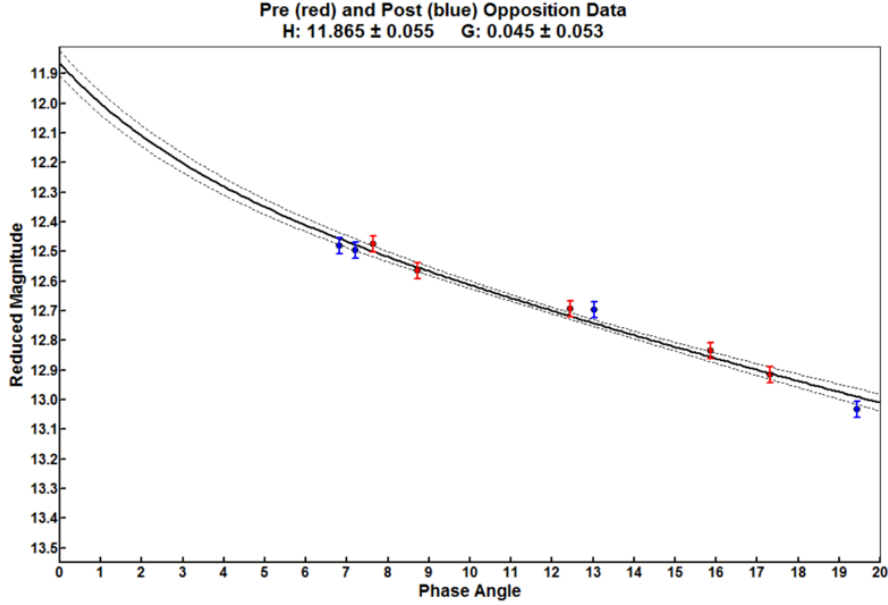
unde  $V$  este magnitudinea aparentă,  $R$  este distanța față de Soare în UA iar  $\Delta$  este distanța față de Pământ.

Obiectele observate de pe Pământ se află în diferite poziții pe orbită, de unde rezultă diferite poziții unghiulare față de Soare. Se definește *unghiul de fază*, care este unghiul pe care îl face un asteroid cu Pământul și Soarele. Când unghiul de fază este 0 asteroidul se află la *opozitie cu Soarele* și are strălucirea cea mai mare, existând și un fenomen în care obiectul, pentru un timp mai scurt, devine mai și strălucitor. Efectul se numește *efectul de opozitie* și se datorează fenomenelor de dispariție a umbrelor, de interferență constructivă multiplă a luminii (lungimea de undă a luminii trebuie să fie egală cu mărimea particulelor aflate pe suprafața asteroidului și mai mică decât distanța dintre ele) și o reflexie difuză [83].

Pe parcursul apariției unui asteroid distanța dintre observator și acesta se modifică. Atunci când magnitudinea aparentă a acestuia este folosită în determinări de perioadă, este nevoie să se îndepărteze efectul de modificare a strălucirii produs de modificarea distanței. Astfel, se calculează magnitudinea absolută (sau magnitudinea redusă), care se definește ca magnitudinea asteroidului dacă acesta se află la 1 UA de Soare și de observator. Efectul de fază poate fi observat dacă se măsoară strălucirea asteroidului înainte și după opozitie.

Magnitudinea absolută a unui asteroid este o măsură a mărimii acestuia, deci determinarea ei exactă pe baze observaționale, este importantă în studiul acestor obiecte. În prezent, în calculul de efemeride, pentru a se estima magnitudinea unui asteroid, se folosește sistemul H-G, care constă în atribuirea fiecărui asteroid unei valori pentru H și în alocarea din oficiu a unei valori pentru parametrul G, care arată modul în care se modifică magnitudinea aparentă în funcție de unghiul de fază. Parametrul H se estimează în funcție de magnitudinea aparentă și un albedo mediu al asteroizilor, iar G poate lua valori de la 0 (creștere sau scădere bruscă a strălucirii





**Figura 4.2:** Exemplu de determinare a parametrilor  $H$  și  $G$ . Punctele roșii reprezintă date fotometrice obținute înainte de opoziție, iar cele albastre după opoziție. Astfel se pot calcula pantele care reprezintă modul în care crește și scade strălucirea asteroidului [185].

în funcție de unghiul de fază) și 1 (creștere lentă). În prezent, în calculul strălucirii, parametrului  $G$  (denumit și *pantă*) i se atribuie valoarea 0,15, însă valoarea reală a acestuia variază de la asteroid la asteroid [202]. Valoarea lui  $G$  depinde și de albedo-ul asteroizilor, cei cu albedo ridicat având un  $G$  mediu de 0,46, iar cei cu albedo scăzut un  $G$  mediu de 0,12. În practică, pentru determinarea mărimilor  $H$  și  $G$ , se observă asteroidul la diferite unghiuri de fază, înainte și după opoziție, se determină perioada de rotație, se reprezintă grafic variația strălucirii în funcție de fază și se determină panta  $G$  și valoarea reală a lui  $H$  (Fig. 4.2).

Magnitudinea absolută pentru o anumită fază poate fi calculată cu relația următoare:

$$H = V_R + 2,5 \log[(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)] \quad (4.2)$$

unde  $V_R$  este magnitudinea redusă,  $G$  este panta, iar  $\Phi_1(\alpha)$  și  $\Phi_2(\alpha)$  sunt două funcții care descriu împrăștierea luminii (Bowell et al. 1989). Funcțiile  $\Phi_i$  pot fi approximate prin formula următoare:

$$\Phi_i(\alpha) = e^{-A_i(\tan \frac{\alpha}{2})^2} \quad (4.3)$$

unde termenii  $A_1 = 3,33$ ,  $B_1 = 0,63$ ,  $A_2 = 1,87$  și  $B_2 = 1,22$ .

Acest sistem aproximează corect strălucirea asteroizilor pentru unghiuri de fază între  $10^\circ$  și  $60^\circ$ , dar prezintă erori pentru faze mai mici și mari, pentru asteroizi cu albedo foarte mare și foarte mic, precum pentru momentul opoziției [164]. Din toate aceste motive, în 2012, s-a adoptat un sistem nou de calcul al magnitudinii asteroizilor [164], bazat de  $H$  și pe doi parametri  $G$ , un model care descrie mai bine variația de strălucire la unghiuri de fază mici. În urma unui studiu statistic pe aproximativ 240.000 de asteroizi [248] s-a găsit că modelul nou aproximează mai bine strălucirea asteroizilor prin reducerea incertitudinii și a erorii sistematice în stabilirea magnitudinii absolute. În acest model, în principiu, strălucirea măsurată a asteroidului (în magnitudini) este convertită în flux cu o relație simplă, după care, împreună cu informații despre fază la momentul observației și deviația standard în măsurarea strălucirii, se obțin, prin fitare și metoda celor mai mici pătrate, valorile unor coeficienți cu ajutorul cărora se calculează cele două valori  $G_1$  și  $G_2$ . Acestea, împreună cu funcțiile  $\Phi_i$  care descriu împrăștierea luminii, se introduc în relația 4.4, folosită pentru a se calcula magnitudinea absolută.

$$V(\alpha) = H - 2,5 \log_{10}[G_1\Phi_1(\alpha) + G_2\Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2)\Phi_3(\alpha)] \quad (4.4)$$

Astfel poate fi descrisă variația de strălucire a unui asteroid și se poate determina valoarea magnitudinii absolute.

Pentru a putea selecta asteroizii pentru observații a fost nevoie să îi identific pe cei aflați în rezonanțe și să calculez strălucirea aparentă a acestora. Detaliez procesul de selecție în secțiunile următoare.

## 4.2 Selecția asteroizilor

Informații despre asteroizi se găsesc în mai multe baze de date. Date fotometrice se găsesc în bazele de date realizate cu observațiile programelor automate Sloan Dig-

Records found: 50 (display limit: 50)

[Click here](#) to return to LCDB page OR  
Use the browser BACK button to return to the form and keep your previous filter settings  
The results are available for [download](#) as a tab-delimited text file

Show LCDB Entries																													
Number	Name	Desig	Family	CS	Class	DiamS	DiamF	Diam	HS	HBand	H	GS	G	Albs	Albf	Albedo	PF	Period	PerDesc	AmpF	AmpMin	AmpMax	U	Pole	BIN	Notes			
100	Hekate		MB-O	S	S			88.66	M		7.67	M	0.15	S		0.1922	27.066			0.11	0.23	3							
101	Helena		MB-I	S	S			65.84	L		8.327	L	0.32	S		0.1898	23.080			0.09	0.13	3							
102	Miriam		MB-M	S	C	L		86.93	L		9.3	L	0.09	L		0.0445	23.613			0.04	0.14	3							
103	Hera		MB-O	S	S			91.20	M		7.66	M	0.15	S		0.1833	23.740			0.35	0.45	3	TRUE						
104	Klymene		THM	S	C	S		123.68	M		8.27	M	0.15	S		0.0568	8.984			0.2	0.3	3	TRUE						
105	Artemis		PHO	S	C	S		119.08	M		8.57	M	0.1	S		0.0465	37.150			0.09	0.17	3	TRUE						
106	Dione		MB-O	S	C	S		146.59	L		7.41	L	0.09	S		0.0893	16.210			0.08	0.18	3							
107	Camilla		MB-O	S	X	L		219.38	L		7.1	L	0.09	L		0.053	4.844			0.32	0.53	3	TRUE	M					
108	Hecuba		MB-O	S	S			64.97	M		8.09	M	0.15	S		0.2431	14.256			0.09	0.12	3	TRUE						
109	Felicitas		MB-M	S	C	L		88.97	L		8.759	L	0.03	L		0.07	13.191			0.06	0.12	3							
110	Lydia		MB-O	S	X	S		86.09	M		7.80	M	0.2	S		0.1808	10.927			0.10	0.26	3	TRUE						
111	Ate		MB-I	S	C	S		134.55	M		8.02	M	0.15	S		0.0605	22.072			0.08	0.18	3							
112	Iphigenia		NYSA	S	C	S		72.18	M		9.84	M	0.15	S		0.0393	31.466				0.30	0.3	3	TRUE					
113	Armalthea		V	S	S			46.14	M		8.74	M	0.35	S		0.2649	9.950			0.19	0.22	3	TRUE	?					
114	Kassandra		MB-M	S	X	L		99.80	L		8.275	L	0.09	L		0.0868	10.7431			0.23	0.25	3	TRUE						
115	Thyra		MB-I	S	S			79.83	M		7.51	M	0.12	S		0.2747	7.241			0.19	0.20	3	TRUE						
116	Sirona		MB-O	S	S			71.70	M		7.82	M	0.15	S		0.2560	12.028				0.42	0.3	3	TRUE					
117	Lomia		MB-O	S	X	S		148.71	M		7.95	M	0.15	S		0.0528	9.127			0.10	0.35	3	TRUE						
118	Peitho		MB-I	S	S			41.73	M		9.14	M	0.15	S		0.2240	7.8055			0.11	0.33	3							
119	Althaea		MB-I	S	S			57.30	M		8.42	M	0.15	S		0.2306	11.484			0.10	0.36	3	TRUE						
120	Lachesis		MB-O	S	C	S		174.10	M		7.75	M	0.15	S		0.0463	46.551			0.14	0.22	3	TRUE						
121	Hermione		MB-O	S	C	C		206.16	M		7.31	L	0.09	L		0.0495	5.55128			0.04	0.62	3	TRUE	B					
122	Gerda		MB-O	S	L	S		81.69	M		7.87	M	0.15	S		0.1883	10.685			0.10	0.26	3	TRUE						
123	Brunhild		MB-M	S	S	D		47.78	M		8.9	M	0.15	D		0.2131	9.873			0.14	0.21	3							
124	Aikeste		MB-M	S	S			76.36	M		8.11	M	0.19	S		0.1728	9.906			0.08	0.30	3							
125	Liberatrix		MB-O	S	X	L		61.06	L		8.9	L	0.22	L		0.1305	3.968			0.20	0.71	3	TRUE						

Figura 4.3: Exemplu de informații care se regăsesc în The Asteroid Lightcurve Database.

ital Sky Survey Moving Object Catalog (SDSS-MOC), Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) și VISTA.

Baza de date fotometrice pentru asteroizi, The Asteroid Lightcurve Database (LCDB) conține date pentru aproximativ 14.000 de obiecte și peste 3.000.000 de estimări fotometrice, pentru asteroizi din centura principală dar și geointersectorii. Consultarea acestei baze de date a fost utilă în alegerea țintelor de observații. Fiecare curbă de lumină din baza de date este marcată în funcție de precizie, cu parametrul  $U$ . Dacă  $U$  este 3, perioada este cunoscută cu precizie. Un parametru  $U$  mai mic de 2 indică o perioadă incertă și un obiect care merită observat (Fig. 4.3).

O altă sursă de informații pentru perioade de rotații de asteroizi este publicația Minor Planet Bulletin, care apare de patru ori pe an. Publicația este un buletin în care se publică observații noi, estimări de perioadă și, cel mai important, o listă de obiecte care se află în poziție favorabilă în următoarele trei luni (Fig. 4.4). Aceste informații sunt utile în special în cazul asteroizilor geointersectorii, ne mai fiind necesară studiarea efemeridelor a mii de obiecte pentru a afla care este cel mai potrivit pentru observații.

Pentru identificarea potențialilor asteroizi de observat, am folosit baza de date orbitale osculatoare ASTORB<sup>1</sup> și baza de date de elemente orbitale proprii ASTDYS

<sup>1</sup><https://asteroid.lowell.edu/main/astorb>

## Lightcurve/Photometry Opportunities

Objects with  $U = 3-$  or 3 are excluded from this list since they will likely appear in the list below for shape and spin axis modeling. Those asteroids rated  $U = 1$  should be given higher priority over those rated  $U = 2$  or  $2+$ , but not necessarily over those with no period. On the other hand, *do not overlook asteroids with  $U = 2/2+$  on the assumption that the period is sufficiently established.* Regardless, do not let the existing period influence your analysis since even high quality ratings have been proven wrong at times. Note that the lightcurve amplitude in the tables could be more or less than what's given. Use the listing only as a guide.

An entry in bold italics is a near-Earth asteroid (NEA).

Number	Name	Brightest			LCDB Data		U
		Date	Mag	Dec	Period	Amp	
12914	1998 SJ141	04	03.0	15.5	-1		
9931	Herbhauptman	04	12.6	15.5	-5	4.44	0.15-0.21 2
3747	Belinskij	04	14.0	15.1	+0	14.6	0.08 2
3394	Banno	04	14.9	14.6	-7		
9899	1996 EH	04	18.5	15.3	-20		
9369	1993 DB1	04	19.1	15.1	-11	54.335	0.17-0.43 2
86401	2000 AF143	04	20.5	15.4	-22		
10500	Nishi-koen	04	20.7	15.1	-5	44.552	0.27 2
2703	Rodari	04	21.8	15.3	-8	5.5	0.20 1
6868	Seiyauyeda	04	22.5	15.4	-6		
31205	1998 BW	04	23.9	15.5	-35	20.907	0.66 2
5351	Diderot	04	24.2	15.3	-4		
3617	Eicher	04	25.3	15.4	+0	5.81	0.21 2
2206	Gabrova	04	26.0	15.2	-6		
3563	Canterbury	04	26.9	15.5	-22	15.553	0.61 2
5291	Yuuko	04	26.9	15.0	-13		
<b>242643</b>	<b>2005 NZ6</b>	<b>04</b>	<b>26.9</b>	<b>15.0</b>	<b>-24</b>		
3390	Demagnet	04	28.0	15.1	-19		
5952	Davemonet	04	28.0	15.5	-22		

**Figura 4.4:** *Exemplu de informații care se regăsesc în Minor Planet Bulletin. Exemplu de listă de obiecte aflate în poziții favorabile pentru observații. Minor Planet Bulletin, Vol. 45, No. 2, AD 2018, April-June.*

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

**Tabelul 4.1:** *Asteroizi din familii care se află la maxim 0,005 UA depărtare de rezonanța de la 2,5 UA.*

<sup>2</sup>. Am mai folosit și baza de elemente orbitale proprii ale familiilor de asteroizi <sup>3</sup>.

### 4.3 Identificarea obiectelor folosind elemente orbitale proprii

Famiiliile de asteroizi pot fi identificate ușor în Fig. 4.5, în care s-a reprezentat în spațiul  $(a, \sin i)$ , baza de date de elemente proprii și famiiliile din baza de date de famiili. Se observă goluri la 2,5 UA și 2,82 UA, zone de rezonanță de mișcare medie cu Jupiter, dar și cum anumite famiili au granițe la marginea rezonanțelor. În golurile respective există asteroizi, aceștia fiind cei selecționați pentru observații (Fig. 4.5 și Fig. 4.6).

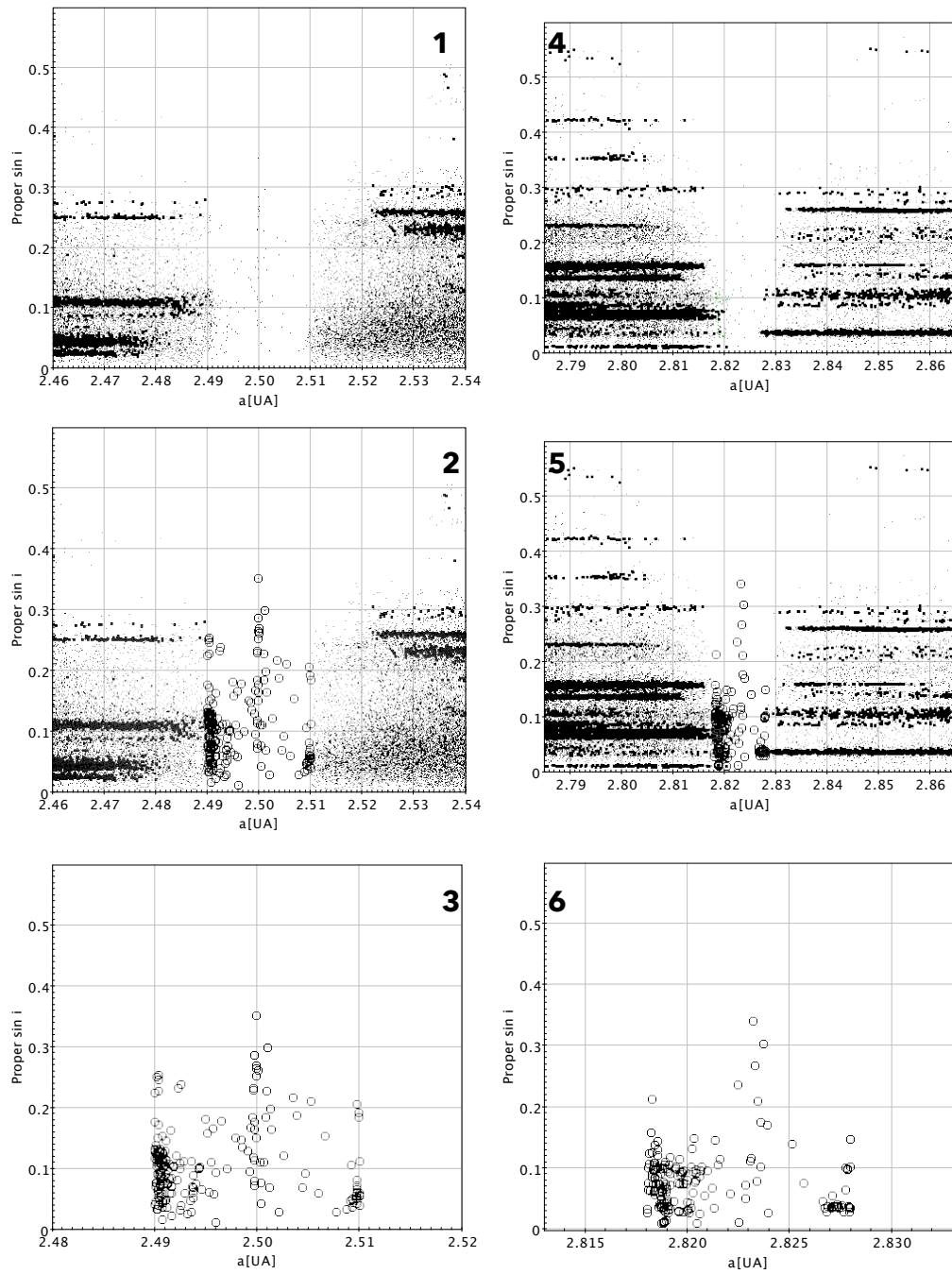
O selecție a asteroizilor situați în interiorul rezonanței, marcați cu cercuri, între 2,49 și 2,51 UA, a avut ca rezultat 205 obiecte. La marginea dinspre Soare a acestei rezonanțe, în intervalul de maxim 0,005 UA, se întâlnesc 27 de asteroizi care fac parte din famiili (Tabel 4.1).

Rezonanța aflată la 2,82 UA a centurii principale de asteroizi este mai îngustă și conține mai puține obiecte. O selecție a obiectelor situate între 2,818-2,820 UA a avut ca rezultat 186 de asteroizi. În cazul acestei rezonanțe, există asteroizi care fac parte din famiili în interior, în total 22 de obiecte (Tabel 4.2).

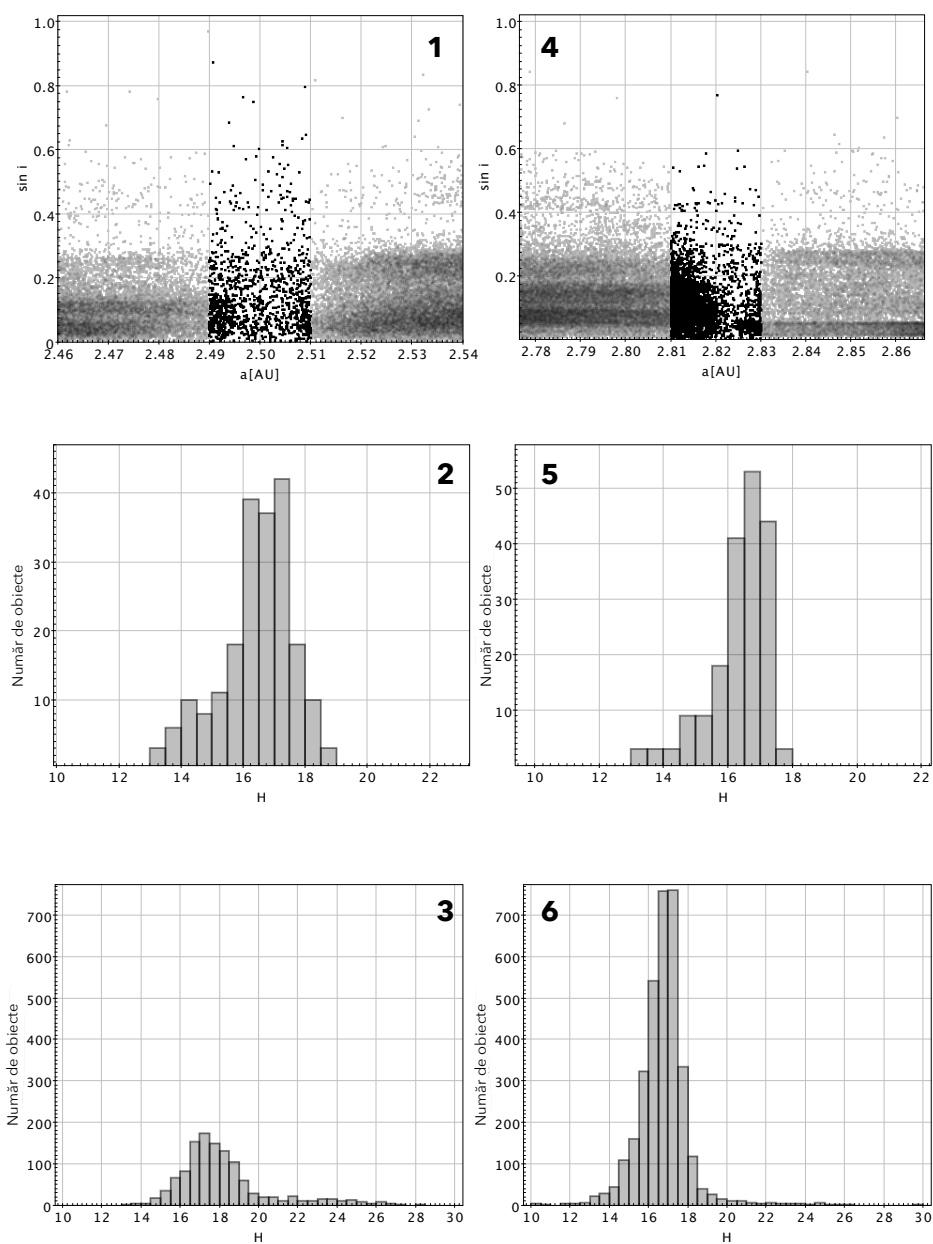
O extindere a domeniului de căutare ar genera mai mulți asteroizi de observat din cauza apropierii de această rezonanță a famiiliilor de asteroizi.

<sup>2</sup><https://newton.spacedys.com/astdys/index.php?pc=0>

<sup>3</sup><https://newton.spacedys.com/astdys/index.php?pc=5>



**Figura 4.5:** *Reprezentarea grafică în spațiul (proper  $a$ ,  $\sin i$ ) a asteroizilor din rezonanțele de mișcare medie situate la 2,5 (Fig. 1, 2 și 3) și 2,82 UA (Fig. 4, 5 și 6). În figurile 3 și 6 sunt reprezentați doar asteroizii aflați în rezonanță. Obiectele reprezentate cu cerc negru sunt asteroizii care fac parte din familii.*



**Figura 4.6:** *Reprezentarea grafică în spațiul  $(a, \sin i)$  a asteroizilor din rezonanțele de mișcare medie situate la 2,5 (figura 1) și 2,82 UA (figura 4). În figurile 3 și 4 (2,5 UA - figura 3 și 2,82 UA - figura 4) sunt date histograme ale asteroizilor aflați în rezonanțe, determinați cu ajutorul elementelor orbitale proprii. În figurile 5 și 6 sunt date histograme ale asteroizilor aflați în rezonanțe (2,5 UA - figura 5 și 2,82 UA - figura 6), determinați cu ajutorul elementelor orbitale proprii publicate de Nesvornny.*

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

**Tabelul 4.2:** *Asteroizi din familii care se află la maxim 0,005 UA depărtare de rezonanța de la 2,82 UA.*

Folosind elementele orbitale proprii, am identificat 49 de asteroizi care fac parte din familii, aflați în rezonanțe sau în preajma acestora. În plus, am identificat 391 de asteroizi care se află în rezonanță, fără o apartenență la familii.

Acest eșantion conține toți asteroizii aflați în rezonanță, iar observarea lor permite determinarea stării rotaționale a acestei populații. Totodată, studierea întregului eșantion de asteroizi permite modelarea în trecut a stării rotaționale a obiectelor care provin din rezonanță.

## 4.4 Identificarea obiectelor folosind elemente orbitale osculatoare

Folosind elementele osculatoare ale bazei de date ASTORB, am generat, în planul  $a$  și  $i$ , distribuția asteroizilor din sistemul solar, în principal în gama 2-4 UA. În total, au fost reprezentați 712.313 asteroizi.

În intervalul 2,49-2,51 UA, am identificat 1171 de asteroizi, inclusiv 25 de obiecte cu înclinări ale orbitelor mai mari de  $30^\circ$ . În intervalul 2,81-2,83, în rezonanța centrată pe 2,82 UA, am identificat 3355 de asteroizi. Folosind datele din ASTORB, am identificat 4526 de asteroizi pe un interval de 0,02 UA centrat pe mijlocul rezonanțelor .

Numărul mare de asteroizi identificați în rezonanțe și în familii aflate în preajma rezonanțelor necesită o selecție a obiectelor de observat. Selecția va fi făcută în



Set	H > 14,5	2,5 UA	2,82 UA
ASTORB	132	10	122
PROPER	31	20	11
Familii	4	3	1

**Tabelul 4.3:** Tabel cu numărul de asteroizi selectați pentru observații și proveniența lor.

funcție de magnitudinea absolută a obiectelor. Magnitudinea absolută limită aleasă este 14,5. Asteroizii au fost împărțiți în trei seturi, care în total conțin 4966 de asteroizi:

- setul cu elemente orbitale osculatoare;
- setul cu elemente orbitale proprii;
- setul de familii aflate în preajma rezonanțelor.

Selecția pe baza magnitudinii absolute a generat 167 de obiecte, dintre care 11 se regăsesc în două seturi, iar unul în trei seturi. Obiectele comune în două seturi: 7256, 7980, 9984, 13021, 14440, 23122, 24223, 27293, 28293, 38390, 55288. Obiectul comun în toate cele trei seturi: 9631.

O comparație între setul de date de obiecte care au curbele de lumină determinate și cel al obiectelor de observat, cu magnitudinea absolută mai mare de 14,5, a generat 19 obiecte comune, ale căror parametri se întâlnesc în tabelul 4.5.

## 4.5 Strategia de observații

Asteroizii din centura principală se pot vedea cel mai bine atunci când sunt la opoziție cu Soarele, adică la  $180^\circ$  de acesta, văzuți de pe Pământ. În acea perioadă asteroizii se află la cea mai mică depărtare de noi și au strălucire maximă, ceea ce înseamnă că se pot observa mai ușor. Perioada optimă de observații durează câteva săptămâni sau și mai mult dacă asteroidul este mare. Am planificat observațiile în funcție de momentele opozițiilor, astfel încât să îi pot observa pe fiecare un minim de cinci nopți. După terminarea a câteva nopți de observații datele pentru asteroid

Asteroid	Familia	D [km]	H	Albedo	Per. [ore]	Amplitudinea	U
541	MB-O	57,01	10,1	0,0496	29,368	0,07	3
673	MB-O	37,53	10,2	0,1044	22,34	0,12	3
716	MB-O	21,28	10,84	0,1801	15,55	0,25	2+
858	MB-O	23,15	10,3	0,25	22,31	0,06	2
1428	MB-O	56,83	10,3	0,0415	16,67	0,15	2+
2953	MB-O	13,58	11,7	0,2	6,2945	0,09	3
5450	MB-O	19,3	12,3	0,057	5,9822	0,2	2+
7302	MB-O	17,5	12,51	0,057	3,275	0,19	2
7980	MB-O	10,61	13,6	0,057	10,48	0,38	2
10919	MB-O	7,95	14,23	0,057	11,002	0,41	2
12558	MB-O	9,84	13,76	0,057	9,409	0,26	2
13061	MB-O	13,98	13	0,057	11,812	0,19	2
13580	MB-O	7,47	14,36	0,057	12,31	0,17	2
13866	MB-I	4,99	13,88	0,2	5,355	0,17	2
15096	MB-O	13,98	13	0,057	3,41	0,21	3
22425	MB-O	5,92	14,87	0,057	8,386	0,4	2
28529	MB-O	6,88	14,54	0,057	30,749	0,68	2
28658	MB-O	9,24	13,9	0,057	8,332	0,62	2
48154	MB-O	9,67	13,8	0,057	5,56	0,79	-3

**Tabelul 4.5:** Date fotometrice ale asteroizilor aflați în rezonanțe. Sursa: Asteroid Lightcurve Database. Familia: MB-O – main belt outer; MB-I - main belt inner; H – magnitudinea absolută; Amplitudinea – variația minimă de strălucire, în magnitudini; U – calitatea curbei de lumina (3 – foarte buna, 2 – poate fi greșită cu 30%).

An	Asteroizi la opoziție	Asteroizi cu $m \geq 17,3$
2018	26	17
2019	51	25
2020	48	19

**Tabelul 4.6:** Tabel cu numărul de asteroizi aflați la opoziție și observabili pe parcursul doctoratului.

erau reduse și am încercat să determin rapid perioada de rotație. Dacă aceasta era evidentă încheiam sesiunile de observații pentru obiectul respectiv și continuam cu altul.

Pentru o planificare a observațiilor, am calculat momentele opozițiilor pentru obiectele selectate, precum și magnitudinea aparentă a asteroizilor.

Pentru cele 167 de obiecte, am identificat 265 de opoziții în perioada iunie 2018 – decembrie 2020, însă, înainte de realizarea planului de observații este nevoie de o selecție în funcție de magnitudinea limită a telescopului folosit la observații. Am ales ca magnitudine limită aparentă, valoarea de 17,3. Au rămas 125 de opoziții în intervalul menționat mai sus (tabel 4.6).

Un asteroid are strălucire maximă în preajma opoziției, acesta fiind momentul propice de observații. Uneori însă, strălucirea acestuia este îndeajuns de mare ca să fie observat mai multe luni de zile, ceea ce este util în cazul obiectelor cu perioadă lungă. Mai jos am realizat planul de observații pentru asteroizii aflați la opoziție în intervalul iunie 2018 – iunie 2020, care au strălucire mai mare de magnitudinea 17,3. Cu roșu sunt marcați asteroizii care fac parte din familii.

Selecția obiectelor a dus la identificarea a 167 de asteroizi care au putut fi observați pe o perioadă de doi ani, unele obiecte putând a fi observate la două opoziții. O parte dintre asteroizi pot fi observați cu instrumente astronomice mici, în vederea determinării caracteristicilor fotometrice. Dintre cele 4.966 de obiecte identificate, doar 19 aveau rezultate în literatură, iar dintre acestea doar 9 au perioade de rotație identificate cu o precizie mare ( $U > 2+$ ).

În funcție de perioadele de vizibilitate optimă ale asteroizilor am făcut un plan de observații. Pentru fiecare obiect am alocat o lună de observații, centrată pe

Asteroid	Opozitie	Magnitudine	Declinatie	An	Luna
1428	26.11.2018	13,9	-3	2018	11
541	18.10.2018	14,1	18	2018	10
2244	21.10.2018	14,7	-4	2018	10
13866	03.11.2018	16,2	10	2018	11
8909	01.10.2018	16,3	-8	2018	10
18686	18.07.2018	16,4	-21	2018	7
13830	17.12.2018	16,6	23	2018	12
18467	08.07.2018	16,6	-18	2018	7
6206	11.09.2018	16,7	-3	2018	9
7056	14.12.2018	16,7	24	2018	12
18289	15.08.2018	16,7	-36	2018	8
5565	19.06.2018	16,8	-12	2018	6
6814	27.10.2018	16,8	12	2018	10
27293	10.12.2018	16,8	35	2018	12
43018	15.12.2018	16,8	25	2018	12
6190	27.12.2018	16,9	25	2018	12
60002	19.11.2018	16,9	17	2018	1
38337	13.09.2018	17,1	2	2018	9
45444	31.08.2018	17,1	8	2018	8
8279	24.06.2018	17,2	-26	2018	6
17521	20.06.2018	17,2	-25	2018	6
20685	13.11.2018	17,2	27	2018	11
66519	27.08.2018	17,2	3	2018	8
71372	11.07.2018	17,2	-19	2018	7
18925	10.07.2018	17,3	-17	2018	7
22322	07.08.2018	17,3	-17	2018	8

**Tabelul 4.8:** Asteroizi la opoziție în 2018, sortați în funcție de magnitudine. Pentru a putea estima rapid cât de facilă va fi observarea asteroidului prezint declinația acestuia rotunjită la grad. Obiectele cu declinație pozitivă cât mai mare se pot observa în condițiile cele mai bune.

Asteroid	Opoziție	Magnitudine	Declinație	An	Luna
673	02.02.2019	13,9	12	2019	2
858	25.03.2019	14	12	2019	3
716	30.06.2019	14,6	-13	2019	6
5565	14.10.2019	15	-8	2019	10
2953	18.01.2019	15,5	19	2019	1
34060	27.09.2019	15,7	13	2019	9
5450	23.03.2019	15,8	4	2019	3
2868	27.09.2019	16	-8	2019	9
2386	03.02.2019	16,3	28	2019	2
9984	14.02.2019	16,3	9	2019	2
10535	31.07.2019	16,3	9	2019	7
3938	19.05.2019	16,4	-16	2019	5
6206	24.12.2019	16,4	22	2019	12
8283	09.08.2019	16,6	-31	2019	8
15096	14.01.2019	16,6	15	2019	1
23354	29.10.2019	16,6	7	2019	10
37645	12.09.2019	16,6	-11	2019	9
31188	09.08.2019	16,7	-23	2019	8
33705	29.08.2019	16,7	-2	2019	8
35572	21.11.2019	16,7	15	2019	11
4496	31.05.2019	16,9	-14	2019	5
17029	27.07.2019	16,9	-17	2019	7
22322	20.12.2019	16,9	28	2019	12
28293	06.04.2019	16,9	-4	2019	3
36575	10.11.2019	16,9	29	2019	11
7302	26.08.2019	17	-9	2019	8
13061	12.02.2019	17	21	2019	2
105209	24.20.2019	17	17	2019	20
28529	16.03.2019	17,1	0	2019	3
96736	22.08.2019	17,1	5	2019	8
9113	06.12.2019	17,2	17	2019	12

**Tabelul 4.9:** Asteroizi la opoziție în 2019, sortați în funcție de magnitudine.

Asteroid	Opoziție	Magnitudine	Declinație	An	Luna
9312	15.08.2019	17,2	-4	2019	8
9631	08.02.2019	17,2	13	2019	2
13021	26.01.2019	17,2	16	2019	1
16344	01.08.2019	17,2	-4	2019	8
17202	20.02.2019	17,2	20	2019	2
18467	28.11.2019	17,2	20	2019	11
25555	01.01.2019	17,2	32	2019	1
27448	31.03.2019	17,2	-2	2019	3
71328	08.02.2019	17,2	20	2019	2
192950	04.04.2019	17,2	-20	2019	4
12558	07.02.2019	17,3	11	2019	2
17521	13.10.2019	17,3	9	2019	10
18686	01.11.2019	17,3	20	2019	11
18925	22.10.2019	17,3	27	2019	10
23122	10.12.2019	17,3	27	2019	12
23887	18.01.2019	17,3	23	2019	1
37370	07.08.2019	17,3	-14	2019	8
55051	24.06.2019	17,3	-26	2019	6
75777	23.02.2019	17,3	11	2019	2
79143	19.11.2018	17,3	19	2019	11

**Tabelul 4.10:** Asteroizi la opoziție în 2019, sortați în funcție de magnitudine - continuare. Pentru a putea estima rapid cât de facilă va fi observarea asteroidului prezint declinația acestuia rotunjită la grad. Obiectele cu declinație pozitivă cât mai mare se pot observa în condițiile cele mai bune.

Asteroid	Opoziție	Magnitudine	Declinație	An	Luna
673	11.05.2020	13,8	-18	2020	5
541	14.01.2020	14,1	17	2020	1
1428	25.02.2020	14,9	25	2020	2
2953	22.04.2020	15,3	-13	2020	4
2386	10.04.2020	15,6	-12	2020	4
2244	25.02.2020	15,8	18	2020	2
7056	17.03.2020	16,5	10	2020	3
17202	20.06.2020	16,5	-16	2020	6
20685	05.03.2020	16,5	-12	2020	3
27293	17.04.2020	16,5	-19	2020	4
48154	15.05.2020	16,5	-5	2020	5
5450	17.06.2020	16,7	-17	2020	6
15096	16.04.2020	17	5	2020	4
79143	03.04.2020	17,1	-10	2020	4
8909	10.01.2020	17,2	27	2020	1
13021	14.04.2020	17,2	9	2020	4
13866	25.02.2020	17,2	18	2020	2
45363	22.04.2020	17,2	-24	2020	4
38337	18.01.2020	17,3	35	2020	1

**Tabelul 4.11:** Asteroizi la opoziție în 2020, sortați în funcție de magnitudine. Pentru a putea estima rapid cât de facilă va fi observarea asteroidului prezint declinația acestuia rotunjită la grad. Obiectele cu declinație pozitivă cât mai mare se pot observa în condițiile cele mai bune.

Plan de observații - 2018							
Asteroid la opoziție	Iunie	Iulie	August	Septembrie	Octombrie	Noiembrie	Decembrie
5565	■						
8279	■						
17521	■						
18686		■					
18467		■					
71372		■					
18925		■					
18289			■				
45444			■				
66519			■				
22322			■				
6206				■			
38337				■			
541					■		
2244					■		
8909					■		
6814					■		
1428						■	
13866						■	
6002						■	
79143						■	
20685						■	
13830							■
7056							■
27293							■
43018							■

Figura 4.7: Planul de observații pentru anul 2018.

momentul când strălucirea era la maxim (figurile 4.7, 4.8 și 4.9).



Plan de observații - 2019												
Asteroid la opoziție	Ianuarie	Februarie	Martie	Aprilie	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie	Octombrie	Noiembrie	Decembrie
2953	■											
15096	■											
13021	■											
25555	■											
673		■										
2386		■										
9984		■										
13061		■										
9631		■										
17202		■										
71328		■										
12558		■										
858			■									
5450			■									
28293			■									
28529			■									
27448			■									
192950				■								
3938				■								
4496					■							
716						■						
10535							■					
17029								■				
8283									■			
31188										■		
33705											■	
7302												■
96736												■
9312												■
16344												■
34060												■
2868												■
37645												■
5565												■
23354												■
17521												■
18925												■
35572												■
36575												■
18467												■
18686												■
6206												■
22322												■
9113												■
105209												■

Figura 4.8: Planul de observații pentru anul 2019.

<b>Plan de observații - 2020</b>						
<b>Asteroid la opoziție</b>	<b>Ianuarie</b>	<b>Februarie</b>	<b>Martie</b>	<b>Aprilie</b>	<b>Mai</b>	<b>Iunie</b>
<b>541</b>						
<b>8909</b>						
<b>38337</b>						
<b>1428</b>						
<b>2244</b>						
<b>13866</b>						
<b>7056</b>						
<b>20685</b>						
<b>2953</b>						
<b>2386</b>						
<b>27293</b>						
<b>15096</b>						
<b>79143</b>						
<b>13021</b>						
<b>45363</b>						
<b>673</b>						
<b>48154</b>						
<b>17202</b>						
<b>5450</b>						

Figura 4.9: Planul de observații pentru anul 2020.



## 5. Tehnici de observații

Astronomia pare a fi o știință în care de cele mai multe ori astronomul este imaginat privind prin telescop. Acest mod de efectuare a observațiilor astronomice este desuet, fiind înlocuit în timp de fotografia astronomică (pe plăci fotografice și pe film) și de achiziția de imagini digitale. În prezent achiziția de date astronomice constă în identificarea obiectului și țintirea acestuia cu un telescop care este dotat cu un senzor sensibil. Telescopul trebuie să urmărească obiectul, mișcându-se cu viteză siderală (generată de rotația diurnă a bolții cerești) și diferențială (generată de viteza de deplasare a asteroidului printre stele), în funcție de viteza obiectului observat, iar senzorul poate fi lăsat să capteze lumina astrului atât timp cât este nevoie pentru ca semnalul să permită măsurarea fluxului luminos și diferențierea acestuia de zgomotul cerului. Semnalul este procesat și măsurat cu diferite programe. Inițial este nevoie reducerea datelor, fiecare imagine trecând printr-un procedeu prin care se scade zgomotul dat de senzor și de imperfecțiunile sistemului optic. Astfel din imagini *brute* se obțin imagini *reduse*, care se pot folosi la măsurarea strălucirii asteroidului.

Perioadele de rotație ale asteroizilor se determină prin studiul variației strălucirii acestora. Măsurarea strălucirii acestora, fotometria, pe o perioadă lungă de timp are ca rezultat identificarea variațiilor produse de rotația lor, variații care prezintă maxime și minime periodice. Aceste periodicități sunt studiate prin analiza Fourier, care indică cele mai probabile perioade. Așa cum am văzut, esențială în determinarea perioadelor de rotație este măsurarea strălucirii asteroizilor.

## 5.1 Telescoape și detectori folosiți

Observarea asteroizilor presupune mai multe instrumente, care formează un sistem de observații: telescopul, montura și senzorul. Fiecare instrument are un rol esențial, începând de la colectarea fotonilor, până la stocarea imaginii. De obicei tot sistemul este găzduit în incinta denumită *observator astronomic*.

Spre deosebire de observarea cu ochiul liber, observațiile astronomice prin telescop permit colectarea unei cantități mai mari de lumină, distingerea detaliilor mai fine, dar și studierea corpurilor cerești în lungimi de undă inaccesibile ochiului uman. Detectorii permit stocarea permanentă a informațiilor. În privința colectării luminii, telescoapele cu un diametru mai mare sunt de dorit pentru că permit observarea obiectelor mai puțin luminoase sau efectuarea de observații precise asupra celor strălucitoare. Telescoapele mai mari permit și observarea în detaliu, având o putere de rezoluție mare, însă acest lucru este limitat de turbulența atmosferică.

Un telescop este un instrument optic care formează o imagine în planul focal. Cel mai simplu telescop este compus dintr-o lentilă (telescop refractor) sau o oglindă (telescop reflector), care formează o imagine virtuală într-unul din focare [126]. Dacă în planul focal se montează un detector pentru înregistrarea imaginii, putem spune că am construit un telescop. Telescoapele se împart în mai multe categorii care, pe scurt, sunt: refractoare, reflectoare și catadioptrice. Refractoarele, cunoscute și sub numele de lunete, folosesc lentile pentru colectarea fotonilor, iar reflectoarele folosesc oglinzi în același scop. Telescoapele catadioptrice folosesc un sistem combinat: o oglindă și un sistem de lentile (denumit *placă corectoare*). Voi descrie mai pe larg tipurile de telescoape folosite în observațiile utilizate în teză. Oglinzile telescoapelor pot avea forme sferice, parabolice sau hiperbolice și se folosesc în combinație cu oglinzi secundare care au suprafețe plane sau hiperbolice. Oglinda principală colectează fotonii, care sunt reflectați în focar cu ajutorul oglinzilor secundare [126].

Sistemele optice sunt caracterizate prin diametrul oglinzii principale ( $d$ ) și distanța focală ( $f$ ). Distanța focală este distanța de la centrul oglinzii până la planul focal (locul în care se formează imaginea). Distanța focală determină mărimea imaginii în planul focal, iar diametrul determină luminozitatea imaginii. Un alt

parametru folosit este raportul  $f/d$ , denumit și luminozitate [9]. Sistemele cu un raport  $f/d$  mic redau imagini mai luminoase în focar decât cele cu  $f/d$  mare. Două surse de lumină separate pe bolta cerească de unghiul  $\Theta$  (măsurat în radiani), vor avea o mărime liniară  $s$  în planul focal, conform relației de mai jos:

$$s = f \times \Theta \quad (5.1)$$

Pentru că mărimile unghiulare ale obiectelor cerești sunt foarte mici, se folosește aproximarea unghiurilor mici, iar mărimea liniară în planul focal, măsurată în "/mm, se poate calcula după relația:

$$s = \frac{206.265}{f} \quad (5.2)$$

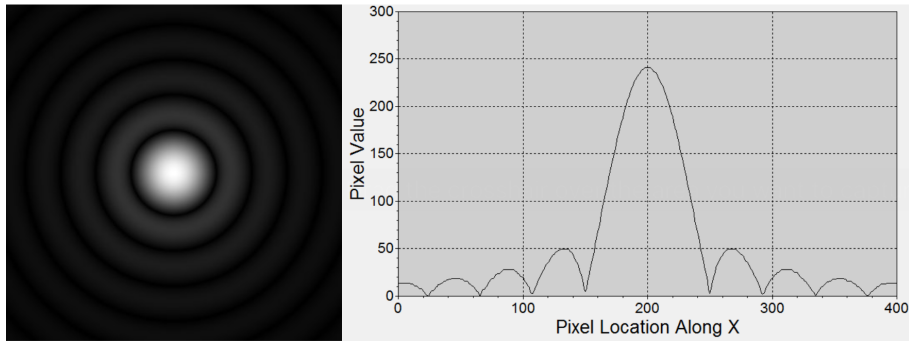
În cazul telescoapelor de tip Cassegrain sau Ritchey-Chretien, care folosesc oglinzi secundare hiperbolice, distanța focală a sistemului este mai mare decât distanța focală a oglinzii principale, lumina fiind condusă pe o cale mai lungă prin telescop. În aceste cazuri ne referim la distanță focală efectivă.

Majoritatea corpurilor cerești sunt punctiforme din cauza depărtărilor mari la care se află, însă imaginea lor nu este punctiformă. Din cauza caracterului ondulatoriu al fotonilor, telescopul nu focalizează lumina într-un punct ci într-o formă compusă dintr-un disc și de inele concentrice luminoase (Fig. 5.2) și întunecate. Discul se numește *discul lui Airy*, conține cea mai mare cantitate de lumină colectată de telescop a steii, și are un diametru unghiular cu atât mai mic cu cât diametrul telescopului este mai mare [9].

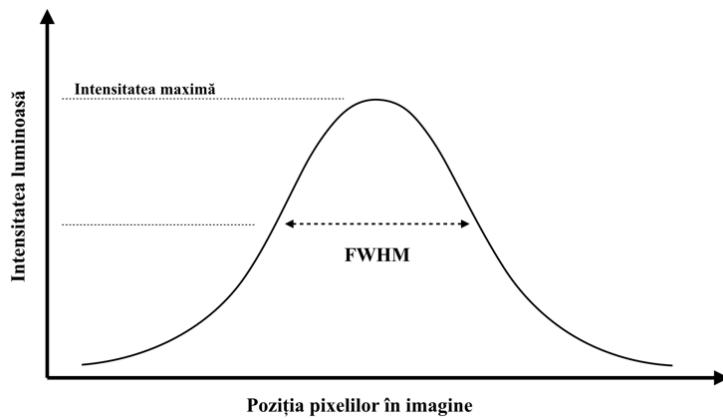
Mărimea liniară a discului depinde de distanța focală și de diametru. Mărimea unghiulară a discului lui Airy, pentru o anumită lungime de undă ( $\lambda$ ) și un diametru ( $D$ ) este dată de relația:

$$\Theta = \frac{1,22\lambda}{D} \quad (5.3)$$

Relația de mai sus, cunoscută ca *limita Dawes* sau *limita de difracție*, reprezintă de fapt limita teoretică de separație a unui obiectiv de telescop, în lipsa turbulenței



**Figura 5.1:** Simulare a imaginii unei stele văzută prin telescop. Discul lui Airy se află în centru. Graficul reprezintă măsurări distribuției luminii de-a lungul liniei orizontale.



**Figura 5.2:** Distribuția pe senzor a intensității luminoase a unei stele.

atmosferice. Un obiect cu un diametru mai mic decât limita Dawes nu poate fi observat ca disc, iar două obiecte situate la o depărtare unghiulară mai mare decât această limită vor fi văzute ca o singură sursă luminoasă [9].

Turbulența atmosferică este un fenomen care, prin degradarea imaginii, duce la scăderea rezoluției. Razele luminoase trec prin mase de aer cu temperaturi diferite (adică indici de refracție diferiți, iar refracția duce la mărirea discului lui Airy. În astronomie se folosește termenul de *seeing*, care se măsoară în imagini prin valoarea în secunde de arc a diametrului gaussianei care fitează cel mai bine discul lui Airy, luată la mijlocul distanței față de maxim (Fig. 5.2). Termenul este utilizat cu denumirea de *FWHM* (Full Width Half-Maximum) .

Pentru că observațiile astronomice de pe Pământ se fac în prezența atmosferei, imaginile sunt modificate continuu de către masele de aer rece și cald în mișcare verticală și orizontală. Această mișcare duce scăderea clarității detaliilor, efect denumit

*turbulență atmosferică.*

Mărimea turbulenței atmosferice este în cele mai bune de locuri de 0,5 secunde de arc, iar în locurile de observație obișnuite de 3-4 secunde de arc. Dacă puterea de rezolvare a unui telescop este de 0,5" care se află într-o zonă cu seeing mediu de 1", acesta nu va putea fi folosit la capacitate maximă.

Telescopul este folosit la captarea imaginii iar o cameră CCD la înregistrarea ei. Voi descrie în continuare caracteristicile generale ale unei camere CCD dar și pe cele ale camerelor folosite.

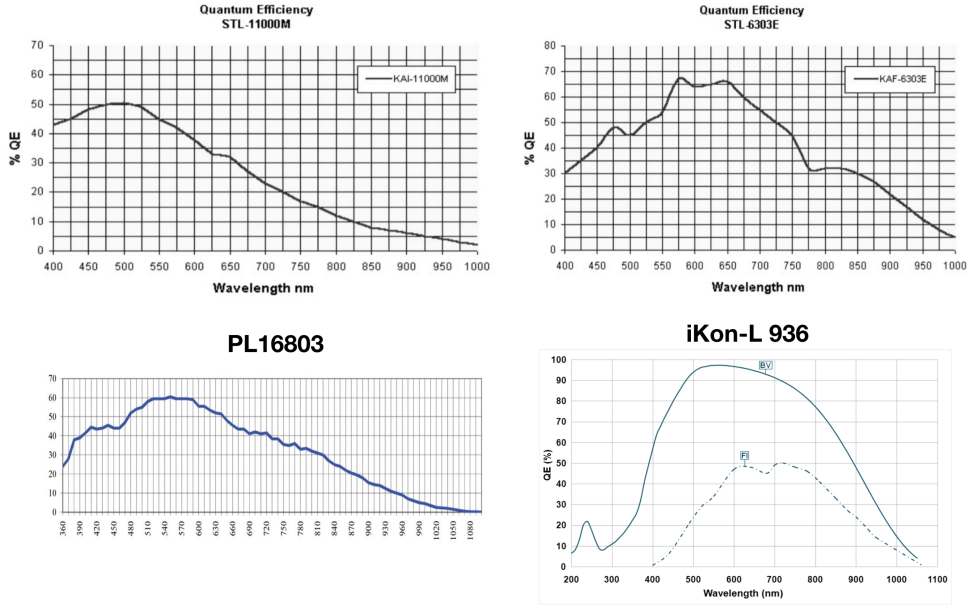
Detectorii moderni folosiți în astronomie sunt de tip digital, adică detectează fotoni și redau o valoare care depinde direct de numărul fotonilor incidenti. Detectorii sunt de tip CCD (charge coupled device), au un răspuns liniar și contabilizează o mare parte din fotonii detectați. CCD-ul înregistrează o imagine bidimensională, care conține informații despre strălucirea și poziția în imagine a sursei luminoase.

Un CCD este un senzor fotosensibil din siliciu care este divizat electric în mici porțiuni independente egale, numite *pixeli*. CCD-ul măsoară cantitate de fotoni incidenti pe fiecare pixel și redă o imagine digitală, o matrice de numere. Fiecare pixel are o valoare (un număr) direct proporțional cu lumina incidentă. Imaginea este citită, stocată și manipulată pe computer.

Alegerea unui CCD pentru observarea astrilor se face pe baza caracteristicilor, cele mai importante fiind:

- eficiența cuantică a unui CCD se referă la fracțiunea de fotoni incidenti care sunt efectiv detectați de senzor; aceasta depinde de tipul de senzor – există CCD-uri cu iluminare frontală, în care lumina trece prin sistemul electronic al senzorului până ajunge la partea de siliciu, dar și CCD-uri cu iluminare inversă, în care lumina atinge în mod direct materialul fotosensibil; senzorii se comportă diferit la lungimi de undă diferite, răspunsul și eficiența cuantică fiind diferite; senzorii cu iluminare frontală au o sensibilitate mică în domeniul albastru din cauza componentelor care absorb în acest domeniu spectral (Fig. 5.3);
- numărarea fotonilor (counts): nu toți fotonii conținuți de lumina unei stele din imagine provin de la aceasta; o parte vin din cauza funcționării circuitului





**Figura 5.3:** Eficiența cuantică a celor patru senzori folosiți de autor la observații. Stânga sus: cameră SBIG 11000M folosită la București, Berthelot și Le Makes; dreapta sus: camera CCD SBIG 6303 folosită la București; stânga jos: camera Pro Line 16803 folosită la București; dreapta jos: camera iKon-L 936 folosită la Pic du Midi.

electric (curent de *bias*) și alta de la curentul care apare în timpul expunerii, denumit *curent de dark*; pentru că doar o parte dintre fotonii incidenti generează electroni care sunt înregistrați pe imagine, se poate folosi o relație care să exprime eficiența transformării fotonilor în electroni

$$N_f = \frac{N_e}{Q_e} \quad (5.4)$$

unde  $N_f$  este numărul de fotoni,  $N_e$  este numărul de electroni iar  $Q_e$  este eficiența cuantică [9];

- timpul de integrare: CCD-ul permite expuneri lungi, în timpul cărora fotonii incidenti se însumează; rezultatul este o imagine foarte strălucitoare a unui obiect strălucitor sau o imagine puțin strălucitoare a unui obiect care la expuneri mai mici nu se poate observa; timpul de integrare se controlează fie printr-un obturator mecanic, fie printr-o comandă pe senzor;

- zgomotul de citire: după terminarea expunerii, imaginea trebuie citită pentru a se afla valoarea fiecărui pixel; această operațiune se face cu ajutorul unor amplificatoare care generează zgomot electric, adică electroni în imagine; media zgomotului pe pixel se numește zgomot de citire;
- zgomotul de bias: este zgomotul care apare pe imaginile cu expunere 0; acesta este dat de curentul intrinsec apărut la funcționarea CCD-ului; acest semnal se modifică cu temperatura și trebuie măsurat pentru o serie de imagini luate la temperaturi similare;
- zgomotul de dark: o expunere lungă fără ca oglinda să fie expusă luminii stelelor ne va arăta semnal în imagine; acesta este compus din zgomotul de citire, zgomotul de bias și un curent dat de excitarea termică a electronilor din CCD; acest tip de zgomot este foarte sensibil la temperatură, acesta fiind și motivul pentru care CCD-urile sunt răcite la temperaturi cât mai mici; chiar și în acest caz, curentul de dark apare, trebuie măsurat și scăzut din imagini; curentul de dark al senzorilor folosiți de autor sunt 0,3 și 0,5 electroni/pixel/secundă la 0° C;
- zgomotul de flat: este compus din neuniformitățile care apar în imagine din cauza faptului că pixelii nu generează semnale egale nici chiar când se află sub aceeași iluminare; alte variații în imagine apar din cauza neuniformității grosimii stratului de siliciu de-a lungul sensorului, dar și de iluminarea neuniformă din planul focal (vignetare) și impuritățile care se depun cu timpul pe senzor; pentru a se corecta toate aceste defecte, se obișnuiește să se achiziționeze imagini cu senzorul iluminat uniform, care se scad din imagini; imaginile se iau în crepuscul sau cu ajutorul unui sistem care introduce lumină în mod uniform în telescop;
- suprasaturarea pixelilor: obiectele strălucitoare, observate cu timp de expunere prea lung, vor fi suprasaturate de lumină, informații colectată fiind inutilizabilă; este necesară stabilirea în urma observațiilor a timpilor de expunere maximi;
- full whell capacity: numărul maximi de electroni pe care un pixel îi poate

primi până se suprasaturează; senzorii CCD-urilor folosite de autor suportă 50.000 și 100.000 de electroni pe pixel până la suprasaturare;

După toate considerentele de mai sus, este evident că procesul de achiziție de imagini astronomice nu este foarte simplu. Din cauza diferitelor tipuri de zgomot care trebuie înregistrate, este nevoie de o planificare a modului de achiziție. În crepuscul, înainte de începerea nopții de observații sau după încheierea acestuia, se iau imaginile *flat*, având grijă ca senzorul să nu fie suprasaturat. Pentru imaginile flat se iau imagini de tip dark și bias, care sunt scăzute, rezultatul final fiind o medie a imaginilor flat obținute, imagine denumită *masterflat*. Achiziția imaginilor astronomice este însoțită de achiziția de imagini dark și bias, la aceeași temperatură a senzorului. Imaginile dark se mediază (*masterdark*), iar la final, din imaginea astronomică se scad imaginile *masterdark* și *masterbias*. Imaginea obținută se împarte la *masterflat* [9].

$$Imagine\ redusă = \frac{imagine\ astronomică - masterdark - masterbias}{masterflat} \quad (5.5)$$

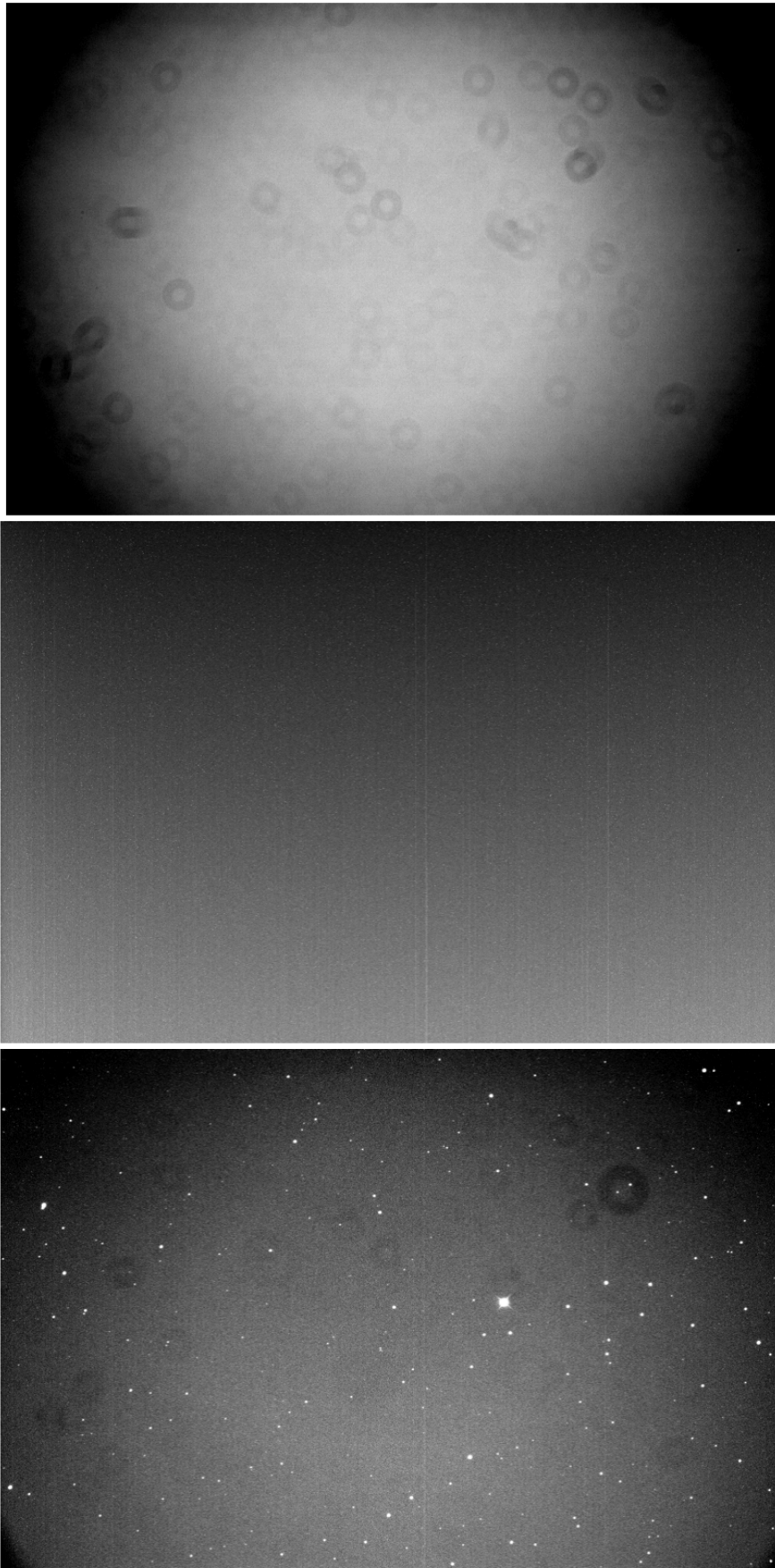
Imaginile din care s-a scăzut zgomotul se numesc *imagini reduse*. Acestea sunt cele folosite pentru măsurarea pozițiilor sau strălucirilor corpurilor cerești (Fig. 5.4).

În funcție de caracteristicile telescopului și ale detectorului, sistemul va prezenta caracteristici optice diferite. Cele mai importante caracteristici ale telescopului sunt diametrul oglinzii ( $d$ ) și distanța focală ( $f$ ). Cele mai importante caracteristici ale detectorului (senzorului) sunt numărul de pixeli și mărimea pixelului (exprimată de obicei în micrometri).

Rezoluția imaginii se referă la câte secunde de arc de cer acoperă un pixel. Rezoluția imaginii depinde de mărimea pixelilor și distanța focală a telescopului.

$$Rezoluția\ imaginii = \frac{206.265}{1000} \times \frac{m_{px}}{f} \quad (5.6)$$

unde  $m_{px}$  este mărimea pixelului, care se exprimă în  $\mu\text{m}$ ,  $f$  este distanța focală în mm, iar rezoluția în "/pixel [9].



**Figura 5.4:** *Imagine de tip flat (sus), dark (mijloc) și o expunere către cer (jos).*

Rezoluția nu trebuie să fie mai mică decât valoarea seeing-ului. Imaginile care au rezoluție prea mică se numesc *sub-eșantionate*. În acest caz, dacă este nevoie să se măsoare cu precizie poziția asteroizilor, fiecare pixel ar ocupa prea multe secunde de arc pentru a se putea obține măsurare precisă. Există și sisteme la care imaginea este *supra-eșantionate*, adică rezoluția pe pixel este prea mare. Astfel, lumina stelei sau asteroidului se revarsă pe prea mulți pixeli, iar măsurarea poziției devine dificilă.

O problemă care trebuie rezolvată mereu este cea a valorii timpului de expunere și a cadenței achiziției de imagini. Deseori un timp prea lung de expunere pe imagini supra-eșalonate, în condiții de turbulență mare, duce la împrăștierea imaginii asteroidului pe prea mulți pixeli. Asteroidul va fi o pată luminoasă de dimensiuni mari, greu de măsurat din punct de vedere fotometric. Cadența achiziției de imagini nu trebuie să fie prea mare, însă imaginile mari se descarcă mai greu decât cele mici.

O soluție pentru rezolvarea problemelor de mai sus este *binning*-ul, care presupune gruparea pixelilor și citirea lor ca unul singur. Astfel se reduce timpul de citire de pe senzor și se obține un semnal mai bun. Binning-ul se poate face pe 2, 3, 4 sau mai mulți pixeli. Câmpul vizual rămâne la aceeași valoare, dar mărimea imaginii se modifică.

Câmpul vizual se referă la aria de cer care poate fi captată în imagine. O arie de cer mai mare conține mai multe stele de referință, dar nu are cea mai mare rezoluție posibilă pentru sistemul dat. Câmpul vizual depinde de mărimea senzorului și de distanța focală a telescopului.

$$Campul\ vizual = 57,3 \times \frac{marimea\ senzorului}{f} \quad (5.7)$$

unde mărimea senzorului se exprimă în mm (mărimea laturilor senzorului), distanța focală în mm, iar câmpul vizual în minute de arc [9].

Un câmp vizual prea mic nu este util în fotometria asteroidală: asteroidul, care se mișcă printre stele, iese repede din câmp, iar stelele referință nu mai pot fi folosite. Un câmp vizual foarte mare este tipic telescoapelor cu distanța focală mică și imaginilor undersampled, deseori asteroidul fiind prea apropiat de stelele din câmp pentru a se putea măsura cu precizie strălucirea lui.

Pe parcursul doctoratului am utilizat la observații mai multe telescoape și

camere CCD. Le voi enumera în continuare, voi descrie capacitățile telescoapelor (Fig. 5.5) și caracteristicile camerelor (Tabel 5.1).

### **5.1.1 Institutul Astronomic al Academiei Române**

De la Institutul Astronomic al Academiei Române din București, care are codul IAU MPC 073 am folosit trei telescoape, după cum urmează: telescop Cassegrain de 0,5 m în diametru,  $f/15$ , telescop Ritchey-Chretien de 0,38 m în diametru,  $f/8$  și telescop RiDK500 Ritchey-Chretien de 0,5 m în diametru,  $f/8$ . Detectorii folosiți la achiziția de imagini sunt următorii: SBIG STL-11000M CCD, 4008 x 2672 pixeli, 9 x 9 micrometri; SBIG STXL-6303E, 3072 x 2048 pixeli, 9 x 9 micrometri; FLI ProLine 1803, 4096 x 4096 pixeli, 9 x 9 micrometri.

Telescopul Cassegrain se operează manual, fiind îndreptat spre obiect prin folosirea coordonatelor orare: unghiul orar și declinația. Din cauza vechimii monturii, asteroizii nu au putut fi observați cu timp de expunere foarte lung, maxim 60 de secunde. Câmpul vizual mic a pus o problemă în găsirea stelelor de referință.

Celelalte telescoape pot fi folosite automat, fiind capabile să se îndrepte înspre obiecte. Monturile moderne au permis timp de expunere mai lung, precum și urmărirea asteroizilor cu o viteză diferențială.

### **5.1.2 Observatorul de la Berthelot**

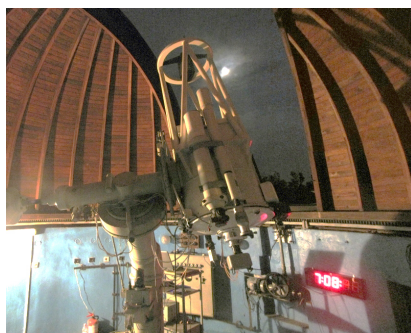
Observatorul de la Berthelot este operat de către Institutul Astronomic al Academiei Române și are codul IAU MPC L54. Am folosit la observații un telescop Ritchey-Chretien de 0,38 m în diametru,  $f/8$ , cu o cameră SBIG STL-11000M CCD, 4008 x 2672 pixeli, 9 x 9 micrometri.

Acest observator a fost construit și inaugurat în 2018, de către personalul Institutului Astronomic, unul din membrii echipei fiind și eu. Am contribuit la instalarea monturii, punerea acesteia în pol, echilibrarea sistemului observațional, alinierea telescopului, a monturii, și la testarea telescopului și a camerei CCD. Din noiembrie 2018 dețin responsabilitatea acestei platforme de observații astronomice în cadrul Institutului Astronomic al Academiei Române și observ de la distanță diferite corpuri cerești cu acel telescop.

Institutul Astronomic al Academiei Române - Observatorul de la București



0,38 m, f/8

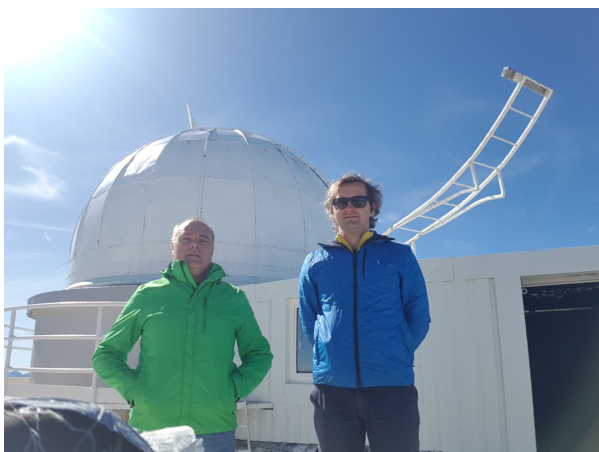


0,5 m, f/15

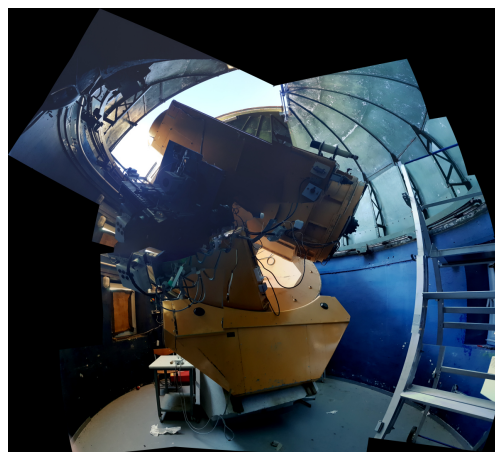


0,5 m, f/7

Pic du Midi - Observatorul din Paris



1 m, f/17



Observatorul de la Berthelot



0,38 m, f/8

Observatorul Le Makes



0,6 m, f/8

**Figura 5.5:** *Telescoapele folosite pentru observarea asteroizilor.*

Telescop	CCD	Câmp vizual [arcmin]	Pixel scale [arcsec]	Observator
Cass 0,5 m	SBIG STXL-6303E	14x11	0,25	București
RC 0,38 m	SBIG STL-11000M	44x29	0,5	București
RC 0,5 m	FLI ProLine 1803	47x47	0,66	București
RC 0,38 m	SBIG STL-11000M	44x29	0,5	Berthelot
1 m	iKon-L 936	10x10	0,16	Pic du Midi
0,6 m	SBIG STL-11000M	25x17	0,4	Le Makes

**Tabelul 5.1:** *Caracteristici ale telescoapelor și ale senzorilor utilizați la observații.*

### 5.1.3 Pic du Midi

Pe parcursul doctoratului am participat la două misiuni de observare împreună cu coordonatorul tezei de doctorat, dr. Mirela Bîrlan la Observatorul de la Pic du Midi (codul IAU MPC 586). Misiunile s-au desfășurat în perioadele 8-15.03.2020 și 29.09 - 05.10.2019. Observațiile s-au făcut cu un telescop de 1 m în diametru, f/17 și o cameră CCD iKon-L 936, 2048 x 2048 pixeli, 13,5 x, 13,5 microni. În cazul acestui telescop operarea este asemănătoare cu cea a telescopului Cassegrain de 0,5 m al Institutului Astronomic al Academiei Române.

### 5.1.4 Le Makes Observatory

La cererea conducătorului de doctorat au fost realizate observații și de la Observatorul Le Makes din Insulele Reunion (cod IAU MPC 181) cu un telescop de 0,6 m în diametru, f/8, și o cameră CCD SBIG STL-11000M CCD, 4008 x 2672 pixeli, 9 x 9 microni. Aceste observații au fost făcute la cerere, de către personalul observatorului, și transmise apoi către mine pentru reducere și prelucrare.

## 5.2 Programe folosite

Pentru a determina perioadele de rotație ale asteroizilor am folosit mai multe programe, necesare la operarea cupolei, a telescopului, achiziția de imagini, reducerea imaginilor și analiza datelor obținute. În continuare voi descrie programele folosite



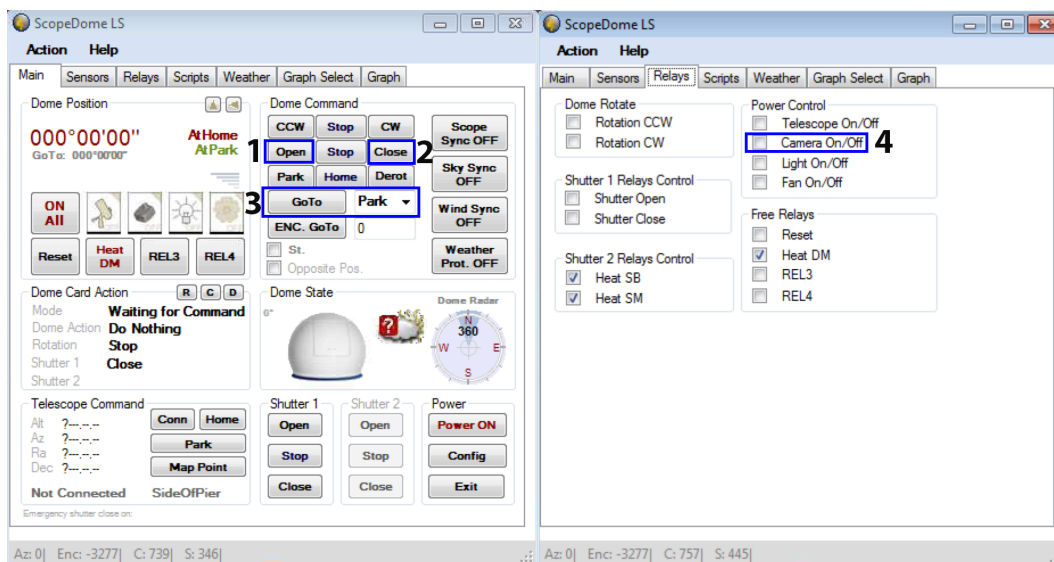


Figura 5.6: Ferestrele de comandă a cupolei.

și procesul de lucru.

## Operarea cupolei

Instrumentele astronomice sunt de cele mai multe ori adăpostite de o cupolă. În cazul Observatorului Astronomic de le Berthelot, cupola, de tip Scope Dome 3 m în diametru, este manevrată de către astronom (observator) fiind totodată și un centru de unde se poate acționa pornirea și oprirea camerei de achiziție de imagini.

La începutul fiecărei sesiuni de observații cupola este deschisă (butonul 1) și este rotită în funcție de azimutul la care se află obiectul (butonul 3). Din cauza mișcării diurne azimutul obiectelor se modifică dar cupola urmărește singură mișcarea boltei cerești. După încheierea sesiunii de observații cupola este orientată într-o poziție anume (park position - butonul 3) și este închisă (butonul 2). Acest program permite și conectarea camerei și a monturii la rețea (butonul 4), precum și monitorizarea stației meteo incluse (Fig. 5.6).

## Operarea telescopului și a monturii

Telescopul poate fi operat cu mai multe programe, însă este trebuie inițializat din programul de bază, denumit *10Micron Keypad*. Atunci când nu este în funcțiune, montura este în starea *park*, din care trebuie scoasă înainte de începerea observațiilor

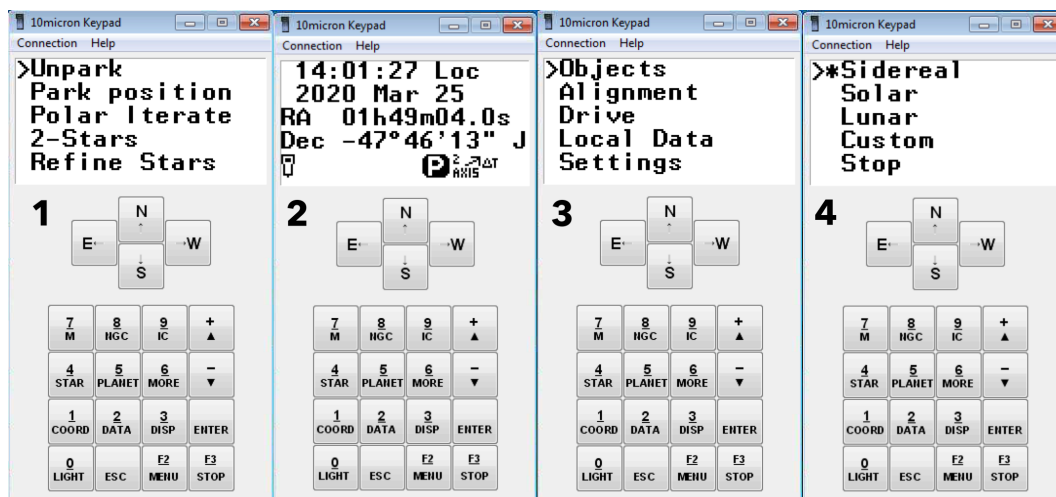


Figura 5.7: Ferestrele de comandă a monturii.

(ecran 1). În urma acestei operațiuni vom vedea data precum și informații despre poziționarea telescopului (ecran 2). Meniul (ecran 3) permite efectuarea mai multor operațiuni, printre care găsierea de obiecte pe cer, alinierea pe stele strălucitoare, modificarea vitezei de rotație a monturii, introducerea de obiecte în baza de date și modificarea anumitor caracteristici ale monturii. O opțiune esențială a monturii este permiterea stabilirii vitezei acesteia (Fig. 5.7).

Asteroizii geointersectorii sunt foarte rapizi, viteza lor fiind mai mare decât viteza mișcării diurne. Astfel, montura poate fi mișcată diferențial pe două axe, ascensie dreaptă și declinație, cu valori date de efemerida asteroidului (ecran 4). După ce montura este inițializată urmează identificarea asteroidului pe cer.

## Identificarea obiectelor

Identificarea obiectelor și poziționarea telescopului în direcția lor s-a făcut în două moduri: prin folosirea pozițiilor sau cu ajutorul unui soft de planetariu.

Poziția pe cer a oricărui corp ceresc este descrisă de două coordonate, ascensie dreaptă și declinație, similare cu longitudinea și latitudinea geografică. Aceste valori se calculează pentru momentul observațiilor și se folosesc pentru a se îndrepta telescopul în acea zonă. Pentru asteroizi cel mai comod este să se folosească formularul de calcul de efemeride al Minor Planet Center, unde se pot calcula poziții pentru orice asteroid. Tot aici se dau și valorile vitezei pe cer a asteroizilor, precum și strălucirea acestora. De obicei am introdus coordonatele în programul care

## Minor Planet Ephemeris Service: Query Results

Below are the results of your request from the Minor Planet Center's Minor Planet Ephemeris Service. Ephemerides are for the geocenter.

(3200) Phaethon

[Display all designations for this object](#) / [Show naming citation](#) / # of variant orbits available = 3

Object is a [Goldstone radar target](#) during 2017/12/01-2017/12/31: Physical studies requested.

Perturbed ephemeris below is based on 33-opp elements from MPO 531007. Last observed on 2020 Feb. 5.

Discovery date : 1983 10 11

Discovery site : IRAS

Discoverer(s) : IRAS

[Further observations?](#) Not necessary for orbit improvement. Desirable as radar target, [PHA]

03200		[H=14.3]						2		3		Uncertainty info	
Date	UT	R.A. (J2000)	Decl.	Delta	r	El.	Ph.	V	Sky Motion	"/min	"/min	3-sig/"	P.A.
	h m s												
2020 03 25	000000	02 03 20.9	+23 14 07	3.169	2.402	33.6	13.3	19.5	+0.80	+0.17	0	000.0	/ Map / Offsets
2020 03 26	000000	02 04 44.6	+23 18 09	3.177	2.402	32.9	13.1	19.5	+0.80	+0.17	0	006.8	/ Map / Offsets
2020 03 27	000000	02 06 08.4	+23 22 14	3.185	2.402	32.3	12.8	19.5	+0.80	+0.17	0	006.8	/ Map / Offsets
2020 03 28	000000	02 07 32.5	+23 26 19	3.193	2.401	31.7	12.6	19.5	+0.80	+0.17	0	006.8	/ Map / Offsets
2020 03 29	000000	02 08 56.8	+23 30 26	3.201	2.401	31.0	12.4	19.5	+0.81	+0.17	0	006.9	/ Map / Offsets
2020 03 30	000000	02 10 21.4	+23 34 35	3.208	2.401	30.4	12.2	19.5	+0.81	+0.17	0	006.9	/ Map / Offsets
2020 03 31	000000	02 11 46.1	+23 38 45	3.216	2.400	29.8	11.9	19.5	+0.81	+0.17	0	007.0	/ Map / Offsets
2020 04 01	000000	02 13 11.1	+23 42 57	3.223	2.400	29.1	11.7	19.5	+0.81	+0.17	0	007.0	/ Map / Offsets
2020 04 02	000000	02 14 36.2	+23 47 09	3.230	2.399	28.5	11.5	19.5	+0.81	+0.18	0	008.6	/ Map / Offsets
2020 04 03	000000	02 16 01.6	+23 51 23	3.236	2.399	27.9	11.2	19.4	+0.81	+0.18	0	007.1	/ Map / Offsets

These calculations have been performed on the [Tamkin Foundation Computing Network](#).

Figura 5.8: Exemplu de efemeridă topocentrică folosită la observații.

controlează montura.

În cazul asteroizilor rapizi, efemeridele se calculează topocentric, adică pentru locul de observații, introducându-se în plus codurile observatoarelor de unde se fac observații (L54, 073 sau 586). Asteroizii care se apropie foarte mult de Pământ, din cauza efectului de parallaxă, se pot afla în poziții diferite pe cer când sunt observați din locuri diferite, efemeridele geocentrice nefiind utile.

Un exemplu de efemeridă a asteroidului (3200) Phaethon este dat în Fig. 5.8. În chenarul 1 se pot vedea coordonatele ecuatoriale calculate din zi în zi la ora 00 GMT, în chenarul 2 mărimea aparentă a obiectului iar în chenarul 3 viteza pe care o are asteroidul descompusă pe cele două axe ecuatoriale (ascensie dreaptă și declinație). Aceste valori se introduc în programul cu care se operează montura atunci când este nevoie ca aceasta să aibă viteza asteroidului.

O altă modalitate prin care am operat telescopul și montura a fost cu ajutorul unui program de planetariu (Fig. 5.9). Pe tot parcursul observațiilor am folosit programul *Cartes du Ciel*<sup>1</sup>, o soluție opensource de astronomie. Acesta permite conectarea telescopului (chenar 2), reprezentarea asteroizilor pe bolta cerească (chenar 1) dar și trasarea traiectoriei acestora pentru o anumită perioadă de timp

<sup>1</sup><https://www.ap-i.net/skychart/en/start>

(chenar 3). Pentru a putea identifica cu precizie câmpul stelar în care se află asteroidul, având în vedere că de obicei câmpul vizual al combinației telescop/CCD este mic, este nevoie ca baza de date de elemente osculatoare să fie cea mai nouă.

În cazul în care asteroidul nu are elemente orbitale precise eroarea de poziție poate depăși precizia cu care programul calculează pozițiile asteroizilor. În acest caz se pot introduce direct în program coordonatele calculate mai precis de Minor Planet Center (chenar 4).

După deschiderea cupolei, conectarea telescopului și găsirea câmpului urmează achiziția imaginilor.

### **Achiziția de imagini**

Imaginile se achiziționează cu un timp de expunere îndeajuns de lung ca asteroidul și stelele de referință să fie ușor vizibile. Pentru a se obține măsurători cu erori mici, este nevoie să se ia în considerare raportul de semnal/zgomot (signal to noise ratio – SNR). Acesta este un termen care definește o valoare a raportului dintre semnalul dorit și cel al zgomotului total. În acest caz, zgomotul este cel produs de strălucirea intrinsecă a cerului, adică fundalul luminos mediu care se întâlnește în zonele fără stele din imagini. Cu cât este mai mare SNR, cu atât măsurătoarea strălucirii va fi mai precisă. Un SNR de 100 indică o valoare a zgomotului de doar 1% față de cea a semnalului. Precizia, în magnitudini poate fi calculată cu relația [9]:

$$1\sigma_{mag} = \frac{1,0857}{SNR} \quad (5.8)$$

Astfel, măsurătoarea va avea o precizie de 0,01 magnitudini. Aici precizia se referă la diferența maximă de strălucire care poate fi detectată. Dacă strălucirea unui asteroid variază cu 0,1 magnitudini, un semnal cu SNR 10 nu va permite detectarea variației. Din acest motiv este necesar mărirea timpului de expunere.

Un timp expunere lung duce la creșterea SNR dar provoacă ambiguități la determinarea perioadei de rotație asteroizilor. Obiectele mici, care se rotesc foarte repede, necesită timp lung de expunere, dar uneori acesta reprezintă o fracțiune importantă din ciclul de rotație. Ambiguitatea apare pentru că strălucirea asteroidului se modifică în timpul expunerii, deci nu se poate măsura o strălucire instantanee.

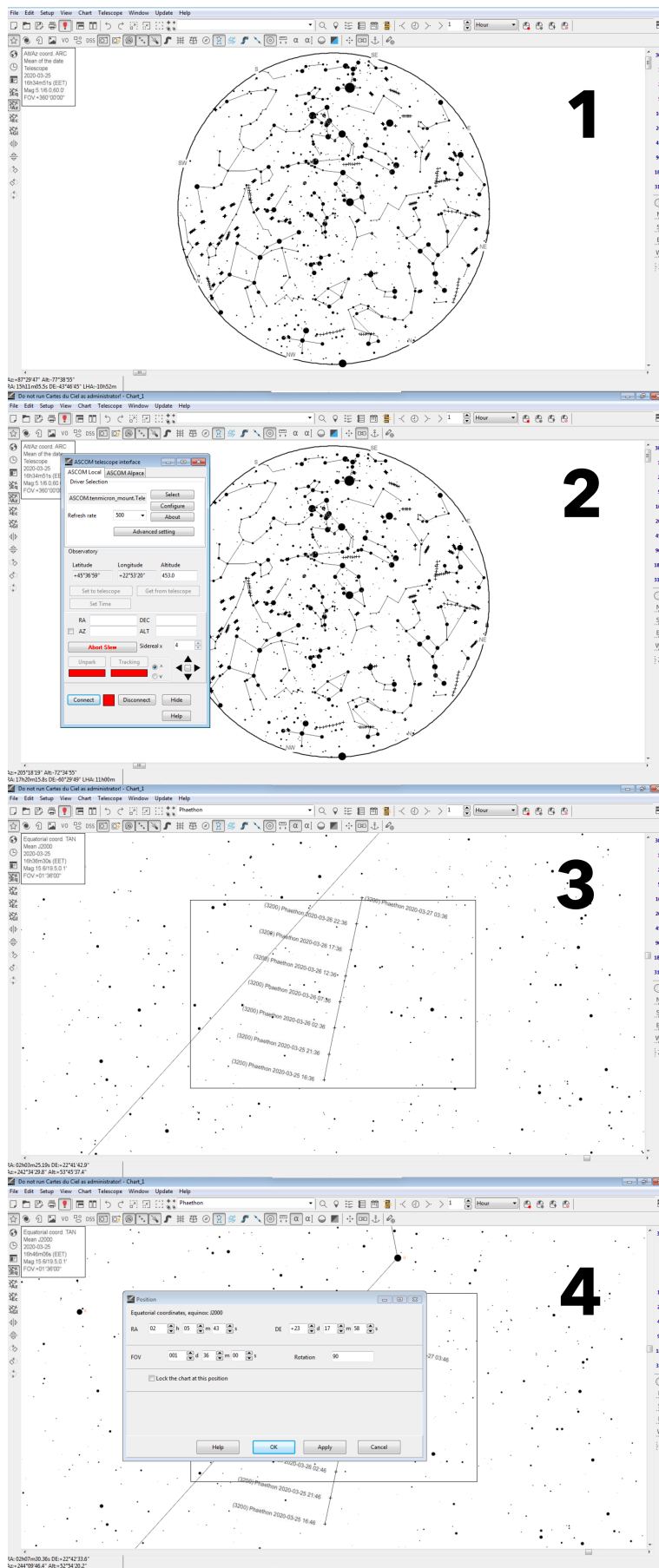


Figura 5.9: Exemplu de operațiuni cu programul Cartes du Ciel.

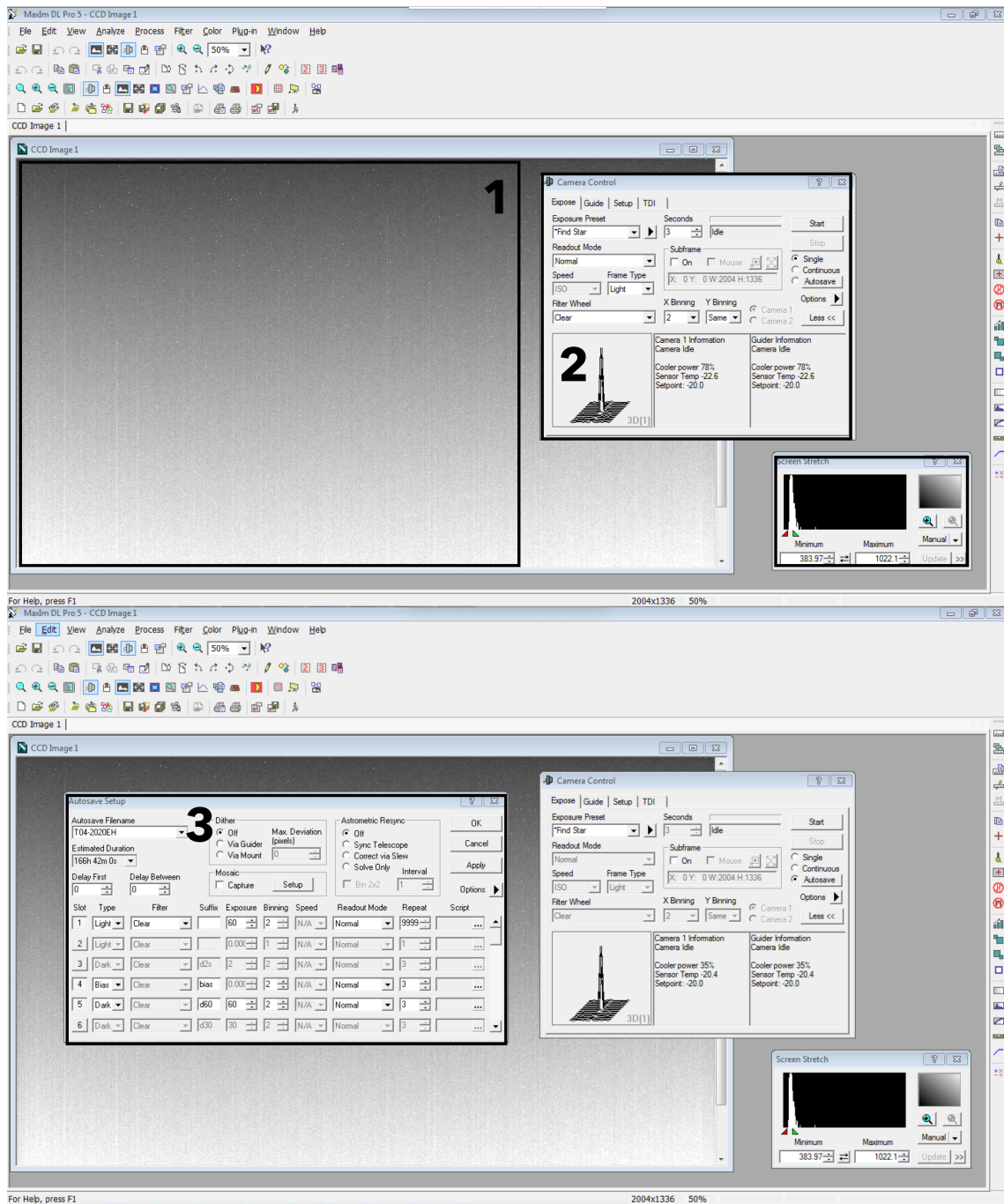


Figura 5.10: Exemplu de operațiuni cu programul Maxim DL.

În cazul expunerilor prea lungi la observarea asteroizilor cu perioadă scurtă, ciclul de variație va fi reprezentat din câteva puncte, ceea ce duce tot la ambiguități. O regulă generală empirică este ca timpul de expunere să nu fie mai lung de 0,185 din perioadă [203]. În cazul în care perioada de rotație a asteroidului nu se cunoaște, este nevoie să se aleagă un timp de expunere care să poată permite și detectarea perioadelor scurte, dar și ale celor lungi. S-a observat că asteroizii mai mici de 200 m au perioade sub 2 ore, așa că în funcție de mărime se poate alege un anumit timp de expunere. Dar strălucirea asteroidului în imagini este dată și de timpul de expunere: un timp de expunere scurt duce la un SNR mic. În cadrul observațiilor făcute în timpul doctoratului am folosit timpi de expunere între 10 și 300 secunde.

Achiziția de imagini a fost făcută în principal cu programul Maxim DL<sup>2</sup>, care permite conectarea monturii, a camerei CCD și a programului de planetariu. Pașii de lucru sunt următorii (Fig. 5.10: se conectează camera; se dă comanda de răcire a camerei până la temperatura de -20°C (chenar 2); se conectează montura pentru a se putea înregistra în imagine poziția câmpului; se iau câteva expuneri pentru verificarea câmpului (chenar 1); se setează achiziția unei serii de imagini cu un timp de expunere (chenar 3).

După o serie de imagini, o sesiune de observații pentru un asteroid, produsele au fost următoarele: seria de imagini în care se află obiectul; o serie de imagini dark și o serie de imagini bias. Pentru fiecare asteroid au fost efectuate mai multe nopți de observații, cu timp minim de observații de două ore.

Pentru fotometrie și analiză Fourier a perioadelor am folosit MPO Canopus<sup>3</sup>. Programul permite analiza seriilor de imagini împărțite în *sesiuni*, adică zile. Fiecare noapte de observații este o sesiune care are un început, sfârșit și un număr de imagini. Inițial este nevoie de recunoașterea câmpului, adică determinarea precisă a coordonatelor centrului câmpului, a orientării acestuia și a scării imaginii. Acest lucru se realizează prin calibrarea astrometrică a primei imagini din sesiune cu ajutorul catalogului de stele intern (MPOSC) dar și al catalogului astrometric UCAC4 [294]. După identificarea câmpului se specifică asteroidul care este observat și se calculează strălucirea lui aparentă, poziția la momentul primei observații precum și viteza și

---

<sup>2</sup><https://diffractionlimited.com/product/maxim-dl/>

<sup>3</sup><http://www.minorplanetobserver.com/MPOSoftware/MPOCanopus.htm>

sensul lui de deplasare. După ce acest pas este trecut, urmează identificarea stelelor de comparație și a asteroidului în prima imagine. Am utilizat opțiunea *Comp Star Selection*, care permite selectarea a cinci stele de comparație. Acestea sunt marcate pe imagine și pot fi alese în funcție de strălucire și culoare. După alegerea stelelor de comparație urmează identificarea asteroidului în prima imagine. Pasul următor constă în deschiderea ultimei imagini din sesiune și marcarea pe aceasta a stelelor de comparație și a asteroidului. Se încarcă apoi toate imaginile și, prin recunoașterea stelelor și a traiectoriei asteroidului, se măsoară strălucirea acestora în fiecare imagine din sesiune. Strălucirea se măsoară prin alegerea aperturilor fotometrice, care pot fi și alungite, în funcție de forma asteroidului în imagine. Acest program permite folosirea de forme de aperturi diferite pentru asteroid și stelele de comparație, avantaj folosit atunci când asteroidul era o dâră foarte lungă (Fig. 5.11).

Rezultatul măsurătorilor este o listă alcătuită din: timpul mediu al expunerii, strălucirea asteroidului, a stelelor de comparație și erorile acestora. În continuare se pot reprezenta datele brute, în secțiunea *lightcurve analysis*. Se poate analiza și strălucirea brută a stelelor de comparație, care poate prezenta variații din cauza modificării masei de aer dar și a posibilei variabilități. Chiar și după măsurători stelele de comparație cu strălucire variabilă pot fi înlăturate, strălucirea asteroidului fiind recalculată.

În continuare, datele pot fi analizate pentru identificarea perioadei de rotație. Programul conține algoritmul FALC (Fourier Analysis for Lightcurves) și permite stabilirea unei perioade inițiale, a pasului de căutare precum și a ordinului Fourier. Rezultatul analizei este curba de lumină redusă la fracțiuni de perioadă, în care toate punctele observaționale sunt reprezentate în funcție de faza lor în ciclul de rotație. Folosind un timp de minim se reduce timpul tuturor punctelor observaționale cu relația:

$$\Phi = \frac{t - t_0}{P} \quad (5.9)$$

unde  $t$  este timpul observației,  $t_0$  este timpul de minim iar  $P$  este perioada, în zile.



Aceasta este metoda prin care am achiziționat imagini, am redus datele și am determinat perioadele de rotație ale asteroizilor. Odată ce procedura de observații a fost pusă la punct, a început observarea asteroizilor.

### 5.3 Reducerea datelor

Achiziția imaginilor este primul pas dintr-un proces care se continuă cu *reducerea* acestora. Zgomotul circuitului electric al camerei și impuritățile din trenul optic trebuie scăzute din imagini pentru a avea imagini finale potrivite pentru a face măsurători fotometrice. Imaginile brute au fost calibrate cu imagini bias, flat și dark, folosind procedurile standard al softului Maxim DL. La reducere am folosit întotdeauna trei imagini dark, bias, iar din imaginile flat s-au scăzut imaginile bias și dark pentru acea expunere. Procedul de reducere al softului realizează mediana imaginilor de calibrare, pe care o scade din imaginile brute.

Fiecare sesiune de observații pentru un asteroid a avut imaginile sale de calibrare bias și dark, imaginile de tip flat fiind realizate la fiecare două săptămâni. La finalul procesului am obținut o serie de imagini reduse.

### 5.4 Fotometrie diferențială

Imaginea unei stele pe o imagine astronomică pare punctiformă, însă o analiză mai atentă ne va arăta că are forma unei distribuții gausiene în centru, însoțită de un halou luminos (Fig. 5.12). La măsurarea strălucirii obiectelor trebuie să se ia în considerare partea centrală dar și cea marginală, pentru a se contoriza toți fotonii veniți pe senzor. În imagini, forma unei surse de lumină punctiformă poate fi aproximată cu o funcție matematică, *PointPoint Spread Function*, însă deseori forma stelei este mai complicată, îndepărtându-se de la cea ideală, din cauza turbulenței atmosferice, focalizării incorecte, vibrațiilor telescopului și a ghidajului. Măsurarea calității imagini se face prin determinarea FWHM pentru mai multe stele din imagine.

Cea mai simplă metodă pentru obținerea măsurătorilor fotometrice este *fotometria de apertură*, metodă care nu ia în considerare forma profilului unei stele

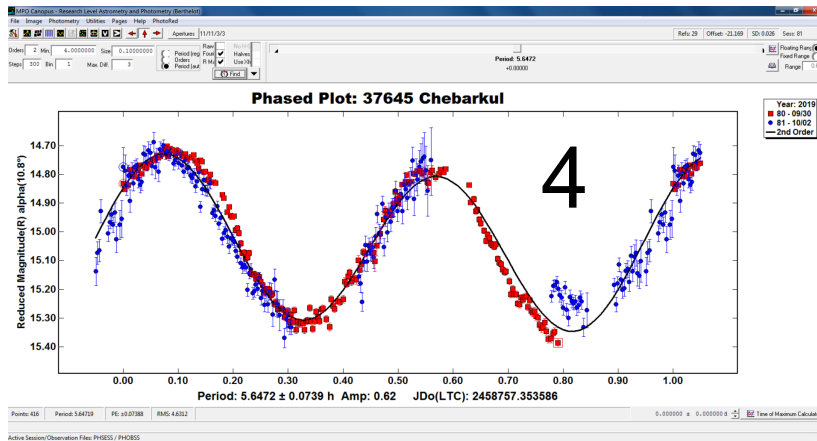
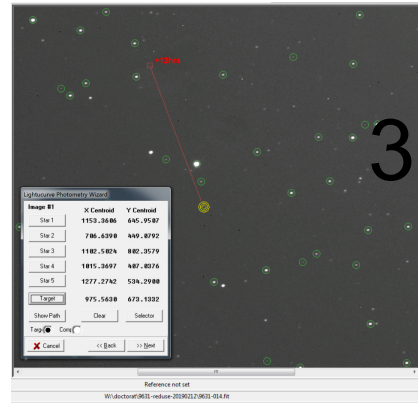
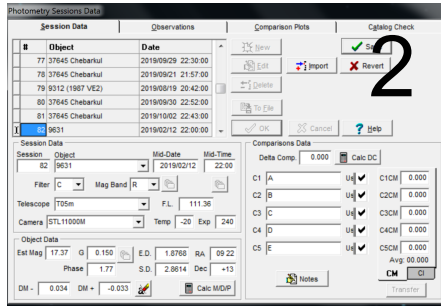
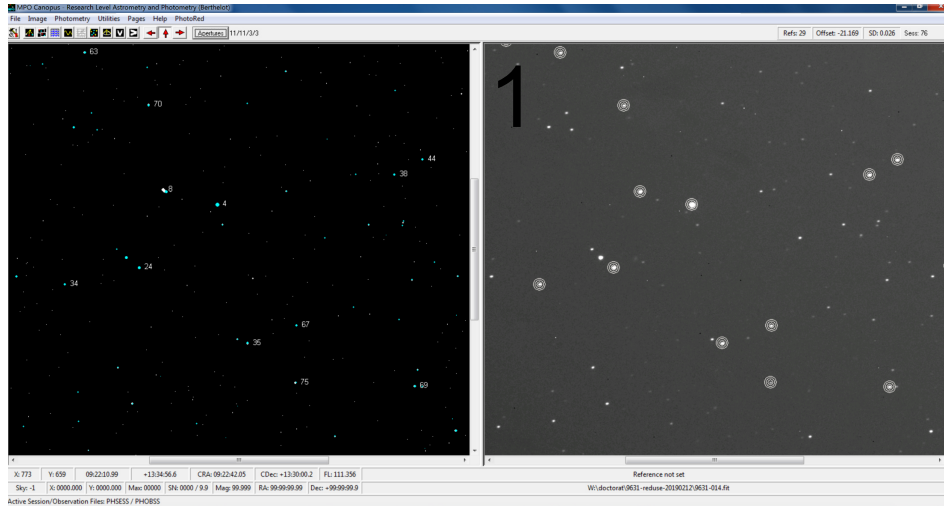
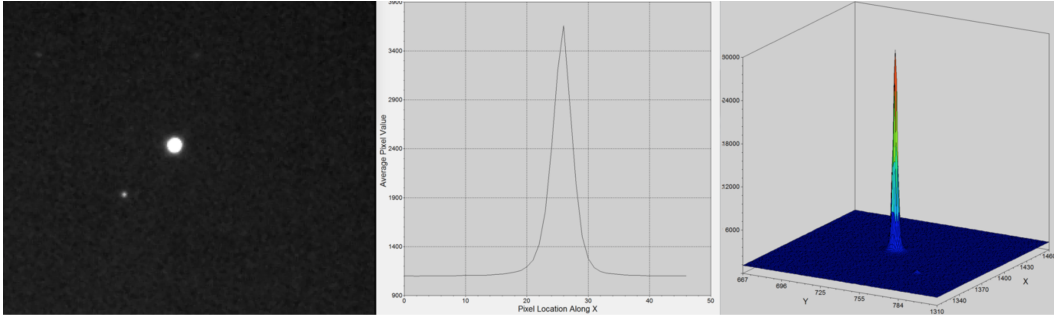


Figura 5.11: Operațiuni realizate cu MPO Canopus. 1 - rezolvarea astrometrică a imaginii prin identificarea stelelor din imagine cu cele din catalog; 2 - crearea sesiunilor de observații; 3 - identificarea stelelor de comparație; cercul galben marchează asteroidul iar linia este traiectoria lui pentru următoarele 12 ore; 4 - determinarea perioadei de rotație; în stânga sus se văd opțiunile descrise în text.



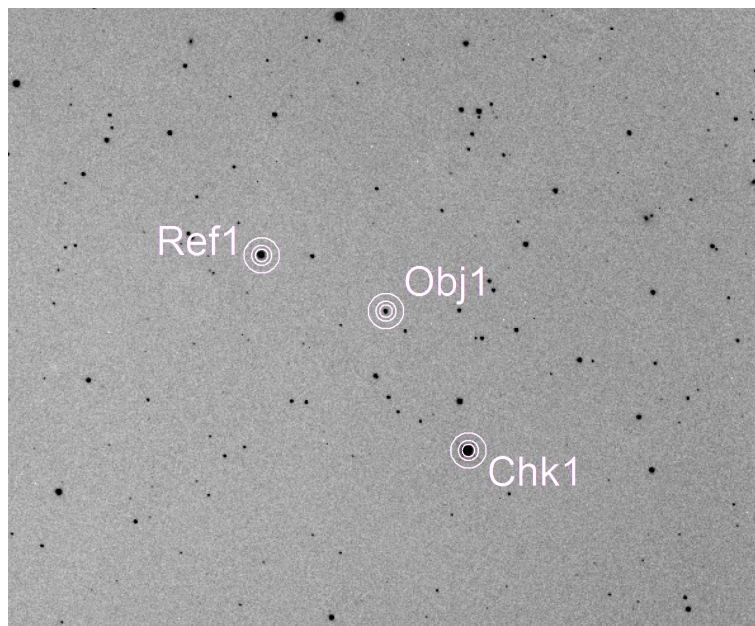
**Figura 5.12:** *Profilul unei stele în imagine (stânga), ca PSF (mijloc) și ca PSF 3D (dreapta). Lumina de la stea se împrăștie pe 15 pixeli.*

ci colectează și măsoară numărul de electroni dintr-o anumită regiune. Această regiune trebuie centrată pe sursă și poate fi circulară, pătrată sau eliptică, în funcție de forma obiectului a cărui strălucire trebuie măsurată. Primul pas constă în estimarea centrului obiectului și alegerea suprafeței (aperturii) de pe care se vor colecta datele.

De cele mai multe ori, măsurarea valorii strălucirii se face folosind trei cercuri concentrice (sau alte forme concentrice), care măsoară semnalul din diferite zone. Cercul central este cel care cuprinde obiectul, însă valoarea obținută cuprinde și semnalul dat de fundal. Practic, se însumează valoarea electronilor din suprafața cercului și se scade valoarea fundalului înmulțită cu numărul de pixeli cuprinși în aria cercului. Mărimea cercului central este esențială pentru a se obține o măsurătoare corectă. Dacă cercul este prea mic, nu se va măsura toată lumina obiectului. Dacă este prea mare, se va măsura și fundal care va fi contorizat ca lumina obiectului. O bună estimare pentru mărimea cercului central este  $3 \cdot \text{FWHM}$ , regiune care cuprinde 100% din fluxul obiectului. O sursă de erori este măsurarea folosind apertură circulară pe o imagine compusă din mici pătrate. Acest lucru duce la măsurarea parțială a unui număr de pixeli, un efect neglijabil doar pentru obiectele strălucitoare.

Exterior cercului central se folosește un inel de pe suprafața căruia nu se măsoară semnalul. Se evită astfel măsurarea accidentală în preajma sursei, evitarea măsurării stelelor aflate lângă sursă, dar și măsurarea de două ori a unei fracțiuni din fundal și din sursă.

Pentru o măsurătoare corectă este nevoie de măsurarea fundalului luminos din preajma sursei. Acest lucru se face prin plasarea unui inel în jurul cercului central și

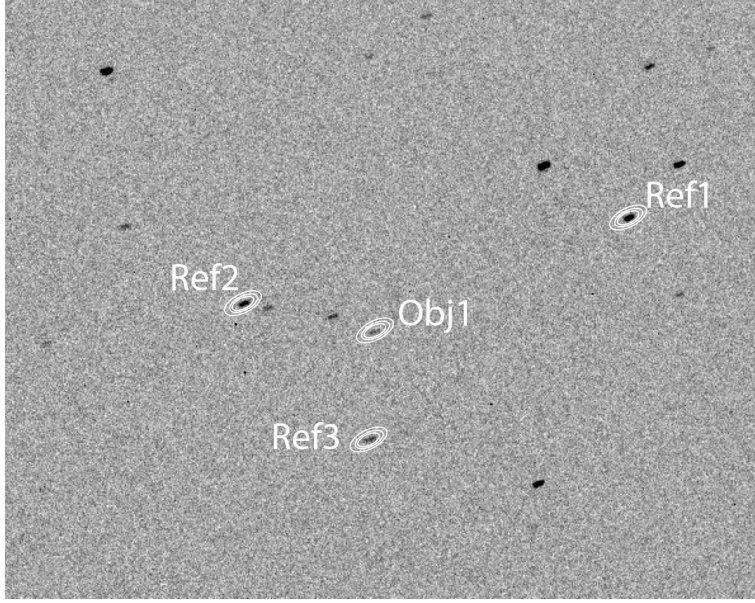


**Figura 5.13:** *Exemplu de aperturi fotometrice aplicate pe stele de străluciri diferite (Obj - asteroidul, Ref - stele de comparație).*

a inelului în care nu se măsoară nimic și măsurarea valorii pixelilor din acea arie. Din inelul exterior se extrage valoarea medie a strălucirii unui pixel din fundal, valoare care se scade din valoarea obținută pentru sursă (Fig. 5.13).

Un caz special este cel dat de asteroizii cu o mișcare rapidă pe cer, care lasă o dâră în imagini. O apertură circulară nu mai este utilă pentru că ar trebui să fie prea mare și ar cuprinde prea mult din luminozitatea fundalului cerului, drept pentru care se folosește o apertură eliptică. Și strălucirea stelelor de comparație trebuie măsurată cu apertură asemănătoare, drept pentru care am ales să urmăresc cerul o jumătate din viteza de deplasare a asteroidului. Urmărirea cu viteză siderală (care compensează mișcarea de rotație a Pământului) produce stele și asteroizi lenți de formă punctiformă. Urmărirea cu viteză siderală produce stele punctiforme și asteroizi rapizi sub formă de dâră, pe când urmărirea cerului cu viteza asteroidului produce pe imagine asteroizi punctiformi și stele elongate. Singura soluție pentru obținerea de forme asemănătoare ale stelelor și ale asteroizilor este urmărirea cu jumătate din viteza de deplasare a asteroizilor. Astfel vom avea forme alungite și putem folosi aperturi alungite pentru măsurarea strălucirilor (Fig. 5.14).

După efectuarea măsurărilor acestea sunt *normalizate*, în funcție de tim-



**Figura 5.14:** *Exemplu de aperturi fotometrice elongate aplicate pe stele de străluciri diferite. Imagine din 2020-03-18, observații asupra asteroidului 2020 FA2. (Obj - asteroidul, Ref - stele de comparație).*

pul de expunere folosit. În imagini luate cu timpi de expunere diferiți, valoarea strălucirii aceleiași stele va fi mai mare în imaginea cu expunere mai lungă cu toate că strălucirea nu se modifică. Normalizarea se face prin împărțirea valorii pixelilor la timpul de expunere (exprimat în secunde).

$$F_{norm} = \frac{F_{masurat}}{t_{exp}} \quad (5.10)$$

Valoarea fluxului normalizat permite estimarea magnitudinii instrumentale a obiectului. Valoarea magnitudinii instrumentale ( $m_i$ ) se determină cu relația:

$$m_i = -2,5 \log \left( \frac{N_{ap} - A_{ap} S_{sky}}{t_{exp}} \right) \quad (5.11)$$

unde  $N_{ap}$  este valoarea totală a pixelilor din apertura centrală,  $A_{ap}$  este aria aperturii centrale,  $S_{sky}$  este valoarea pixelilor din inelul exterior, iar  $t_{exp}$  este timpul de expunere (în secunde).

Pe parcursul observațiilor apar fenomene care duc la perturbarea semnalului luminos și efectuarea de măsurători fotometrice eronate. Cel mai important fenomen

de acest gen este cel dat variația masei de aer. Fluxul luminos al obiectelor trebuie să treacă prin atmosferă până ajunge în telescop și detector, iar atmosfera absoarbe și împrăștie din fotoni. Acest lucru duce la modificarea strălucirii obiectelor în funcție de poziția lor față de orizont, adică în funcție de depărtarea lor de zenit. Termenul de *masă de aer* se referă la grosimea atmosferei prin care trebuie să treacă lumina în comparație cu grosimea întâlnită la zenit (punctul situat deasupra capului). Un obiect situat la zenit va fi privit printr-o masă de aer egală cu 1. Lumina unui obiect situat aproape de orizont va suferi modificări: va ajunge în cantitate mai mică la telescop și va deveni mai roșie pentru că lumina albastră este împrăștiată mai bine de atmosferă.

Pentru calculul masei de aer ( $X$ ) se folosesc următoarele relații:

$$X = \frac{1}{\cos Z} \quad (5.12)$$

unde  $z$  este:

$$Z = 90^\circ - h^\circ \quad (5.13)$$

unde  $z$  este distanța zenitală în grade, iar  $h$  este înălțimea deasupra orizontului. Dacă  $z=0^\circ$ , adică steaua se află la zenit,  $X$  va avea valoarea 1. Dacă  $h=30^\circ$ ,  $X$  va avea valoarea 2. Dacă steaua se află la înălțimi mai mici de  $30^\circ$ , este nevoie de includerea unei corecții de refracție, relația folosită fiind:

$$X = \sec(z) - 0,00182(\sec(z) - 1 - 0,029(\sec(z) - 1)^2 - 0,00081(\sec(z) - 1)^3) \quad (5.14)$$

Distanța zenitală a unui obiect se poate calcula și folosind relația următoare:

$$\sec(z) = (\sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(H))^{-1} \quad (5.15)$$

unde  $\varphi$  este latitudinea locului de observație,  $\delta$  este declinația astrului, iar  $H$  este unghiul orar al astrului [280].

Observațiile foarte precise necesită și determinarea coeficientului extincție, fie prin măsurarea magnitudinii instrumentale a unei stele de referință la mase de aer diferite, sau prin măsurarea a două stele de referință la mase de aer diferite. Determinarea coeficienților de extincție se face pentru fiecare lungime de undă observată, folosind stele cu magnitudini bine determinate în acele lungimi de undă. Măsurătorile efectuate prin filtre diferite vor suferi corecții bazate pe coeficienți diferiți de extincție. Pentru că obiectul lucrării nu este determinarea coeficienților de extincție, subiectul nu va fi tratat mai departe.

În cazul observațiilor făcute de mine, corecția strălucirilor pentru masa de aer și extincție se realizează cu procedura automată inclusă în programul Canopus.

### 5.4.1 Fotometrie diferențială

În cazul în care este nevoie de determinarea variațiilor de strălucire ale asteroizilor și nu de măsurări absolute de strălucire, cea mai folosită metodă fotometrică este fotometria *diferențială*. Această metodă constă în găsirea diferenței de strălucire dintre asteroid și o stea de referință. În practică se folosesc mai multe stele de referință, iar ca magnitudine de referință se folosește magnitudinea medie a acestora. Stelele de referință trebuie să nu aibă strălucire variabilă, unul din motivele pentru care se folosesc mai multe fiind identificării unei variabilități în strălucirea acestora. Stelele de referință trebuie să aibă culori asemănătoare cu lumina reflectată de asteroid, adică să fie de tip solar.

Dacă obiectul observat este notat cu  $V$ , strălucirea acestuia este comparată cu cea a stelelor de comparație  $C_i$ , după cum urmează:  $V - C_1$  reprezintă măsurarea diferenței dintre obiectul cu strălucire presupus variabilă și cel cu strălucire presupus constantă; este nevoie însă și de verificarea variabilității stelei de referință, acest lucru fiind făcut prin măsurarea strălucirii altor stele de referință, denumite și stele de verificare; se vor reprezenta grafic diferențele  $C_2 - C_1$ ,  $C_3 - C_1$ , etc; dacă în toate cazurile rezultatul diferenței este o variație strălucire, se poate confirma variabilitatea stelei de referință; dacă doar una din diferențe prezintă variabilitate, cel mai probabil una din stelele de verificare are strălucire variabilă. În felul acesta se pot înlătura stelele de referință neconforme. Dacă se folosesc mai multe stele

de referință este nevoie să se facă diferența dintre strălucirea fiecăreia și media de strălucire ale tuturor (Fig. 5.15).

Avantajul acestei metode este că se pot folosi doar magnitudinile instrumentale, nefiind nevoie de alte transformări dar și că efectele produse de variația masei de aer și a extincției sunt identice pentru că stele de referință și asteroidul se află înălțimi identice pe cer. Dacă obiectele au aceeași culoare, extincția lor este similară. Dacă se folosesc stele de culori diferite, extincția pentru stelele albastre este mai mare decât pentru cele roșii și galbene, fiind nevoie de transformări laborioase.

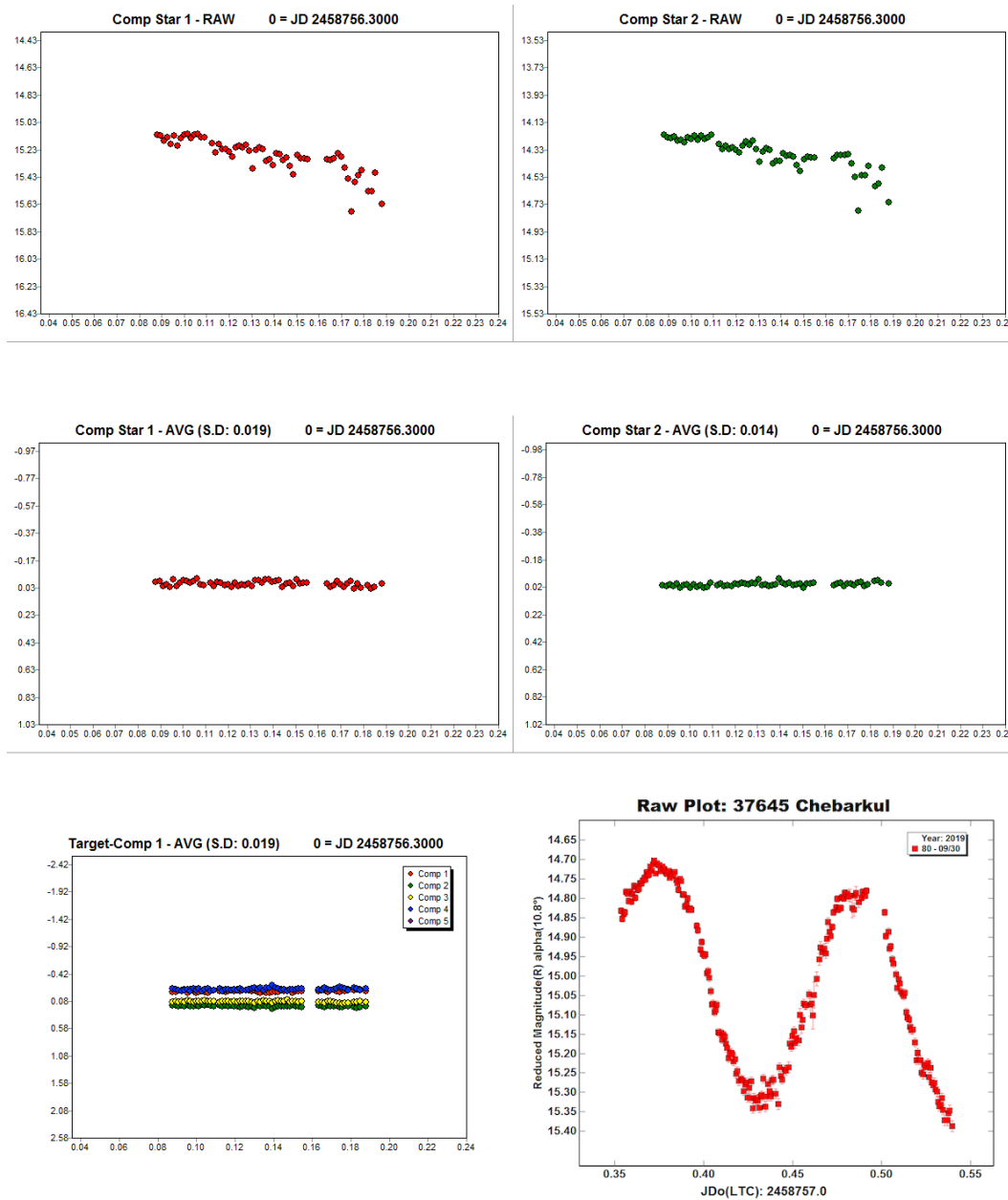
### 5.4.2 Stele de comparație – cataloage

Fotometria este un proces în care luminozitatea obiectului observat (care trebuie să prezinte o variație) este comparată cu strălucirea unor stele de referință și de verificare. Pentru a putea fi folosite, stelele de referință trebuie să îndeplinească anumite condiții, cea mai evidentă fiind ca trebuie să nu aibă strălucire variabilă. În fotometria asteroidală este nevoie ca stelele să fie de tip solar, să nu fie roșii (de tip spectral M, majoritatea stelelor roșii fiind variabile) dar nici albastre (de tip spectral O, A și B, pentru că strălucirea lor este influențată mai mult de extincția atmosferică). Pentru a se ușura munca astronomilor, s-au realizat cataloage stelare fotometrice, ale căror stele pot fi folosite în fotometrie.

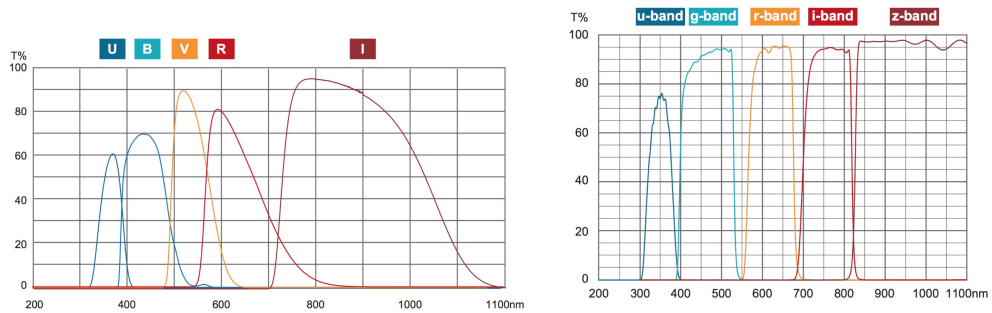
Cataloagele stelare trebuie să acopere întreg cerul, pe o gamă largă de magnitudini, iar strălucirea stelelor trebuie să fie măsurată în diferite lungimi de undă. Pentru a se realiza o caracterizare fotometrică completă, stelele sunt observate prin telescop prin filtre diferite, diferența de strălucire în filtre diferite fiind denumită *indice de culoare*. Filtrele folosite în diferite cataloage stelare fac parte dintr-un sistem fotometric, în care fiecare filtru este centrat pe o anumită lungime de undă. Există filtre de bandă largă, care lasă să treacă, față de lungimea de undă centrală, lumină pe o lățime de 30 nm, dar și filtre de bandă îngustă, cu lățimea de doar câțiva nanometri. Filtrele dintr-un anumit sistem fotometric sunt alese a.î. să acopere o gamă largă a spectrului electromagnetic, cel puțin în domeniul vizibil.

Unul dintre cele mai vechi sisteme fotometrice este sistemul Johnson-Morgan, în care se folosesc filtre UBVR. Lungimile de undă pe care sunt centrate filtrele





**Figura 5.15:** Exemplu de observații pentru asteroidul (37645) Cherbakul. În primele două grafice de sus sunt reprezentate strălucirile brute pentru două stele de comparație. Se observă cum strălucirea lor scade spre sfârșitul nopții din cauza extincției atmosferice. În graficele de mijloc se observă strălucirea celor două stele de comparație după ce a fost scăzut efectul dat de extincție. În graficul din stânga jos sunt reprezentate strălucirile tuturor stelelor de comparație folosite în acea sesiune de observație. În dreapta jos este reprezentată strălucirea redusă a asteroidului.



**Figura 5.16:** Curbele de transmise ale filtrelor din sistemele fotometrice UBVRI și ugriz.

sunt următoarele: U – 365 nm, B – 440 nm, V – 550 nm, R – 700 nm, I – 900 nm. Un sistem fotometric folosit pe scară largă este sistemul Sloan Digital Sky Survey (SDSS), dar și cel al The Two Micron All-Sky Survey (2MASS) (Fig. 5.16).

În procesul de fotometrie pe care l-am abordat am folosit două cataloage stelare: APASS [92] și MPOSC3 [177].

Catalogul stelar all-sky APASS (The AAVSO Photometric All-Sky Survey) își propune observarea întregului cer, în filtrele B, V, g, r și i. Este pus la dispoziția astronomilor de American Association of Variable Star Observers și conține stele între magnitudinile 7 și 17, distribuite pe întreg cerul. În determinarea magnitudinilor asteroidului am folosit magnitudinea în v a stelelor din acest catalog.

Un alt catalog folosit este MPOSC3, care conține 150.000.000 de stele, cu magnitudini în filtrele BVRI, g, r și i. Majoritatea magnitudinilor sunt obținute prin aplicarea de corecții, pe baza formulelor de transformare între filtre. Catalogul MPOSC3 este incorporat în soft-ul Minor Planet Observer MPO Canopus, folosit de autor la fotometrie.

## 5.5 Determinarea perioadelor de rotație - curbele de lumină

Atingerea obiectivelor tezei de doctorat se face în primul rând prin determinarea perioadei de rotație a asteroizilor. Aceasta se determină prin măsurarea strălucirii lor pe parcursul unui anumit interval de timp. Rezultatul final al măsurătorilor

fotometrice se numește *curbă de lumină*, care este de fapt un grafic al variației în timp a strălucirii asteroidului. Curba de lumină poate fi prezentată pentru o anumită perioadă de timp sau, folosind analiza Fourier pentru identificarea unei perioade, poate fi redusă la o perioadă anume.

În funcție de forma asteroidului și orientarea axei de rotație, maximele sau minimele pot fi inegale sau chiar inexistente (în cazul unui asteroid rotund). Perioada de rotație, denumită *sinodică* este egală cu timpul trecut între două minime sau două maxime.

Curba de lumină depinde și de considerente geometrice, unghiul de fază, de unghiul pe care îl face axa de rotație cu direcția de observare și de oblicitatea orbitei. Pentru un elipsoid de dimensiuni  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , care îndeplinesc condiția  $a > b > c$ , amplitudinea curbei de lumină este următoarea:

$$\Delta m = 2,5 \log \left( \frac{a}{b} \right) - 1,25 \log \left( \frac{a^2 \cos^2 \xi + c^2 \sin^2 \xi}{b^2 \cos^2 \xi + c^2 \sin^2 \xi} \right) \quad (5.16)$$

unde  $a$ ,  $b$  și  $c$  sunt laturile asteroidului iar  $\xi$  este de unghiul pe care îl face axa de rotație cu direcția de observare.

Pentru o înclinare de  $90^\circ$ , relația 5.16 devine:

$$\Delta m = 2,5 \log \left( \frac{a}{b} \right) \quad (5.17)$$

sau

$$\frac{a}{b} \geq 10^{0,4\Delta m} \quad (5.18)$$

Amplitudinea obținută la un anumit timp de observație poate fi descrisă de relațiile de mai sus, dar unghiul de fază modifică amplitudinea. Amplitudinea crește cu unghiul de fază, iar curbele de lumină obținute atunci când unghiul de fază este mare prezintă o supraestimare a amplitudinii și, indirect, a raportului dintre axele  $a$  și  $b$  ale asteroidului. Corecția se poate face numai dacă se cunoaște rata de variație a strălucirii în funcție de unghiul de fază 4.2. Dar, cum acest lucru nu este posibil, este nevoie de o aproximare a ratei de variație, adică a pantei curbelor de fază (s).

$$\Delta m(\alpha = 0^\circ) = \frac{\Delta m(\alpha)}{1 + s\alpha} \quad (5.19)$$

Astfel, relația 5.19 devine:

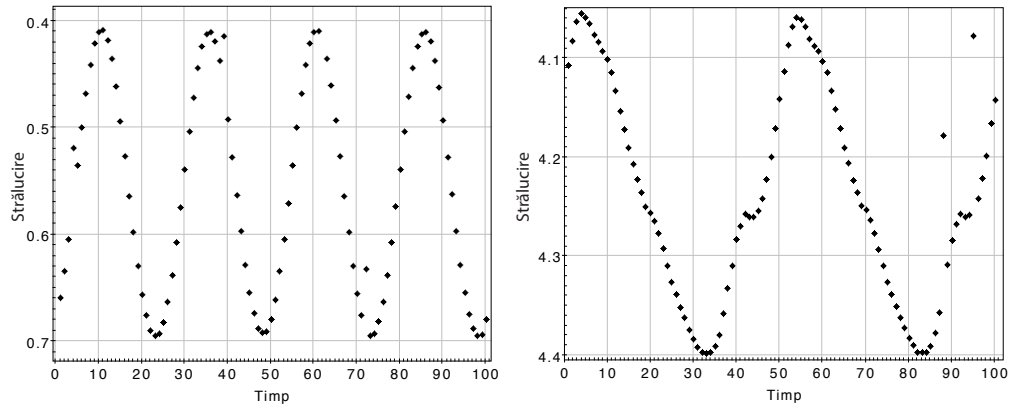
$$\frac{a}{b} \geq 10^{0,4\Delta m(\alpha)/(1+s\alpha)} \quad (5.20)$$

Analize pe baza datelor observaționale [298] și modele numerice [77] arată că rata de variație a strălucirii depinde de tipul taxonomic al asteroizilor și că nu poate fi mai mare de 0,03 mag/grad.

Strălucirea poate să din alte motive, care pot fi determinate în funcție de forma curbei de lumină. Este evident că un asteroid sferic nu va prezenta variații de strălucire în timpul rotației sale din cauză că proiecția ariei suprafeței care reflectă lumina Soarelui nu se modifică. Un asteroid sferic cu variații de albedo va prezenta variații de strălucire periodice, care pot fi folosite pentru determinarea rotației. Curba de lumină a unui asemenea asteroid va prezenta un număr de minime egale cu numărul zonelor în care apar variații de albedo (Fig. 5.17). Dacă există doar o zonă, curba de lumină va avea un minim și un maxim iar minimul va fi cu atât mai adânc cu cât raportul de albedo dintre zonele deschise și închise la culoare este mai mare.

Cea mai des întâlnită formă de asteroid, determinată în urma studierii a multor curbe de lumină, este cea de elipsoid Jacobi [240]. Curba de lumină a unui asemenea asteroid, în rotație uniformă, este o sinusoidă *bi-modală* (cu două maxime și două minime). În cazul unui albedo uniform amplitudinea variației este dată doar de raportul lungimilor axelor principale (Fig. 5.17). Astfel, o modelare a curbei de lumină generează informații despre acest raport, cuantificat în relația 5.5.

De multe ori, pentru asteroizii la care nu se cunoaște perioada, a fost nevoie de o determinare rapidă a perioadei de rotație pentru a se putea planifica observațiile ulterioare. Acest lucru a fost făcut prin studierea vizuală a curbei de lumină obținută. De exemplu, dacă observăm două maxime consecutive, în două seri diferite puteam afla ușor diferența dintre ele prin scăderea duratei de timp trecute între cele două mo-



**Figura 5.17:** Curbe de lumină teoretice. Stânga: curba de lumină pentru un elipsoid fără variații de albedo cu proporțiile axelor de 3:1. Dreapta: curba de lumină pentru un obiect sferic care are o singură zonă cu albedo diferit. În fiecare dintre grafice sunt reprezentate două perioade de rotație.

mente. Dacă primul minim avea loc la JD 2458882,4375 iar al doilea la 2458883,325, diferența era de 0,8875 zile. Acest lucru însemna că în cele două momente asteroidul s-a aflat la aceeași orientare, durata dintre momente fiind de 21,3 ore (0,885 zile x 24 ore). Astfel, perioada de rotație nu putea fi decât un submultiplu al acestei valori:

$$P = \frac{21,3}{N} \quad (5.21)$$

unde  $N$  este 1, 2, 3, etc.

Am aflat astfel că perioada de rotație poate fi 21,3 sau 10,65 sau 7,1 ore, sau de valoare mai mică. Desigur că în funcție de rapiditatea cu care scădea sau creștea strălucirea de la maxim la minim sau invers am putut exclude anumite perioade. De exemplu, în cazul de mai sus, dacă de la maxim la minim treceau trei ore am putut exclude perioade egale cu acea durată și chiar pe cea de 7,1 ore. Am putut astfel planifica iar după câteva nopți de observații avem certitudinea că perioada poate fi determinată din observațiile efectuate până în acel moment și am putut trece la observarea altui asteroid.

Determinarea precisă a perioadei de rotație se face folosind analiza Fourier pe datele existente. Practic se aplică următorul algoritm:

$$M(t, P) = \sum_{i=1}^n \left[ a_i \sin \left( \frac{2\pi t}{P} \right) + b_i \cos \left( \frac{2\pi t}{P} \right) \right] \quad (5.22)$$

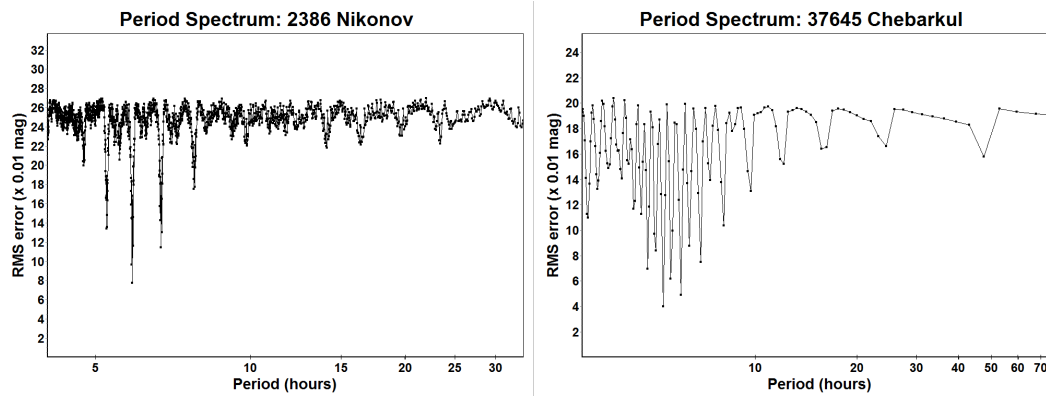
unde  $t$  este timpul,  $P$  perioada de rotație iar  $n$  este ordinul Fourier [240].

Cu această ecuație, cu datele observaționale și cu o perioadă inițială se găsesc prin metoda celor mai mici pătrate coeficienții  $a$  și  $b$ , cu care se fitează datele. Se calculează eroarea medie pătratică dintre datele observaționale și fitare, după care se recalculează incrementându-se perioada ( $P + \Delta P$ ). Se repetă determinarea coeficienților  $a$  și  $b$ , calculul erorii, se fitează datele, după care procesul se reia. Rezultatul va fi cel care fitează cel mai bine datele (cea mai mică eroare medie pătratică). Pentru majoritatea asteroizilor a doua armonică este suficientă pentru determinarea perioadei datorită curbei de lumină bi-modale.

Perioada inițială este aleasă în funcție de intervalul de timp în care s-au făcut observații, forma curbei brute de lumină și amplitudinea variației de strălucire. Alegerea perioadei inițiale și a pasului de incrementare este la alegerea autorului, în funcție de durata observațiilor și a formei curbei de lumină brute. La curbele de lumină cu durată mare am ales pași mai lungi, iar la cele cu durată scurtă pași mai mici. O soluție a fost alegerea a trei pași diferiți, de 0,01, 0,1 și o oră pentru a începe căutarea perioadei, iar intervalul de timp pentru care am căutat perioada a fost de aproximativ de două ori mai lung decât perioada estimată din observațiile brute.

Alegerea perioadei corecte se face prin precizia cu care se ajusta aceasta cu datele. În urma analizei Fourier se reprezintă spectrul perioadelor, un grafic pe care se reprezintă perioadele determinate și eroarea pătratică medie. Cea mai probabilă perioadă este cea care are cea mai mică eroare pătratică medie (Fig. 5.18).

Situația se complică atunci când amplitudinea curbei de lumină este mică și o a doua armonică nu poate ajusta datele. Pentru acest caz și pentru curbe de lumină complicate (variații de strălucire în timpul pantei ascendente sau descendente) se apelează la grade mai mari ale armonicilor. Cu cât forma obiectului este mai rotundă (adică amplitudinea variației de strălucire este mai mică) cu atât numărul armonicii crește, fiind favorizate armonicile 4 și 6 [89]. Chiar și în cazul asteroizilor observați la unghiuri de fază mari este nevoie de folosirea armonicilor mari din cauza curbelor



**Figura 5.18:** Două periodograme ale asteroizilor observați. Se poate remarca cea mai bună perioadă în amândouă cazurile (*RMS mic*), valoarea perioadei inițiale și pasul ales, din frecvența punctelor.

de lumină complexe datorate fenomenului de umbrire a suprafeței sau a formelor de relief.

## 5.6 Metoda de lucru

Voi sumariza aici metoda de lucru folosită la determinarea perioadelor de rotație ale asteroizilor

- am identificat asteroizii aflați în rezonanțe folosind trei baze de date: MPCORB, ASTORB și baza de date de familii de asteroizi; am identificat un număr de 4966 de obiecte;
- am studiat capacitățile tehnice ale telescoapelor și detectorilor pe care le aveam la dispoziție;
- am selectat asteroizii în funcție de strălucirea minimă pe care o puteam detecta ( $H > 14,5$ ) sau magnitudine limită  $< 17,3$ ; a selectat 167 de asteroizi;
- am planificat observațiile în funcție poziția asteroizilor față de Soare a.î. să pot observa timp de o lună un obiect;
- folosind experiența anterioară am ales programele utile în studiul propus;

- am început observațiile în luna septembrie 2018; le-am încheiat în decembrie 2019; am observat cu patru telescoape de la cinci observatoare astronomice, două aflate în Franța (Pic du Midi - misiuni de observații și Insulele Reunion - observații la distanță); în total am observat 29 de asteroizi, din care 6 aveau deja date în literatură;
- ori de câte ori am avut ocazia am observat în paralel asteroizi geointersectorii în cadrul campaniilor internaționale de observații sau pe cei aflați în condiții favorabile de vizibilitate.

În continuare voi prezenta rezultate obținute, împărțite pe categorii de obiecte: asteroizi geointersectorii, asteroizi din rezonanțe și asteroizi observați cu prilejul unor campanii internaționale de observații.





## 6. Rezultate obținute

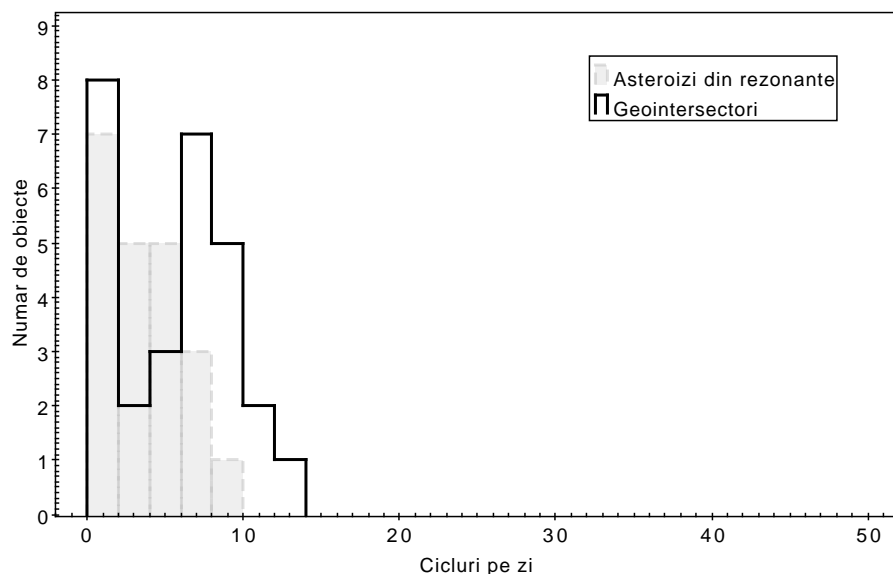
Înainte de a elabora rezultatele obținute, le voi prezenta succint în paragrafele următoare:

- pe parcursul doctoratului am observat 29 de asteroizi aflați în rezonanțele de mișcare medie cu Jupiter, prezentați în subcapitolul 6.1;
- am observat și am redus date pentru 31 de asteroizi geointersectori, surse de meteori și posibile ținte pentru misiuni spațiale, prezentați în subcapitolul 6.2;
- am observat un asteroid activ, prezentat în subcapitolul 6.3;
- am participat la trei campanii internaționale pentru asteroizii geointersectori 2012 TC4, (155140) 2005 UD și (66391) 1999 KW4, prezentate în subcapitolul 6.4;

Datele pentru asteroizii 2012 TC4, (155140) 2005 UD, (66391) 1999 KW4, (6478) Gault, (3122) Florence și 2018 GE3 au fost publicate pe parcursul doctoratului. Rezultatele obținute pentru celelalte obiecte sunt subiectul următoarelor articole planificate și în curs de redactare.

În cazul asteroizilor geointersectori, prezint curbe de lumină cu un grad mare de certitudine (determinate pe parcursul a mai multor rotații ale asteroidului) pentru 73% din asteroizii observați. Pentru 9% din asteroizi am observat timp de o singură rotație sau mai puțin, iar pentru 2% nu am putut determina o perioadă de rotație.

Pentru 17% din asteroizii aflați în rezonanțe nu am putut determina perioada de rotație, iar pentru 10% din ei am oferit doar o estimare a perioadei de rotație minime. Aceștia au fost observați în proporție de 100% pe parcursul a mai multor nopți, rezultatele incerte provenind de la variația mică de de strălucire.

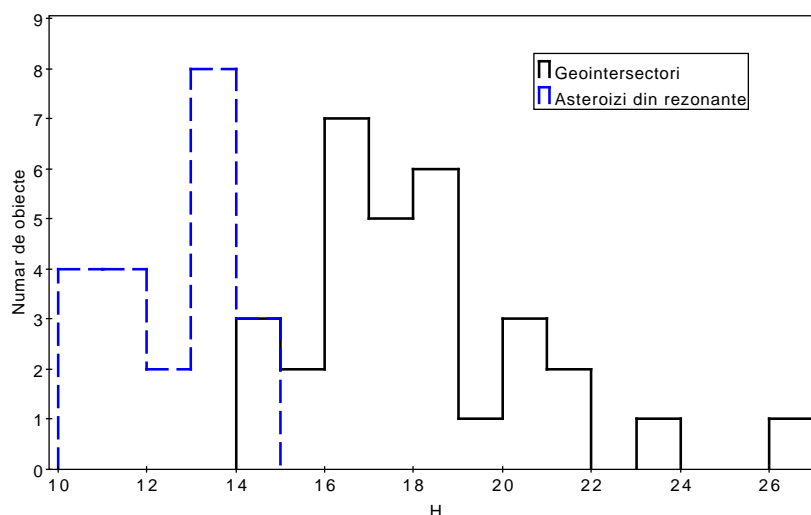


**Figura 6.1:** *Histogramă a perioadelor de rotație pentru asteroizii geointersectorii și cei aflați în rezonanțe, observați pe parcursul doctoratului.*

Histograma perioadelor de rotație pentru cele două tipuri de asteroizi (Fig. 6.1) indică o distribuție bimodală pentru asteroizii geointersectorii, în gama de 1-20 de cicluri de rotație de pe zi (1-24 de ore perioadă de rotație). La asteroizii din centura principală nu se observă această caracteristică, însă pentru amândouă cazurile numărul de obiecte nu este suficient de mare pentru o caracterizare solidă a populațiilor.

Distribuția în funcție de magnitudinea absolută (Fig. 6.2) a asteroizilor pentru care s-au determinat perioade de rotație, împărțită în cele două categorii de obiecte observate, asteroizi geointersectorii și asteroizi din rezonanțe, arată mărimea obiectelor observate. În cazul asteroizilor geointersectorii am putut observa și obiecte mai mici când s-au aflat la depărtare minimă de Pământ. Cel mai mare asteroid geointersector observat are magnitudinea absolută 14,4 (asteroidul 3122 Florence), iar cel mai mic are magnitudinea absolută 26,7 (asteroidul 2012 TC4, observat când a trecut la numai 270.000 km de Pământ). În cazul asteroizilor din rezonanță, magnitudinea absolută minimă este de 10 (asteroidul 541 Deborah) și cea maximă 14,96 (asteroidul 2002 GX14). Aceștia au fost observați la depărtări de sute de milioane de km de Pământ.

O comparație între numărul de asteroizi situați în rezonanțe pentru care s-au



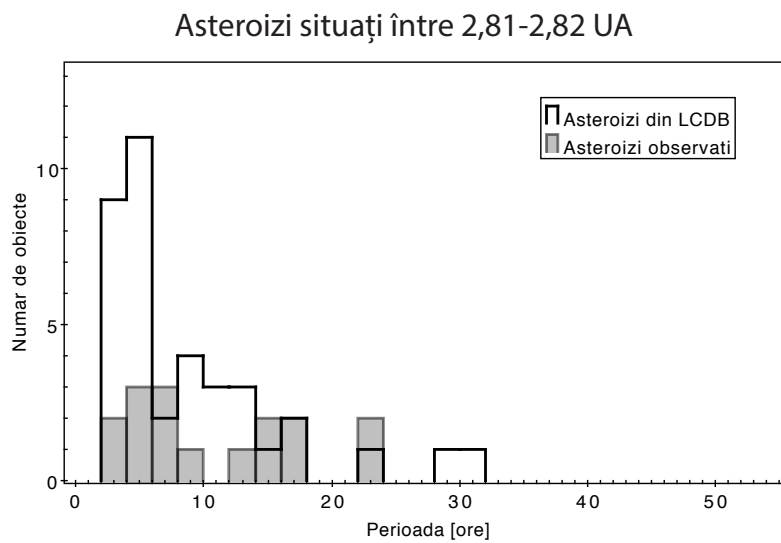
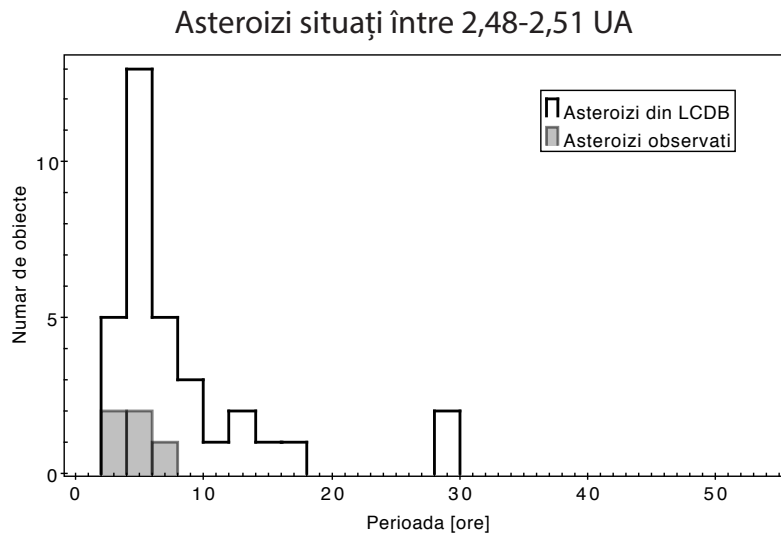
**Figura 6.2:** Distribuția în funcție de magnitudinea absolută ( $H$ ) a asteroizilor pentru care s-au determinat perioade de rotație, împărțită în cele două categorii de obiecte observate: asteroizi geointersectori și asteroizi din rezonanțe. Se observă faptul că în cazul asteroizilor geointersectori am observat și obiecte mai mici de 1 km ( $H \geq 16$ ).

determinat perioadele de rotație și cei observați în această teză de doctorat (Fig. 6.3) arată o creștere de cu 42% a numărului de obiecte observate în rezonanța de la 2,82 UA și una cu 15% în rezonanța de la 2,5 UA. Histograma perioadelor de rotație din cele două rezonanțe arată o distribuție bimodală pentru asteroizii observați în rezonanța de la 2,82 UA. În rezonanța de la 2,5 UA nu am observat mulți asteroizi pentru a mă putea pronunța asupra distribuției perioadelor.

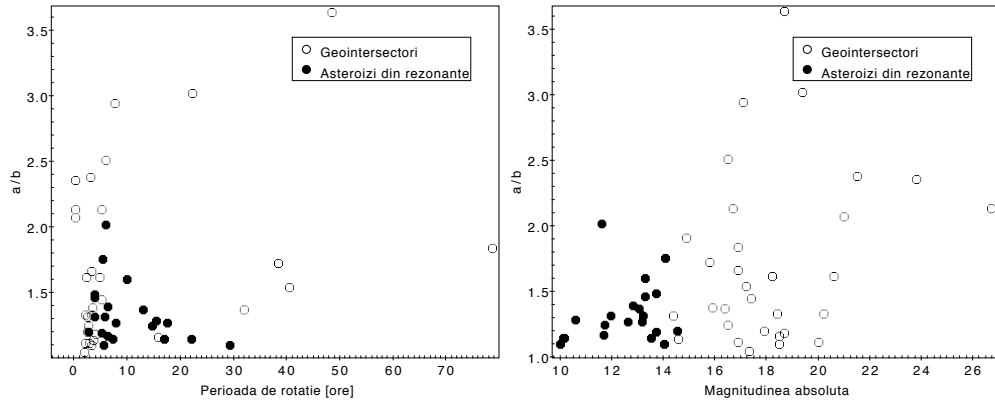
Pentru a afla dacă există o corelație între forma asteroizilor și mărimea/perioada de rotație a lor am realizat două grafice pe care am reprezentat raportul  $a/b$  - perioadă de rotație și raportul  $a/b$  - magnitudine absolută (Fig. 6.4).

Pentru asteroizii din rezonanțe nu am găsit rapoarte  $a/b$  mai mari de 2, media fiind de 1,3, ceea ce înseamnă o formă aproape rotundă. Din datele obținute reiese faptul că raportul tinde spre 1 cu creșterea perioadei însă pentru a se identifica este nevoie să se observe mai mulți asteroizi. În ceea ce privește mărimea (reprezentată prin magnitudinea absolută), nu se observă nici o corelație cu raportul  $a/b$ .

În cazul asteroizilor geointersectori se observă că pentru mărimi mici nu există rapoarte  $a/b$  mai mici de 2, ceea ce poate fi explicat prin faptul că asteroizii geointersectorii mici sunt fragmente ale asteroizilor mai mari, obiecte monolit. În privința



**Figura 6.3:** *Histogramă a rotațiilor asteroizilor din rezonanțele 2,5 (sus) și 2,82 (jos) UA. Au fost trecute perioadele de rotație care se găsesc în LCDB și cele determinate pe parcursul doctoratului.*



**Figura 6.4:** Forma asteroizilor în funcție de perioada de rotație (sus) și magnitudinea absolută (jos). Am reprezentat asteroizii observați, separați pe clase: geointersectorii, cerc alb, și din rezonanțe, cerc negru.

rotațiilor, din datele obținute reiese că rapoartele  $a/b$  sunt diverse la rotații rapide.

Reprezentarea asteroizilor pe o diagramă diametru-perioadă (Fig. 6.5) ne arată care dintre aceștia se rotesc peste bariera de rotație și care nu. Bariera de rotație, limita de rotație maximă pe care o poate avea un asteroid fără a se dezintegra din cauza forței centrifuge, se întâlnește la o perioadă de 2,2 ore (aproximativ 10,9 cicluri de rotație pe zi).

Din setul de date de asteroizi geointersectorii observați trec de această limită asteroizii 2012 TC4, 2018 GE3 și 2019 GT3, care au perioade foarte scurte, cu peste 50 de cicluri de rotație pe zi. Aceste obiecte au o formă neregulată, cu raporturi  $a/b$  mai mari de doi, ceea ce indică faptul că sunt fragmente. Un alt asteroid aflat la bariera de rotație este 2005 JF21, obiect care are însă raportul  $a/b$  de 1,04, adică este sferic. Asteroizii sferici cu rotație rapidă pot fi de tip conglomerat de fragmente cu o structură internă care rezistă forțelor induse de rotație prin forțe de coeziune internă ale particulelor din care sunt compuși.

Setul de date de asteroizi din rezonanță nu conține asteroizi cu rotație rapidă, cel mai rapid fiind (023354) 9547 P-L, cu o rotație de 8,4 cicluri pe zi. 37% dintre aceștia au rotații sub două cicluri pe zi, iar 79% de sub 5 cicluri pe zi.

Prezint în tabelele următoare rezultatele obținute pentru asteroizii din rezonanțe și pentru cei geointersectorii (tabelele 6.1 și 6.2).

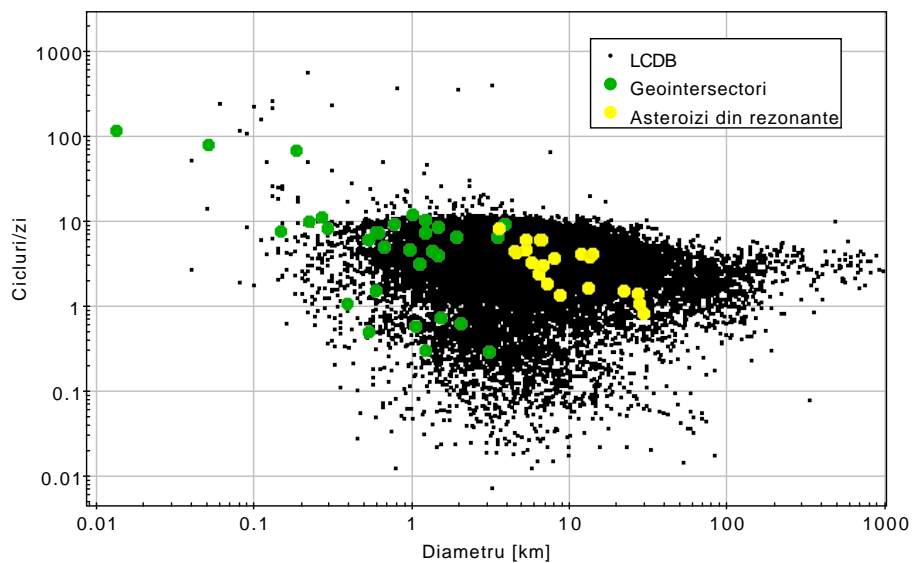
Asteroid	Telescop	Date obs.	PAB long [°]	PAB lat [°]	$\alpha$ [°]
(000541) Deborah	Bucharest	26.08-05.10.2018	25,5-27,8	6,6	18,2-7,0
(000716) Berkeley	Bucharest	24.06-21.07.2019	278,6-278,9	8,3-7,4	4,8-8,8
(000858) El Djezair	Bucharest	25.03-28.04.2019	179,6-180,8	10,5-9,4	5,1-15,7
(001428) Mombasa	Berthelot	03.01-19.02.2019	61,9-70,4	-15,2 - -10,5	17,3-22,0
(002244) Tesla	Berthelot	30.11-13.12.2018	27,2-29,6	-9,2 - -9,8	19,4-22,3
(002386) Nikonov	Berthelot	17.01-27.02.2019	131,5-130,5	9,1-8,3	6,2-9,5
(002868) Upupa	Berthelot	12.09-02.10.2019	0,0-0,7	-6,4 - -7,2	6,7-5,5
(002953) Vysheslavia	Berthelot	06.12.2018-19.02.2019	116,6-117,8	-0,8 - -1,0	15,3-12,2
(005565) Ukyounodaibu	Berthelot, Les Makes	09.12-23.12.2019	23,1-26,8	-12,1 - -11,8	27,0-25,7
(006206) Corradolamberti	Berthelot	01.04-19.09.2019	29,2-80,9	0,4 - -0,2	5,6-21,6
(009312) 1987 VE2	Berthelot	19.08.2019	325	7,8	3
(009631) Hubertreeves	Berthelot	07.02-16.02.2019	139,6	-1,5	1,0-3,0
(009984) Gregbryant	Berthelot	10.02-23.02.2019	146,7	-3,2	3,4-3,9
(010535) 1991 RB1	Berthelot	25.07-05.08.2019	309,8	7	5,5-3,9
(016344) 2370 T-3	Berthelot	09.08.2019	312,3	11,2	6,2
(018464) 1995 SK23	Berthelot	04.12.2019	66,4	8,4	4,9
(018925) 2000 PY25	Berthelot	25.10-27.10.2019	32,9	12,6	5,6
(023354) 9547 P-L	Pic du Midi	30.09.2019	165,6	-0,7	7,1
(027448) 2000 GQ6	Bucharest	30.03-31.03.2019	190,1	2,1	1
(028293) 1999 CN57	Bucharest	30.03-04.04.2019	195,7	1,8	3,5-1,3
(033705) 1999 LJ	Berthelot	20.08-04.09.2019	335,4	6,1	5,9-4,2
(034060) 2000 OZ45	Berthelot	11.08-19.10.2019	359,8-5,1	8,1-10,1	20,0-10,1
(035572) 1998 HW6	Berthelot	18.11-25.11.2019	58,5	-4,1	1,8
(037645) Chebarkul	Pic du Midi	30.09-02.10.2019	349,8	-4,4	10,8
(045444) 2000 AD180	Bucharest	22.08-07.09.2019	92,3-97,8	-4,3	18,1-20,4
(060002) 1999 TU5	Berthelot	17.11-02.12.2018	57,1	-1,7	1,6-5,9
(096736) 1999 NA48	Berthelot	08.08-11.08.2019	323,6	14	9,5
(105209) 2000 OU48	Berthelot	23.10-24.10.2019	31	3,8	2,4
(159666) 2002 GX14	Pic du Midi	03.10.2019	350	-2,4	12,2

**Tabelul 6.1:** Date observaționale: Telescop - telescopul folosit; Data-obs, intervalul de timp în care s-au realizat observațiile, în format zz/mm/aaaa; PAB - unghiul de poziție bisector al asteroidului, în longitudine și latitudine;  $\alpha$  - unghiul de fază la care s-a observat asteroidul.

Asteroid	Rot	Err	$\Delta$ mag	H	Diam real	Tip	Cicluri pe zi	a/b
(1566) Icarus	2,274	0,004	0,12	16,9	1,2	Apollo	10,6	1,1
(2059) Baboquivari	38,425	0,166	0,59	15,8	2,0	Amor	0,6	1,7
(3122) Florence	2,615	0,003	0,3	14,4	3,9	Amor	9,2	1,3
(3200) Phaethon	3,623	0,062	0,14	14,6	3,5	Apollo	6,6	1,1
(9400) 1994 TW1	82,6	0,100	0,7	14,9	3,1	Amor	0,3	1,9
(13553) Masaakikoyama	31,981	0,088	0,34	16,4	1,5	Amor	0,8	1,4
(35396) 1997 XF11	3,253	0,022	0,55	16,9	1,2	Apollo	7,4	1,7
(85989) 1999 JD6	7,665	0,010	1,17	17,1	1,1	Aten	3,1	2,9
(99907) 1989 VA	2,541	0,028	0,2	17,9	0,8	Aten	9,4	1,2
(138925) 2001 AU43	3,6	0,100	0,35	15,9	1,9	Amor	6,7	1,4
(140158) 2001 SX169	3,312	0,006	0,31	18,4	0,6	Apollo	7,2	1,3
(143404) 2003 BD44	78,6	0,100	0,66	16,9	1,2	Apollo	0,3	1,8
(144332) 2004 DV24	6,025	0,047	1	16,5	1,5	Apollo	4,0	2,5
(190166) 2005 UP156	40,5	0,100	0,47	17,2	1,1	Amor	0,6	1,5
(206378) 2003 RB	48,5	0,100	1,4	18,7	0,5	Apollo	0,5	3,6
(276033) 2002 AJ129	4	0,010	0,18	18,7	0,5	Apollo	6,0	1,2
(333888) 1998 ST4	5,317	0,006	0,82	16,7	1,3	Amor	4,5	2,1
(348400) 2005 JF21	2	0,029	0,05	17,3	1,0	Amor	12,0	1,0
(354030) 2001 RB18	15,863	0,251	0,16	18,5	0,6	Amor	1,5	1,2
(398188) Agni	22,3	0,000	1,2	19,4	0,4	Aten	1,1	3,0
(418849) 2008 WM64	2,407	0,006	0,52	20,6	0,2	Apollo	10,0	1,6
(444584) 2006 UK	2,119	0,228	0,31	20,2	0,3	Apollo	11,3	1,3
(455432) 2003 RP8	4,813	0,008	0,52	18,2	0,7	Amor	5,0	1,6
1999 AF4	3,238	0,351	0,1	18,5	0,6	Amor	7,4	1,1
2012 TC4	0,204	0,002	0,82	26,7	0,0	Apollo	117,6	2,1
2015 DP155	3,095	0,002	0,94	21,5	0,1	Amor	7,8	2,4
2015 TB145	2,91	0,040	0,12	20	0,3	Apollo	8,2	1,1
2018 GE3	0,304	0,001	0,93	23,8	0,1	Apollo	78,9	2,4
2019 GT3	0,355	0,006	0,79	21	0,2	Apollo	67,6	2,1

**Tabelul 6.2:** Tabel cu datele fizice ale asteroizilor din geointersectorii determinate din observațiile realizate pe perioada doctoratului. Asteroid - obiectul observat; Rot - perioada de rotație, în ore; Err - eroarea perioadei de rotație;  $\Delta$ mag - amplitudinea curbei de lumină; H - magnitudinea absolută; Diametru- diametrul estimat din valoarea H; Tip - clasa asteroidului; Cicluri pe zi - numărul de rotații pe 24 de ore; a/b - raportul dintre axele mari ale obiectului.





**Figura 6.5:** *Perioadele de rotație ale asteroizilor observați în funcție de diametru.*

În următoarele subcapitole vor prezenta rezultatele obținute, prin descrierea succintă a articolelor publicare sau o analiză detaliată a obiectelor observate.

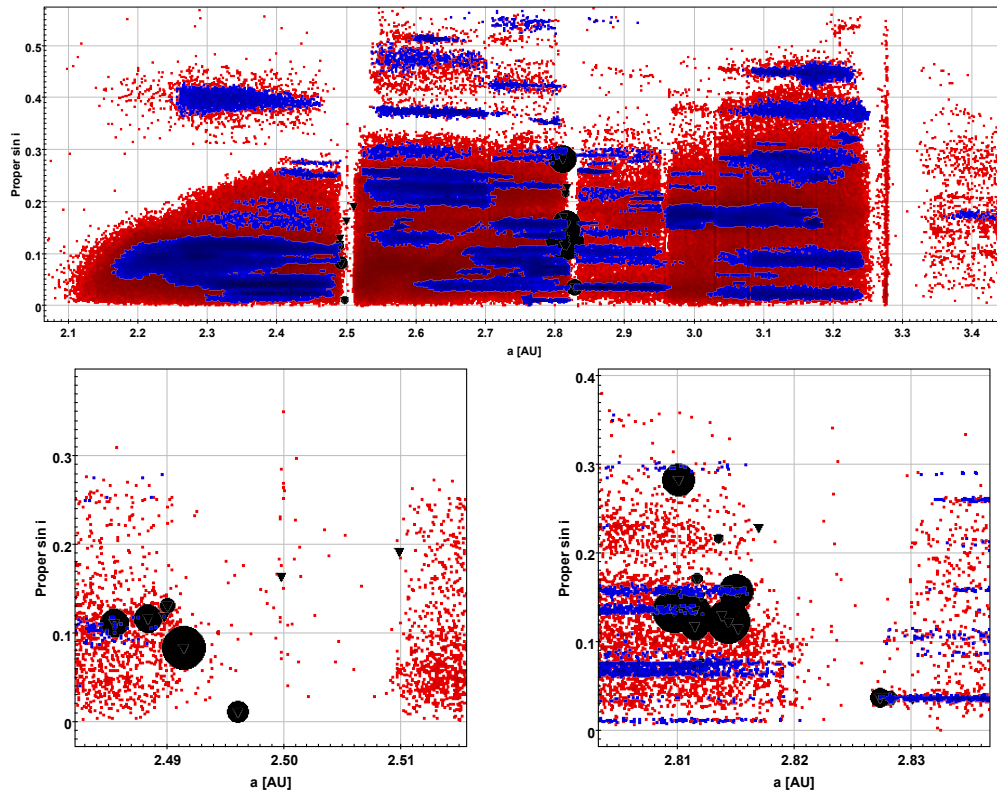
## 6.1 Asteroizi din rezonanțe și din familii

Pe parcursul doctoratului am investigat 29 de asteroizi situați în rezonanțe. Dintre aceștia, 23 de asteroizi nu aveau date despre perioada de rotație proprie (până la data de 20 ianuarie 2020). Rezultatele conțin date despre 10 asteroizi din patru familii (anume: Vesta, Gefion, Agnia și Koronis) situate la marginile interioare și exterioare rezonanțelor de la 2,5 și 2,86 UA. Rezultatele obținute se găsesc în Tabelul 6.6. Graficele cu perioadele de rotație determinate în această teză se găsesc în Fig. 6.11, Fig. 6.12 și Fig. 6.13.

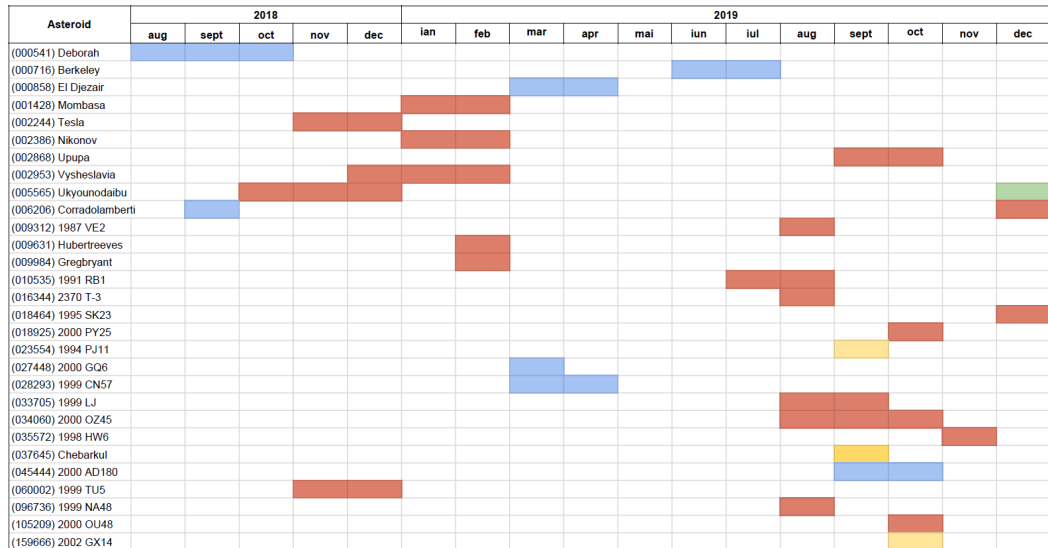
Pentru selecția obiectelor de observat am folosit baza de date Astdys. Am reprezentat grafic asteroizii în spațiul (proper a, proper sin i). Am selectat obiectele care se aflau la o depărtare mai mică de 0,02 UA de rezonanțele situate la 2,5 și 2,82 AU. Apoi, după ce am evaluat magnitudinea limită a instrumentelor astronomice aflate la dispoziția noastră, am ales ca limită asteroizii care au o magnitudine absolută mai mică de 14,5. În acest fel a rezultat o listă de 167 de obiecte. În intervalul august 2018 - decembrie 2019 am reușit să observăm 29 de asteroizi din lista de observații. Date despre observațiile făcute se găsesc în Tabelul 6.3.

Imaginile au fost înregistrate cu timpi de expunere între 60 și 180 de secunde, evitându-se expuneri mai lungi pentru a putea obține date și în cazul asteroizilor cu perioade mai scurte. Telescoapele au fost ghidate în mod sideral pentru că viteza aparentă a asteroizilor din centura principală este destul de mică. Imaginile au fost înregistrate în modul bin 2x2, adică la o scară a imaginii redusă la 50%, pentru a se maximiza semnalul luminos. Calibrarea obișnuită a imaginilor a fost realizată cu dark și flat, imagini care conțin informații despre zgomotul electronic și eventualele impurități din drumul optic.

Magnitudinile au fost reduse la unitate ( $5 * \log(rD)$ ) pentru distanțele geocentrice ( $r$ ) și heliocentrice ale asteroidului (magnitudine reduse). Curbele de lumină au fost realizate în raport cu media strălucirii stelelor de referință pentru a se elimina erorile aleatorii. Pentru fotometrie și analiză Fourier a perioadelor am folosit MPO Canopus V10, care include algoritmul FALC (Fourier Analysis for Lightcurves). În majoritatea cazurilor gradul Fourier care s-a potrivit datelor noastre a fost 2. Graficele din articol au pe axa timpului faza rotației, iar pe verticală magnitudinea



**Figura 6.6:** *Sus:* grafic al asteroizilor din centura principală, cu elemente orbitale proprii. Familiile de asteroizi sunt marcate cu albastru. *Jos-stânga:* grafic al rezonanței de la 2,5 UA. Cercurile mari reprezintă asteroizii pentru care am determinat perioade de rotație, mărimea cercului fiind dependentă de valoarea perioadei de rotație. Asteroizii pentru care nu s-a putut determina o perioadă de rotație sunt marcați cu triunghi negru. *Dreapta-jos:* grafic al rezonanței de la 2,82 UA.



**Figura 6.7:** *Diagrama Gantt a observațiilor. Cu roșu: observații de la Berthelot; cu albastru: observații de la București; cu verde: observații de la Le Makes; cu galben: observații de la Pic du Midi.*

redusă.

## Rezultate observaționale

Am observat 29 de asteroizi, dintre care 23 nu aveau, la data de 20 ianuarie 2020, date despre rotație în literatură. Rezultatele conțin date despre 10 asteroizi din patru familii (Vesta, Gefion, Agnia și Koronis) situate la marginile interioare și exterioare rezonanțelor de la 2,5 și 2,86 UA. Rezultatele obținute se găsesc în Tabelul 6.4. Graficele cu perioadele de rotație determinate în această teză se găsesc în Fig. 6.11, Fig. 6.12 și Fig. 6.13.

### Asteroizi la rezonanța de la 2,5 UA

Am observat 8 asteroizi aflat în preajma acestei rezonanțe. Unul este situat în mijlocul aceștia, unul la marginea exterioară iar restul la marginea interioară. Un asteroid aparține familiei Vesta. Perioadele de rotație din acest studiu sunt primele publicate pentru acești asteroizi.

(9984) Gregbryant a fost observat timp de 5 nopți, cu un total de 17,2 ore de observație. Am determinat o perioadă de rotație de  $7,86 \pm 0,02$  ore, cu o amplitudine

Asteroid	Telescop	Date obs.	PAB long [°]	PAB lat [°]	$\alpha$ [°]
(000541) Deborah	Bucharest	26.08-05.10.2018	25,5-27,8	6,6	18,2-7,0
(000716) Berkeley	Bucharest	24.06-21.07.2019	278,6-278,9	8,3-7,4	4,8-8,8
(000858) El Djezair	Bucharest	25.03-28.04.2019	179,6-180,8	10,5-9,4	5,1-15,7
(001428) Mombasa	Berthelot	03.01-19.02.2019	61,9-70,4	-15,2 - -10,5	17,3-22,0
(002244) Tesla	Berthelot	30.11-13.12.2018	27,2-29,6	-9,2 - -9,8	19,4-22,3
(002386) Nikonov	Berthelot	17.01-27.02.2019	131,5-130,5	9,1-8,3	6,2-9,5
(002868) Upupa	Berthelot	12.09-02.10.2019	0,0-0,7	-6,4 - -7,2	6,7-5,5
(002953) Vysheslavia	Berthelot	06.12.2018-19.02.2019	116,6-117,8	-0,8 - -1,0	15,3-12,2
(005565) Ukyounodaibu	Berthelot, Les Makes	09.12-23.12.2019	23,1-26,8	-12,1 - -11,8	27,0-25,7
(006206) Corradolamberti	Berthelot	01.04-19.09.2019	29,2-80,9	0,4 - -0,2	5,6-21,6
(009312) 1987 VE2	Berthelot	19.08.2019	325	7,8	3
(009631) Hubertreeves	Berthelot	07.02-16.02.2019	139,6	-1,5	1,0-3,0
(009984) Gregbryant	Berthelot	10.02-23.02.2019	146,7	-3,2	3,4-3,9
(010535) 1991 RB1	Berthelot	25.07-05.08.2019	309,8	7	5,5-3,9
(016344) 2370 T-3	Berthelot	09.08.2019	312,3	11,2	6,2
(018464) 1995 SK23	Berthelot	04.12.2019	66,4	8,4	4,9
(018925) 2000 PY25	Berthelot	25.10-27.10.2019	32,9	12,6	5,6
(023354) 9547 P-L	Pic du Midi	30.09.2019	165,6	-0,7	7,1
(027448) 2000 GQ6	Bucharest	30.03-31.03.2019	190,1	2,1	1
(028293) 1999 CN57	Bucharest	30.03-04.04.2019	195,7	1,8	3,5-1,3
(033705) 1999 LJ	Berthelot	20.08-04.09.2019	335,4	6,1	5,9-4,2
(034060) 2000 OZ45	Berthelot	11.08-19.10.2019	359,8-5,1	8,1-10,1	20,0-10,1
(035572) 1998 HW6	Berthelot	18.11-25.11.2019	58,5	-4,1	1,8
(037645) Chebarkul	Pic du Midi	30.09-02.10.2019	349,8	-4,4	10,8
(045444) 2000 AD180	Bucharest	22.08-07.09.2019	92,3-97,8	-4,3	18,1-20,4
(060002) 1999 TU5	Berthelot	17.11-02.12.2018	57,1	-1,7	1,6-5,9
(096736) 1999 NA48	Berthelot	08.08-11.08.2019	323,6	14	9,5
(105209) 2000 OU48	Berthelot	23.10-24.10.2019	31	3,8	2,4
(159666) 2002 GX14	Pic du Midi	03.10.2019	350	-2,4	12,2

**Tabelul 6.3:** Date pertinente pentru observațiile făcute. Telescop - telescopul folosit; Data-obs, intervalul de timp în care s-au realizat observațiile, în format zz/mm/aaaa; PAB - unghiul de poziție bisector al asteroidului, în longitudine și latitudine; &  $\alpha$  - unghiul de fază la care s-a observat asteroidul.

de 0,26 magnitudini, dar și faptul că maximele nu au aceeași strălucire. Acest asteroid nu face parte dintr-o familie și este situat la limita interioară a rezonanței.

(23354) 9547 P-L nu face parte dintr-o familie de asteroizi și se află la marginea interioară a rezonanței. A fost observat o noapte, timp în care am putut determina o perioadă de rotație de  $2,9 \pm 0,3$  ore, cu o amplitudinea de 0,2 magnitudini. În timpul scurt de observații am măsurat un minim și un maxim, dar nu am putut observa un ciclu de variație, ceea ce a dus la erori mari în determinarea perioadei.

(28293) 1999 CN57 a fost observat timp de două nopți, în care am determinat o perioadă de rotație  $3,99 \pm 0,02$  ore și o amplitudine a variației de strălucire de 0,43 magnitudini. Curba de lumină este bimodală, cu maxime și minime de străluciri egale. Acest obiect este situat la marginea interioară a rezonanței și nu face parte dintr-o familie de asteroizi.

(33705) 1999 LJ este situat la marginea interioară a rezonanței și are o magnitudine absolută de 13,9. Nu este identificat ca membru al vreunei familii de asteroizi, cu toate că se afla la margine exterioară a familiei Klio. Curba de lumină, compusă din trei nopți de observații, arată o amplitudine de 0,19 magnitudini și o perioadă de rotație de  $5,197 \pm 0,009$  ore, cu maxime de străluciri egale.

(37645) Chebarkul este situat la marginea exterioară a familiei Vesta și la marginea interioară a rezonanței. Are magnitudinea absolută de 14,4. A fost observat timp de 4 nopți de la Pic du Midi și Berthelot, timp în care s-a detectat o variație mare de strălucire, de 0,6 magnitudini. Perioada de rotație, determinată din observațiile de la Pic du Midi, este de  $5,34 \pm 0,07$  ore, iar curba de lumină este bimodală și simetrică.

(45444) 2000 AD180 a fost observat timp de 6 nopți dar nu s-a putut identifica nicio variație de strălucire. Pentru că strălucirea obiectului nu a variat de la o noapte la alta și luând în considerare semnalul luminos (SNR 10), putem estima că amplitudinea curbei de lumină este mai mică decât cea pe care o putem detecta noi pentru un obiect de strălucirea asteroidului și anume, mai mică de 0,1 magnitudini. Acest obiect este situat la marginea exterioară a rezonanței.

(96736) 1999 NA48 a fost observat timp de 3 nopți, cu un timp total de observații de 11 ore. Nu s-au observat variații de strălucire nici în cea mai lungă noapte de observație (de 4 ore). În acest caz, fie avem de-a face cu o perioadă lungă

de rotație, fie amplitudinea este mai mică de 0,1 magnitudini, așa cum putem detecta în mod normal din acest loc de observații. Acest asteroid se află în mijlocul rezonanței.

(159666) 2002 GX14 a fost observat de la Pic du Midi, pe parcursul a 4 ore, Am putut detecta o creștere în strălucire de 0,1 magnitudini, drept pentru care propunem o perioadă de rotație mai mare de 4 ore. Acest asteroid nu este membru al unei familii și se află la marginea interioară a rezonanței.

### **Asteroizi la rezonanță situată la 2,82 UA**

Am observat 21 de asteroizi la această rezonanță, 11 situați la marginea interioară și 10 la marginea exterioară a rezonanței. Pentru 15 dintre asteroizii observați nu am găsit referințe în literatură, drept pentru care parametrii determinați de noi sunt primii publicați pentru aceste obiecte. Nouă dintre asteroizi sunt membri ai unor familii, după cum urmează: 5 membri ai familiei Gefion, 1 membru al familiei Agnia și 3 membri ai familiei Koronis.

(716) Berkeley, un asteroid situat în același spațiu (a,i) ca membrii familiei Dora dar fără a fi membru, a fost observat timp de 8 nopți. În literatură [70] a fost publicată o perioadă de rotație de 15,55 ore, iar datele noastre confirmă acest rezultat. Am determinat o perioadă de rotație de  $15,53 \pm 0,04$  ore și o amplitudine de 0,27 magnitudini, însă unul din minime nu a fost observat în întregime.

(541) Deborah este un asteroid mare ( $H = 10,1$ ) situat la marginea interioară a rezonanței. A fost observat timp de 7 nopți dar nu a putut fi detectată o variație de strălucire. Un rezultat anterior [1] arată o perioadă de rotație de  $23,37 \pm 0,05$  ore și o amplitudine de 0,1 magnitudini, prea mică pentru a putea fi detectată din locul de observații.

(858) El Djezair a fost observat timp de 9 nopți, cu un timp total de observații de 39 de ore. Curba de lumină arată o perioadă de rotație de  $22,02 \pm 0,07$  ore și o variație de strălucire de 0,15 magnitudini. Observațiile anterioare [278] sunt în bună concordanță cu rezultatele noastre, curba de lumină obținută de noi acoperind mai bine variația de strălucire a asteroidului. (858) El Djezair este situat la marginea interioară a rezonanței și nu este membru într-o familie de asteroizi.

(1428) Mombasa este un asteroid mare ( $H = 10,3$ ) care a fost observat timp de 8

noapți. Am determinat o perioadă de rotație de  $17,000 \pm 0,032$  și o amplitudine mică de doar 0,15 magnitudini, un rezultat care confirmă datele existente în literatură [90]. Asteroidul este situat la marginea interioară a rezonanței.

(2244) Tesla este un asteroid situat la marginea interioară a rezonanței, observat timp de 5 noapți. Am determinat o perioadă de rotație de  $14,66 \pm 0,03$  ore dintr-o curbă de lumină fragmentată, unul din maxime nefiind observat. Amplitudinea curbei de lumină este de 0,24 magnitudini, iar minimele nu au străluciri egale.

(2386) Nikonov este un membru al familiei Gefion, situat la marginea exterioară a familiei de asteroizi și la marginea interioară a rezonanței. A fost observat timp de 7 noapți, cu un timp total de observații de 29,5 ore. Am determinat o perioadă de rotație de  $5,896 \pm 0,004$  ore și o amplitudine de 0,76 magnitudini, un rezultat care confirmă datele din literatură [55], bazat pe fotometrie GAIA DR2.

(2868) Upupa este situată la marginea interioară a rezonanței și a fost observat timp de 4 noapți, cu un total de 12,1 ore. Perioada de rotație determinată este de  $6,4 \pm 0,1$  ore, iar amplitudinea de 0,36 magnitudini. Curba de lumină este bimodală și simetrică.

(2953) Vysheslavia este un membru al familiei Koronis, situat la marginea interioară a familiei și la cea exterioară a rezonanței. A fost observat timp de 8 noapți, cu un timp total de observație de 24 de ore. Am determinat o perioadă de rotație de  $6,295 \pm 0,003$  ore și o amplitudine de 0,17 magnitudini, rezultat care îl confirmă pe singurul aflat în literatură [259].

(5565) Ukyounodaibu a fost observat de la observatoarele din București și Le Makes (Insulele Reunion), cu un timp total de observații de 22 de ore. Perioada de rotație determinată este de  $5,7509 \pm 0,0081$  ore, iar amplitudinea de 0,3 magnitudini. Curba de lumină a fost fitată cu o funcție Fourier de gradul 3. Asteroidul nu este membru al unei familii și se află la marginea interioară a rezonanței.

(6206) Corradolamberti este membru al familiei Koronis. A fost observat la două epoci, în septembrie 2018 și decembrie 2019, timp de 8 noapți. Nu am putut determina variabilitate în limita a 0,3 magnitudini (limita de variabilitate de strălucire pe care o putem atinge la semnalul pe care îl avea asteroidul) nici chiar în cea mai lungă noapte de observații (4,5 ore).

(9312) 1987 VE2 a fost observat pentru o singură noapte, timp de 3 ore. Nu



am putut determina o perioadă și nici o variație de strălucire sub pragul de 0,1 magnitudini, limita de precizie a locului de observație. Asteroidul este situat la marginea interioară a rezonanței și este membru al familiei Gefion.

(9631) Hubertreeves este membru al familiei Koronis și este situat la marginea exterioară a rezonanței. A fost observat timp de 5 nopți. Perioada de rotație este de  $9,99 \pm 0,06$  ore, iar amplitudinea de 0,51 magnitudini. Curba de lumină este bimodală și are un minim mai puțin strălucitor decât celălalt.

(10535) 1991 RB1 a fost observat timp de 5 nopți și a fost evident din observații că perioada de rotație era mai lungă decât cea mai lungă noapte de observații. Curba de lumină prezintă o periodicitate de  $12,94 \pm 0,08$  ore și o amplitudine de 0,34 magnitudini. Asteroidul nu este membru al unei familii și se află la marginea interioară a rezonanței.

(16344) 2370 T-3 este un membru al familiei Gefion, situat la marginea exterioară a familiei. A fost observat timp de 3 nopți. Cea mai lungă noapte de observații a avut 4,8 ore, timp în care am detectat un minim al variației de strălucire. Putem afirma că perioada de rotație este mai mare de 5 ore și amplitudinea de aproximativ 0,2 magnitudini.

(18464) 1995 SK23 este membru al familiei Gefion. A fost observat doar o noapte, timp de 6 ore. Am detectat o variație de strălucire de 0,3 magnitudini dar pentru că nu am putut observa o rotație completă nu am determinat perioada de rotație. Totuși, ținând cont de durata observațiilor, putem estima că perioada de rotație este mai lungă de 6 ore.

(18925) 2000 PY25 este situat la marginea interioară a rezonanței dar nu este membru al unei familii. A fost observat timp de 3 nopți, cu un timp total de observații de 18,2 ore. Curba de lumină este asimetrică, având un maximul cu durata mai mare decât celălalt. Perioada de rotație este de  $3,98 \pm 0,03$  ore, iar amplitudinea de 0,3 magnitudini.

(27448) 2000 GQ6 este situat la marginea exterioară a rezonanței, în același spațiu (a, sin i) ca și membrii familiei Koronis dar nu este membru. A fost observat de-a lungul a 2 nopți, timp de 7,5 ore. Am determinat o perioadă de rotație de  $3,91 \pm 0,07$  ore și o amplitudine de 0,41 magnitudini. Curba de lumină este bimodală și asimetrică.

(34060) 2000 OZ45 este membru al familiei Gefion și este localizat la marginea exterioară a familiei. Cele 7 nopți de observații arată o curbă de lumină simetrică și bimodală, cu o perioadă de rotație de  $17,64 \pm 0,02$  ore și o amplitudine de 0,26 magnitudini. Unul din maxime nu a fost observat în totalitate.

(35572) 1998 HW6, situat la marginea interioară a rezonanței, nu a prezentat variație de strălucire în limita a 0,1 magnitudini. A fost observat timp de 4 nopți, cea mai lungă sesiune de observații având durată de 5,3 ore.

(60002) 1999 TU5 este membru al familiei Agnia, situat la marginea interioară a rezonanței. Datele de observații, luate pe parcursul a 3 nopți, arată o curbă de lumină bimodală, asimetrică, cu o perioadă de rotație de  $7,315 \pm 0,017$  ore și o amplitudine de 0,15 magnitudini.

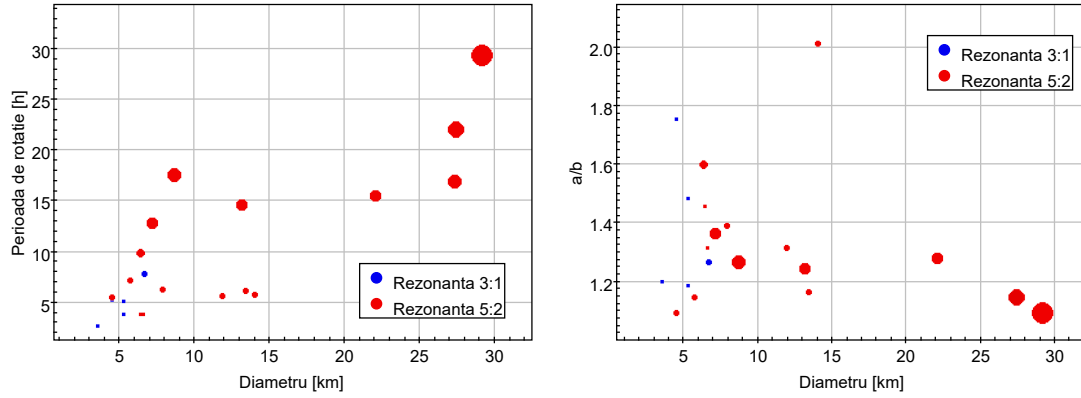
(105209) 2000 OU48 a fost observat pentru o noapte, timp de 6 ore, perioadă în care s-a putut observa o rotație completă. Perioada de rotație este de  $5,6 \pm 0,5$  ore și amplitudinea de 0,1 magnitudini. Acest asteroid este situat la marginea interioară a rezonanței, în același spațiu (a, sin i) ca familia Dora, dar nu este considerat membru al acestei familii.

### 6.1.1 Concluzii

O comparație între numărul de asteroizi situați în rezonanțe pentru care s-au determinat perioadele de rotație și cei observați în această teză de doctorat (Fig. 6.3) arată o creștere de cu 42% a numărului de obiecte observate în rezonanța de la 2,82 UA și una cu 15% în rezonanța de la 2,5 UA. Histograma perioadelor de rotație din cele două rezonanțe arată o distribuție bimodală pentru asteroizii observați în rezonanța de la 2,82 UA. În rezonanța de la 2,5 UA nu am observat mulți asteroizi pentru a mă putea pronunța asupra distribuției perioadelor.

Pentru a afla dacă există o corelație între forma asteroizilor și mărimea/perioada de rotație a lor am realizat două grafice pe care am reprezentat raportul a/b - perioadă de rotație și raportul a/b - magnitudinea absolută (Fig. 6.8).

Pentru asteroizii din rezonanțe nu am găsit rapoarte a/b mai mari de 2, media fiind de 1,3, ceea ce înseamnă o formă aproape rotundă. Practic, 57% dintre asteroizi sunt aproape sferici, cu rapoarte a/b mai mici de 1,3, iar 99% dintre aceștia au

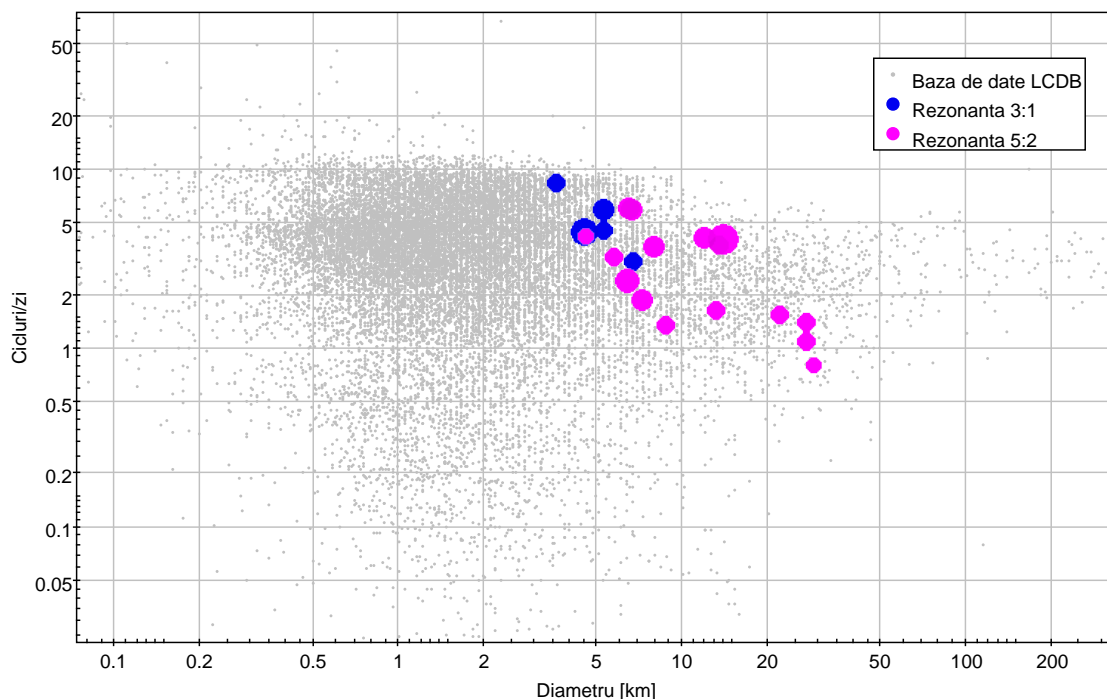


**Figura 6.8:** *Stânga: perioada de rotație ca funcție de diametrul asteroizilor din rezonanțe observați. Mărimea simbolului este proporțională cu durata perioadei de rotație. Dreapta: raportul dintre axe mari ale asteroidului și diametru. Mărimea simbolului este proporțională cu durata perioadei de rotație.*

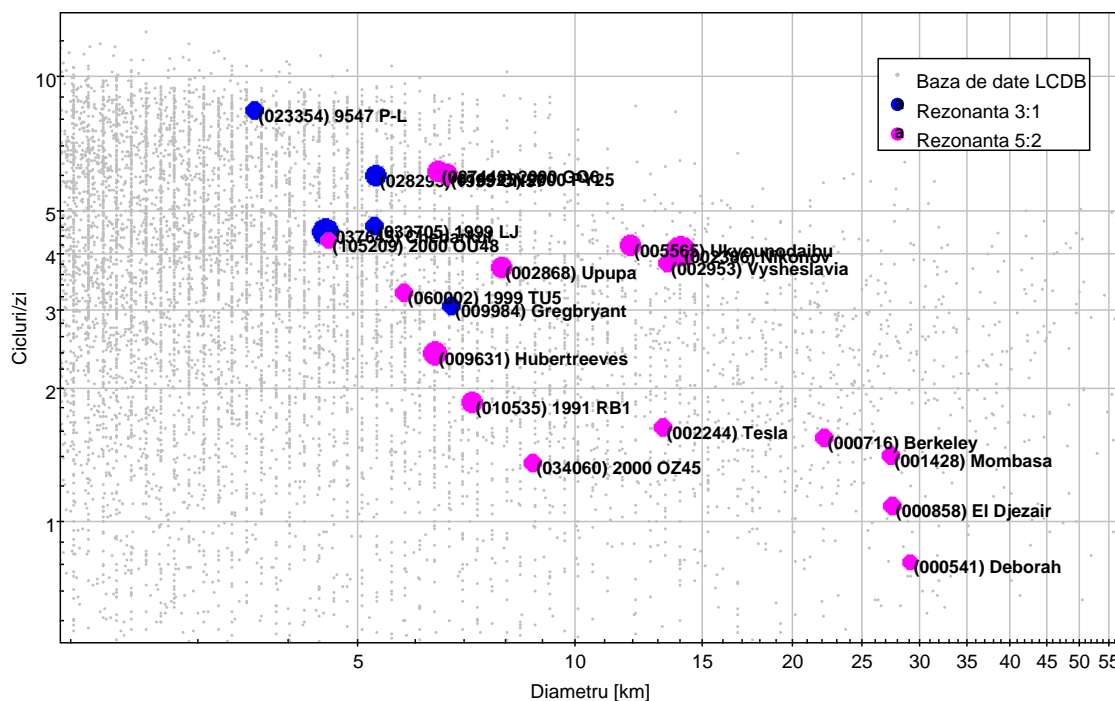
perioade mai lungi de 5 ore. Din datele obținute se vede faptul că raportul  $a/b$  tinde spre 1 cu creșterea perioadei, însă pentru determinarea unei corelații mai precise este nevoie să se observe mai mulți asteroizi. În ceea ce privește mărimea (reprezentată prin magnitudinea absolută), nu se observă nici o corelație cu raportul  $a/b$ .

Pentru asteroizii din rezonanța 3:1 nu am găsit perioade de rotație mai lungi 8 ore, însă eșantionul de obiecte observate este prea mic pentru a se putea determina o regulă. Tot în această rezonanță se află și asteroidul (023354) 9547 P-L, un obiect cu rotație rapidă (2,8 ore) aflat la limita de rotație pentru diametrul său. Forma aproape sferică indică faptul că obiectul ar fi de tip conglomerat de fragmente în care forțele dintre particule sunt mai puternice decât forța centrifugă.

Amprenta structurii interne în cadrul acestor obiecte se vede foarte ușor la obiectele cu raport mic între axele  $a/b$  și rotații lungi. Dintre toate obiectele observate se remarcă (716) Berkeley, (541) Deborah, (858) El Djezair și (1428) Mombasa, care au diametru mai mari de 20 km, perioade mai lungi de 15 ore și rapoarte  $a/b$  mai mici de 1,3. Pot estima că în cadrul obiectelor observate, luând în considerare proprietățile fizice enumerate mai sus, 86% se clasifică drept asteroizi de tip conglomerat de fragmente (Fig. 6.10).



**Figura 6.9:** *Perioade de rotație și diametrele asteroizilor pentru care s-au determinat perioade de rotație. Mărimea simbolurilor este proporțională raportul a/b.*



**Figura 6.10:** *Perioade de rotație și diametrele asteroizilor pentru care s-au determinat perioade de rotație. Mărimea simbolurilor este proporțională cu raportul a/b.*

Asteroid	H	Rot. per. [ore]	Rot. per. eroare [ore]	$\Delta M$ [mag]	Rezonanță și familie
(000541) Deborah	10,01	-	-	0,1	5:2
(000716) Berkeley	10,61	15,53	0,04	0,27	5:2
(000858) El Djezair	10,14	22,02	0,07	0,15	5:2
(001428) Mombasa	10,15	17,000	0,032	0,15	5:2
(002244) Tesla	11,73	14,66	0,03	0,24	5:2
(002386) Nikonov	11,6	5,896	0,004	0,76	5:2 Gefion
(002868) Upupa	12,84	6,4	0,1	0,36	5:2
(002953) Vysheslavia	11,69	6,295	0,003	0,17	5:2 Koronis
(005565) Ukyounodaibu	11,95	5,7509	0,0081	0,3	5:2
(006206) Corradolamberti	12,92	-	-	<0,3	5:2 Koronis
(009312) 1987 VE2	12,64	-	-	<0,1	5:2 Gefion
(009631) Hubertreeves	13,3	9,99	0,06	0,51	5:2 Koronis
(009984) Gregbryant	13,19	7,86	0,02	0,26	3:1
(010535) 1991 RB1	13,05	12,94	0,08	0,34	5:2
(016344) 2370 T-3	13,77	>5	-	0,2	5:2 Gefion
(018464) 1995 SK23	14,07	>6	-	0,3	5:2 Gefion
(018925) 2000 PY25	13,22	3,98	0,03	0,3	5:2
(023354) 9547 P-L	14,56	2,89	0,3	0,2	3:1
(027448) 2000 GQ6	13,28	3,91	0,07	0,41	5:2
(028293) 1999 CN57	13,71	3,99	0,02	0,43	3:1
(033705) 1999 LJ	13,72	5,197	0,009	0,19	3:1
(034060) 2000 OZ45	12,63	17,64	0,02	0,26	5:2 Gefion
(035572) 1998 HW6	12,94	-	-	<0,1	5:2
(037645) Chebarkul	14,06	5,34	0,07	0,61	3:1 Vesta
(045444) 2000 AD180	13,99	-	-	<0,2	3:1
(060002) 1999 TU5	13,52	7,315	0,017	0,15	5:2 Agnia
(096736) 1999 NA48	14,41	-	-	<0,1	3:1
(105209) 2000 OU48	14,04	5,6	0,5	0,1	5:2
(159666) 2002 GX14	14,96	>5	-	<0,1	3:1

**Tabelul 6.4:** Caracteristicile observate ale obiectelor descrise mai sus. Rot. per. este perioada de rotație în ore, însoțită de eroare (Rot. per. eroare);  $\Delta M$  este amplitudinea variației; sunt redată și informații despre rezonanța din care fac parte dar și despre apartenența la familii de asteroizi.

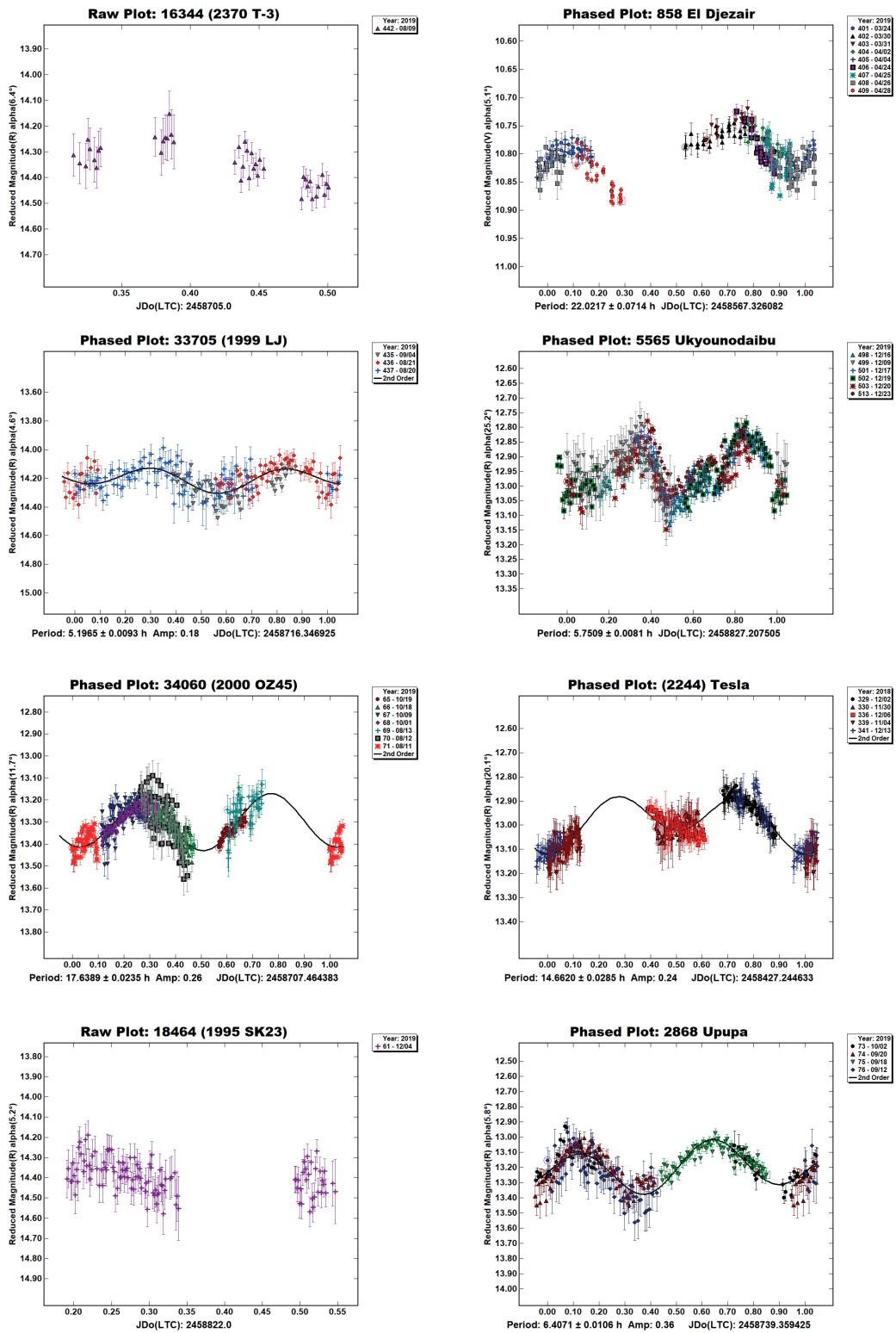
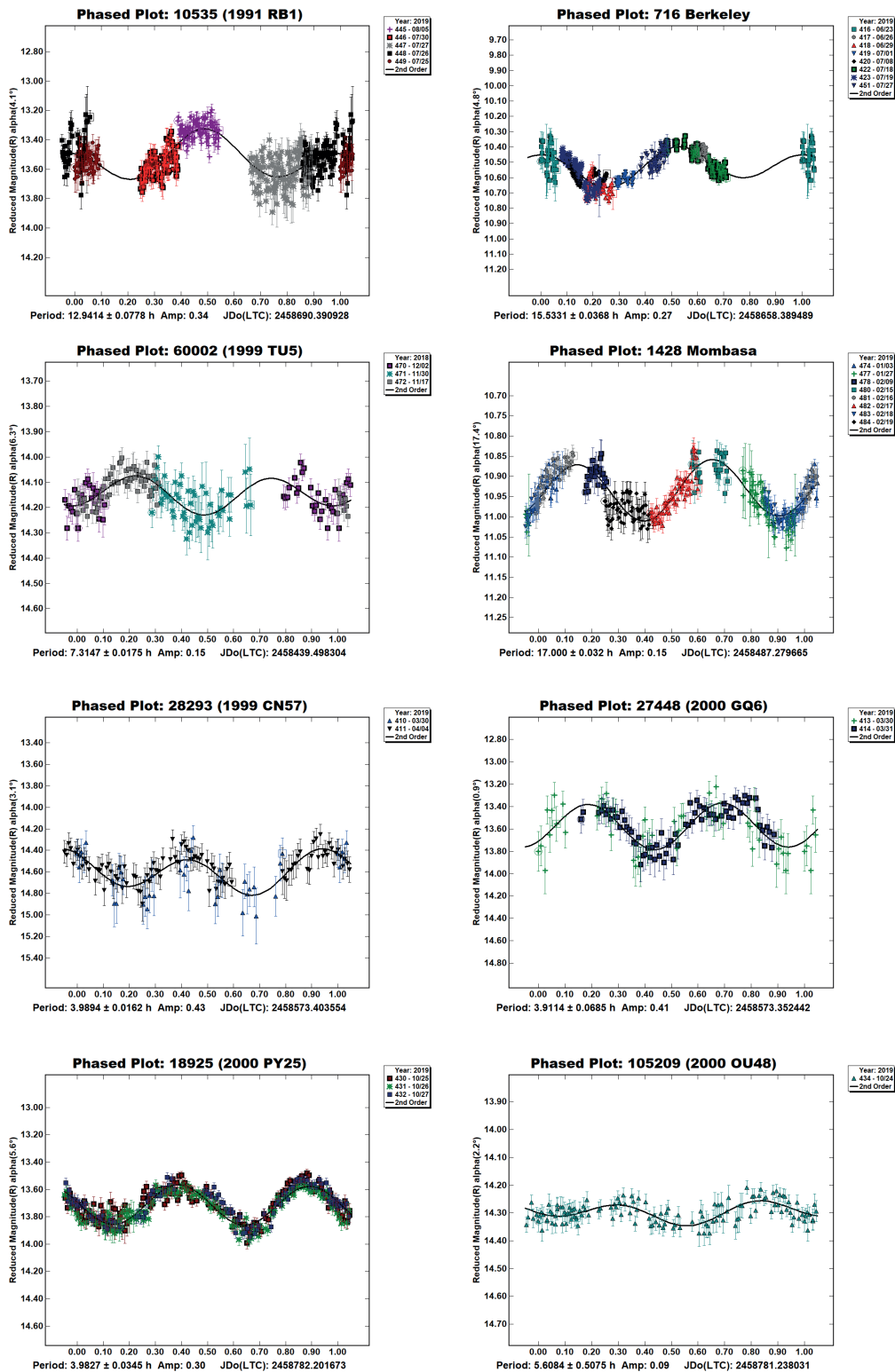


Figura 6.11: Curbe de lumină ale asteroizilor din rezonante observați în decursul acestei teze.



**Figura 6.12:** Curbe de lumină ale asteroizilor din rezonanțe, observați în decursul acestei teze (continuare).

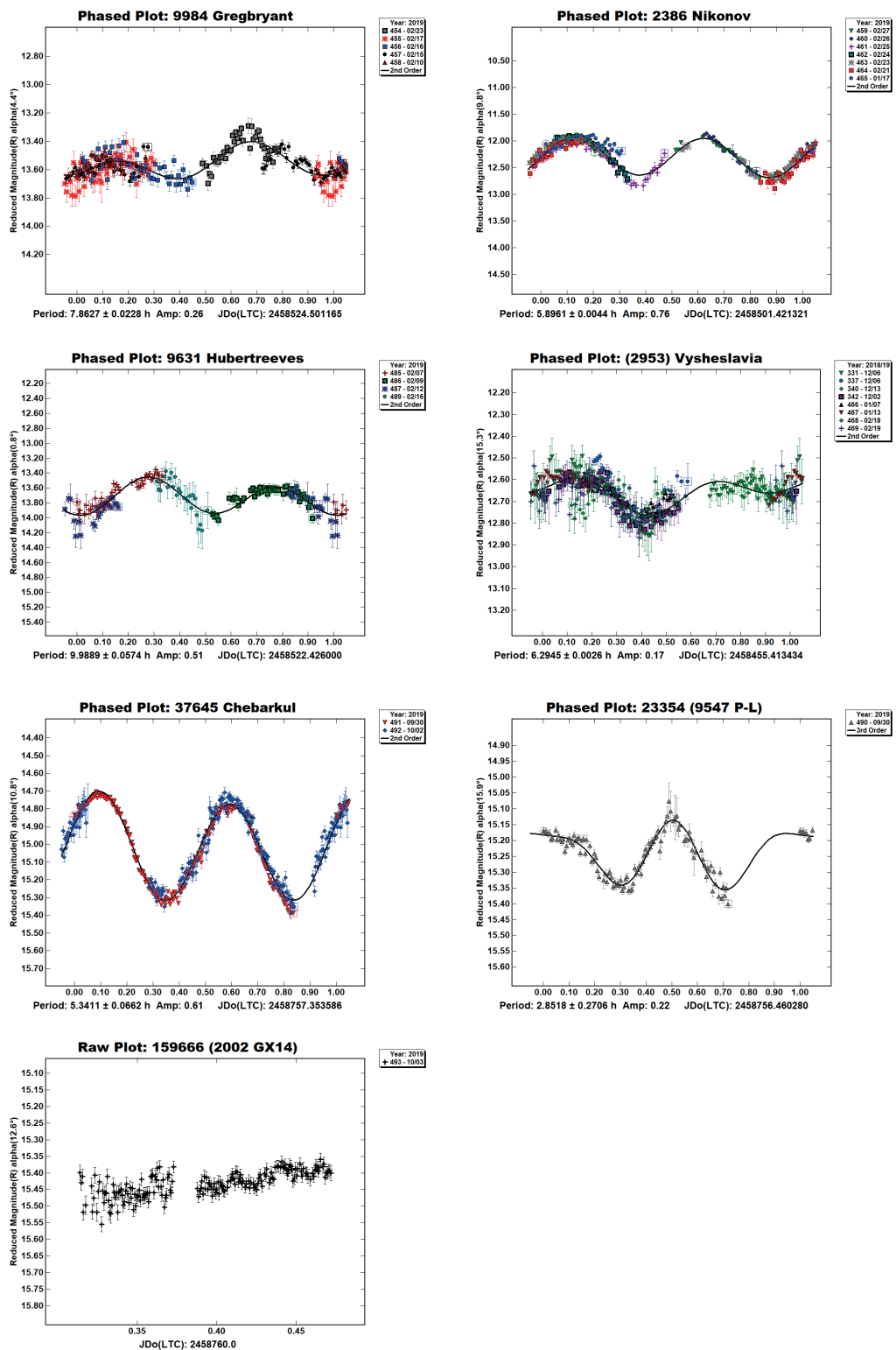


Figura 6.13: Curbe de lumină ale asteroizilor din rezonanțe observați în decursul acestei teze (continuare).



## 6.2 Proprietăți fotometrice ale asteroizilor geointersectori

În cadrul tezei am determinat perioada de rotație pentru asteroizi geointersectori, cu scopul de a determina, confirma sau infirma rezultatele anterioare. Interesul pentru asteroizii cu perioade cunoscute este justificat pentru că rotația se poate modifica în urma efectelor non-gravitaționale sau poate fi diferită din simplul fapt că unghiul de observare este diferit la apariții diferite. Uneori noi date pot îmbunătăți sau modifica complet valoarea perioadei de rotație, chiar și pentru asteroizii cu mai multe date de observație [252].

În această secțiune prezint date fotometrice pentru 31 de asteroizi geointersectori în cadrul unui studiu observațional de doi ani realizat la Institutul Astronomic al Academiei Române. Prezint date pentru 5 asteroizi geointersectori care sunt surse posibile pentru curenți de meteori și 17 asteroizi cu  $\Delta v$  mai mică de  $12 \text{ km/s}$ . Pentru unele obiecte am putut doar estima o perioadă de rotație, din cauza observațiilor puține, variației mici de strălucire sau a perioadelor foarte lungi de rotație.

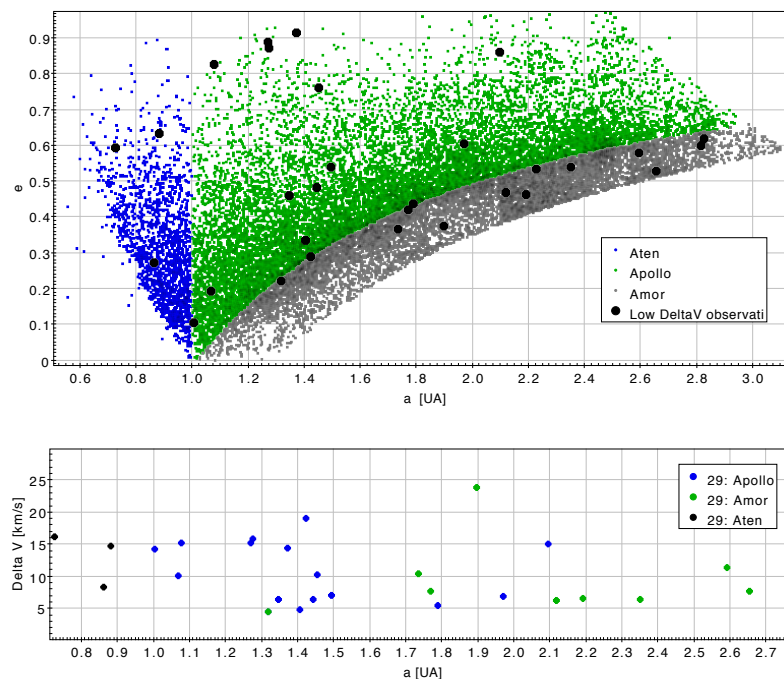
Legătura directă între asteroizii geointersectori și curenții de meteori [53] [110] este investigată prin metode prin metode de similitudine orbită cu criterii multiple, cu rezultate notabile, curenții de meteori Quadrantide, Geminide și Tauride fiind recunoscute ca având un asteroid sau mai mulți ca sursă. Rezultatul acestor studii este o listă de obiecte și unul dintre obiectivele studiului nostru este acela de a determina perioada de rotație a unora dintre asteroizi care pot fi o sursă de meteori. Prezint curbe de lumină pentru cinci astfel de obiecte: (1566) Icarus, (3200) Phaethon, (155140) 2005 UD, (190166) 2005 UP156 și (503941) 2003 UV11.

O categorie specială de asteroizi geointersectori este reprezentată de aceia care sunt ținte pentru misiunile spațiale. Studiarea in-situ ale suprafețelor unui asteroid oferă informații și indicii despre formarea și evoluția sistemului nostru solar și permite studiul de material pristin. Deoarece operațiunile navelor spațiale depind de proprietățile fizice ale obiectului, cunoașterea în avans ale unor proprietăți permite o mai bună planificare a studiului de pe orbită. Criteriul de selectare al unui asteroid de interes valoarea cât mai mică a parametrului  $\Delta v$ . Modificarea vitezei

unei sonde spațiale dintre orbita terestră și orbita asteroidului -  $\Delta v$  - este o măsură a cantității de combustibil necesară pentru a deplasa nava spațială între cele două corpuri. Începând cu ianuarie 2019, 9% dintre asteroizii geointersectori descoperiți au  $\Delta v < 5$  km/s, 30% au  $\Delta v < 6$  km/s și 55% au  $\Delta v < 7$  km/s.

În eșantionul de 31 de asteroizi observați, distribuția în funcție de  $\Delta v$  este următoarea: un obiect cu  $\Delta v < 5$  km/s; două cu  $5 < \Delta v < 6$  km/s; șase obiecte cu  $6 < \Delta v < 7$  km/s; șapte obiecte cu  $7 < \Delta v < 12$  km/s.

Limita de 12 km/s este o limită pentru o utilizare eficientă a combustibilului în vederea studierii unui asteroid, limită care ia în considerare ferestrele de lansare și durata misiunii pentru misiunile robotice posibile către asteroizi. Luând în considerare dimensiunea estimată a asteroidului, împreună cu valoarea perioadei de rotație, se pot extrage informații despre structura internă a asteroidului.



**Figura 6.14:** *Sus: Asteroizii observați sunt reprezentați cu cercuri mari în spațiul (a, e). Pe fundal sunt reprezentați asteroizii geointersectori descoperiți. Cu gri sunt asteroizii Aten, cu verde asteroizii Apollo și cu albastru asteroizii Amor. Jos: Asteroizii observați în funcție de semi-axa mare a orbitei și a vitezei  $\Delta V$ . Culorile sunt aceleași ca mai sus.*

În Fig. 6.14 sunt reprezentați asteroizii geointersectori observați în spațiul (a, e), împreună cu valorile  $\Delta v$  în funcție de tipul orbital.

Obiectele au fost observate de-a lungul unei perioade de trei ani și alese în funcție de capacitățile sistemului de observații. Am ales asteroizi geointersectori la apariții favorabile și situați la depărtări mici de Pământ. Căutând obiecte strălucitoare pentru a maximiza raportul semnal/zgomot (SNR) în imagini. Au fost efectuate observații cu două telescoape ale Institutului Astronomic al Academiei Române din București, România: un telescop de 0,5 m și unul 0,4 m în diametru.

Lucrarea prezintă curbe de lumină și perioade de rotație pentru 31 de asteroizi geointersectori, estimări minime pentru perioade și amplitudini pentru două obiecte și curbe de lumină fără variații (și nici estimări pentru perioade) pentru un asteroid. Erorile complete și alte date observaționale pertinente sunt disponibile în Tabelul 1.

Șase obiecte se află pe lista de asteroizi geointersectori care pot fi o sursă de curenți de meteori și 20 au  $\Delta v$  mai mic de 12 km/s. Conform clasei dinamice, 39% din asteroizii observați sunt de tip Amor, 9% sunt Aten și 52% sunt de tip Apollo. 589% din asteroizii observați sunt clasificați și ca PHA.

În unele cazuri nu putem furniza estimări și erori ale perioadele de rotație. Pentru unele obiecte prezintă curbe de lumină fără variații aparente de luminositate și nici o estimare a periodicității. Există două motive fizice pentru această situație: obiectele sunt aproape sferice sau axa de rotație este de-a lungul liniei de vedere. Pentru obiectele mici, natura sferică este discutabilă și este de așteptat ca acestea să prezinte o amplitudine mare a variației luminozității, dar pentru obiecte mari este posibilă o curbă de lumină plată. O altă explicație pentru o curbă de lumină fără variație ar fi numărul scăzut de date observaționale, deoarece în cazul unei perioade lungi de rotație sunt necesare multe nopți de observații.

### **Asteroizi geointersectori surse de curenți de meteori**

În această secțiune descriem asteroizi care sunt o sursă posibilă de curenți de meteori. Pentru aceste obiecte am determinat perioade de rotație și erorile lor, data de minim (ToM), amplitudinea variației luminozității și gradul curbei Fourier.

(1566) Icarus este un asteroid aparținând clasei dinamice a asteroizilor potențial periculoși. A fost observat în nopțile de 22 și 23 iunie 2015, cu telescopul de 0,5 m. Am obținut o perioadă de rotație de  $2,274 \pm 0,004$  ore și o amplitudine de 0,12 magnitudini. Curba de lumină este bimodală, dar asimetrică, cu un minim mai mare

Asteroid	Tip	Telescop	Data-obs	$\alpha$ [°]	PAB long [°]	PAB lat [°]	$\Delta v$ [km·s <sup>-1</sup> ]
(1566) Icarus	Apollo/PHA	0.5 m	2015/06/22-23	48.3-46.1	241	5	15.2
(2059) Baboquivari	Amor	0.4 m	2019/08/14-09/29	15.1-34.0	329	14	7.7
(3122) Florence	Amor/PHA	0.4 m	2017/09/10-12/22	71.4-37.8	54	51	5.8
(3200) Phaethon	Apollo/PHA	0.4 m	2017/12/11-12	20.7-24.2	78	13	15.2
(9400) 1994 TW1	Amor	0.5 m	2015/09/13-10/06	37.2-49.0	30	15	11.4
(13553) Masaakikoyama	Amor	0.4 m	2018/06/24-08/23	32.3-19.9	314	20	6.6
(35396) 1997 XF11	Apollo/PHA	0.5 m	2016/04/15	4.3	203	-2	6.5
(85989) 1999 JD6	Aten/PHA	0.5 m	2015/07/07-19	46-64.6	312	22	14.7
(99907) 1989 VA	Aten	0.4 m	2017/11/01-02	31-33.5	63	-1	16.1
(138925) 2001 AU43	Amor	0.5 m	2017/08/01-02	8.2-7.7	307	5	23.7
(140158) 2001 SX169	Apollo/PHA	0.4 m	2017/11/20-29	10.5-12.2	63	-7	6.5
(143404) 2003 BD44	Apollo/PHA	0.4 m	2017/02/26-03/28	17.2-11.9	178	-1	6.9
(144332) 2004 DV24	Apollo/PHA	0.4 m	2018/09/03-04	79.1-79.6	350	52	19.1
(155140) 2005 UD	Apollo	0.4 m	2018/10/03-06	28.3-17.1	30	-5	15.8
(190166) 2005 UP156	Amor	0.4 m	2017/06/20-30	32.8-35.8	263	19	6.3
(206378) 2003 RB	Apollo/PHA	0.5 m	2015/08/23-28	52.7-71.3	355	22	5.5
(276033) 2002 AJ129	Apollo/PHA	0.4 m	2018/02/05-09	24.1-16.2	140	0	14.5
(333888) 1998 ST4	Amor	0.4 m	2017/10/01-17	12.5-15.1	14	12	5.3
(348400) 2005 JF21	Amor/PHA	0.5 m	2015/07/23-25	33.9-34.3	284	14	6.6
(354030) 2001 RB18	Amor	0.4 m	2019/09/03-08	18.2-18.5	344	11	6.4
(398188) Agni	Aten/PHA	0.4 m	2018/08/02-03	39.2-41.5	293	13	8.4
(418849) 2008 WM64	Apollo/PHA	0.4 m	2017/12/21-26	29.5-42.4	101	-6	14.3
(444193) 2005 SE71	Apollo/PHA	0.4 m	2018/04/22-05/01	55.9-26.3	206	16	10.1
(444584) 2006 UK	Apollo/PHA	0.4 m	2017/10/30	163.4	41	9	7.1
(455432) 2003 RP8	Amor	0.4 m	2019/07/27-08/12	15.1-59.1	300	24	10.4
(503941) 2003 UV11	Apollo/PHA	0.4 m	2017/10/19-20	10.9-8.9	33	-1	10.3
1999 AF4	Amor	0.4 m	2018/01/18	8.5	121	-4	7.5
2012 TC4	Apollo	0.4 m	2017/10/11	42.3-45.8	359	1	10.7
2015 DP155	Amor/PHA	0.4 m	2018/06/05-12	63.4-38.8	260	29	4.6
2015 TB145	Apollo/PHA	0.5 m	2015/10/30	35.8-36.8	35	-9	15.1
2018 GE3	Apollo	0.4 m	2018/04/14	28.2	216	8	—
2019 GT3	Apollo	0.4 m	2019/09/09	45.7	330	23	—

**Tabelul 6.5:** Date despre circumstanțele de observații. Data-obs- intervalul în care s-au făcut observațiile, în format yyyy/mm/dd; tipul de asteroid geointersectorii, telescopul utilizat, unghiul de fază,  $\Delta v$ ; PAB este unghiul bisector cu Pământul și Soarele

decât celălalt. Acest rezultat este în acord cu [267] și [180], care au găsit o curbă de lumină asimetrică.

(3200) Phaethon este cel mai mare asteroid geointersector și este clasificat ca potențial periculos. Este un asteroid pe orbită cometară [106] care prezintă activitate cometară și strălucire anormală la periheliu [106]. Phaethon este sursa curentului de meteori Geminide [53] și este un obiect bine studiat ( $U = 3$ ), țintă a misiunii Destiny + [103]. Raportăm o curbă de lumină incompletă din două nopți de observație, din decembrie 2017. Am determinat o perioadă de rotație de  $3,6627 \pm 0,0615$  ore, o amplitudine de strălucire de 0,14 magnitudini și o curbă de lumină bimodală cu un maxim mai slab decât celălalt, în bună concordanță cu rezultatele recente [111, 81, 2, 118].

(155140) 2005 UD este un asteroid geointersector de tip Apollo considerat a fi asociat cu curentul de meteori diurn Sextantide și a fi un fragment al lui Phaethon [112] care la rândul său ar putea fi o cometă evoluată termic [106]. Rezultatele anterioare au găsit o perioadă de rotație de 5,2310 [112]. Am observat acest obiect timp de 3 nopți, în octombrie 2018. Am găsit o perioadă de rotație neechivocă de  $5,2219 \pm 0,0459$  de ore din datele noastre și o curbă de lumină bimodală cu maxime egale. Amplitudinea variației luminozității a fost de 0,4 magnitudini, în acord cu [113].

(190166) 2005 UP156 a fost observat de către [264], care a găsit o perioadă de rotație de  $40,5 \pm 0,1$  ore. Un studiu mai recent [273] a constatat că 2005 UP15 este un sistem binar sincron cu o perioadă similară. Am observat asteroidul timp 7 nopți în decembrie 2017 și am găsit o perioadă de rotație de  $40,5 \pm 0,1$  ore. Datele noastre formează o curbă de lumină incompletă, dar cu extremele de luminozitate observate. Prin urmare, chiar dacă rezultatele noastre corespund lucrărilor anterioare, recomandăm prudență în interpretarea lor.

(503941) 2003 UV11 a fost observat doar pentru două nopți, insuficiente pentru a detecta perioada de rotație de 8,25 ore raportată de [269]. Amplitudinea observată poate fi de maxim 0,3 magnitudini, observându-se o creștere în strălucire în a doua noapte de observații, o estimare în concordanță cu rezultatul din literatură.

2019 GT3 este un asteroid mic de tip Apollo, care a fost observat timp de 3 ore în seara de 9 septembrie 2019, pe când se afla la 0,058 UA de Pământ. Am

putut determina că acest obiect este în rotație rapidă, cu o perioadă de rotație de  $0,3547 \pm 0,0058$  ore. Curba de lumină este asimetrică, prezentând maxime și minime de strălucire diferite. Amplitudinea este de 0,79 magnitudini. 2019 GT3 este o posibilă sursă pentru curenții de meteori Corvide sau h Virginide [53].

### **Asteroidi posibili ținte pentru misiuni spațiale**

În această secțiune prezentăm curbele de lumină, perioadele de rotație și amplitudinea luminozității pentru asteroidi geointersectori cu  $\Delta v$  mai mic de  $< 12$  km/s.

(2059) Baboquivari este un asteroid geointersector de mari dimensiuni ( $H=15,8$ ) care a fost observat timp de 11 nopți, între august-septembrie 2019. Strălucirea mare a obiectului a permis obținerea unui SNR mare și erori mici la fotometrie. Am determinat că asteroidul are o rotație lentă, cu o perioadă de rotație sinodică de  $38,4 \pm 0,2$  ore. Amplitudinea este de 0,59 magnitudini.

Asteroidul (3122) Florence a fost observat din București timp de 9 nopți, din septembrie până în decembrie 2017. Pentru fiecare noapte de observații am găsit o perioadă de rotație diferită de celelalte, o dovadă a faptului că perioada variază. Curba de lumină este bimodală, cu un maxim cu 0,1 magnitudini mai strălucitor decât altul. O perioadă de rotație pentru toate datele este de  $2,615 \pm 0,003$  ore, care însă nu este în concordanță cu alte rezultate. Știind că există și doi sateliți, am încercat să detectăm perioadele de revoluție ale acestora. Am folosit algoritmul Dual Period Search. După ce am stabilit perioada de rotație a primarului am scăzut valoarea acesteia din date pentru a detecta variația datorată sateliților. Nu am putut identifica perioadele de 8 și 25 de ore din literatură, dar am găsit o alta, de  $10,328 \pm 0,0036$  ore, valoare în bună concordanță cu cea determinată de [275]. Din curba de fază am găsit o valoare pentru magnitudinea absolută,  $13,542 \pm 0,188$ , și una pentru pantă,  $0,169 \pm 0,09$ . Rezultatele sunt prezentate în figurile 6.21 6.22 6.23 6.24.

Asteroidul geointersector de tip Amor (9400) 1994 TW1 a fost observat timp de 8 zile în septembrie 2015. Nu am putut observa toate fazele rotației, în special pe cele extreme și nu putem confirma rezultatul lui [268] care a raportat o perioadă sinodică de 97,1 ore din observații realizate la șase luni după noi. Rezultatul nostru este o reducere a datelor utilizate de [246], care a găsit o perioadă de rotație ceva mai lungă,

de 82,5 ore, un rezultat similar cu [246] dar diferit de [268]. Rezultatele diferite arată că 1994 TW1 este un asteroid în rotație haotică, care prezintă mai multe armonice în curba de lumină. O perioadă de 97,1 ore s-a potrivit cu datele noastre, rezultate care prezintă o discrepanță în parte ascendentă a variației de strălucire. Până în iulie 2019 datele noastre și ale lui [268] sunt singurele din literatură.

Pentru (13553) Masaakikoyama [201] a găsit o perioadă de rotație de 38 de ore cu date luate în 2015. [272] a publicat date noi, luate în aceeași perioadă de timp ca și noi, care confirmă rotația haotică pentru acest obiect, găsind trei perioade, de 32, 39 și 58 de ore, care ajustează datele lor. Cele două rezultate confirmă faptul că pentru rotația acestui asteroid se pot găsi mai multe perioade. Am observat acest obiect timp de 15 nopți între iunie și august 2018 când se afla la depărtare mică de Pământ și am găsit o perioadă de rotație de  $31,98 \pm 0,09$  de ore, asemănătoare cu cea raportată de [272]. Extremele curbei de lumină sunt bine observate dar datele sunt împrăștiate în ciclul de variație, drept pentru care rezultatul nostru nu are un grad mare de încredere. Amplitudinea variației determinată de noi se aseamănă cu cea a [272] pentru o perioadă de rotație de 32 de ore.

(35396) 1997 XF11 este un asteroid potențial periculos observat pe parcursul unei singure nopți, pe 15 aprilie 2016. Acest asteroid are o perioadă de rotație de 3,253 de ore [136, 268, 201]. Intervalul de 2,78 de ore cât a fost observat de noi reprezintă aproape o rotație, iar perioada de rotație determinată de noi este de  $3,186 \pm 0,028$  ore. Am folosit datele noastre în comun cu cele ale lui Warner [268] și am remarcat că setul nostru de date se suprapune perfect cu cel existent deja (Fig. 6.19).

(140158) 2001 SX169 este un asteroid potențial periculos observat timp de două nopți pe 20 și 29 noiembrie 2017. Am observat două rotații complete și am stabilit o perioadă de rotație de  $3,3115 \pm 0,0063$  ore și o amplitudine de 0,31 magnitudini. De asemenea, am observat în periodogramă că alte perioade sunt posibile în intervalul de 3,1-3,4 ore. Acest rezultat este ceva diferit de cel al lui [247] și [269], care dau 3,14 ore pentru perioada de rotație, obținut din date luate la 14 zile și o lună mai târziu decât noi. Nu putem folosi datele acestora din cauză că au fost luate la mai mult de 100 de rotații ale asteroidului după observațiile noastre (eroarea va fi mai mare decât perioada de rotație determinată de noi).

(143404) 2003 BD44 este un alt asteroid potențial periculos cu o perioadă lungă de rotație, destul de incertă. Datele noastre, deși acoperă 5 nopți, nu acoperă întreaga curbă de lumină. Am testat perioada de rotație de  $78,6 \pm 0,1$  ore [187] care a s-a potrivit datelor noastre. [187] a găsit că obiectul este în rotație rapidă și propune mai multe valori pentru perioada de rotație, de 78,45, 78,6, și 79,56 ore. Datele noastre se potrivesc unei perioade de rotație de 78,6 ore.

(206378) 2003 RB este un asteroid potențial periculos care a fost observat pentru 3 nopți în august 2015. În acest timp luminozitatea a variat cu 1,2 magnitudini și am putut observa întotdeauna partea descendentă a curbei luminoase, un semn al unei perioade de rotație multiplu sau submultiplu de 24 de ore. Am găsit o valoare de  $48,5 \pm 0,1$  ore pentru perioada de rotație și o amplitudine a luminozității de 2,6 magnitudini. Variația mare a luminozității nu pare probabilă și este un efect al slabei noastre acoperiri fotometrice. Rezultatul nostru nu este în concordanță cu cel al lui [266] care a găsit 37,5 ore pentru perioada de rotație și sugerează, de asemenea, că RB 2003 este în rotație haotică. Pentru a găsi variația amplitudinii de luminozitate reală, am fitat o funcție sinusoidală asupra datelor noastre și am constatat că o perioadă de rotație de  $48,5 \pm 0,1$  ore corespunde acestora. Amplitudinea curbei de lumină este de 1,4 magnitudini.

(333888) 1998 ST4 a fost observat pentru 7 nopți în octombrie 2017. Acest asteroid de tip Amor prezintă o curbă de lumină cu o amplitudine mare, 0,64 magnitudini și o perioadă de rotație de  $5,3169 \pm 0,0061$  ore. Maximul secundar este mai slab ca strălucire decât cel principal și perioada de rotație arată o variație mică (0,6 minute) între valoarea determinată la 1, 2, 3, 10 octombrie și 17, 18 octombrie 2017. Valorile obținute sunt în concordanță cu singura referință găsită în literatură [271].

(348400) 2005 JF21 este un asteroid potențial periculos raportat a fi binar cu o perioadă principală de 2,41 ore și o perioadă secundară de 14,72 ore [231] sau 29,1 ore [179]. În studiile acestea, în care se combină observații luate pe o perioadă lungă de timp, s-a găsit că perioada de rotație, amplitudinea și forma curbei de lumină se modifică împreună cu faza și aspectul sub care se vede asteroidul de pe Pământ. [179] a observat asteroidul în aceeași perioadă ca și noi și a găsit o amplitudine de 0,05 magnitudini și o perioadă de rotație de  $2,423 \pm 0,006$  ore. Din datele noastre s-a putut determina o perioadă de  $2,49 \pm 0,03$  ore însă pentru că o amplitudine



atât de mică este greu de identificat cu instrumentele noastre am testat pe datele noastre perioada din literatură [179], care s-a potrivit. Discrepanța dintre aceste două perioade poate fi explicată prin erorile mari ale fotometriei și amplitudinii foarte mici.

(354030) 2001 RB18 este un asteroid de tip Amor care a fost observat timp de trei nopți, între 3 și 8 august 2019, pe când se afla la 0,143 UA de Pământ. Am identificat o variație de strălucire cu amplitudine de numai 0,16 magnitudini și o posibilă perioadă lungă de rotație. Datele noastre, care nu acoperă toate extremele de strălucire, arată o perioadă de  $15,86 \pm 0,25$  ore. Acesta este primul rezultat obținut pentru acest asteroid, la data de august 2019.

(398188) Agni este un asteroid potențial periculos observat pe parcursul a două nopți în luna august 2018. Acesta se rotește haotic [199], având mai multe perioade de rotație, dar s-a stabilit nici o perioadă. O estimare a fost făcută de [276] care a găsit două perioade posibile: 22,1 și 32,6 ore. Am testat valorile sale și am constatat că o funcție sinusoidală cu o perioadă dublă de 22,3 ore ar putea fi o potrivire bună a datelor noastre, rezultat care confirmă faptul că acesta este un obiect care se rotește lent.

(455432) 2003 RP8 a fost observat timp de 3 nopți în iulie-august 2019. Am determinat o perioadă de rotație de  $4,813 \pm 0,008$  ore și o amplitudine de 0,52 magnitudini. Curba de lumină este incompletă dar cele două maxime sunt cuprinse în observațiile noastre. La data observației, rezultatele noastre erau singurele din literatură.

Un alt rezultat incert pe care îl raportăm este perioada de rotație a asteroidului potențial periculos (444584) 2006 UK, observat în octombrie 2017, pentru care nu am găsit nici un alt rezultat anterior din literatură. Am observat asteroidul timp de două ore pe 30 octombrie și am detectat o variație de strălucire de 0,3 magnitudini. Am obținut o perioadă de rotație de  $2,1 \pm 0,2$  ore, dar acest rezultat este incert pentru că nu putem determina dacă curba de lumina are două minime sau unul.

1994 AF4 este un mic asteroid geointersector de tip Amor, care a fost observat timp de trei ore în noaptea de 18 octombrie 2018. Curba de lumină prezintă o amplitudine foarte mică (0,1 magnitudini) și o perioadă de rotație de  $3,2 \pm 0,3$  ore, în concordanță cu rezultatele anterioare, obținute în aceeași perioadă de timp ca noi

[213]. Eroarea mare în determinarea perioadei se datorează timpului relativ scurt de observații, care acoperă doar o rotație a asteroidului.

2012 TC4 este un tip NEA Apollo observat de 3,5 ore în 11 octombrie 2017. Am reanalizat date anterioare [228] și am găsit o perioadă secundară de  $0,1412 \pm 0,0009$  ore și una primară de  $0,204 \pm 0,001$  ore, un rezultat în concordanță cu cele ale lui [277] și [234]. Am stabilit că 2012 TC4 este un rotator rapid, aflat în rotație haotică, care are curbe de lumină de forme diferite de la un ciclu la altul.

Am observat asteroidul potențial periculos 2015 DP155 timp de 6 nopți în timpul apropierii sale din iunie 2018 și am stabilit o perioadă de rotație de  $3,095 \pm 0,002$  ore cu o amplitudine mare (0,94 magnitudini). Unul dintre maxime are o durată mai mare decât celălalt, un efect vizibil și pe curba de lumină a [270]. Rezultatele noastre sunt în concordanță cu [270] și [208]. Am verificat dacă forma curbei de lumină se modifică din cauza aspectului sub care se observă asteroidul și am găsit că amplitudinea a scăzut cu 0,1 magnitudini de pe 5 pe 12 iunie.

### **Alți asteroizi geointersectorii observați**

Am observat asteroidul (85989) 1999 JD6 pentru 13 nopți, la începutul și mijlocul lunii iulie 2015. Acesta este un asteroid potențial periculos binar, bine observat, care pe 25 iulie s-a aflat la cea mai mică depărtare de (0,0484 UA) de Pământ. A fost observat de radar [132] și mulți observatori au raportat perioade de rotație determinate fotometric [246, 5, 265, 189, 233, 201]. Din observațiile noastre Am determinat o perioadă de  $7,665 \pm 0,010$  ore și o amplitudine de 1,17 magnitudini pentru acest asteroid binar, o valoare foarte bună în acord cu restul rezultatelor.

(99907) 1989 VA, un asteroid de tip Aten, a fost observat în două nopți (1 și 2 noiembrie 2017). Asteroidul prezintă maxime inegale și o amplitudine de 0,2 magnitudini. Curbele de lumină au diferite perioade și amplitudini (2,4962 ore pe 1/11 și 2,2312 ore pe 2/11), un posibil efect al modificării aspectului orientării obiectului. Curba de lumină prezintă o perioadă de rotație de  $2,28 \pm 0,03$  ore, în acord cu [198], cu un maxim mai strălucitor decât celălalt. Rezultatul nostru este primul după cel din 1997 [198].

(138925) 2001 AU43 este un asteroid de tip Amor, observat pentru 2 nopți de la București. Observațiile noastre nu au putut să acopere o rotație completă, dar

am putut observa maximul secundar și panta înainte de minimul primar. Perioada de rotație cea mai probabilă fost de  $3,6 \pm 0,1$  ore, deși pe perioadele cu valori de 4,3 și 5,2 ore sunt potrivite. Din acest motiv, rezultatul nostru trebuie utilizat cu precauție. Amplitudinea curbei de lumină este de 0,4 magnitudini. Singurul rezultat publicat pentru acest obiect este acela al lui [154] care a găsit 5,2 ore pentru perioada de rotație și propune că obiectul se află în rotație haotică.

(144332) 2004 DV24 este un asteroid potențial periculos observat timp de 2 nopți în septembrie 2018, în timpul unei apropieri de Pământ. Deși barele de eroare sunt destul de mari, am reușit să detectăm o tendință ascendentă a strălucirii în ambele nopți. Am determinat o valoare de 3,0123 ore pentru perioada de rotație, dar nu pentru o curbă de lumină bimodală. Dacă luăm în considerare o curbă de lumină bimodală, perioada de rotație ar trebui să fie  $6,03 \pm 0,05$  ore, dublul estimării inițiale. Estimăm că amplitudinea minimă este de 1 magnitudine, dar aceasta este o estimare brută datorită observării incomplete a curbei de lumină. În prezent, rezultatul nostru este singurul disponibil pentru acest obiect.

(276033) 2002 AJ129 este un asteroid potențial periculos cu una dintre cele mai mici distanțe a periheliului, interior orbitei lui Mercur. Acesta a fost observat anterior de către [201], care a găsit o amplitudine foarte mică și o perioadă de rotație de 3,9226 ore. Am observat asteroidul pe 5 și 9 februarie 2018, acoperind mai mult de o perioadă de rotație, și am stabilit o valoare de  $4,00 \pm 0,01$  pentru perioada de rotație. Curba de lumină este bimodală și simetrică cu o amplitudine de 0,18 magnitudini. Transformata Fourier arată o grupare de perioade posibile în vecinătatea a 4 ore, variind între 3,5 și 4,4 ore.

(418849) 2008 WM64 este un asteroid potențial periculos cu o orbită cu înclinare mare, care s-a apropiat de Pământ în decembrie 2017. Am observat timp 4 nopți între 21-26 decembrie 2017 și am găsit o curbă de lumină cu maxime inegale și o amplitudine mare de 0,57 magnitudini. Perioada de rotație găsită este de  $2,407 \pm 0,006$  ore, dar se pare că variază [269]. Atunci când datele noastre au fost reprezentate separat pentru fiecare noapte, am descoperit că curbele de lumină prezintă variații ale formei și amplitudinii, indicând faptul că obiectul se află într-o stare de rotație haotică.

(444193) 2005 SE71 este un asteroid potențial periculos observat timp de 6

noapți în aprilie 2018. Are o variație a luminozității de peste o magnitudine și o perioadă de rotație greu de estimat. Din datele noastre nu am putut determina o perioadă, deoarece variabilitatea nu este repetabilă, existând dovezi clare că obiectul se află în rotație haotică [199]. După ce am forțat pe datele noastre perioada de rotație de 66,8 ore găsită de [270], am constatat că numai prima jumătate a curbei de lumină se potrivește.

2015 TB145 a fost observat pe parcursul a trei noapți în octombrie 2015, dar s-a dovedit a fi o țintă dificilă. Am putut detecta o amplitudine de strălucire foarte mică numai în a treia noapte de observație după ce magnitudinea asteroidului și SNR au crescut, când am observat obiectul timp de 3 ore. Am determinat o perioadă de rotație de  $2,91 \pm 0,04$  ore și o amplitudine de 0,12 magnitudini. Acest asteroid potențial periculos a fost de asemenea observat de către [274] care au găsit valori similare pe o serie de date mai numeroase decât ale noastre. Perioada de rotație determinată de noi a avut ca bază date dintr-o singură noapte de observații și pentru că nu s-a raportat faptul că asteroidul este în rotație haotică tragem concluzia că diferențele apar din cauza datelor de observație insuficiente.

2018 GE3 a fost observat în noaptea de 14 aprilie 2018, timp de o oră, când se afla la 0,005 UA de Pământ. Datele obținute se potrivesc pentru o perioadă de rotație de  $0,304 \pm 0,001$  ore, curba de lumină având amplitudinea de  $0,93 \pm 0,05$  magnitudini. Spectrul de perioadă pentru datele noastre, calculat pentru perioade între 0,1 și 1,2 ore arată ca cea mai probabilă perioada de 0,304 ore, însă datele nu se potrivesc perfect pe această perioadă, semn al variației rapide a acesteia. Variația se poate datora variația foarte rapide a unghiului sub care se observă asteroidul. Rezultatul obținut este singurul din literatură.

### 6.2.1 Curbe de fază

Prezentăm curbe de fază pentru 10 asteroizi geointersectorii dintre care 9 de tip taxonomic S și unul de tip K. Curbele de fază sunt prezentate în Fig. 6.20 iar datele sunt trecute în tabelul 6.6. Am căutat în literatură informații despre asteroizii pentru care am determinat curba de fază și nu am găsit valori pentru pantă, drept pentru care am folosit în calcule valoarea fixă de 0,23 pentru asteroizii de tip S și de

0,15 pentru cei de tip K. În ciuda datelor în număr mic, valorile determinate pentru magnitudinea absolută a asteroizilor sunt în concordanță cu cele publicate până în prezent, în limita barelor de eroare.

Prezentăm date luate înaintea opoziției pentru asteroizii (85989) 1999 JD6, (155140) 2005 UD și (418849) 2008 WM64, și date post-opoziție pentru (2059) (2059) Baboquivari, (3122) Florence (333888) 1998 ST4, (276033) 2002 AJ129, și 2012 TC4. În toate cazurile în afară de asteroidul 1999 JD6 am determinat cu o bună aproximare curba de fază din datele noastre, pentru asteroidul 1996 JD6 datele fiind obținute la unghiuri de fază mai mari  $46^\circ$ , valori la care modelul H și G nu este foarte precis. Am găsit, cazul asteroidului 2012 TC4, date observaționale luate la momente apropiate în timp care nu se încadrau în curba teoretică de fază. Motivul ar putea fi rotația rapidă a asteroidului și variația de strălucire a maximelor.

Cea mai detaliată curbă de fază este cea a asteroidului 1999 AF3, pentru care avem șase observații luate în gama de unghiuri de fază de la  $8^\circ$  la  $36^\circ$ . Prezentăm două curbe de fază, una în care valoarea parametrului G este de 0,23 (așa cum s-a determinat pentru asteroizii de tip S) și alta în care, folosind datele observaționale am determinat valoare G. Valoarea obținută din datele noastre este mai mică decât cea stabilită în mod uzual, iar magnitudinea absolută obținută din datele noastre este mai mică în amândouă cazurile.

Un alt caz interesant este cel al asteroidului 2015 DP155, la care datele noastre nu urmăresc curba teoretică în cazul valorilor mari ale unghiului de fază. Curba de fază realizată doar din observațiile noastre nu duce la modificarea valorii magnitudinii absolute, rezultat ce arată că modelul de calcul H-G este nu este util la unghiuri de fază mari.

## Concluzii

Studiul nostru conține date fotometrice pentru 31 de asteroizi geointersectorii.

Prezint rezultate pentru patru asteroizi (2004 DV24, 2006 UK, 2018 GE3 și 2019 GT3) pentru care nu s-au mai raportat observații și avem rezultate pentru 8 asteroizi cu valoarea U de 2 și pentru 4 asteroizi cu o singură sursă de date în literatură. Prezentăm, de asemenea, o curbă de lumină completă pentru asteroidul binar 1999 JD6, o curbă de lumină incompletă și o confirmare a unei perioade de

rotație pentru asteroidul binar 2005 JF21. De asemenea, am găsit dovezi pentru rotație haotică în cazul obiectelor 2008 WM64, 1989 VA și 1998 ST4 și perioade secundare pentru (3122) Florence și 2012 TC4.

Raportăm perioade de rotație pentru 5 asteroizi care sunt surse posibile pentru curenții de meteori, dar numai unul (2005 UP156) este un rotator lent. Pentru 2003 UV11 putem deduce o perioadă de rotație sau o orientare a axei de rotație a obiectului înspre observator. Variația de strălucire a acestui obiect este de maxim 0,3 magnitudini.

Am stabilit perioade de rotație pentru 19 asteroizi geointersectorii cu  $\Delta v$  mai mic de 12 km/s, iar 46% dintre acestea sunt asteroizi cu rotație lentă (perioade mai lungi de 10 ore). Din eșantionul mic al asteroizilor cu  $\Delta v$  scăzut nu am putut găsi o corelație între diametru și perioada de rotație 6.15.

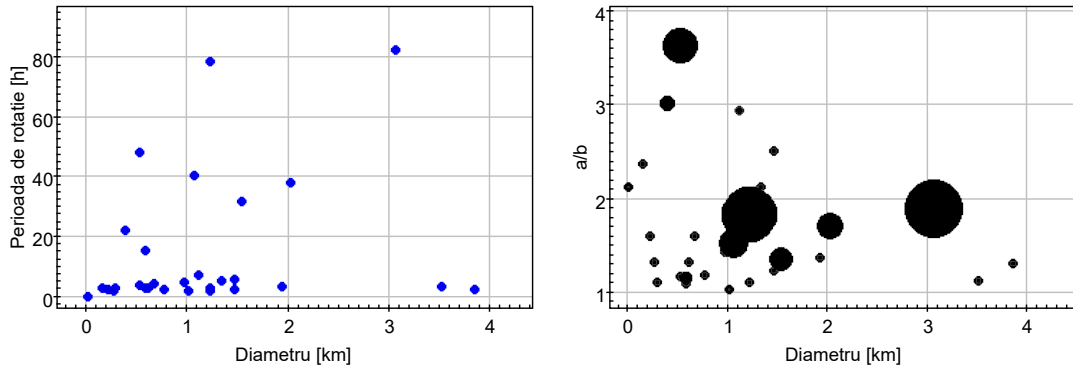
Nu am găsit o dependență a perioadei de rotație a asteroizilor geointersectorii de diametru (Fig. 6.15). Datele noastre arată că doar 23% dintre asteroizii observați au perioade mai lungi de 20 de ore, iar 61% dintre ei au perioade sub 5 ore. Dintre asteroizii sub 1 km în diametru 68% dintre aceștia au perioade de rotație mai mici de 5 ore și doar 12% mai lungi de 20 de ore.

La asteroizii mai mari de 1 km găsim o creștere a duratei perioadei de rotație, 33% din ei având perioade mai lungi de 20 de ore. 46% dintre asteroizii de această mărime au perioade mai scurte de 5 ore.

În cazul asteroizilor surse de meteori, nu am observat un număr prea mare de asemenea obiecte pentru a determina o distribuție semnificativă.

Asteroizii de tip conglomerat de fragmente pot fi identificați în funcție de forma și durata perioadei de rotație, în general, asteroizii rotunzi, mari sau mici, cu rotații lente putând fi clasificați în această categorie.

În Fig. 6.15, dreapta, sunt reprezentați asteroizii geointersectorii observați, în funcție de diametru și raportul axelor mari  $a$  și  $b$ . Mărimea simbolului este proporțională cu durata de rotație, fiind evident faptul că și asteroizii cu o formă puternic alungită pot avea rotații lente. Luând în considerare erorile de determinare a perioadei și a amplitudinii curbei de lumină pot estima că din eșantionul meu, toți asteroizii cu un raport  $a/b \leq 2$ , indiferent de diametru, pot fi încadrați ca conglomerat de fragmente, 71% din cei observați. În special dintre aceștia, asteroizii



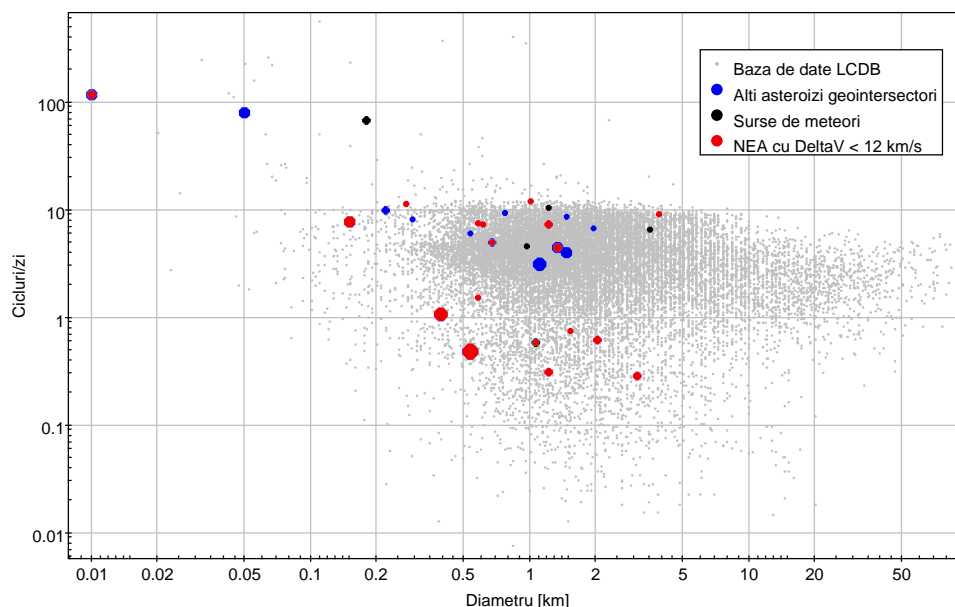
**Figura 6.15:** *Stânga: perioada de rotație ca funcție de diametrul asteroizilor geointersec-tori observați. Dreapta: raportul dintre axele mari ale asteroidului și diametru. Mărimea simbolului este proporțională cu durata perioadei de rotație.*

(9400) 1994 TW1, (13553) Masaakikoyama și (143404) 2003 BD44 se remarcă prin perioade de rotație foarte lungi și diametre mai mari de 1 km. Dintre asteroizii mai mici de 1 km, îi remarcăm pe 1999 AF4 și pe 2015 TB145 care au o formă aproape sferică (raport  $a/b$  1,1).

Cei mai mari asteroizi geointersec-tori observați, (3122) Florence și (3200) Phaethon, corpuri cu diametrul mai mare de 3 km, au perioade scurte și rapoarte  $a/b$  mai mici de 1,4. (3200) Phaethon este și o sursă confirmată de meteori, forma sferică a sa, împreună cu rotația de 3,6 ore, recomandînd-ul ca asteroid de tip conglomerat de fragmente, obiect care poate pierde materie în urma rotației rapide.

Un alt mod de a vedea care dintre asteroizi sunt de tip conglomerat de fragmente este să studiem care dintre ei se află aproape de limita de rotație. Un asteroid mic și rotund, aflat sau nu la limita de rotație poate fi un conglomerat de fragmente, dar unul cu o formă puternic alungită nu. Asteroizii mari, aproximativ sferici, cu perioade de rotații lungi pot fi conglomerat de fragmente.

În Fig. 6.16, cu gri sunt reprezentați asteroizii cu perioade determinate (baza de date LCDB) și cei observați în cadrul doctoratului. Asteroizii cu simboluri roșii sunt cei posibile ținte pentru misiuni spațiale, iar cei cu simboluri albastre sunt surse de meteori. Simbolurile roșii sunt asteroizi care nu fac parte din cele două categorii. Dintre asteroizi care pot fi surse de meteori, cel mai apropiat de limita de rotație este (1566) Icarus, un obiect aproximativ sferic ( $a/b = 1,2$ ). Asteroidul



**Figura 6.16:** *Perioadele de rotație și diametrele asteroizilor pentru care s-au determinat perioade de rotație. Mărimea simbolurilor este proporțională cu raportul  $a/b$ .*

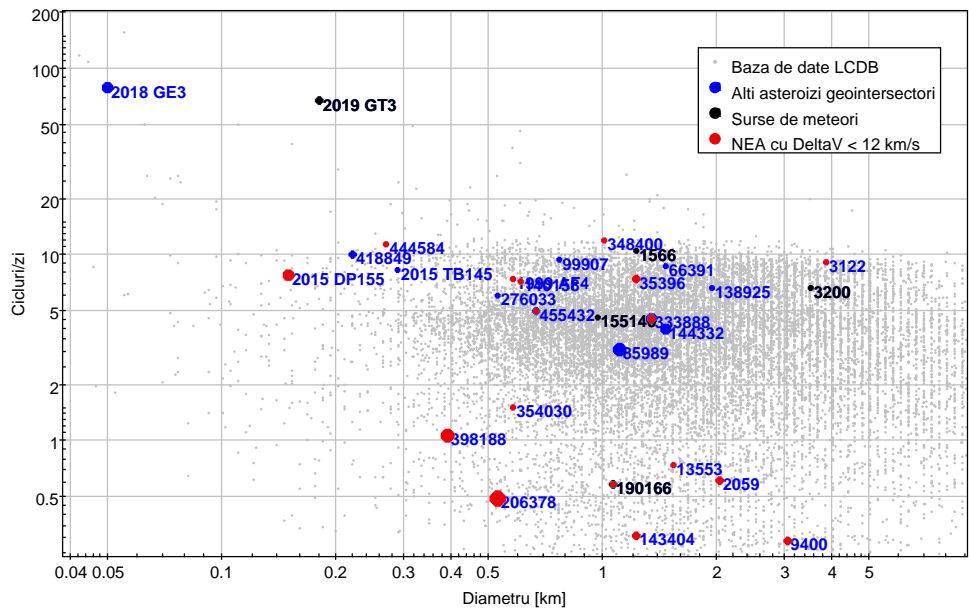
(3200) Phaethon, și el sferic, este apropiat de limita de rotație pentru diametrul său. (190166) 2005 UP156 are o rotație lungă și un raport  $a/b = 1,5$ , ceea ce îl face susceptibil de a fi conglomerat de fragmente. 2019 GT3 are o rotație foarte rapidă, fiind dincolo de limita de rotație, cu o axă de două ori mai mare decât cealaltă, proprietăți care îl descalifică drept conglomerat de fragmente (Fig. 6.17).

Pentru asteroizii posibile ține de misiuni spațiale, pot confirma structură conglomerat de fragmente pentru obiectele (9400) 1994 TW1, (13553) Masaakikoyama, (190166) 2005 UP156, (2059) Baboquivari, (354030) 2001 RB18, (455432) 2003 RP8, (140158) 2001 SX169, 1999 AF4 și (143404) 2003 BD44. Aceste obiecte au perioade scurte sau lungi, pentru diametrul lor se află departe de limita de rotație și au o formă aproximativ sferică.

Tot în această categorie se află 1999 AF4 (diametru 1 km) și (3122) Florence (diametru 3,8 km), doi asteroizi aflați aproape de limita de rotație, cu forme sferice. Aceștia pot avea o structură internă de tip conglomerat de fragmente în care forțele interne sunt mai puternice decât gravitația.

Trebuie menționat faptul că valoarea raportului axelor  $a$  și  $b$  ale asteroizilor a fost determinată pe parcursul unei singure apariții ale acestora. Din cauza modificării continue a unghiului sub care se observă rotația unui asteroid, este necesară deter-





**Figura 6.17:** *Perioade de rotație și diametrele asteroizilor pentru care s-au determinat perioade de rotație. Mărimea simbolurilor este proporțională cu raportul a/b.*

minarea curbei de lumină (și implicit a raportului a/b) la mai multe apariții, ceea ce nu este întotdeauna posibil.

Asteroid	Perioada de rotație [h]	Eroarea [h]	$\Delta m$	ToM JD	G	H	H det	Tax.	U
(1566) Icarus	2,274	0,004	0,12	2457196,322	0,15	16,9	-	S	3
(2059) Baboquivari	38,4	0,2	0,59	2458744,375	0,15	15,8	16,01 $\pm$ 0,26	-	-
(3122) Florence	2,615	0,003	0,23	2458007,340	0,17	13,5	-	S	3
(3200) Phaethon	3,6627	0,0615	0,14	2458099,437	0,15	14,6	-	B	3
(9400) 1994 TW1	97,1	0,1	>0,68	2457279,397	0,15	14,9	-	S	2
(13553) Masaakikoyama	31,98	0,09	0,34	2458294,373	0,15	16,4	-	S	2
(35396) 1997 XF11	3,186	0,028	0,55	2457494,340	0,15	16,9	-	X	3
(85989) 1999 JD6	7,665	0,010	1,17	2457211,381	0,15	17,1	16,30 $\pm$ 0,55	K	3
(99907) 1989 VA	2,28	0,03	0,20	2458059,347	0,15	17,9	-	S	3
(138925) 2001 AU43	3,6	0,1	0,35	2457967,384	0,15	15,9	-	S	2+
(140158) 2001 SX169	3,3115	0,0063	0,31	2458078,414	0,15	18,4	-	S	3
(143404) 2003 BD44	78,6	0,1	0,66	2457811,439	0,15	16,9	-	S	2+
(144332) 2004 DV24	6,03	0,05	$\sim$ 1	2458365,294	0,15	16,5	-	S	3-
(155140) 2005 UD	5,2219	0,0459	0,4	2458395,426	0,23	17,4	17,30 $\pm$ 0,21	S	3
(190166) 2005 UP156	40,5	0,1	0,47	2457925,356	0,15	17,2	-	S	3
(206378) 2003 RB	48,5	0,1	$\sim$ 1,4	2457258,298	0,15	18,7	-	S	2
(276033) 2002 AJ129	4,00	0,01	0,18	2458155,382	0,23	18,7	18,62 $\pm$ 0,15	S	2+
(333888) 1998 ST4	5,3169	0,0061	0,82	2458028,359	0,23	16,7	16,21 $\pm$ 0,13	S	3
(348400) 2005 JF21	2,49	0,03	0,05	2457227,340	0,15	17,3	-	S	3
(354030) 2001 RB18	15,86	0,25	0,16	2458732,332	0,15	18,5	-	S	3
(398188) Agni	22,3	-	$\sim$ 1,2	-	0,15	19,4	-	S	2
(418849) 2008 WM64	2,407	0,006	0,52	2458109,371	0,23	20,6	20,32 $\pm$ 0,24	S	3
(444193) 2005 SE71	-	-	$\sim$ 1	-	0,15	18,1	-	S	2
(444584) 2006 UK	2,1	0,2	0,31	2458057,354	0,15	20,2	-	-	-
(455432) 2003 RP8	4,813	0,008	0,52	2458693,398	0,15	18,2	-	-	-
(503941) 2003 UV11	-	-	$\sim$ 0,3	-	0,15	19,5	-	S	3-
1999 AF4	3,2	0,3	0,1	2458137,342	0,23	18,5	18,26 $\pm$ 0,17	S	3-
2012 TC4	0,204	0,001	0,82	2458038,276	0,23	26,7	25,88 $\pm$ 0,40	S	3
2015 DP155	3,095	0,002	0,94	2458275,387	0,23	21,5	21,40 $\pm$ 0,50	S	3
2015 TB145	2,91	0,04	0,12	2457326,427	0,15	20,0	-	S	3
2018 GE3	0,304	0,001	0,93	2458223,364	0,15	23,8	-	-	-
2019 GT3	0,3547	0,0058	0,79	2458736,329	0,15	21,0	-	-	-

**Tabelul 6.6:** Rezultatele observaționale. Rot period - perioada de rotație determinată, exprimată în ore; Error - eroarea determinării perioadei de rotație;  $\Delta M$  - amplitudinea variației de strălucire; ToM JD - o dată a unui minim; G - panta; H - magnitudinea absolută din catalog; H det - magnitudinea absolută determinată din datele noastre; Tax - taxonomia obiectului; U - parametrul de certitudine a curbei de lumină înainte de observațiile noastre.

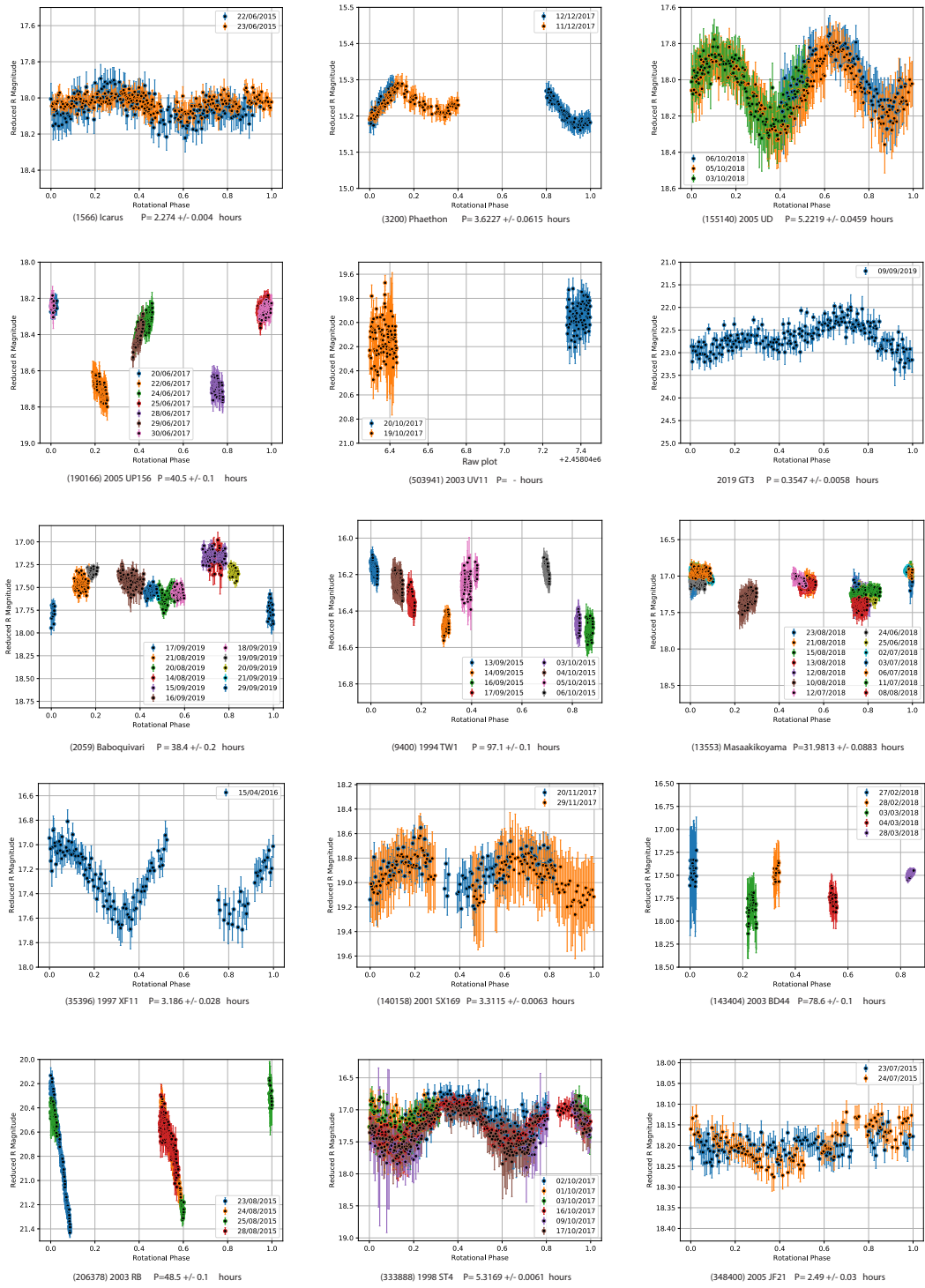


Figura 6.18: Curbe de lumină ale asteroizilor observați.

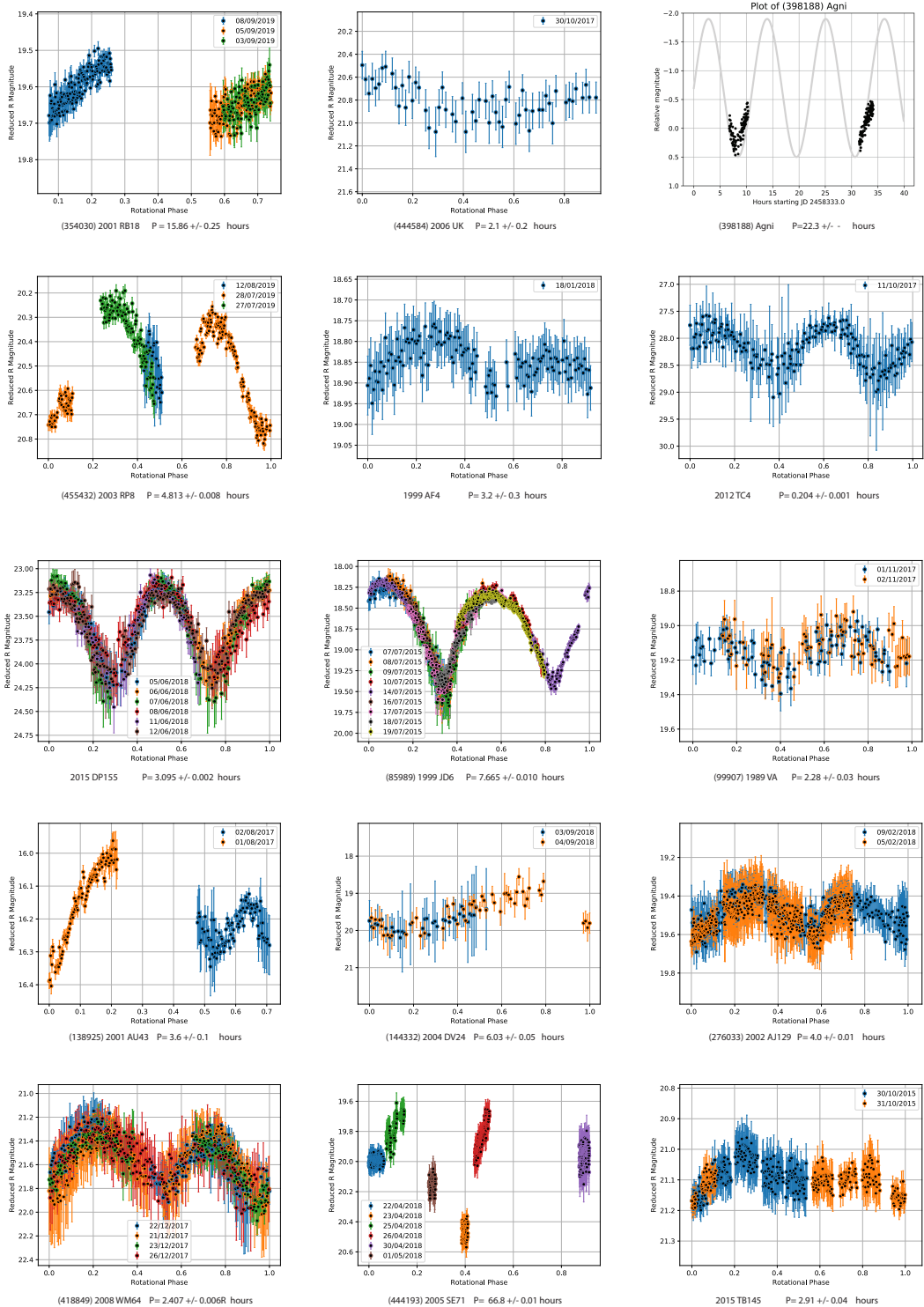


Figura 6.19: Curbe de lumină ale asteroizilor observați.

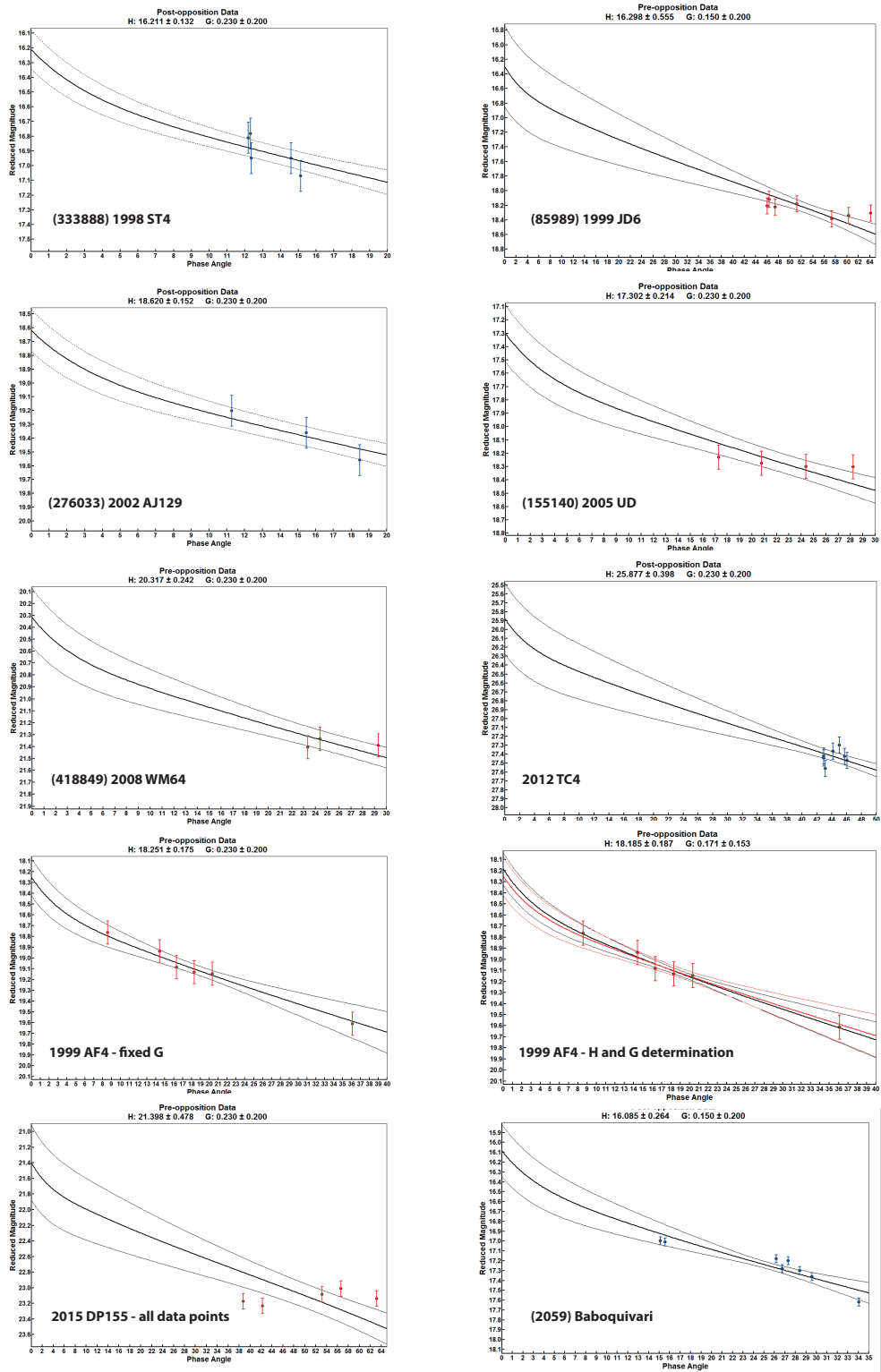


Figura 6.20: Curbe de fază ale asteroizilor observați.

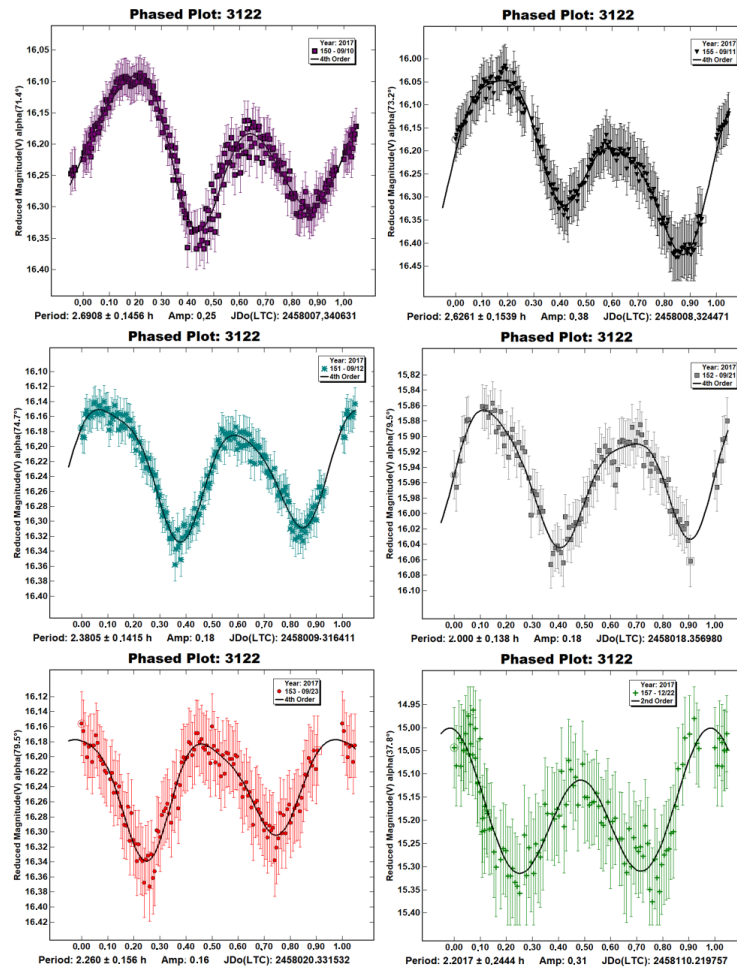


Figura 6.21: Determinarea perioadei de rotație a asteroidul (3122) Florence pentru fiecare noapte de observație.

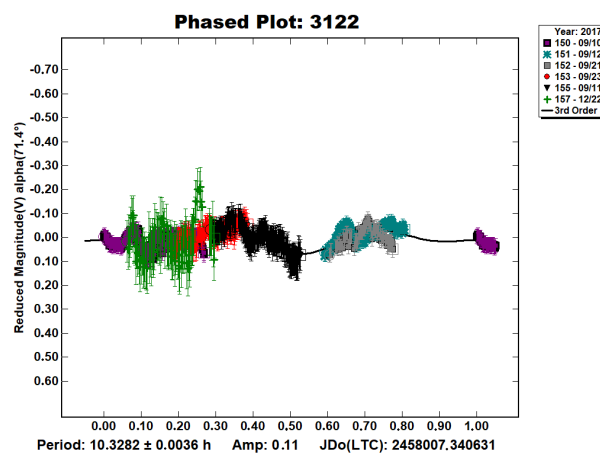
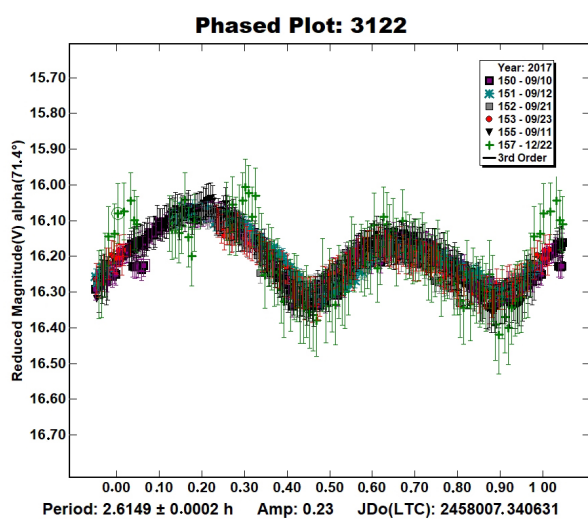
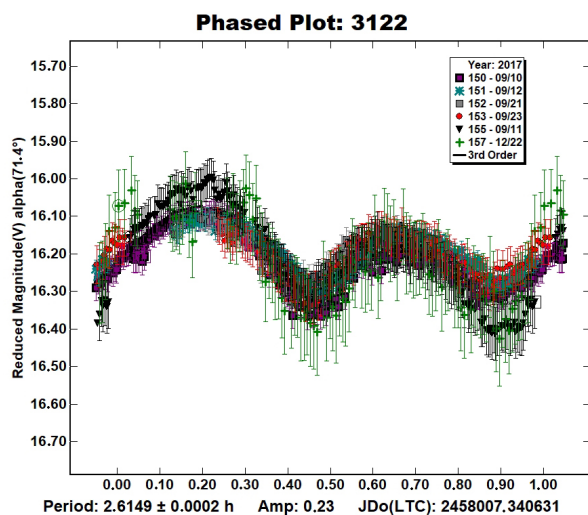
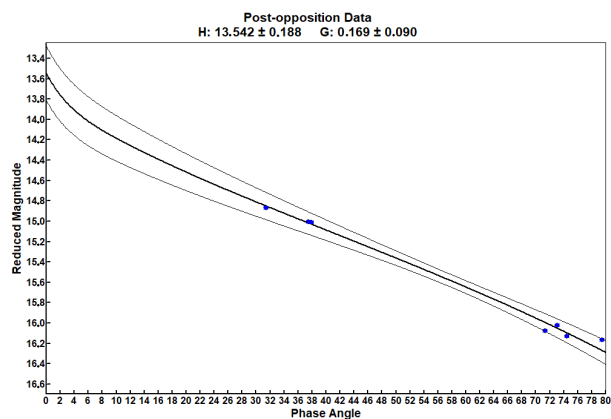


Figura 6.22: Perioada secundară a asteroidului (3122) Florence.



**Figura 6.23:** Curba de lumină înainte (stânga) și după extragerea perioadei secundare pentru asteroidul (3122) Florence.



**Figura 6.24:** Curba de fază din strălucirea maximă în V pentru fiecare noapte observație a asteroidului (3122) Florence.

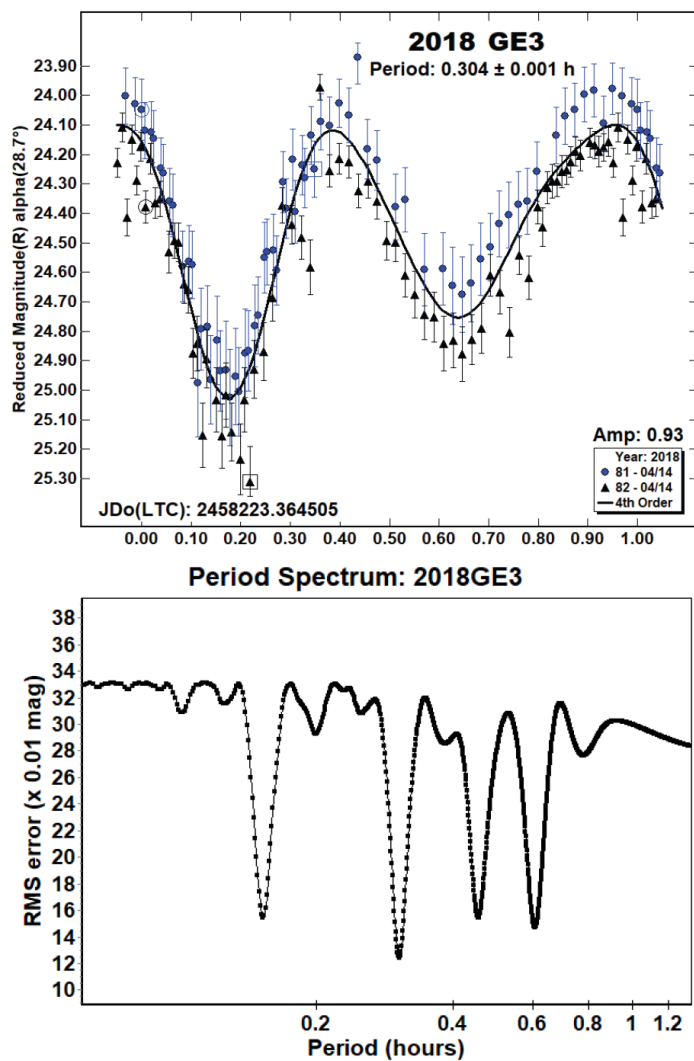


Figura 6.25: Curba de lumină a asteroidului 2018 GE3 și spectrul de perioade.



## 6.3 Asteroizi activi

Pe parcursul doctoratului am observat un asteroid activ, (6478) Gault, pentru care am făcut 8 nopți de observație, între 23 martie și 26 aprilie 2019. Acest asteroid a format o coadă care a putut fi observată pe parcursul unei luni. Am realizat observații fotometrice cu telescopul NEEMO T05 care au fost publicate în articolul *Active asteroid (6478) Gault: a blue Q-type surface below the dust?* în The Astrophysical Journal Letters, la care sunt coautor. Mai jos prezint articolul și contribuția mea la studiul acestui asteroid.

### 6.3.1 (6478) Gault: o suprafață de tip Q sub praf?

#### Abstract

În acest articol prezentăm observații spectroscopice în infraroșul apropiat ale asteroidului (6478) Gault de la telescopul de 3 m NASA/Infrared Telescope Facility realizate în lunile martie și aprilie 2019. Imagini de la telescopul NEEMO T05 și alte date publicate anterior sunt folosite drept context pentru observațiile spectroscopice. Confirmăm că asteroidul este bogat în silicați (de tipul Q sau S) și este legat din familia (25) Phocaea. Asteroidul prezintă o variație spectroscopică substanțială în gama de  $0,75\text{-}2,45\mu\text{m}$ , de la o pantă spectrală în albastru ( $s' = -13,5 \pm 1,1\% \mu\text{m}^{-1}$ ) la roșu ( $s' = +9,1 \pm 1,2\% \mu\text{m}^{-1}$ ), variație care nu pare să fie corelată cu activitatea. Comparația dintre spectrul asteroidului și cel ale condritelor ordinare sugerează că albastrul se datorează pierderii parțiale de regolit, ceea ce duce la expunerea unei suprafețe proaspete, săracă în praf. Existența asteroizilor cu o rotație la limita limitei de dezintegrare, cu spectre asemănătoare cu a lui Gault, întărește ideea menționată mai sus. Observații spectroscopice făcute după ce încetează activitatea cometară a asteroidului vor confirma sau infirma ipoteza noastră.

#### Introducere

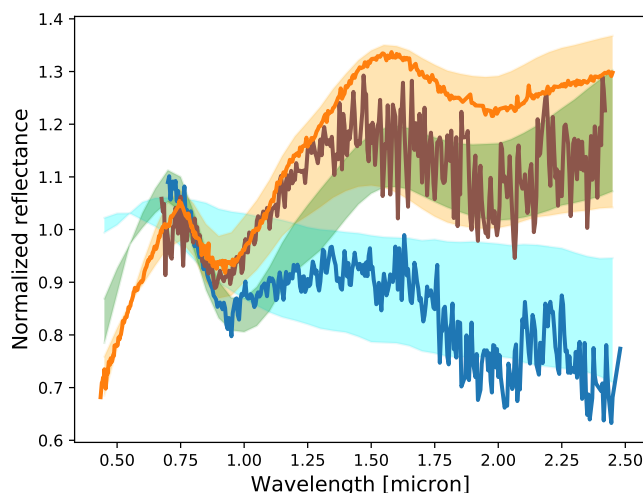
În luna martie 2019 a fost raportată activitate cometară pentru asteroidul (6478) Gault, un asteroid de  $\sim 4\text{-km}$ . Se estimează că au fost emise zeci de milioane de kg de praf [100] [108] [162] [292], care au format o coadă lungă și subțire, identificate

pentru prima oară în imaginile Hawaii ATLAS [242], în decembrie 2018 [227]. Activitatea a fost confirmată de mai multe echipe [78] [79] [104] [125] [291], între timp apărând alte două cozi [108]. Imagini din arhivă arată că asteroidul a fost activ și în trecut [42], semn că motivul activității nu este unul colizional. Activitatea cometară nu poate fi pusă nici pe emisia de materiale volatile, observându-se că asteroidul este activ când se află la afeliu [42], totodată nefiind detectată prezența gazului în spectru [108]. Pentru asteroid a fost determinată o perioadă de rotație de aproximativ 2 ore [115], apropiată de viteza de dezintegrare rotațională [195] dar și o viteză mică a particulelor de praf ejectate [100] [108], [115] [162] [292]. Din toate aceste date se consideră că activitatea apărută este datorată creșterii vitezei de rotație din cauza radiației solare (efectul YORP) [20] [260]. Până în prezent însă, observațiile fotometrice nu indică o variație de strălucire pe termen scurt a asteroidului [108] [162] [292], acest fapt fiind pus pe seama anvelopei de praf care înconjoară obiectul [128]. O altă ipoteză spune că activitatea poate fi produsă prin detașarea unui asteroid binar cu componente în contact [292] însă nu există date fotometrie care să confirme sau să infirme acest lucru.

Taxonomia obiectului înainte de episodul activ este foarte puțin cunoscută. Din punct de vedere dinamic asteroidul a fost asociat cu două familii: Phocaea, care conține asteroizi de tip S și Tamara, în care se găsesc predominant asteroizi de tip C [170] [175]. Observații făcute cu Zwicky Transient Facility (ZTF) au stabilit că asteroidul are culori asemănătoare cu cele ale asteroizilor de tip C și Q [292] [100] [108] [292]. Spectroscopia în infraroșul apropiat a dus la clasificare asteroidului ca tip Q sau S [217], stabilindu-se astfel legătura dintre familia Phocaea și Gault. În acest articol raportăm observații spectroscopice în infraroșul apropiat și măsurători fotometrice simultane care vin în sprijinul celor spectroscopice.

## **Spectroscopie**

Observațiile spectroscopice au fost realizate cu telescopul NASA Infrared Telescope Facility (IRTF) din Hawaii, cu spectrograful SpeX [204]), cu fantă de  $0,8 \times 15$  arcsec în modul de rezoluție joasă, în domeniul  $0,7\text{-}2,5 \mu\text{m}$ . Au fost luate spectre cu timpul de expunere de 120s. În fiecare seară au fost observate și trei stele de tip solar, spectrele acestora fiind folosite la reducerea spectrelor asteroidului. Spectrele au



**Figura 6.26:** Spectrul asteroizilor Gault și Phocaea.

fost reduse cu Image Reduction and Analysis Facility (IRAF) și Interactive Data Language (IDL), folosind soft-ul Autospex. Spectrele au fost reduse prin extragerea pixelilor defecti, a imagini flat field și a fundalului cerului. La finalul procedurii a fost scăzut spectrul mediu al stelelor de tip solar.

Spectrele asteroidului au fost comparate cu cele ale asteroidului Phocaea (Fig. 6.26), amândouă prezentând benzi de absorbție la  $1\mu\text{m}$  și  $2\mu\text{m}$ , detalii obișnuite la asteroizii de tip S sau Q [33] [48]. Acest rezultat confirmă apartenența lui Gault la familia Phocaea și este în concordanță cu alte rezultate [217].

Panta spectrală a lui Gault s-a modificat pe parcursul a două nopți de observație. Pe 8 aprilie spectrul era roșu, cu un gradient spectral de  $s' = 9,1 \pm 1,2\% \mu\text{m}^{-1}$ , asemănător cu cel al asteroizilor de tip S dar mai mic decât al lui Phocaea  $s' = 22 \pm 0,2\% \mu\text{m}^{-1}$ . Pe 31 martie însă, spectrul era albastru, cu o pantă negativă  $s' = -13,5 \pm 1,1\% \mu\text{m}^{-1}$ . Asteroizii de tip B au pante spectrale negative, însă aceștia nu prezintă absorbții în infraroșul apropiat. Din punct de vedere al liniilor de absorbție spectrul lui Gault este de tip S, dar ca pantă spectrală este mai albastru decât cele ale asteroizilor tip S sau Q.

Datele au fost verificate pentru a ne asigura că nu observăm un efect al reducerilor de date, al instrumentului sau al condițiilor de observație. Asteroidul a fost observat la o masă de aer mică ( $<1.3$ ) și la unghi de fază mic ( $\alpha < 20^\circ$ ). Spectrul s-a redus separat cu cel al fiecărei stele de tip solar separat pentru a identifica

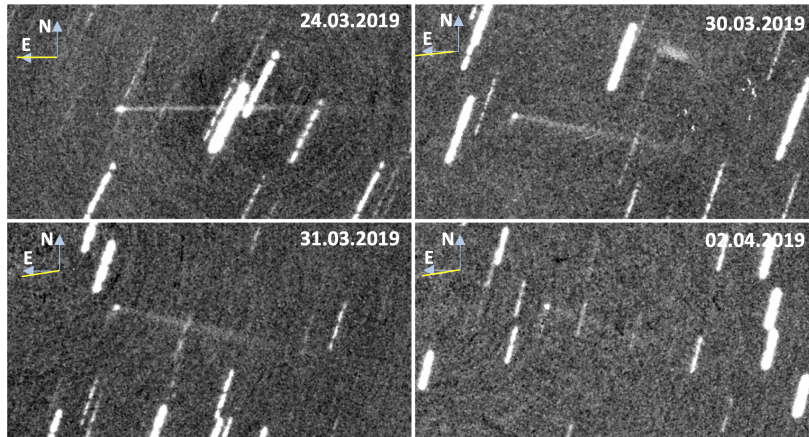
UT Date	Mean MJD	Instrument	Air Mass	$r_H$ (AU)	$\Delta$ (au)	$\alpha$ (deg)
2019 Mar 31	58573,398553	SpeX	1,09–1,33	2,30	1,44	16,0
2019 Apr 8	58581,293721	SpeX	1,05–1,06	2,28	1,48	18,9
2019 Mar 23	58565,910038	NEEMO T05	1,52–1,62	2,32	1,41	12,9
2019 Mar 24	58566,849897	NEEMO T05	1,45–1,47	2,31	1,41	13,3
2019 Mar 30	58572,863234	NEEMO T05	1,38–1,51	2,30	1,43	15,8
2019 Mar 31	58573,849273	NEEMO T05	1,38–1,46	2,30	1,44	16,1
2019 Apr 02	58575,847994	NEEMO T05	1,38–1,41	2,29	1,45	16,9
2019 Apr 04	58577,821224	NEEMO T05	1,36–1,37	2,29	1,46	17,7
2019 Apr 24	58597,834428	NEEMO T05	1,39–1,46	2,24	1,61	23,7
2019 Apr 26	58599,782625	NEEMO T05	1,27–1,30	2,24	1,63	24,1

**Tabelul 6.7:** Circumstanțele de observații spectroscopice și fotometrice pentru asteroidul (6478) Gault.

o posibilă eroare de observație, însă panta spectrală a rămas la fel. S-a verificat spectrul altui asteroid observat după Gault, însă acesta nu a fost albastru.

## Fotometrie

Aproape simultan cu observațiile spectroscopice s-a realizat și fotometrie cu un telescop de 0,5 m Near Earth Environment Monitoring (NEEMO T05), echipat cu o cameră FLI ProLine 16803  $4k \times 4k$  [14] [16]. NEEMO T05 este un telescop relativ compact, cu un câmp vizual de  $47 \times 47 arcmin$ , al Institutului Astronomic al Academiei Române (cod IAU 073). Imaginile au fost luate cu timp de expunere de 120s, fără filtru, în mod binning  $2 \times 2$ , ceea ce înseamnă a fost înregistrată strălucirea obiectului în gama de 0,36-0,93  $\mu m$ . Imaginile au fost reduse cu procedura standard, iar fotometria a fost realizată folosind stele de referință cu raport semnal/zgomot mai mare de 100. Magnitudinile stelelor de referință au fost luate din catalogul AAVSO Photometric All-SkySurvey - APASS [91], fiind folosită magnitudinea în V la reducere. Măsurătorile individuale din fiecare seară au fost mediate, iar magnitudinea medie folosită la curba de lumină.

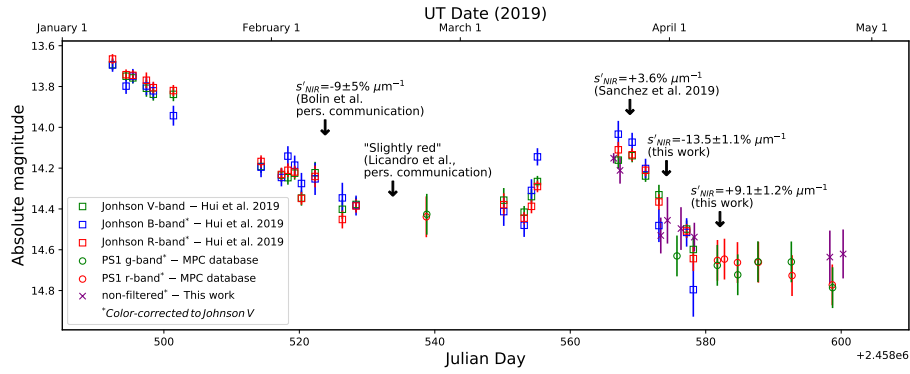


**Figura 6.27:** Asteroidul Gault și coada sa. Imagini luate de la NEEMO T05, Imaginile sunt normalizate. Pe ele sunt marcate orientarea câmpului și direcția antisolară. Pământul a trecut în planul orbitei asteroidului în data de 24 martie 2019.

### Curba de lumină fotometrică

Observații fotometrice suplimentare au fost colectate de la alte echipe între ianuarie și mai 2019 și folosite pentru a se studia curba de lumină a asteroidului [100]; [292]. Toate măsurătorile au fost convertite în magnitudini absolute. Magnitudinile observate au fost reduse la distanțele heliocentrice și geocentrice de 1 UA și corectate pentru unghiul de fază și pentru a se calcula o strălucire ținând cont de coada și coama asteroidului [29] [221]. [292] a determinat  $H_{n,g} = 14,81 \pm 0,04$  și  $H_{n,r} = 14,31 \pm 0,01$  pentru faza dinainte de începerea activității, luând în considerare panta ( $G$ ) de 0,15. Am recalculat valorile magnitudinii absolute folosind o pantă de 0,23, caracteristică asteroizilor de tip S și am găsit  $H_{n,g} = 14,88 \pm 0,04$  și  $H_{n,r} = 14,38 \pm 0,01$ , care, transformate în domeniul Johnson V [243], dau  $H_{n,B} = 15,39 \pm 0,06$ ,  $H_{n,V} = 14,64 \pm 0,04$ ,  $H_{n,R} = 14,17 \pm 0,04$ . În final, toate magnitudinile măsurate au fost transformate în magnitudini V.

Curba de lumină rezultată (6.28) arată scăderea strălucirii după momentul creșterii activității, de la sfârșitul lui 2018 până în martie 2019. O creștere bruscă de strălucire s-a înregistrat pe 24 martie 2019, perioadă care coincide cu trecere Pământului în planul orbitei asteroidului. Creșterea strălucirii este datorată prezenței prafului în planul orbital al asteroidului și nu unei alte creșteri a ac-



**Figura 6.28:** Curba de lumină a asteroidului. Se observă scăderea și creșterea bruscă a strălucirii. Pe grafic sunt marcate momentele când s-au realizat observații spectroscopice. Nu se observă nicio corelație dintre panta spectroscopică și magnitudinea absolută.

activității, idee susținută și de faptul că nu a apărut o altă coadă. În continuare, strălucirea asteroidului a scăzut.

### Posibile explicații pentru variabilitatea spectrală.

Pentru a investiga originea modificărilor spectrale am identificat spectre luate anterior, care arată că asteroidul a mai suferit un episod de creștere a activității cu aproximativ 50 de zile înainte de cel investigat în acest articol. Modificarea pantei spectrale nu se poate asocia cu cea a magnitudinii absolute, drept pentru care modificările par să fie independente de activitatea asteroidului.

Cometele sunt obiecte ale căror culori spectrale se modifică destul de rapid [283] [101] [130] însă originea variabilității nu este încă elucidată. Sublimarea gheții sau compoziția prafului emis de comete pot avea ca rezultat modificări de culoare, însă pentru un asteroid nu se poate lua în considerare sublimarea gheții pentru că locul în care s-au format aceste obiecte este mai aproape de Soare decât cel în care se găseau elementele volatile în stare solidă [253]. În cazul lui Gault, absența gazului în spectru și forma cozilor exclud ca sursă sublimarea.

Împrăștierea Rayleigh poate schimba culoarea spectrală a unui obiecte însă în cazul lui Gault, particulele din care este compusă anvelopa de praf par să aibă mărimi de  $100\mu\text{m}$  și nu ar putea produce împrăștierea Rayleigh [108] [292].

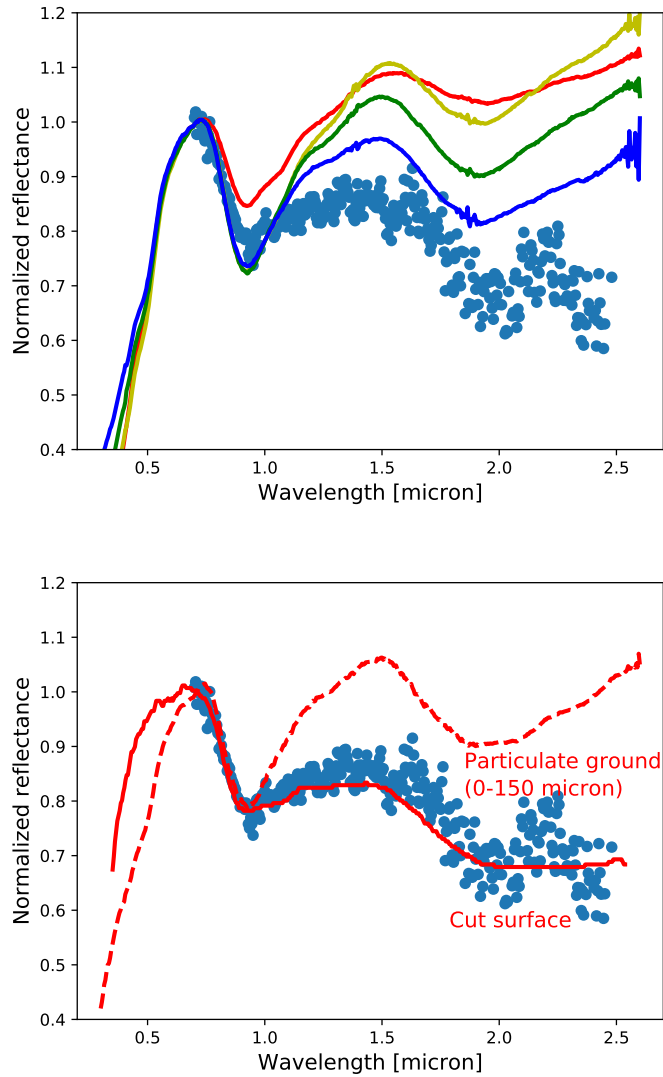
Asteroizii de tip S au drept corespondent pe Pământ meteoriții condrite or-

dinare [167]. Pantele spectrale ale acestora sunt roșii sau neutre și se modifică în funcție de mărimea particulelor componente. Cu cât sunt mai mari particulele, cu atât culoarea spectrală este spre neutru, însă nu s-a observat până acum vreun spectru albastru.

Meteorii condrite ordinare săraci în praf au spectrele cele mai apropiate de cel al lui, Gault, varianta albastră. Asteroizii cu rotație rapidă, care pot pierde material din cauza forței centrifuge, pot avea un spectru albastru uneori, atunci când suprafața se curăță, în urma pierderii de materie. Din acest motiv, ar trebui ca și alți asteroizi de tip Q, cu rotație rapidă, să prezinte pantă spectrală albastră [190]. Au fost căutați asemenea asteroizi în baza de date SMASS/MITHNEOS [10] și au fost găsite șase obiecte de tip Q, dintre care două cu rotație rapidă. În același timp au fost găsiți și asteroizi de tip S cu rotație rapidă, semn că nu toți pierd materie. Concluzia studiului nostru este că asteroidul Gault are o suprafață parțial curățată de praf, care prezintă o pantă spectrală albastră.

## Concluzii

În acest articol prezentăm observații spectroscopice în infraroșul apropiat ale asteroidului (6478) Gault de la telescopul de 3 m NASA/Infrared Telescope Facility realizate în lunile martie și aprilie 2019. Imagini de la telescopul NEEMO T05 și alte date publicate anterior sunt folosite drept context pentru observațiile spectroscopice. Confirmăm că asteroidul este bogat în silicați (de tipul Q sau S) și este legat din familia (25) Phocaea. Asteroidul prezintă o variație spectroscopică substanțială în gama de  $0,75\text{-}2,45\mu\text{m}$ , de la o pantă spectrală în albastru ( $s' = -13,5 \pm 1,1\% \mu\text{m}^{-1}$ ) la roșu ( $s' = +9,1 \pm 1,2\% \mu\text{m}^{-1}$ ), variație care nu pare să fie corelată cu activitatea. Comparația dintre spectrul asteroidului și cel ale condritelor ordinare sugerează că albastrul se datorează pierderii parțiale de regolit, ceea ce duce la expunerea unei suprafețe proaspete, săracă în praf. Observații spectroscopice făcute după ce încetează activitatea cometară a asteroidului vor confirma sau infirma ipoteza noastră.



**Figura 6.29:** Comparație între spectrul albastru al lui Gault din noaptea de 31 martie 2019 și cel al câtorva meteoriți condrite ordinare. Sus: 0-25 $\mu\text{m}$  (roșu), 25-45 $\mu\text{m}$  (galben), 45-75 $\mu\text{m}$  (verde) și 75-125 $\mu\text{m}$  (albastru închis); Jos: comparație cu material pisat și o bucată din meteoritul Bald Mountain L4 Mountain L4 OC. Bucata întreagă de meteorit este cea mai bună analogie cu spectrul asteroidului.



## 6.4 Asteroizi din campanii observații

Am observat trei asteroizi geointersectori din cadrul unor campanii de observații, coordonate în plan internațional, după cum urmează:

- asteroidul geointersector binar (66391) 1999 a fost observat cu ocazia unei campanii de observații inițiată de International Asteroid Warning Network (IAWN);
- asteroidul geointersector (155140) 2005 UD a fost observat cu ocazia campaniei internaționale inițiată de operatorii misiunii spațiale Destiny+;
- asteroidul geointersector 2012 TC4 cu ocazia unei campanii organizate de Universitatea din Maryland, realizată când obiectul a trecut la doar 50.000 km de Pământ.

Voi prezenta pe larg rezultatele obținute deoarece au făcut subiectul a trei articole diferite, iar analiza lor nu s-a limitat doar la studiul fotometric.

### 6.4.1 Asteroidul (66391) 1999 KW4

Asteroidul geointersector binar (66391) 1999 a fost observat cu ocazia unei campanii de observații inițiată de International Asteroid Warning Network (IAWN) timp de cinci zile în iunie 2019 de la stația de observație NEEMO T05 a Institutului Astronomic al Academiei Române. Am determinat o perioadă de rotație de 2,7652 ore, cu o amplitudine de 0,24 magnitudini. Datele noastre arată o scădere de strălucire care poate fi datorată unei ocultații sau eclipse a componentelor sistemului. Am integrat numeric orbita asteroidului pentru un interval de [-100:100] ky și am găsit evoluții haotice ale semiaxe mari ale orbitei, cu numeroase captări și salturi.

#### Introducere

Asteroidul geointersector de tip Aten (66391) 1999 KW4 a fost descoperit pe 20 mai 1999 de către programul Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR). Chiar dacă la momentul descoperirii nu s-au efectuat studii pentru determinarea

parametrilor fizici, a fost evident că obiectul are un diametru mare, având o magnitudine absolută de 16,5. În 2001, în momentul unei apropieri de Pământ la numai 0,03233 UA (cea mai mică depărtare până în 2036), asteroidul a fost observat RADAR de la observatoarele Goldstone și Arecibo, fiind determinată o perioadă de rotație de 2,8 ore și o mărime de 1,3 km [182]. A fost descoperit și un satelit al acestui obiect, cu mărimea de 500 m, care se rotește în jurul corpului primar în 17,4 ore. Începând cu data de 27 august 2019, corpul primar se numește Moshup și cel secundar Squannit [153].

Densitatea sistemului este de  $2,000 \text{ kg/m}^3$ , satelitul fiind mai dens decât corpul principal, iar porozitatea sistemului este de 50% [182]. Proprietățile au fost confirmate și de Pravec cu date obținute în 2000 și 2001 [196]. Menționăm și starea de rotație sincronă a sistemului binar [166], precum și elementele orbitale  $a = (2,578 \pm 0,015) \text{ km}$ ,  $i = (156,1 \pm 0,2)$  și  $e = (0,0004 \pm 0,0019)$  determinate de [218].

Spectre în infraroșul apropiat au fost obținute cu telescopul NASA IRTF, asteroidul aparținând tipului taxonomic S [11], în care se găsesc cei mai mulți asteroizi binari [183]. Rezultate anterioară arată că cele două componente ale sistemului au aceleași proprietăți mineralogice [15, 40].

În mai 2019, 1999 KW4 s-a apropiat din nou de planeta noastră, la 0,0346 UA, distanță similară cu cea din 2001. Cu această ocazie a fost pornită o campanie internațională de observații de către International Asteroid Warning Network<sup>1</sup> (IAWN). Conform UN Office for Outer Space Affairs, asteroizii geointersectorii reprezintă un risc de catastrofă pentru planeta noastră. Obiectivul IAWN este să supervizeze răspunsurile la alertele de observație și să stabilească un grup internațional de observatoare care să găsească, urmărească și să caracterizeze asteroizii geointersectorii. IAWN coordonează și înființează campanii de observație, un exemplu fiind dat de campania pentru asteroidul 2012 TC4 [206, 228].

Pentru că un asteroid geointersector se apropie mult de Pământ la câteva zeci de ani [13], este normal ca în acele momente să se încerce obținerea a câtor mai multe tipuri de date fizice.

66391 (1999 KW4) s-a apropiat de Pământ în 2019, circumstanțele de observații

---

<sup>1</sup><http://iawn.net/>

fiind favorabile observațiilor fotometrice din România după data de 25 mai. Asteroidul s-a aflat în preajma ecuatorului ceresc și a putut fi observat la unghiuri de fază moderate.

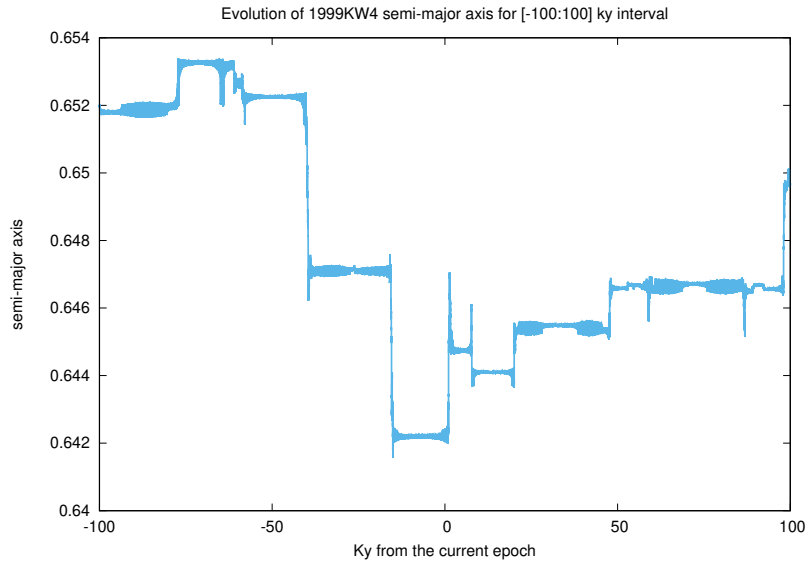
### **Proprietăți dinamice**

66391 (1999 KW4), un asteroid geointersector mare, se află în sistemul solar interior, pe o orbită cu excentricitate și înclinare mare ( $a = 0,64$  AU,  $i = 38,88^\circ$ ,  $e = 0,69$ ). Chiar dacă nu se află pe lista de asteroizi de risc, 1999 KW4 se apropie de trei planete: Mercur, Venus și Terra. Pentru a explora proprietățile dinamice ale acestui asteroid Aten, am integrat numeric orbita sa pentru un interval de timp de  $[-100:100]$  ky (Figure 6.30) utilizând procedurile explicate în cite [53] și [168]. Evoluția semiaxei mari a orbitei este caracterizată de un comportament haotic, cu numeroase episoade de captări și salturi. Cele mai recente episoade au fost investigate prin generarea unei familii de 100 de clone cu orbite între 1 și 3  $\sigma$  față de incertitudinile obținute de la serviciul NeoDys. Clonele au fost integrate numeric pentru  $[-10:10]$  ky, fiind înregistrate apropierea de planetele din sistemul solar ( $d < 10$  raze Roche) sau impactul cu acestea ( $d < 0,5$  raze Roche). În viitor, familia de clone începe să divergă în urma unui apropieri mici de sistemul Pământ-Lună, în aproximativ 1 ky (1% din clone la mai puțin de 0,01 AU de Lună). 0,1 ky mai târziu, 25% din clone se apropie de Pământ la o distanță similară. În intervalul de timp de mai sus, 8% din clone vor întâlni planeta Venus în 7,9 ky (Fig. 6.31). Coeficientul Lyapunov determinat în urma integrării numerice este de doar 40 ani, o valoare obișnuită pentru un asteroid geointersector care se apropie de planete.

### **Observații**

Campania de observații a fost ținută la Institutul Astronomic al Academiei Române (cod MPC IAU 073), pentru că în ultimii ani s-au observat cu succes și alți asteroizi geointersectorii cu echipamentele respective [73, 228, 229].

Pentru campania de observație am folosit telescopul NEEMO T05 [14, 16]. Acest sistem de telescoape este instalat provizoriu la Institutul Astronomic, fiind în perioada de testare. Această campanie, împreună cu altele [133] reprezintă un test



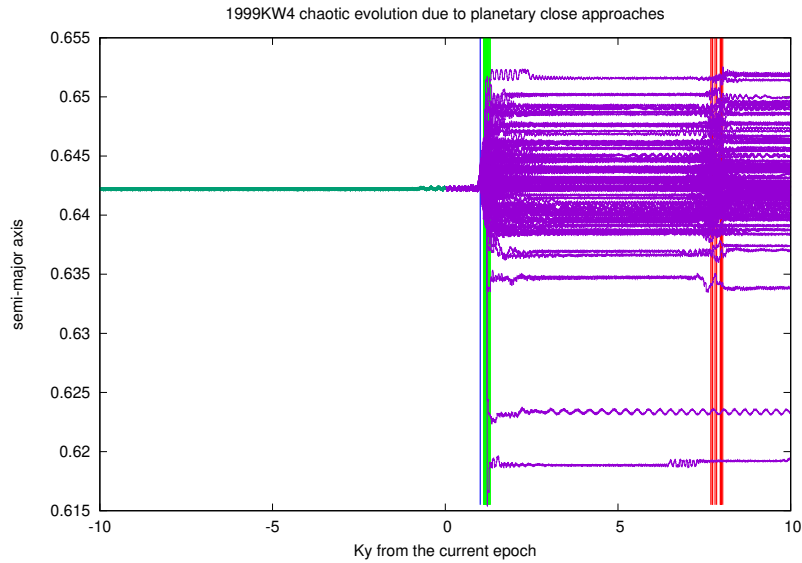
**Figura 6.30:** Evoluția semiaxe mari a orbitei asteroidului 1999 KW4.

care ne permite organizarea și altor campanii de observații dedicate caracterizării fotometrice a asteroizilor geointersectorii..

Camera folosită la achiziția de imagini este FLI ProLine 16803 4k×4k, cu telescopul NEEMO T05 ( $\text{FoV} = 47' \times 47'$ ). Imaginile au fost achiziționate fără filtru, cu expunere de 30 și 60s, în mod binning 2x2. Telescopul a urmărit cerul cu viteza asteroidului pentru a maximiza raportul semnal/zgomot (SNR). Observațiile au fost făcute pe parcursul a 5 nopți, între 1-12 iunie 2019, cu un total de 10,36 ore de observații. Unghiul de fază la care s-au făcut observațiile a variat între  $69^\circ$  și  $73^\circ$ , distanța dintre asteroid și Pământ fiind crescătoare. Strălucirea aparentă a asteroidului a crescut, împreună cu viteza aparentă. Un sumar al datelor de observație sunt prezentate în Tabelul 5.3.

Pe parcursul îndepărtării asteroidului de Pământ strălucirea acestuia a scăzut foarte rapid, drept pentru care SNR-ul obiectului a variat mult, fiind de 105 pe 1 iunie și de 25 pe 12 iunie. Obiectul a fost observat la mase de aer cât mai mici, între 1,2 și 2.

Determinarea de perioadă a fost făcută cu MPO Canopus, program care folosește algoritmul FALC [86]. Perioada de rotație a fost obținută cu ajutorul analizei Fourier, un polinom Fourier de gradul 2 fiind suficient pentru descrierea curbei de lumină.



**Figura 6.31:** Comportamentul clonelor în intervalul  $[-10:10]$  ky. Cele mai importante apropieri de Lună, Pământ și Venus sunt marcate cu albastru, verde și roșu.

## Rezultate

Am determinat o perioadă de rotație de  $2,7652 \pm 0,0036$  ore și o amplitudine de  $0,24 \pm 0,05$  magnitudini. Amplitudinea variației de strălucire este de două ori mai mare decât cea publicată de [196], curbă de lumină în care datele aveau o dispersie mai mare decât cele din curba noastră de lumină. Discrepanța poate fi explicată prin i) observațiile noastre nefiltrate, și ii) o geometrie diferită sub care a fost observat sistemul. Curba de lumină este prezentată în Fig. 6.32. Valorile obținute de noi, perioada de rotație, amplitudinea și forma curbei de lumină, sunt în concordanță cu cele obținute anterior [182, 196]. 1994 KW4 are o curbă de lumină bimodală, cu minime de strălucire diferite.

Am analizat datele noastre pentru a identifica semnalul satelitelui, vizibil ca o scădere în strălucire cu o perioadă lungă. Analiza nu a dat roade, putând fi explicată prin următoarele aspecte:

- datele noastre sunt prea zgomotoase; poziția telescopului în interiorul orașului face ca fundalul cerului să fie mare în raport cu semnalul asteroidului; fotometria este afectată, nefiind posibil detectarea de variații foarte mici de strălucire;
- mișcarea rapidă a asteroidului nu a permis timpuri de expunere mari, care ar fi

Night	start - end [hh:mm]	Exp. time [s]	V [mag]	Airmass	$\Delta$ [AU]	Phase [°]	No. obs.
01.06.2019	19:27 - 21:29	30s	13,4	1,3 - 1,9	0,0921	73,3	171
04.06.2019	19:16 - 21:16	60s	14,6	1,2 - 1,7	0,1271	70,0	102
07.06.2019	19:41 - 21:55	60s	15,1	1,2 - 2,0	0,1631	69,5	114
08.06.2019	19:54 - 21:47	60s	15,3	1,3 - 1,9	0,1750	69,4	93
12.06.2019	19:27 - 21:40	60s	15,8	1,2 - 1,8	0,2226	69,2	90

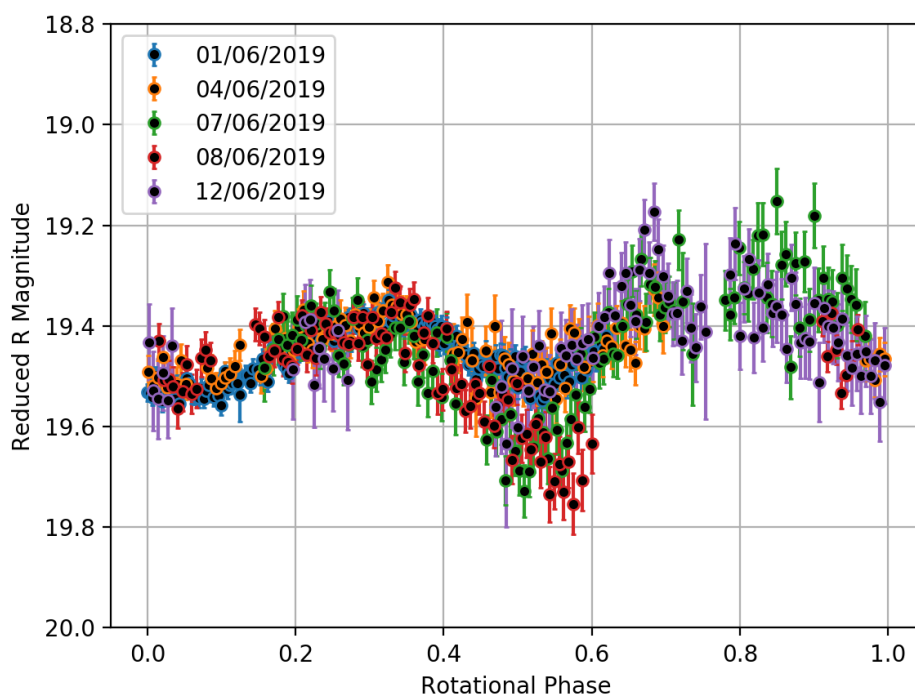
**Tabelul 6.8:** Circumstanțele de observații pentru campania asteroidului 1999 KW4. Tabelul conține momentele de început și sfârșit pentru fiecare noapte de observații, timpul de expunere folosit la achiziția de imagini (TU), valoarea masei de aer pe parcursul observațiilor.  $V$  este magnitudinea vizuală calculată a asteroidului, iar  $\Delta$  este distanța dintre asteroid și Pământ, în Unități Astronomice. Sunt date și unghiul de fază, precum și numărul de observații folosite.

permis obținerea unui SNR mare; în anumite cazuri obiectul se afla jos față de orizont, un motiv în plus pentru un semnal slab;

- orientarea orbitei satelitului ar fi putut fi nefavorabilă, cu polul orbitei îndreptat înspre observator; această orientare nu permite detectarea unei scăderi de strălucire; un argument împotriva acestei situații este amplitudinea primarului, care este asemănătoare cu cea din literatură, semn că orientarea sistemului nu s-a schimbat.

Inspecția vizuală a curbei de lumină compozite arată o scădere de strălucire la faza de 0,55 a perioadei de rotație, doar în noaptea de 7 spre 8 iunie 2019. Putem specula că această scădere este rezultatul unei ocultații sau eclipse a primarului de către satelit, după cum se explică în [50, 49]. Ca și în cazul asteroidului (854) Frostia, prezentat în Fig. 1 în [6], curba de lumină prezintă o amplitudine mică, cu excepția fenomenelor mutuale (ocultație sau eclipsă). Atunci când se produc astfel de fenomene, amplitudinea crește brusc și curba de lumină prezintă două minime cu aspect de  $V$ .

În acest caz, inspecția detaliată a scăderii de strălucire este justificată. Scăderea se va produce la o valoare comensurabilă cu jumătatea perioadei satelitului, la un



**Figura 6.32:** Curba de lumină compozită a asteroidului (66391) 1999 KW4 din observații făcute la București. Fiecare noapte de observații este marcată cu o culoare diferită. Datele sunt reprezentate pentru o perioadă de  $2,7652 \pm 0,0036$  ore. Amplitudinea curbei de lumină este de  $0,24 \pm 0,05$  magnitudini.

raport de numere naturale ( $1/2$ ,  $2/2$ ,  $3/2$ ,  $4/2$ , etc.), momente asociate eclipsarea primarului de către satelit sau ocultarea satelitului de către primar. Momentul scăderii din noaptea de 7 spre 8 iunie este separat de 25h06m, această valoare fiind relativ apropiată de raportul  $3/2$  din perioada satelitului. Acesta este un rezultat nesigur pentru că datele noastre conțin doar panta scăderii de strălucire, nu și mijlocul acesteia. Scăderea poate fi produsă de eclipsarea sau ocultarea satelitului de către primar.

## Concluzii

Asteroidul 66391 (1999 KW4) a fost observat timp de 5 nopți de la Institutul Astronomic al Academiei Române, în iunie 2019. Perioada de rotație determinată a fost de  $2,7652 \pm 0,0036$  ore, o valoare care este în foarte bună concordanță cu rezultatele anterioare. Amplitudinea este de  $0,24 \pm 0,05$  magnitudini, mai mare

decât cea raportată anterior, fapt care poate fi explicat printr-o orientare diferită a sistemului. O scădere mai mare de strălucire, observată la faza de 0,55, poate fi explicată prin eclipsarea sau ocultarea componentelor sistemului. Datele noastre nu au putut fi folosite pentru determinarea perioadei orbitale a satelitului din cauza timpului prea scurt de observații. Am integrat numeric orbita asteroidului pentru un interval de  $[-100:100]$  ky și am găsit că evoluția semiaxei mari a orbitei prezintă numeroase episoade de captări și salturi.

This work undertaken in Bucharest was supported by a grant of the Ministry of National Education and Scientific Research, RDI Program for Space Technology and Advanced Research - STAR, projects number 513 and 465.



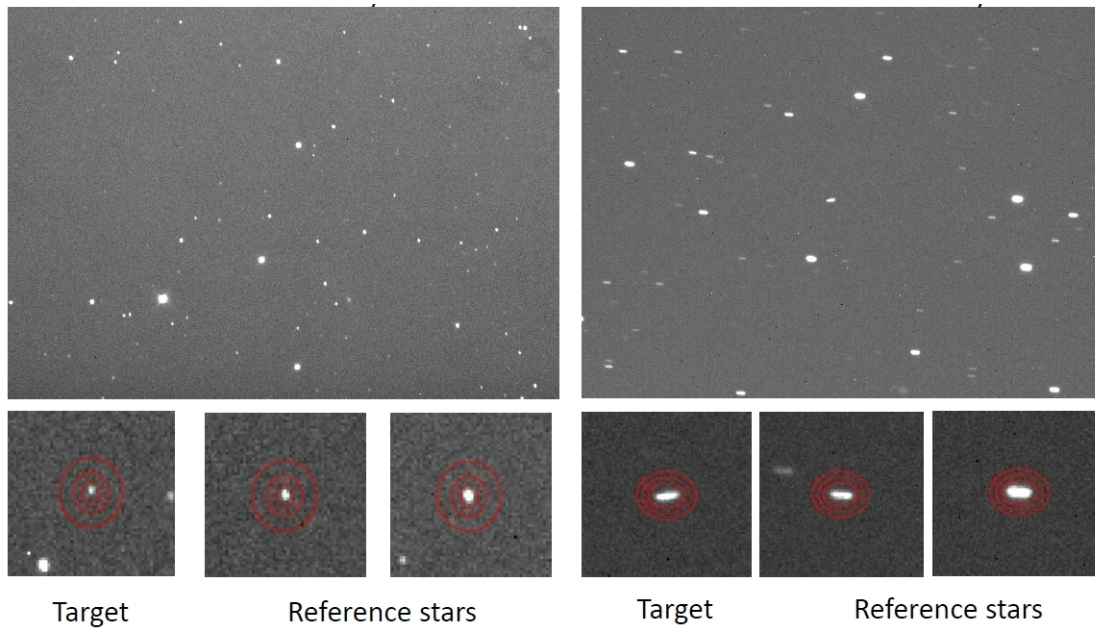
## 6.4.2 Asteroidul (155140) 2005 UD

Asteroidul (155140) 2005 UD, un posibil fragment al lui (3200) Phaethon și o țintă a misiunii spațiale Destiny+ a fost observat din două locuri diferite, București, România și Les Makes – Réunion cu ocazia unei campanii internaționale inițiată în Japonia. Campania a fost inițiată cu scopul de a se obține o urmărire continuă a asteroidului, de pe mai multe meridiane. Am determinat perioada de rotație a asteroidului, care este de  $5,231 \pm 0,034$  ore și are o amplitudine de 0,38 de magnitudini. Ambele valori sunt în bună concordanță cu rezultatele obținute anterior. Prezentăm și observații din două locuri diferite, în care datele se suprapun pe curba de lumină.

### Introducere

(155140) 2005 UD este un asteroid geointersector mic, descoperit pe 22 octombrie 2005 la Catalina Sky Survey. O similaritate între elementele orbitale ale acestui asteroid și cele ale lui (3200) Phaethon a fost identificată imediat după descoperire și a fost stabilit faptul că 2005 UD este un fragment al lui (3200) Phaethon, asteroid care este sursa curenților de meteori Geminide [53]. În 2007 a fost determinată o perioadă de rotație de 5,231 ore pentru acest obiect [113] și că are o culoare asemănătoare cu a lui Phaethon [109]. S-a determinat și faptul că 2005 UD are variații de culoare pe suprafață, caracteristică asociată fragmentării.

În septembrie 2018, o apropiere relativ mică a asteroidului de Pământ ( $\sim 0,22$  AU) a permis o mai bună caracterizare fizică a acestuia, fiind demarată o campanie internațională de observații, în ajutorul misiunii spațiale japoneze Destiny+, care are ca țintă principală asteroidul Phaethon și ca țintă secundară pe 2005 UD. Raportăm aici rezultate din două locuri diferite: Institutul Astronomic al Academiei Române în București, România și Les Makes Observatory din Insulele Réunion, Franța. Aceste observații au fost parte a campaniei internaționale condusă de Dr Fumi Yoshida de la Chiba Institute of Technology din Japonia, campanie care și-a propus determinarea a câtor mai multe caracteristici fizice ale obiectului [3].



**Figura 6.33:** Exemplu de imagini și de reducere fotometrică; stânga: imagini de la București; dreapta - imagini de la Les Makes.

### Observații

În România, observațiile au fost realizate la Institutul Astronomic al Academiei Române (IAU MPC code 073), unde au mai fost observați asteroizi din campanii de observații [73, 228, 229]. Am folosit un telescop de tip Ritchey-Chretien, cu diametru de 0,38 m,  $f/6$  și o cameră CCD SBIG STL-11000M, răcită la  $-20^{\circ}\text{C}$ . Câmpul vizual al sistemului este de  $44' \times 29'$  și scara imaginii de  $1,3''/\text{pixel}$  (imaginile au fost luate în mod binning  $2 \times 2$  pentru a maximiza timpul de descărcare de la senzor). Pentru a maximiza raportul semnal/zgomot (SNR) nu am folosit filtre în procesul de achiziție. Asteroidul a fost observat timp de 5 nopți, cu un timp total de observare de 13 ore. Unghiul de fază a variat între  $28^{\circ}$  și  $17^{\circ}$  iar depărtarea de Pământ a crescut. Magnitudinea aparentă a asteroidului a crescut, la fel ca și mișcarea proprie pe cer (Fig. 6.33).

Asteroidul a fost observat și de la Observatorul Les Makes, Insulele Réunion (IAU MPC code 181), cu un telescop reflector de 0,6-m,  $f/8$  și o cameră CCD SBIG STL-11000M răcită la  $-5^{\circ}\text{C}$ . Câmpul vizual este de  $25' \times 17'$ , cu o scară a imaginii de  $1,1''/\text{pixel}$  pe imagini luate cu binning  $3 \times 3$ . Observațiile au durat 3 nopți, cu un timp total de observare de 7,9 ore, în condiții similare celor descrise mai sus. Un

sumar al circumstanțelor de observare se găsește în Tabelul 5.4.

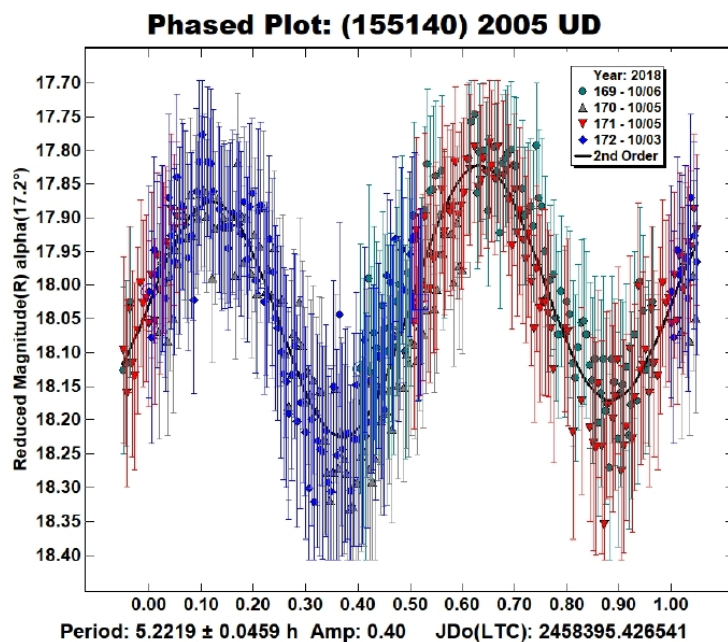
Night	start - end [hh:mm]	Exp. time [s]	V [mag]	Airmass	Delta [AU]	Phase [°]
Bucharest						
03.10.2018	22:16 - 00:59	90s	15,9	1,5 - 1,3	0,238	28
04.10.2018	21:48 - 00:39	90s	15,9 - 14,7	1,5 - 1,3	0,244	24,3
05.10.2018	21:22 - 00:24	90s	15,9 - 14,7	1,5 - 1,3	0,252	20,7
07.10.2018	20:26 - 23:11	90s	15,8 - 14,7	1,7 - 1,3	0,269	13,8
Les Makes						
05.10.2018	21:44 - 01:06	180s	15,9	2,3-1,2	0,252	20,5
07.10.2018	20:24 - 00:48	180s	15,8	3,0- 1,2	0,269	13,8

**Tabelul 6.9:** Circumstanțele de observare din București și Les Makes. Sunt date momentele de început și sfârșit ale observațiilor, masa de aer, distanța față de Pământ  $\Delta$  în UA, magnitudinea vizuală și faza.

## Rezultate

Din observațiile de la București am determinat o perioadă de rotație de  $5,222 \pm 0,046$  ore și o amplitudine de 0,4 magnitudini, curba de lumină fiind prezentată în Figure 6.34. Din observațiile de la Les Makes am determinat o perioadă de rotație de  $5,252 \pm 0,065$  ore și o amplitudine de 0,41 magnitudini, curba de lumină fiind prezentată în Fig. 6.35. Cele două valori sunt similare și în concordanță cu rezultatele obținute anterior [113]. Perioada de rotație obținută atunci când datele au fost puse în comun este de  $5,231 \pm 0,034$  ore, iar amplitudinea este de 0,38 magnitudini (Fig. 6.36).

O caracteristică importantă a datelor noastre este suprapunerea observațiilor făcute la cele două observatoare. Am efectuat observații simultane în noaptea de 5 octombrie 2018, pe parcursul a jumătate din rotația asteroidului (Fig. 6.37). Acesta este un test al metodelor de reducere și analiză a datelor. Curbele de lumină se suprapun cu o precizie foarte bună, ceea ce crește gradul de încredere în rezultatele obținute. Observațiile și rezultatele obținute au fost prezentate la conferința PDC



**Figura 6.34:** Curba de lumină din datele obținute de la București. Noapțile diferite de observație sunt marcate cu simboluri diferite.

2019 de la Chyba University și au fost puse la dispoziția campaniei internaționale de observații.

### Concluzii

Asteroidul geointersector (155140) 2005 UD a fost observat timp de 5 nopți din două locuri diferite, în octombrie 2018. Perioada de rotație obținută este de  $5,231 \pm 0,034$  ore și amplitudinea de 0,30 magnitudini. Menționăm că perioada de rotație a asteroidului nu s-a modificat din 2006.

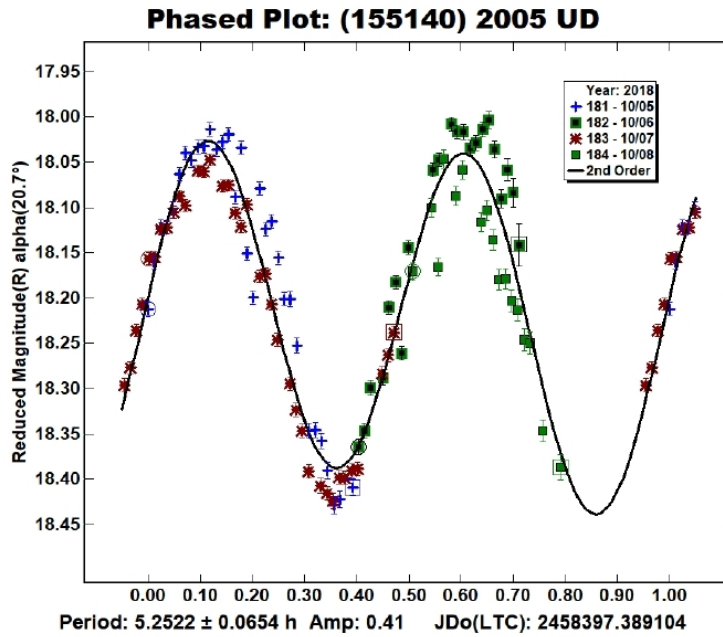


Figura 6.35: Curba de lumină din datele obținute de la Les Make. Noapțile diferite de observație sunt marcate cu simboluri diferite.

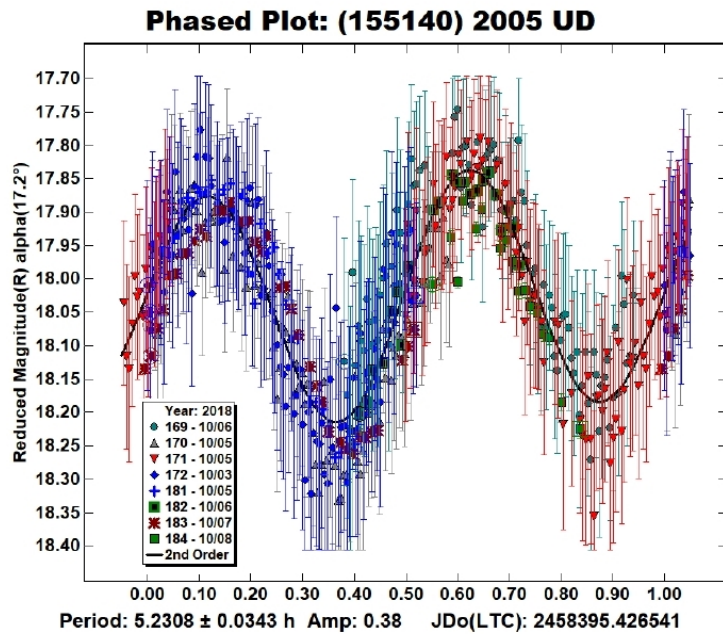


Figura 6.36: Curba de lumină obținută din toate observațiile.

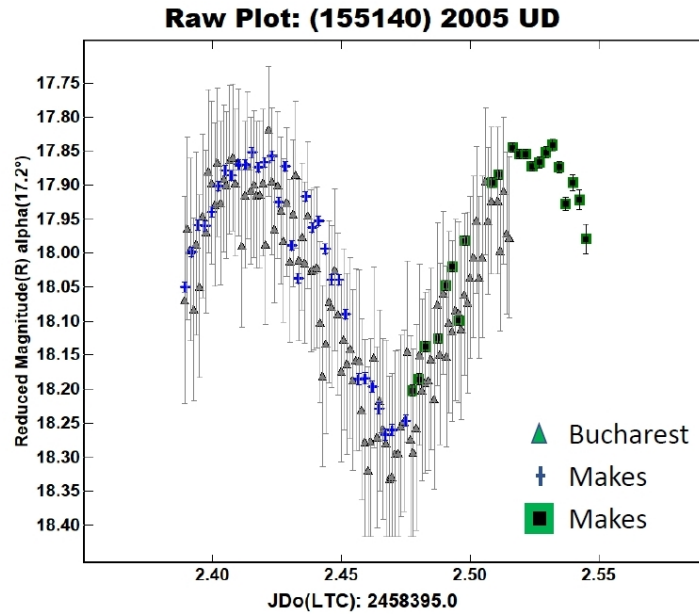


Figura 6.37: Suprapunerea datelor din noaptea de 5 octombrie 2018.

### 6.4.3 Asteroidul 2012 TC4

În acest articol prezentăm trei ore de observații fotometrice pentru asteroidul 2012 TC4, făcute în timpul apropierii minime de Pământ din 12 octombrie 2017. Observațiile noastre arată că asteroidul are o perioadă foarte mică de rotație,  $0,204 \pm 0,001$  ore, și este în rotație haotică. Ca formă, asteroidul este de 1,7 mai lung pe o latură decât pe alta. Rotația rapidă este compatibilă cu un obiect de tip monolit.

#### Introducere

Apropierea unui asteroid la mai puțin de o distanță lunară de Pământ reprezintă o oportunitate rară de a studia obiectele mici care reprezintă un risc pentru viața de pe planeta noastră. Apropierea minimă este deseori singurul moment când putem observa asteroizi mici. Este crucial să se determine cât mai mulți parametri fizici prin toate metodele posibile, radar, spectroscopie în vizibil și infraroșu și fotometrie, aceste date fiind utilizate pentru a se determina forma, perioada de rotație și compoziția suprafeței asteroizilor.

Asteroidul 2012 TC4 a fost descoperit pe 4 octombrie 2012 de către Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS) la Haleakala Observatory din Hawaii, Statele Unite. Pe 12 octombrie 2017, 2012 TC4 s-a apropiat

Day	start - end	Exp. time [s]	V [mag]	Airmass	$\Delta$ [LD]
10.10.2017	18:00 - 22:18	60	16,7	1,7-2,0	2,2-1,99
11.10.2017	18:30 - 20:47	10-30	15-14,7	1,8-2,0	0,74-0,58

**Tabelul 6.10:** Circumstanțele de observație: este dat momentul de început și sfârșit a fiecărei nopți de observații (în TU); timpul de expunere folosit, magnitudinea aparentă vizuală, masa de aer, faza și depărtarea de Pământ în distanțe lunare.

la doar 50.151 km de Pământ, fiind recuperat cu două luni înainte, pe când avea magnitudinea 27, cu telescopul FORS2 al Observatorului Sudic European. Această apropiere a fost cea mai mică până în anul 2108.

Nu a fost observabil din țara noastră la momentul minimei apropieri, dar am putut observa asteroidul timp de două nopți înainte.

La apariția anterioară s-a găsit că perioada de rotație este de 0,204 ore [178] [281] dar și de 0,2067 [36]. Din amplitudinea variației de strălucire s-a estimat și raportul dintre axa mare și scurtă a obiectului ca fiind de  $2,3 \pm 0,2$  [36]. Folosind magnitudinea absolută de 26,7 și un albedo între 0,05 și 0,5 putem calcula și o mărime aproximativă a obiectului care este între 9 și 30 de metri.

Având în vedere apropierea din 2017, comunitatea internațională a organizat o campanie de observații la care am participat și noi.

## Observații

Am observat asteroidul timp de două nopți, cu un timp total de observații de 6,4 ore, timp în care distanța față de Pământ s-a micșorat considerabil. Strălucirea aparentă a asteroidului a scăzut, iar viteza pe cer a ajuns la 117 arcsec/min.

## Reducerea datelor

Imaginile brute au fost calibrate cu imagini bias, flat și dark, folosind procedurile standard al softului. Setul de date a fost procesat cu MPO Canopus. Măsurătorile de fotometrie diferențială au fost realizate prin selectarea a maxim cinci stele de referință de tip solar. Pentru fiecare sesiune de observații (noapte de observații) am folosit minim trei stele de referință, cu magnitudini extrase din catalogul CMC-15.

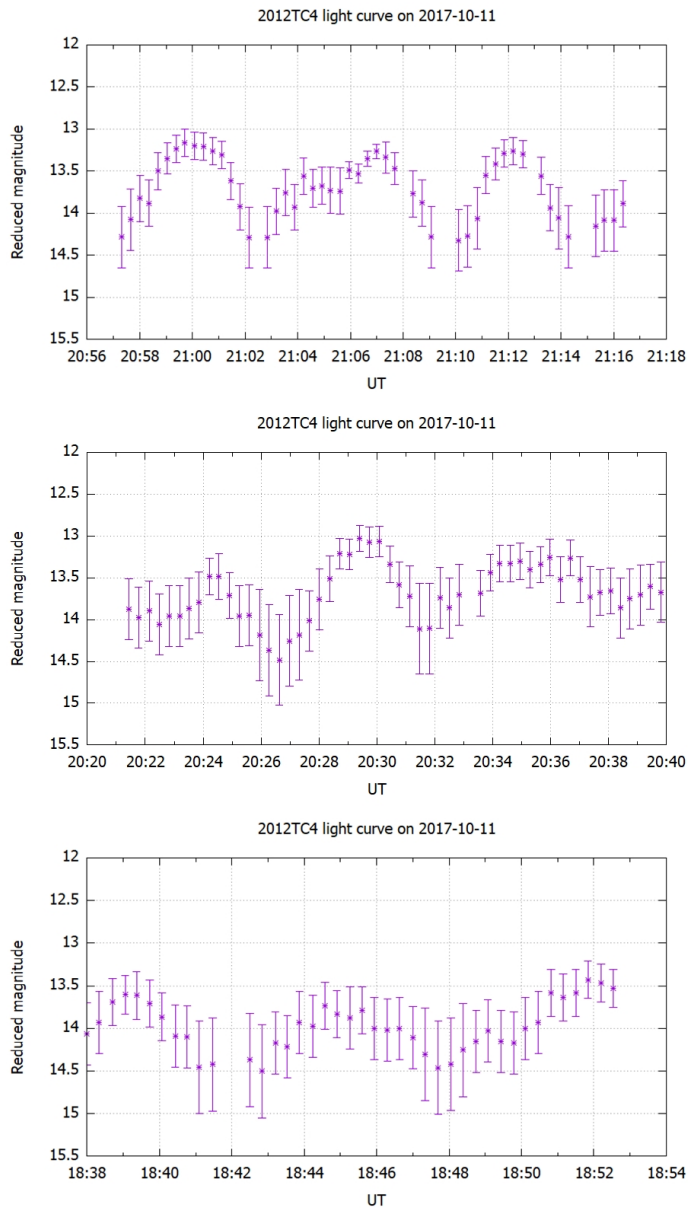


Figura 6.38: Curbe de lumină brute ale asteroidului 2012 TC4.



Day	start - end	Duration [min]	No. of images	Rot. period [h]
11.10.2017	18:38 - 18:52	14	41	$0,214 \pm 0,003$
11.10.2017	19:32 - 19:48	16	38	$0,206 \pm 0,005$
11.10.2017	20:21 - 20:40	19	53	$0,200 \pm 0,005$
11.10.2017	20:57 - 21:26	19	49	$0,205 \pm 0,001$

**Tabelul 6.11:** Rezultate obținute pentru fiecare sesiune de observații. Este dat intervalul de observație, numărul de puncte și perioada obținută.

Determinarea de perioadă a fost făcută cu MPO Canopus, program care folosește algoritmul FALC (Fourier Analysis for Lightcurves). Perioada de rotație a fost obținută cu ajutorul analizei Fourier.

## Rezultate

Datele obținute arată că 2012 TC4 este un corp aflat în rotație rapidă și cu o variație de strălucire importantă. Este unul din cazurile particulare de asteroizi aflați într-o rotație haotică, în care și axa de rotație se rotește (tumbling asteroids). Perioada de rotație a asteroidului este de aproximativ 12 minute, în concordanță cu rezultatele obținute anterior. Amplitudinea este de 1,4 magnitudini, ceea ce indică un raport de lungimi de axe de 1,7 [120].

Câmpul nostru vizual este de mici dimensiuni iar asteroidul, care se mișcă repede, îl traversa în aproximativ 20 de minute. Acest lucru ne-a forțat să folosim stele de referință diferite pentru fiecare câmp, ceea ce duce la o dispersie mai mare a datelor.

Am analizat curbele de lumină și am determinat forma lor și perioada de rotație variază de la un ciclu la altul, dovadă a rotației haotice. Algoritmul FLAC aplicat datelor a identificat mai multe perioade de rotație posibile, menționate în tabelul 5.7.

Pentru a determina o perioadă medie am aplicat analiza Fourier de gradul 6, pornind de la perioada de 6 minute cu 2300 de pași de 1 secundă, ceea ce a dus la găsirea perioadelor de 0,102, 0,203 și 0,306 ore. Toate perioadele în afara de cea de 0,203 ore aveau ca rezultat curbe de lumină cu un singur minim și maxim așa

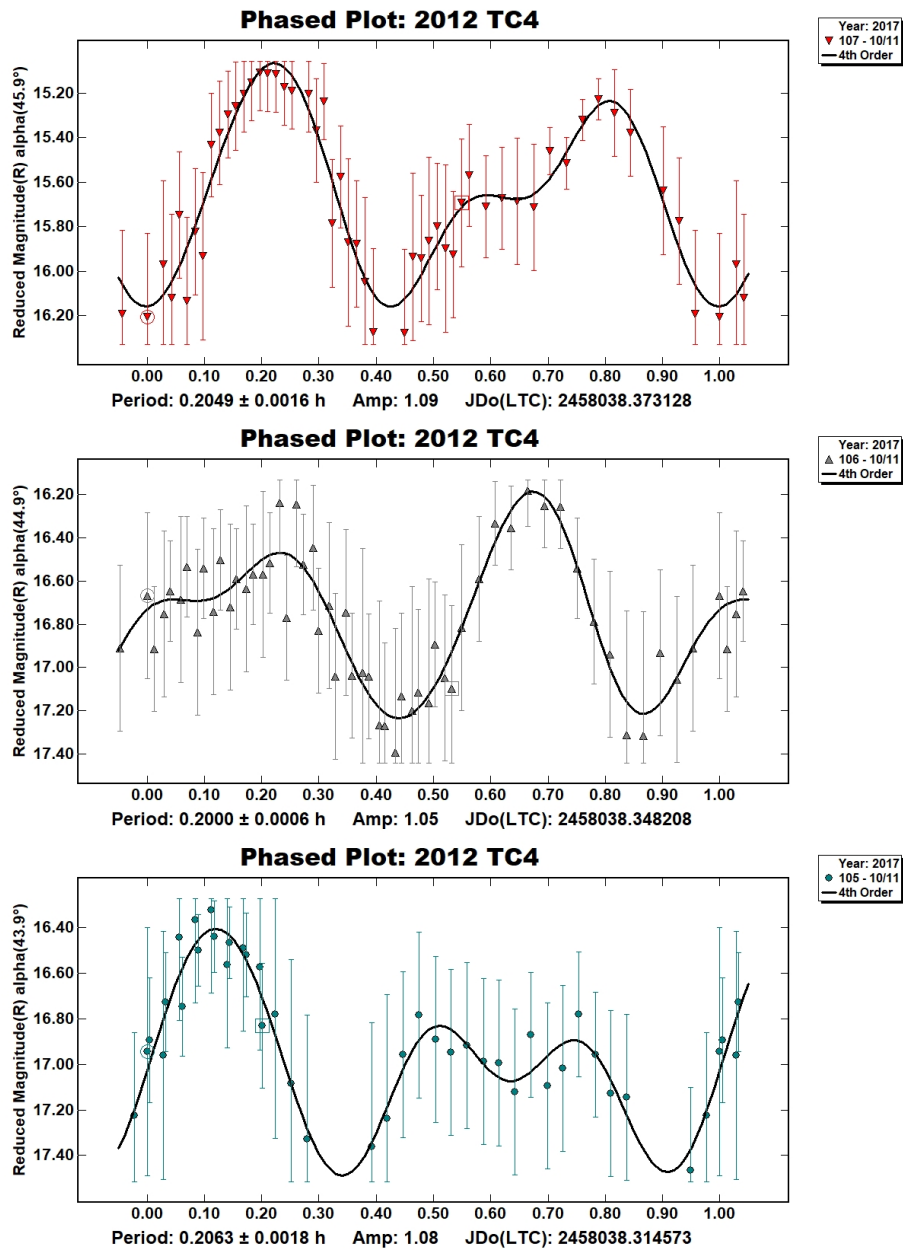


Figura 6.39: Perioade determinate pentru asteroidul 2012 TC4.

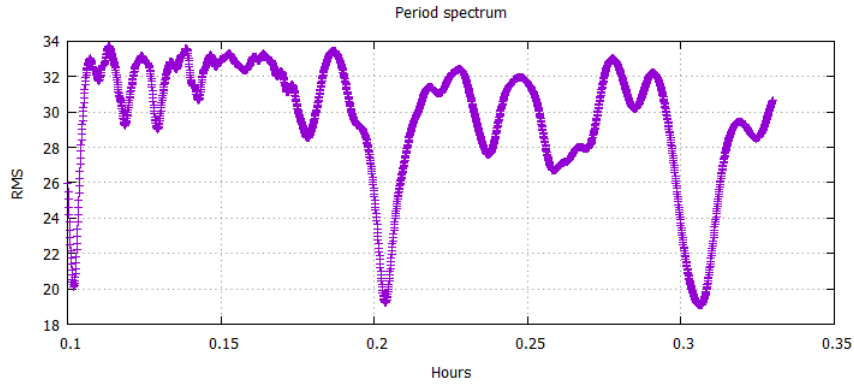


Figura 6.40: Periodograma asteroidului 2012 TC4.

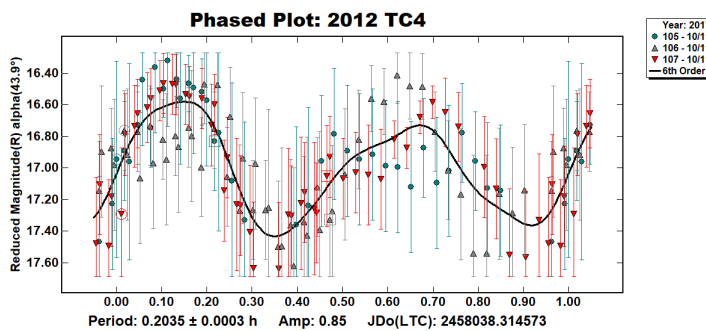


Figura 6.41: Perioada medie determinată pentru asteroidul 2012 TC4.

că au fost excluse. O analiza mai atentă a dus la determinarea unei perioade de  $0,204 \pm 0,001$  ore, rezultat în concordanță cu cele obținute anterior.

## Concluzii

Asteroidul 2012 TC4 a fost observat pe parcursul a două nopți de la Institutul Astronomic al Academiei Române cu un telescop de 0,38 cm în diametru. Am determinat o perioadă de rotație medie de  $0,204 \pm 0,001$  ore dar am găsit că perioada variază de la un ciclu la altul, asteroidul fiind în rotație haotică. Perioada foarte scurtă de rotație indică faptul că asteroidul este de tip monolit, forțele interne de coeziune fiind puternice și incompatibile cu o structură internă cu porozitate mare (Pravec and Harris, 2007).

Pe baza curbei de lumină am găsit că axa mare a asteroidului este de 1,7, un rezultat diferit de 2,3 [191]. Totuși, din cauza modificării unghiului sub care se vede asteroidul, rezultatele pot varia.

## 7. Concluzii și perspective

Pe parcursul doctoratului am observat și am redus date obținute anterior pentru 31 de asteroizi geointersectori, posibile surse de meteori și posibile ținte pentru viitoare misiuni spațiale, pentru a determina structura internă a acestora.

Am mai observat și 29 de asteroizi aflați în centura principală, în rezonanțele de mișcare medie cu Jupiter, cu același scop, în paradigma că obiectele din rezonanță pot deveni asteroizi geointersectori. Scopul observațiilor a fost determinarea tipului de structură internă.

Prin observarea asteroizilor pe parcursul a mai multor nopți (acolo unde a fost posibil) și prin măsurarea strălucirii acestora, am reușit în cele mai multe din cazuri să determin o variație periodică de strălucire, datorată rotației acestora. Folosind analiza Fourier am identificat cea mai probabilă perioadă de rotație și amplitudinea variației de strălucire, date care mi-au permis în continuare determinarea raportului dintre axele mari ale asteroizilor și încadrarea acestora, în funcție de valoarea perioadei de rotație în asteroizi de tip monolitic sau conglomerat de fragmente.

Pentru asteroizii aflați în rezonanțe am avut un timp total de observație de 514,5 ore, iar pentru cei geointersectori un timp total de 405 ore. Datele au fost obținute cu cinci telescoape, trei situate în România, unul la Observatorul de la Pic du Midi (Franța), iar altul în Insulele Reunion (Franța).

În cazul asteroizilor geointersectori, prezintă curbe de lumină cu un grad mare de certitudine (determinate pe parcursul a mai multor rotații ale asteroidului) pentru 73% din asteroizii observați. Pentru 9% din asteroizi am observat timp de o singură rotație sau mai puțin, iar pentru 2% nu am putut determina o perioadă de rotație.

Pentru 17% din asteroizii aflați în rezonanțe nu am putut determina perioada de rotație, iar pentru 10% din ei am oferit doar o estimare a perioadei de rotație minime. Aceștia au fost observați în proporție de 100% pe parcursul a mai multor

noapți, rezultatele incerte provenind de la variația mică de strălucire.

Histograma perioadelor de rotație pentru cele două tipuri de asteroizi indică o distribuție bimodală pentru asteroizii geointersectori, în gama de 1-20 de cicluri de rotație de pe zi (1-24 de ore perioadă de rotație). La asteroizii din centura principală nu se întâlnește această caracteristică, însă pentru amândouă cazurile numărul de obiecte nu este suficient de mare pentru o caracterizare solidă a populațiilor.

Pentru asteroizii din rezonanțe nu am găsit rapoarte ale axelor mari mai mari de 2, media fiind de 1,3, ceea ce înseamnă o formă aproape rotundă. Din datele obținute reiese faptul că raportul tinde spre 1 cu creșterea perioadei însă pentru a se stabili o corelație mai puternică este nevoie să se observe mai mulți asteroizi. În ceea ce privește mărimea nu se observă nici o corelație cu raportul dintre axele mai ale obiectelor.

În cazul asteroizilor geointersectori se observă că pentru mărimi mici nu există rapoarte ale axelor mai mici de 2, ceea ce poate fi explicat prin faptul că asteroizii geointersectori mici sunt fragmente ale asteroizilor mai mari, obiecte monolit. În privința rotațiilor, din datele mele reiese că rapoartele axelor sunt diverse la rotații rapide.

Pentru câțiva asteroizi am abordat și o analiză complexă, îmbinând fotometria cu dinamica pe termen lung a obiectelor, precum și spectroscopia (în cazul asteroidului activ 6478 Gault).

Ca perspective, în primul rând este necesară observarea a mai multor obiecte pentru a spori gradul de încredere a studiilor statistice realizate până în prezent. Nu am observat toate obiectele din lista asteroizilor din rezonanțe, deci există perspective pentru continuarea studiului.

O altă perspectivă este obținerea de date astronomice complementare despre asteroizi, în special date spectroscopice care permit caracterizarea suprafețelor. O altă direcție de studiu a obiectelor este caracterizarea dinamică a obiectelor luând în considerare și efectele nongravitaționale.

## 8. Lista contribuțiilor proprii

### 8.1 Lucrări publicate în reviste

#### 8.1.1 Reviste cotate ISI

1. Michaël Marsset, Francesca DeMeo, *Adrian Sonka*, Mirel Birlan, David Polishook, Brian Burt, Richard P Binzel, Shelte J Bus, Cristina Thomas (2019), Active asteroid (6478) Gault: a blue Q-type surface below the dust?, *The Astrophysical Journal Letters* **882**, 1 L2
2. Popescu, M., Vaduvescu, O., de León, J., Gherase, R. M., Licandro, J., Boacă, I. L., *Șonka, A. B.*, Ashley, R. P., Močnik, T., Morate, D., Predatu, M., De Prá, M., Fariña, C., Stoev, H., Díaz Alfaro, M., Ordonez-Etxeberria, I., López-Martínez, F., Errmann, R. (2019) Near-Earth asteroids spectroscopic survey at Isaac Newton Telescope, *Astronomy & Astrophysics* **627**, 21 pp.
3. BA Dumitru, M Birlan, *A. Sonka*, F Colas, DA Nedelcu (2018), Photometry of asteroids (5141),(43032),(85953),(259221), and (363599) observed at Pic du Midi Observatory, *Astronomische Nachrichten* **339**, 2-3 p. 198-203.

#### 8.1.2 Reviste indexate ISI

1. *Adrian Bruno Șonka*, Mirel Bîrlan, Dan Alin Nedelcu, (2020), COMET 246P/NEAT, Electronic Telegram **No. 4799** Central Bureau for Astronomical Telegrams
2. *Adrian Bruno Șonka*, Mirel Bîrlan, Dan Alin Nedelcu, Mădălina Mirela Trelia (2019), Photometry of binary Near Earth Asteroid (66391) 1999 KW4, *Romanian Astronomical Journal* **29**, 2 p. 149-158.
3. *Adrian Bruno Șonka*, Mirel Bîrlan, Simon Anghel, Frederik Vachier, Jerome Berthier, Alain Klotz, Pierre Thierry, Andre Peyrot, Jean-Paul Teng (2019), The (155140)

- 2005 UD lightcurve and rotational period from simultaneous observations, Romanian Astronomical Journal **29**, 1, p. 35–41.
4. Mirel Birlan, *Adrian Sonka*, DA Nedelcu, Mugurel Balan, Simon Anghel, C Pandelescu, M Trusculescu, C Dragasanu, V Plesca, CH Gandescu, C Banica, T Georgescu (2019), Telescope calibration for mobile platforms: first results, Romanian Astronomical Journal **29**, 1, p. 23-33.
  5. Andreea Ioana Gornea, *Adrian Bruno Sonka*, Mirel Birlan, Simon Anghel (2018), Photometric Observations of Near-Earth Asteroid 2018 GE3, Minor Planet Bulletin **45**, p. 315-316.
  6. *Adrian Bruno Sonka*, Andreea Ioana Gornea, Mirel Birlan (2018), Photometric Monitoring of PHA (3122) Florence, Romanian Astronomical Journal **28**, p. 79-86.
  7. Mirel Birlan, Vasile Plesca, C Hedwig Gandescu, Dan Alin Nedelcu, Mugurel Balan, Cosmin Banica, Constantin Pandele, *Adrian Sonka*, Tudor Georgescu (2018), Observational asset for Near-Earth Objects, artificial satellites, and space debris: an assessment of concept, Romanian Astronomical Journal **28**, p. 67-77.
  8. Dan Alin Nedelcu, Mirel Birlan, Vlad Turcu, Ioana Boaca, Octavian Badescu, Andreea Gornea, *Adrian Bruno Sonka*, Octavian Blagoi, Cristian Danescu, Petre Paraschiv (2018), Meteorites Orbits Reconstruction by Optical Imaging (MOROI) Network, Romanian Astronomical Journal **28**, p. 57-65.
  9. *Adrian Bruno Sonka*, Andreea Ioana Gornea, Simon Anghel, Mirel Birlan (2017), Photometric Observations of Near Earth Asteroid 2012 TC4, Romanian Astronomical Journal **27**, 3, p. 223-231.

## 8.2 Lucrări prezentate la conferințe

### 8.2.1 Conferințe internaționale

1. *Adrian Șonka* (2019), Minor Planet Photometry - from images to data, Natural Space Risks 2019, Observatorul din Paris, Franța, 26 – 31 august 2019
2. M. Birlan, *A. Sonka*, A. Nedelcu, F. Colas, V. Turcu, S. Anghel, Near-Earth Asteroids Monitoring for Hazard Assessments, Planetary Defense Conference 2019,

Washington DC, USA, 29 aprilie - 3 mai 2019

3. Mirel Bîrlan, *Adrian Şonka*, Photometry Observations of 2005 UD from Bucharest and Le Makes Observatories (2019), International Symposium on Dust & Parent Bodies, Tokyo, februarie 12–14, 2019 (prezentare făcută online)
4. *Adrian Şonka*, M. Birlan, A. Gornea, I. Boian, Minor planet photometry, International Conference on Astronomy and Space Science "New horizons in space and planetary astrophysics. Honoring IAU 100, Bucureşti, 16-19 Octombrie 2019
5. Mirel Birlan, D.A. Nedelcu, *A. Sonka*, M. Balan, V. Plesca, C Banica, C. Gandescu, A. Pandele, T. Georgescu, Tests of mobile platforms for optical astronomy, International Conference on Astronomy and Space Science "New horizons in space and planetary astrophysics. Honoring IAU 100, Bucureşti, 16-19 octombrie 2019
6. *Adrian Şonka*, Alin Nedelcu, Mirel Bîrlan, The Microsat-R event, 8th IAA Conference on Space Systems as Critical Infrastructure, Mamaia, România, 27-28 iunie 2019
7. *Adrian Sonka*, Mirel Birlan, Andreea Gornea, Ioana Boian, Photometry of selected NEA sample in Bucharest, Congresul Internațional de Matematică, Galati, România, 28 iunie – 3 iulie 2019
8. Mirel Bîrlan, Dumitru Bogdan, Alin Nedelcu, *Adrian Şonka*, The Missing V-Type NEA's, International Astronomical Union General Assembly, Vienna, Austria, 20-31 august 2018
9. Mirel Bîrlan, *Adrian Sonka*, Andreea Gornea, Alin Nedelcu, Pierre Vernazza, Francois Colas, Suveillance and opportunities for observing Near Earth Objects, Didymos observer workshop, Praga, Cehia, 19-21 iunie 2018
10. *Adrian ŞONKA*, Andreea GORNEA, Simon ANGHEL, Recent results from T04, Outlook in Astronomy, Astrophysics, Space and Planetary Sciences, International Conference, 17-19 May 2018, Cluj-Napoca in the framework of Cluj Academic Days 2018.



## 8.2.2 Conferințe naționale

1. *Adrian ȘONKA*, Mirel BÎRLAN, Andreea Ioana GORNEA, Simon ANGHEL, The case of 2012 TC4, Annual Scientific Conference, Facultatea de fizica, București, 21 iunie 2018, secția Atmosphere and Earth Science, Enviroment Protection;
2. *Adrian ȘONKA*, Mirel BÎRLAN, Andreea GORNEA, Ioana BOIAN, Physical Parameters of Near Earth Asteroids, Annual Scientific Conference, Facultatea de fizica, București, 21 – 22 iunie 2019, sectia Atmosphere and Earth Science, Enviroment Protection;
3. Elisabeta PETRESCU, *Adrian ȘONKA*, Mirel BÎRLAN, Annual Scientific Conference, Monitoring the Great Red Spot, the largest anti-cyclone in our Solar System, Facultatea de fizica, București, 21 – 22 iunie 2019, prezentare la sectia Atomic and Molecular Physics. Astrophysics and Applications
4. *Adrian Sonka*, Mirel Birlan, Observații astronomice asteroidale, A Doua Conferinta a doctoranzilor din consortiul Universitaria, BUCUREȘTI, 26-28 septembrie 2019;

## 8.3 Cărți

1. Mirel Bîrlan, *Adrian Șonka*, (2018) *Introducere în lumea asteroizilor*, Editura Zorio, ISBN 6068759237, București

## Bibliografie

- [1] Michael S. Alkema. “Asteroid Lightcurve Analysis at Elephant Head Observatory: 2013 August- October”. In: *Minor Planet Bulletin* 41.1 (Jan. 2014), p. 40.
- [2] M. Ansdell et al. “VizieR Online Data Catalog: Observed light curve of (3200) Phaethon (Ansdell+, 2014)”. In: *VizieR Online Data Catalog* 179 (Apr. 2017).
- [3] T Arai et al. “DESTINY+ mission: Flyby of Geminids parent asteroid (3200) Phaethon and in-situ analyses of dust accreting on the Earth”. In: *Lunar and Planetary Science Conference*. Vol. 49. 2018.
- [4] D. J. Asher, S. V. M. Clube, and D. I. Steel. “Asteroids in the Taurid Complex”. In: **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** 264 (Sept. 1993), p. 93. DOI: 10.1093/mnras/264.1.93.
- [5] A. Aznar Macias et al. “EURONEAR - First Light Curves and Physical Properties of Near Earth Asteroids”. In: *arXiv e-prints*, arXiv:1801.09420 (Jan. 2018), arXiv:1801.09420. arXiv: 1801.09420 [astro-ph.EP].
- [6] R. Behrend et al. “Four new binary minor planets: (854) Frostia, (1089) Tama, (1313) Berna, (4492) Debussy”. In: **Astron. Astrophys.** 446.3 (Feb. 2006), pp. 1177–1184. DOI: 10.1051/0004-6361:20053709.
- [7] Michael J. S. Belton et al. “Galileo’s Encounter with 243 Ida: An Overview of the Imaging Experiment”. In: 1996.
- [8] “Bemerkung über den Sternschnuppenfall vom 13. Nov. und 10. August 1866”. In: *Astronomische Nachrichten* 68 (Feb. 1867), p. 287.

- [9] Richard Berry and James Burnell. “Astronomical Image Processing”. In: *Willman-Bell, Inc* (2000).
- [10] R. P. Binzel et al. “Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS)”. In: *Icarus* 324 (May 2019), pp. 41–76. DOI: 10.1016/j.icarus.2018.12.035.
- [11] R. P. Binzel et al. “Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS)”. In: */icarus* 324 (May 2019), pp. 41–76. DOI: 10.1016/j.icarus.2018.12.035.
- [12] Richard P. Binzel et al. “Observed spectral properties of near-Earth objects: results for population distribution, source regions, and space weathering processes”. In: **Icarus** 170.2 (Aug. 2004), pp. 259–294. DOI: 10.1016/j.icarus.2004.04.004.
- [13] M. Birlan et al. “Characterization of (357439) 2004 BL86 on its close approach to Earth in 2015”. In: **Astron. Astrophys.** 581, A3 (Sept. 2015), A3. DOI: 10.1051/0004-6361/201526460.
- [14] M. Birlan et al. “Observational asset for Near-Earth Objects, artificial satellites, and space debris: an assessment of concept”. In: *Romanian Astronomical Journal* 28.2 (Jan. 2018), pp. 67–77.
- [15] M. Birlan et al. “Spectroscopy and surface properties of (809) Lunda”. In: **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** 437.1 (Jan. 2014), pp. 176–184. DOI: 10.1093/mnras/stt1869.
- [16] M. Birlan et al. “Telescope calibration for mobile platforms: first results”. In: *Romanian Astronomical Journal* 29 (2019), pp. 23–33.
- [17] Jr. Bottke W. F. et al. “The Effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids”. In: *Asteroids III*. 2002, pp. 395–408.

- [18] Jr. Bottke William F., David P. Rubincam, and Joseph A. Burns. “Dynamical Evolution of Main Belt Meteoroids: Numerical Simulations Incorporating Planetary Perturbations and Yarkovsky Thermal Forces”. In: **Icarus** 145.2 (June 2000), pp. 301–331. DOI: 10.1006/icar.2000.6361.
- [19] Jr. Bottke William F. et al. “The Yarkovsky and Yorp Effects: Implications for Asteroid Dynamics”. In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34 (May 2006), pp. 157–191. DOI: 10.1146/annurev.earth.34.031405.125154.
- [20] W. F. Bottke Jr. et al. “The Yarkovsky and Yorp Effects: Implications for Asteroid Dynamics”. In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34 (May 2006), pp. 157–191. DOI: 10.1146/annurev.earth.34.031405.125154.
- [21] W. F. Bottke et al. “Velocity Distributions among Colliding Asteroids”. In: **Icarus** 107.2 (Feb. 1994), pp. 255–268. DOI: 10.1006/icar.1994.1021.
- [22] William F. Bottke, David Vokrouhlický, and David Nesvorný. “An asteroid breakup 160Myr ago as the probable source of the K/T impactor”. In: **Nature** 449.7158 (Sept. 2007), pp. 48–53. DOI: 10.1038/nature06070.
- [23] William F. Bottke et al. “Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects”. In: **Icarus** 156.2 (Apr. 2002), pp. 399–433. DOI: 10.1006/icar.2001.6788.
- [24] William F. Bottke et al. “Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects”. In: *Icarus* 156.2 (2002), pp. 399–433. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6788>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103501967880>.
- [25] William F. Bottke et al. “Dynamical Spreading of Asteroid Families by the Yarkovsky Effect”. In: *Science* 294.5547 (Nov. 2001), pp. 1693–1696. DOI: 10.1126/science.1066760.
- [26] William F. Bottke et al. “Linking the collisional history of the main asteroid belt to its dynamical excitation and depletion”. In: **Icarus** 179.1 (Dec. 2005), pp. 63–94. DOI: 10.1016/j.icarus.2005.05.017.

- [27] William F. Bottke et al. “The fossilized size distribution of the main asteroid belt”. In: *Icarus* 175.1 (May 2005), pp. 111–140. DOI: 10.1016/j.icarus.2004.10.026.
- [28] William F. Bottke et al. “Understanding the Distribution of Near-Earth Asteroids”. In: *Science* 288.5474 (Jan. 2000), pp. 2190–2194. DOI: 10.1126/science.288.5474.2190.
- [29] E. Bowell et al. “Application of photometric models to asteroids”. In: *Asteroids II*. Ed. by R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews. 1989, pp. 524–556.
- [30] Edward Bowell et al. “Application of photometric models to asteroids.” In: *Asteroids II*. Ed. by Richard P. Binzel, Tom Gehrels, and Mildred Shapley Matthews. Jan. 1989, pp. 524–556.
- [31] M. Brož et al. “Yarkovsky origin of the unstable asteroids in the 2/1 mean motion resonance with Jupiter”. In: *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 359.4 (June 2005), pp. 1437–1455. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.08995.x.
- [32] M. Brož et al. “Yarkovsky origin of the unstable asteroids in the 2/1 mean motion resonance with Jupiter”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 359.4 (June 2005), pp. 1437–1455. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.08995.x. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/359/4/1437/3266077/359-4-1437.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08995.x>.
- [33] S. J. Bus and R. P. Binzel. “Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy”. In: *Icarus* 158 (July 2002), pp. 146–177. DOI: 10.1006/icar.2002.6856.
- [34] Schelte J. Bus and Richard P. Binzel. “Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy”. In: *Icarus* 158.1 (July 2002), pp. 146–177. DOI: 10.1006/icar.2002.6856.
- [35] M. W. Caffee et al. “Irradiation records in meteorites.” In: *Meteorites and the Early Solar System*. Ed. by John F. Kerridge and Mildred Shapley Matthews. 1988, pp. 205–245.

- [36] Albino Carbognani. “Asteroids lightcurves at oavda: 2012 June-2013 March”. In: *Minor Planet Bulletin* 41 (2014), pp. 4–8.
- [37] V. Carruba and T. A. Michtchenko. “A frequency approach to identifying asteroid families. II. Families interacting with nonlinear secular resonances and low-order mean-motion resonances”. In: **Astron. Astrophys.** 493.1 (Jan. 2009), pp. 267–282. DOI: 10.1051/0004-6361:200809852.
- [38] B. Carry. “Density of asteroids”. In: *Planetary and Space Science* 73.1 (2012). Solar System science before and after Gaia, pp. 98–118. ISSN: 0032-0633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.03.009>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063312000773>.
- [39] B. Carry et al. “Homogeneous internal structure of CM-like asteroid (41) Daphne”. In: **Astron. Astrophys.** 623, A132 (Mar. 2019), A132. DOI: 10.1051/0004-6361/201833898. arXiv: 1901.01890 [astro-ph.EP].
- [40] B. Carry et al. “The small binary asteroid (939) Isberga”. In: **Icarus** 248 (Mar. 2015), pp. 516–525. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.11.002. arXiv: 1411.0872 [astro-ph.EP].
- [41] Benoit Carry et al. “VLT/SPHERE looks at triple asteroid Sylvia”. In: *EPSC-DPS Joint Meeting 2019*. Vol. 2019. Sept. 2019, EPSC-DPS2019–516.
- [42] C. O. Chandler et al. “Six Years of Sustained Activity in (6478) Gault”. In: **Astrophys. J. Lett.** 877, L12 (May 2019), p. L12. DOI: 10.3847/2041-8213/ab1aaa.
- [43] Colin Orion Chandler et al. “SAFARI: Searching Asteroids for Activity Revealing Indicators”. In: **Pub. Astron. Soc. Pac.** 130.993 (Nov. 2018), p. 114502. DOI: 10.1088/1538-3873/aad03d. arXiv: 1807.00831 [astro-ph.EP].
- [44] C. R. Chapman, D. Morrison, and B. Zellner. “Surface Properties of Asteroids: A Synthesis of Polarimetry, Radiometry, and Spectrophotometry”. In: **Icarus** 25.1 (May 1975), pp. 104–130. DOI: 10.1016/0019-1035(75)90191-8.

- [45] F. E. DeMeo. “The compositional variation of small bodies across the Solar System”. Theses. Observatoire de Paris, June 2010. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00514550>.
- [46] F. E. DeMeo and B. Carry. “Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt”. In: **Nature** 505.7485 (Jan. 2014), pp. 629–634. DOI: 10.1038/nature12908. arXiv: 1408.2787 [astro-ph.EP].
- [47] Francesca E. DeMeo et al. “An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared”. In: **Icarus** 202.1 (July 2009), pp. 160–180. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.02.005.
- [48] Francesca E DeMeo et al. “An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared”. In: *Icarus* 202.1 (July 2009), pp. 160–180.
- [49] P. Descamps et al. “A giant crater on 90 Antiope?” In: **Icarus** 203.1 (Sept. 2009), pp. 102–111. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.04.022. arXiv: 0905.0631 [astro-ph.EP].
- [50] P. Descamps et al. “New determination of the size and bulk density of the binary Asteroid 22 Kalliope from observations of mutual eclipses”. In: **Icarus** 196.2 (Aug. 2008), pp. 578–600. DOI: 10.1016/j.icarus.2008.03.014. arXiv: 0710.1471 [astro-ph].
- [51] J.D. Drummond et al. “Dwarf planet Ceres: Ellipsoid dimensions and rotational pole from Keck and VLT adaptive optics images”. In: *Icarus* 236 (2014), pp. 28–37. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.038>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001910351400164X>.
- [52] B. A. Dumitru, M. Birlan, and D. A. Nedelcu. “Asteroid parent bodies of meteor showers: An update”. In: *Romanian Astronomical Journal* 28 (2018), pp. 167–175.
- [53] B. A. Dumitru et al. “Association between meteor showers and asteroids using multivariate criteria”. In: **Astron. Astrophys.** 607, A5 (Oct. 2017), A5. DOI: 10.1051/0004-6361/201730813.

- [54] Daniel D. Durda et al. “Size-frequency distributions of fragments from SPH/N-body simulations of asteroid impacts: Comparison with observed asteroid families”. In: **Icarus** 186.2 (Feb. 2007), pp. 498–516. DOI: 10.1016/j.icarus.2006.09.013.
- [55] Durech, J. and Hanus, J. “Reconstruction of asteroid spin states from Gaia DR2 photometry”. In: *A&A* 620 (2018), A91. DOI: 10.1051/0004-6361/201834007. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834007>.
- [56] Paolo Farinella and Donald R. Davis. “Collision rates and impact velocities in the main asteroid belt”. In: **Icarus** 97.1 (May 1992), pp. 111–123. DOI: 10.1016/0019-1035(92)90060-K.
- [57] Paolo Farinella, Christiane Froeschle, and Robert Gonczi. “Meteorites from the Asteroid 6 Hebe”. In: *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 56.1-2 (June 1993), pp. 287–305. DOI: 10.1007/BF00699740.
- [58] Paolo Farinella and David Vokrouhlicky. “Semimajor Axis Mobility of Asteroidal Fragments”. In: *Science* 283 (Mar. 1999), p. 1507. DOI: 10.1126/science.283.5407.1507.
- [59] M. A. Feierberg, L. A. Lebofsky, and D. J. Tholen. “The nature of c-class asteroids from 3- $\mu$ m spectrophotometry”. In: **Icarus** 63.2 (Aug. 1985), pp. 183–191. DOI: 10.1016/0019-1035(85)90002-8.
- [60] Yanga R. Fernández, David C. Jewitt, and Scott S. Sheppard. “Albedos of Asteroids in Comet-Like Orbits”. In: **Astronom. J.** 130.1 (July 2005), pp. 308–318. DOI: 10.1086/430802.
- [61] Romain Fétick et al. “Vesta seen by VLT/SPHERE”. In: *EPSC-DPS Joint Meeting 2019*. Vol. 2019. Sept. 2019, EPSC-DPS2019–141.
- [62] Ken Fox, Iwan P. Williams, and David W. Hughes. “The ‘Geminid’ asteroid (1983 TB) and its orbital evolution”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 208.1 (May 1984), 11P–15P. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/208.1.11P. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/208/1/11P/2812973/mnras208-011P.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/208.1.11P>.



- [63] Ch. Froeschlé and C. Froeschlé. “Dynamical transport mechanisms of planet-crossing bodies”. In: *IAU Colloq. 173: Evolution and Source Regions of Asteroids and Comets*. Ed. by J. Svoren, E. M. Pittich, and H. Rickman. Jan. 1999, p. 87.
- [64] Ch. Froeschle and A. Morbidelli. “The Secular Resonances in the Solar System”. In: *Asteroids, Comets, Meteors 1993*. Ed. by Andrea Milani, Michel di Martino, and A. Cellino. Vol. 160. IAU Symposium. Jan. 1994, p. 189.
- [65] A. Fujiwara et al. “The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa”. In: *Science* 312.5778 (2006), pp. 1330–1334. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1125841. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/312/5778/1330.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/312/5778/1330>.
- [66] Michael J. Gaffey and Sarah L. Gilbert. “Asteroid 6 Hebe: The probable parent body of the H-Type ordinary chondrites and the IIE iron meteorites”. In: *Meteoritics and Planetary Science* 33.6 (Nov. 1998), pp. 1281–1295. DOI: 10.1111/j.1945-5100.1998.tb01312.x.
- [67] Tabaré Gallardo. “Atlas of the mean motion resonances in the Solar System”. In: *Icarus* 184.1 (Sept. 2006), pp. 29–38. DOI: 10.1016/j.icarus.2006.04.001.
- [68] Tabaré Gallardo. “Atlas of three body mean motion resonances in the Solar System”. In: *Icarus* 231 (Mar. 2014), pp. 273–286. DOI: 10.1016/j.icarus.2013.12.020. arXiv: 1312.6068 [astro-ph.EP].
- [69] Tabaré Gallardo, Leonardo Coito, and Luciana Badano. “Planetary and satellite three body mean motion resonances”. In: *Icarus* 274 (Aug. 2016), pp. 83–98. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.03.018. arXiv: 1603.06911 [astro-ph.EP].
- [70] J. Garlitz. 2011. URL: <http://eoni.com/~garlitzj/Period.htm> (visited on 09/24/2011).
- [71] Matthew J. Genge. “Micrometeorites and Their Implications for Meteors”. In: *Earth Moon and Planets* 102.1-4 (June 2008), pp. 525–535. DOI: 10.1007/s11038-007-9185-z.

- [72] B. J. Gladman et al. “Dynamical lifetimes of objects injected into asteroid belt resonances”. In: *Science* 277 (Jan. 1997), pp. 197–201. DOI: 10.1126/science.277.5323.197.
- [73] A. I. Gornea et al. “Photometric Observations of Near-Earth Asteroid 2018 GE3”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (Oct. 2018), pp. 315–316.
- [74] Mikael Granvik et al. “Debiased orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects”. In: *Icarus* 312 (Sept. 2018), pp. 181–207. DOI: 10.1016/j.icarus.2018.04.018. arXiv: 1804.10265 [astro-ph.EP].
- [75] Mikael Granvik et al. “Escape of asteroids from the main belt”. In: **Astron. Astrophys.** 598, A52 (Feb. 2017), A52. DOI: 10.1051/0004-6361/201629252.
- [76] Adam H. Greenberg et al. “Yarkovsky Drift Detections for 247 Near-Earth Asteroids”. In: **Astronom. J.** 159.3, 92 (Mar. 2020), p. 92. DOI: 10.3847/1538-3881/ab62a3.
- [77] PJ Gutiérrez et al. “Comments on the amplitude-phase relationship of asteroid lightcurves—Effects of topography, surface scattering properties, and obliquity”. In: *Astronomy & Astrophysics* 454.1 (2006), pp. 367–377.
- [78] A. Hale, R. Berry, and H. Weiland. “(6478) Gault”. In: *Central Bureau Electronic Telegrams* 4594 (Jan. 2019).
- [79] A. Hale, H. Weiland, and R. Berry. “(6478) Gault”. In: *Central Bureau Electronic Telegrams* 4597 (Jan. 2019).
- [80] J. Hanuš et al. “(704) Interamnia: a transitional object between a dwarf planet and a typical irregular-shaped minor body”. In: **Astron. Astrophys.** 633, A65 (Jan. 2020), A65. DOI: 10.1051/0004-6361/201936639. arXiv: 1911.13049 [astro-ph.EP].
- [81] J. Hanuš et al. “New and updated convex shape models of asteroids based on optical data from a large collaboration network”. In: **Astron. Astrophys.** 586, A108 (Feb. 2016), A108. DOI: 10.1051/0004-6361/201527441. arXiv: 1510.07422 [astro-ph.EP].

- [82] J. Hanuš et al. “The shape of (7) Iris as evidence of an ancient large impact?” In: **Astron. Astrophys.** 624, A121 (Apr. 2019), A121. DOI: 10.1051/0004-6361/201834541. arXiv: 1902.09242 [astro-ph.EP].
- [83] Bruce Hapke. “Bidirectional Reflectance Spectroscopy. 5. The Coherent Backscatter Opposition Effect and Anisotropic Scattering”. In: **Icarus** 157.2 (June 2002), pp. 523–534. DOI: 10.1006/icar.2002.6853.
- [84] A. W. Harris. “The Rotation Rates of Very Small Asteroids: Evidence for ‘Rubble Pile’ Structure”. In: *Lunar and Planetary Science Conference*. Vol. 27. Lunar and Planetary Science Conference. Mar. 1996, p. 493.
- [85] A. W. Harris and J. S. V. Lagerros. “Asteroids in the Thermal Infrared”. In: *Asteroids III*. 2002, pp. 205–218.
- [86] A. W. Harris et al. “Photoelectric observations of asteroids 3, 24, 60, 261, and 863”. In: **Icarus** 77 (Jan. 1989), pp. 171–186. DOI: 10.1016/0019-1035(89)90015-8.
- [87] Alan W Harris. “On the revision of radiometric albedos and diameters of asteroids”. In: *Icarus* 126.2 (1997), pp. 450–454.
- [88] Alan W. Harris. “A Thermal Model for Near-Earth Asteroids”. In: **Icarus** 131.2 (Feb. 1998), pp. 291–301. DOI: 10.1006/icar.1997.5865.
- [89] AW Harris et al. “On the maximum amplitude of harmonics of an asteroid lightcurve”. In: *Icarus* 235 (2014), pp. 55–59.
- [90] Scot Hawkins and Richard Ditteon. “Asteroid Lightcurve Analysis at the Oakley Observatory - May 2007”. In: *Minor Planet Bulletin* 35.1 (Mar. 2008), pp. 1–4.
- [91] A. A. Henden et al. “APASS - The Latest Data Release”. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts #225*. Vol. 225. American Astronomical Society Meeting Abstracts. Jan. 2015, p. 336.16.
- [92] Arne A Henden et al. “APASS-the latest data release”. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts# 225*. Vol. 225. 2015.
- [93] D. Herald et al. *Asteroid Occultations V3.0*. Tech. rep. Sept. 2019.

- [94] Kiyotsugu Hirayama. “Families of asteroids : second paper”. In: *Annales de l’Observatoire astronomique de Tokyo* 19 (Jan. 1927), p. 1.
- [95] Keith A. Holsapple. “Spin limits of Solar System bodies: From the small fast-rotators to 2003 EL61”. In: *Icarus* 187.2 (Apr. 2007), pp. 500–509. DOI: 10.1016/j.icarus.2006.08.012.
- [96] Jr. Hovis W. A. and William R. Callahan. “Infrared Reflectance Spectra of Igneous Rocks, Tuffs, and Red Sandstone from 0.5 to 22  $\mu$ ”. In: *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)* 56.5 (May 1966), p. 639.
- [97] Henry H. Hsieh and Nader Haghighipour. “Potential Jupiter-Family comet contamination of the main asteroid belt”. In: *Icarus* 277 (Oct. 2016), pp. 19–38. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.04.043. arXiv: 1604.08557 [astro-ph.EP].
- [98] Jiangchuan Huang et al. “The Ginger-shaped Asteroid 4179 Toutatis: New Observations from a Successful Flyby of Chang’e-2”. In: *Scientific Reports* 3, 3411 (Dec. 2013), p. 3411. DOI: 10.1038/srep03411. arXiv: 1312.4329 [astro-ph.EP].
- [99] Man-To Hui and David Jewitt. “NON-GRAVITATIONAL ACCELERATION OF THE ACTIVE ASTEROIDS”. In: *The Astronomical Journal* 153.2 (Jan. 2017), p. 80. DOI: 10.3847/1538-3881/153/2/80. URL: <https://doi.org/10.3847%2F1538-3881%2F153%2F2%2F80>.
- [100] Man-To Hui, Yoonyoung Kim, and Xing Gao. “New Active Asteroid (6478) Gault”. In: *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.: Letters, slz112* (July 2019). ISSN: 1745-3925.
- [101] O. Ivanova et al. “Colour variations of Comet C/2013 UQ4 (Catalina)”. In: *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 469 (Aug. 2017), pp. 2695–2703. DOI: 10.1093/mnras/stx1004. arXiv: 1706.01228 [astro-ph.EP].
- [102] Željko Ivezić et al. “Color Confirmation of Asteroid Families”. In: *Astronom. J.* 124.5 (Nov. 2002), pp. 2943–2948. DOI: 10.1086/344077. arXiv: astro-ph/0208098 [astro-ph].

- [103] T. Iwata et al. “Studies on Solar System Explorations Using DESTINY: The Demonstration and Experiments of Space Technology for Interplanetary Voyage”. In: *Lunar and Planetary Science Conference*. Vol. 46. Lunar and Planetary Science Conference. Mar. 2015, p. 1727.
- [104] E. Jehin, M. Ferrais, and Y. Moulane. “(6478) Gault”. In: *Central Bureau Electronic Telegrams* 4606 (2019).
- [105] P. Jenniskens. “2003 EH<sub>1</sub> Is the Quadrantid Shower Parent Comet”. In: **Astronom. J.** 127.5 (May 2004), pp. 3018–3022. DOI: 10.1086/383213.
- [106] D. Jewitt and H. Hsieh. “Physical Observations of 2005 UD: A Mini-Phaethon”. In: **Astronom. J.** 132 (Oct. 2006), pp. 1624–1629. DOI: 10.1086/507483.
- [107] D. Jewitt, H. Hsieh, and J. Agarwal. “The Active Asteroids”. In: *Asteroids IV*. 2015, pp. 221–241. DOI: 10.2458/azu\_uapress\_9780816532131-ch012.
- [108] D. Jewitt et al. “Episodically Active Asteroid 6478 Gault”. In: **Astrophys. J. Lett.** 876, L19 (May 2019), p. L19. DOI: 10.3847/2041-8213/ab1be8. arXiv: 1904.07100 [astro-ph.EP].
- [109] David Jewitt and Henry Hsieh. “Physical observations of 2005 UD: A mini-Phaethon”. In: *The Astronomical Journal* 132.4 (2006), p. 1624.
- [110] Tadeusz J. Jopek. “Remarks on the Meteor Orbital Similarity D-Criterion”. In: **Icarus** 106.2 (Dec. 1993), pp. 603–607. DOI: 10.1006/icar.1993.1195.
- [111] M.-J. Kim et al. “Optical observations of NEA 3200 Phaethon (1983 TB) during the 2017 apparition”. In: **Astron. Astrophys.** 619, A123 (Nov. 2018), A123. DOI: 10.1051/0004-6361/201833593. arXiv: 1809.05900 [astro-ph.EP].
- [112] D. Kinoshita et al. “Surface heterogeneity of 2005 UD from photometric observations”. In: **Astron. Astrophys.** 466.3 (May 2007), pp. 1153–1158. DOI: 10.1051/0004-6361:20066276.
- [113] D Kinoshita et al. “Surface heterogeneity of 2005 UD from photometric observations”. In: *Astronomy & Astrophysics* 466.3 (2007), pp. 1153–1158.
- [114] Daniel Kirkwood. “The Zone of Asteroids and the Ring of Saturn”. In: *Side-real Messenger* 3 (Feb. 1884), pp. 6–9.

- [115] J. T. Kleyna et al. “The Sporadic Activity of (6478) Gault: A YORP-driven Event?” In: **Astrophys. J. Lett.** 874, L20 (Apr. 2019), p. L20. DOI: 10.3847/2041-8213/ab0f40. arXiv: 1903.12142 [astro-ph.EP].
- [116] Z. Knezevic, A. Lemaitre, and A. Milani. “The Determination of Asteroid Proper Elements”. In: *Asteroids III*. 2002, pp. 603–612.
- [117] Yoshihide Kozai. “Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity”. In: **Astronom. J.** 67 (Nov. 1962), pp. 591–598. DOI: 10.1086/108790.
- [118] Y. N. Krugly et al. “The Near-Earth Objects Follow-up Program. IV. CCD Photometry in 1996-1999”. In: **Icarus** 158 (Aug. 2002), pp. 294–304. DOI: 10.1006/icar.2002.6884.
- [119] Petr Kuchynka and William M. Folkner. “A new approach to determining asteroid masses from planetary range measurements”. In: **Icarus** 222.1 (Jan. 2013), pp. 243–253. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.11.003.
- [120] T Kwiatkowski et al. “Photometric survey of the very small near-Earth asteroids with the SALT telescope-I. Lightcurves and periods for 14 objects”. In: *Astronomy & Astrophysics* 509 (2010), A94.
- [121] D. S. Lauretta et al. “The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu”. In: **Nature** 568.7750 (Mar. 2019), pp. 55–60. DOI: 10.1038/s41586-019-1033-6.
- [122] U. -J. Le Verrier. “Recherches astronomiques: Chapitre IV. - Développement de la fonction qui sert de base au calcul des perturbations des mouvements des planètes.” In: *Annales de l’Observatoire de Paris* 1 (Jan. 1855), pp. 258–342.
- [123] L. A. Lebofsky et al. “Visual and radiometric photometry of 1580 Betulia”. In: **Icarus** 35.3 (Sept. 1978), pp. 336–343. DOI: 10.1016/0019-1035(78)90086-6.
- [124] Larry A. Lebofsky and John R. Spencer. “Radiometry and thermal modeling of asteroids.” In: *Asteroids II*. Ed. by Richard P. Binzel, Tom Gehrels, and Mildred Shapley Matthews. Jan. 1989, pp. 128–147.

- [125] C.-H. Lee. “Early detection of (6478) Gault’s new tail”. In: *The Astronomer’s Telegram* 12468 (Feb. 2019).
- [126] Pierre Léna, François Lebrun, and François Mignard. *Observational astrophysics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [127] J. Licandro et al. “Spectral properties of asteroids in cometary orbits”. In: **Astron. Astrophys.** 487.3 (Sept. 2008), pp. 1195–1196. DOI: 10.1051/0004-6361:20078340e.
- [128] J. Licandro et al. “The Effect of Seeing Variations in Time-Series CCD Inner Coma Photometry of Comets: A New Correction Method”. In: **Astronom. J.** 119 (June 2000), pp. 3133–3144. DOI: 10.1086/301406.
- [129] J. Licandro et al. “The visible and near-infrared spectra of asteroids in cometary orbits”. In: **Astron. Astrophys.** 618, A170 (Oct. 2018), A170. DOI: 10.1051/0004-6361/201832853. arXiv: 1903.10880 [astro-ph.EP].
- [130] I. Luk’yanyk et al. “Rapid variations of dust colour in comet 41P/Tuttle-Giacobini-Kresák”. In: **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** 485 (May 2019), pp. 4013–4023. DOI: 10.1093/mnras/stz669. arXiv: 1905.10078 [astro-ph.EP].
- [131] R. Malhotra. “Orbital Resonances and Chaos in the Solar System”. In: *Solar System Formation and Evolution*. Ed. by D. Lazzaro et al. Vol. 149. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 1998, p. 37.
- [132] S. E. Marshall et al. “Potentially Hazardous Asteroid (85989) 1999 JD6: Radar, Infrared, and Lightcurve Observations and a Preliminary Shape Model”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #47*. Vol. 47. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. Nov. 2015, p. 204.09.
- [133] Michaël Marsset et al. “Active Asteroid (6478) Gault: A Blue Q-type Surface below the Dust?” In: **Astrophys. J. Lett.** 882.1, L2 (Sept. 2019), p. L2. DOI: 10.3847/2041-8213/ab32ee. arXiv: 1907.10077 [astro-ph.EP].
- [134] Michaël Marsset et al. “The violent collisional history of aqueously evolved (2) Pallas”. In: *Nature Astronomy* (Feb. 2020). DOI: 10.1038/s41550-019-1007-5.

- [135] K. Marti and T. Graf. “Cosmic-Ray Exposure History of Ordinary Chondrites”. In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 20 (Jan. 1992), p. 221. DOI: 10.1146/annurev.ea.20.050192.001253.
- [136] V. M. Martinez et al. “Lightcurves for Two Near-Earth Asteroids by Asteroids Observers (OBAS) - MPPD: 2016 April-May”. In: *Minor Planet Bulletin* 43 (Oct. 2016), pp. 283–284.
- [137] F. Marzari, D. Davis, and V. Vanzani. “Collisional evolution of asteroid families.” In: **Icarus** 113.1 (Jan. 1995), pp. 168–187. DOI: 10.1006/icar.1995.1014.
- [138] Joseph R. Masiero et al. “Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years Four and Five”. In: *arXiv e-prints*, arXiv:2002.07941 (Feb. 2020), arXiv:2002.07941. arXiv: 2002.07941 [astro-ph.EP].
- [139] Joseph R. Masiero et al. “Asteroid Family Identification Using Physical Properties from WISE/NEOWISE”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #45*. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. Oct. 2013, p. 208.20.
- [140] Joseph R. Masiero et al. “ASTEROID FAMILY IDENTIFICATION USING THE HIERARCHICAL CLUSTERING METHOD AND WISE/NEOWISE PHYSICAL PROPERTIES”. In: *The Astrophysical Journal* 770.1 (May 2013), p. 7. DOI: 10.1088/0004-637x/770/1/7. URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637x/770/1/7>.
- [141] Joseph R. Masiero et al. “Main Belt Asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary Albedos and Diameters”. In: **Astrophys. J.** 741.2, 68 (Nov. 2011), p. 68. DOI: 10.1088/0004-637x/741/2/68. arXiv: 1109.4096 [astro-ph.EP].
- [142] R. G. McMahon et al. “First Scientific Results from the VISTA Hemisphere Survey (VHS)”. In: *The Messenger* 154 (Dec. 2013), pp. 35–37.
- [143] P. Michel and Ch. Froeschlé. “Dynamics of Small Earth-Approachers on Low-Eccentricity Orbits and Implications for Their Origins”. In: *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 78 (Jan. 2000), pp. 93–112.



- [144] P. Michel and D. C. Richardson. “Collision and gravitational reaccumulation: Possible formation mechanism of the asteroid Itokawa”. In: **Astron. Astrophys.** 554, L1 (June 2013), p. L1. DOI: 10.1051/0004-6361/201321657.
- [145] P. Michel and F. Thomas. “The Kozai resonance for near-Earth asteroids with semimajor axes smaller than 2AU.” In: **Astron. Astrophys.** 307 (Mar. 1996), p. 310.
- [146] P. Michel et al. “Collisional Formation and Modeling of Asteroid Families”. In: *Asteroids IV*. 2015, pp. 341–354. DOI: 10.2458/azu\_uapress\_9780816532131-ch018.
- [147] Patrick Michel, Christiane Froeschlé, and Paolo Farinella. “Dynamical Evolution of NEAs: Close Encounters, Secular Perturbations and Resonances”. In: *Earth Moon and Planets* 72.1-3 (Feb. 1996), pp. 151–164. DOI: 10.1007/BF00117513.
- [148] Patrick Michel et al. “Collisions and Gravitational Reaccumulation: Forming Asteroid Families and Satellites”. In: *Science* 294.5547 (Nov. 2001), pp. 1696–1700. DOI: 10.1126/science.1065189.
- [149] Patrick Michel et al. “The Population of Mars-Crossers: Classification and Dynamical Evolution”. In: **Icarus** 145.2 (June 2000), pp. 332–347. DOI: 10.1006/icar.2000.6358.
- [150] F. MIGLIORINI et al. “Vesta fragments from v6 and 3:1 resonances: Implications for V-type near-Earth asteroids and howardite, eucrite and diogenite meteorites”. In: *Meteoritics & Planetary Science* 32.6 (1997), pp. 903–916. DOI: 10.1111/j.1945-5100.1997.tb01580.x. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01580.x>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01580.x>.
- [151] Andrea Milani, Steven R. Chesley, and Giovanni B. Valsecchi. “Asteroid close encounters with Earth: risk assessment”. In: **Planetary Space Science** 48.10 (Aug. 2000), pp. 945–954. DOI: 10.1016/S0032-0633(00)00061-1.

- [152] Andrea Milani et al. “On the ages of resonant, eroded and fossil asteroid families”. In: *Icarus* 288 (May 2017), pp. 240–264. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.12.030. arXiv: 1607.01998 [astro-ph.EP].
- [153] Minor Planet Circular 114957. “MPC114957”. In: *Minor Planet Electronic Circulars* (Aug. 2019).
- [154] M. Mollica et al. “Lightcurve Analysis for Minor Planet 138925 2001 AU43”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (Jan. 2018), pp. 60–61.
- [155] Lawrence A. Molnar and M. J. Haegert. “Details of Recent Collisions of Asteroids 832 Karin and 158 Koronis”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #41*. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. Sept. 2009, p. 27.05.
- [156] M. Moons. “Review of the Dynamics in the Kirkwood Gaps”. In: *The Dynamical Behaviour of our Planetary System*. Ed. by R. Dvorak and J. Henrard. Jan. 1997, p. 175.
- [157] Michèle Moons and Alessandro Morbidelli. “Secular Resonances in Mean Motion Commensurabilities: The 4/1, 3/1, 5/2, and 7/3 Cases”. In: *Icarus* 114.1 (1995), pp. 33–50. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1006/icar.1995.1041>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001910358571041X>.
- [158] Michèle Moons, Alessandro Morbidelli, and Fabio Migliorini. “Dynamical Structure of the 2/1 Commensurability with Jupiter and the Origin of the Resonant Asteroids”. In: *Icarus* 135.2 (1998), pp. 458–468. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1006/icar.1998.5963>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103598959632>.
- [159] A. Morbidelli and M. Moons. “Secular Resonances in Mean Motion Commensurabilities: The 2/1 and 3/2 Cases”. In: *Icarus* 102.2 (Apr. 1993), pp. 316–332. DOI: 10.1006/icar.1993.1052.
- [160] A. Morbidelli and D. Vokrouhlický. “The Yarkovsky-driven origin of near-Earth asteroids”. In: *Icarus* 163.1 (May 2003), pp. 120–134. DOI: 10.1016/S0019-1035(03)00047-2.

- [161] A. Morbidelli et al. “Origin and Evolution of Near-Earth Objects”. In: *Asteroids III*. 2002, pp. 409–422.
- [162] F. Moreno et al. “Dust properties of double-tailed active asteroid (6478) Gault”. In: *A&A* 624 (2019), p. L14. DOI: 10.1051/0004-6361/201935526.
- [163] T. Mothé-Diniz et al. “Mineralogical analysis of the Eos family from near-infrared spectra”. In: *Icarus* 195.1 (May 2008), pp. 277–294. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.12.005.
- [164] Karri Muinonen et al. “A three-parameter magnitude phase function for asteroids”. In: *Icarus* 209.2 (Oct. 2010), pp. 542–555. DOI: 10.1016/j.icarus.2010.04.003.
- [165] N. Murray, M. Holman, and M. Potter. “On the Origin of Chaos in the Asteroid Belt”. In: *Astronom. J.* 116.5 (Nov. 1998), pp. 2583–2589. DOI: 10.1086/300586.
- [166] Shantanu P. Naidu and Jean-Luc Margot. “Near-Earth Asteroid Satellite Spins Under Spin-orbit Coupling”. In: *Astronom. J.* 149.2, 80 (Feb. 2015), p. 80. DOI: 10.1088/0004-6256/149/2/80. arXiv: 1410.0082 [astro-ph.EP].
- [167] T. Nakamura et al. “Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites”. In: *Science* 333 (Aug. 2011), p. 1113. DOI: 10.1126/science.1207758.
- [168] D. A. Nedelcu et al. “Evidence for a source of H chondrites in the outer main asteroid belt”. In: *Astron. Astrophys.* 567, L7 (July 2014), p. L7. DOI: 10.1051/0004-6361/201423949.
- [169] L. Neslušan, J. Svoren, and Vladimir Porubcan. “A computer program for calculation of a theoretical meteor-stream radiant”. In: *Astronomy and Astrophysics* 331 (Feb. 1998), pp. 411–413.
- [170] D. Nesvorný. “Nesvorny HCM Asteroid Families V3.0”. In: *NASA Planetary Data System* 234 (Dec. 2015).
- [171] D. Nesvorný, M. Brož, and V. Carruba. “Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families”. In: *Asteroids IV*. 2015, pp. 297–321. DOI: 10.2458/azu\_uapress\_9780816532131-ch016.

- [172] D. Nesvorný and D. Vokrouhlický. “New Candidates for Recent Asteroid Breakups”. In: **Astronom. J.** 132.5 (Nov. 2006), pp. 1950–1958. DOI: 10.1086/507989.
- [173] David Nesvorný and William F. Bottke. “Detection of the Yarkovsky effect for main-belt asteroids”. In: **Icarus** 170.2 (Aug. 2004), pp. 324–342. DOI: 10.1016/j.icarus.2004.04.012.
- [174] David Nesvorný et al. “Asteroidal source of L chondrite meteorites”. In: **Icarus** 200.2 (Apr. 2009), pp. 698–701. DOI: 10.1016/j.icarus.2008.12.016.
- [175] B. Novaković et al. “A Dark Asteroid Family in the Phocaea Region”. In: **Astronom. J.** 153, 266 (June 2017), p. 266. DOI: 10.3847/1538-3881/aa6ea8. arXiv: 1704.06088 [astro-ph.EP].
- [176] Carolyn Nugent et al. “NEOWISE Reactivation Mission Year One: Preliminary Asteroid Diameters and Albedos”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #47*. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. Nov. 2015, p. 301.01.
- [177] Minor Planet Observer. *MPO Canopus software* (<http://www.minorplanetobserver.com>), BDW Publishing, Colorado Springs. 2015.
- [178] Caroline E Odden et al. “Lightcurve Analysis for Near-Earth Asteroid 2012 TC4”. In: *Minor Planet Bulletin* 40 (2013), pp. 176–177.
- [179] J. Oey and R. Groom. “Photometric Observations of Near-Earth Asteroid (348400) 2005 JF1”. In: *Minor Planet Bulletin* 43 (July 2016), pp. 208–210.
- [180] J. Oey, H. Williams, and R. Groom. “Lightcurve Analysis of Asteroids from BMO and DRO in 2015”. In: *Minor Planet Bulletin* 44 (July 2017), pp. 200–204.
- [181] E. J. Opik. “Collision probability with the planets and the distribution of planetary matter”. In: *Proc. R. Irish Acad. Sect. A* 54 (Jan. 1951), pp. 165–199.

- [182] S. J. Ostro et al. “Radar Imaging of Binary Near-Earth Asteroid (66391) 1999 KW4”. In: *Science* 314 (Nov. 2006), pp. 1276–1280. DOI: 10.1126/science.1133622.
- [183] Myriam Pajuelo et al. “Spectral properties of binary asteroids”. In: **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** 477.4 (July 2018), pp. 5590–5604. DOI: 10.1093/mnras/sty1013.
- [184] R. S. Park et al. “A partially differentiated interior for (1) Ceres deduced from its gravity field and shape”. In: **Nature** 537.7621 (Sept. 2016), pp. 515–517. DOI: 10.1038/nature18955.
- [185] Frederick Pilcher and Lorenzo Franco. “Rotation Period and H-G Parameters of 682 Hagar”. In: *Minor Planet Bulletin* 41.1 (Jan. 2014), pp. 35–36.
- [186] Henri Poincaré. *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*. 1892. DOI: 10.3931/e-rara-421.
- [187] T. Polakis, B. D. Warner, and B. A. Skiff. “Lightcurve Analysis for Near-Earth Asteroid (143404) 2003 BD44”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (Jan. 2018), pp. 3–4.
- [188] D. Polishook and N. Brosch. “Photometry and spin rate distribution of small-sized main belt asteroids”. In: **Icarus** 199.2 (Feb. 2009), pp. 319–332. DOI: 10.1016/j.icarus.2008.10.020. arXiv: 0811.1223 [astro-ph].
- [189] D. Polishook and N. Brosch. “Photometry of Aten asteroids: More than a handful of binaries”. In: **Icarus** 194 (Mar. 2008), pp. 111–124. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.09.022.
- [190] D. Polishook et al. “Observations of fresh and weathered surfaces on asteroid pairs and their implications on the rotational-fission mechanism”. In: *Icarus* 233 (May 2014), pp. 9–26. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.01.014. arXiv: 1401.4465 [astro-ph.EP].
- [191] David Polishook. “Fast rotation of the NEA 2012 TC4 indicates a monolithic structure”. In: *Minor Planet Bulletin* 40 (2013), pp. 42–43.

- [192] M. Popescu, M. Birlan, and D. A. Nedelcu. “Modeling of asteroid spectra - M4AST”. In: **Astron. Astrophys.** 544, A130 (Aug. 2012), A130. DOI: 10.1051/0004-6361/201219584.
- [193] M. Popescu et al. “Near-infrared colors of minor planets recovered from VISTA-VHS survey (MOVIS)”. In: **Astron. Astrophys.** 591, A115 (June 2016), A115. DOI: 10.1051/0004-6361/201628163. arXiv: 1605.05594 [astro-ph.EP].
- [194] M. Popescu et al. “Taxonomic classification of asteroids based on MOVIS near-infrared colors”. In: **Astron. Astrophys.** 617, A12 (Sept. 2018), A12. DOI: 10.1051/0004-6361/201833023. arXiv: 1807.00713 [astro-ph.EP].
- [195] P. Pravec and A. W. Harris. “Fast and Slow Rotation of Asteroids”. In: *Icarus* 148 (Nov. 2000), pp. 12–20. DOI: 10.1006/icar.2000.6482.
- [196] P. Pravec et al. “Photometric survey of binary near-Earth asteroids”. In: **Icarus** 181 (Mar. 2006), pp. 63–93. DOI: 10.1016/j.icarus.2005.10.014.
- [197] P. Pravec et al. “Spin rate distribution of small asteroids”. In: **Icarus** 197.2 (Oct. 2008), pp. 497–504. DOI: 10.1016/j.icarus.2008.05.012.
- [198] P. Pravec et al. “The Near-Earth Objects Follow-Up Program”. In: **Icarus** 130 (Dec. 1997), pp. 275–286. DOI: 10.1006/icar.1997.5816.
- [199] P. Pravec et al. “Tumbling asteroids”. In: **Icarus** 173 (Jan. 2005), pp. 108–131. DOI: 10.1016/j.icarus.2004.07.021.
- [200] Petr Pravec and Alan W. Harris. “Fast and Slow Rotation of Asteroids”. In: **Icarus** 148.1 (Nov. 2000), pp. 12–20. DOI: 10.1006/icar.2000.6482.
- [201] Petr Pravec, Marek Wolf, and Lenka Sarounova. *Ondrejov Asteroid Photometry Project*. 2019. URL: <http://www.asu.cas.cz/~ppravec/> (visited on 09/24/2019).
- [202] Petr Pravec et al. “Absolute magnitudes of asteroids and a revision of asteroid albedo estimates from WISE thermal observations”. In: **Icarus** 221.1 (Sept. 2012), pp. 365–387. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.026.
- [203] Petr Pravec et al. “Fast rotating asteroids 1999 TY2, 1999 SF10, and 1998 WB2”. In: *Icarus* 147.2 (2000), pp. 477–486.

- [204] J. T. Rayner et al. “SpeX: A Medium-Resolution 0.8-5.5 Micron Spectrograph and Imager for the NASA Infrared Telescope Facility”. In: **Pub. Astron. Soc. Pac.** 115 (Mar. 2003), pp. 362–382. DOI: 10.1086/367745.
- [205] W. T. Reach. “Spitzer observations of comets and zodiacal light”. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts #206*. Vol. 206. American Astronomical Society Meeting Abstracts. Jan. 2005, p. 28.17.
- [206] V. Reddy et al. “Near-Earth asteroid 2012 TC4 observing campaign: Results from a global planetary defense exercise”. In: **Icarus** 326 (July 2019), pp. 133–150. DOI: 10.1016/j.icarus.2019.02.018.
- [207] Vishnu Reddy et al. “Mineralogical characterization of Baptistina Asteroid Family: Implications for K/T impactor source”. In: **Icarus** 216.1 (Nov. 2011), pp. 184–197. DOI: 10.1016/j.icarus.2011.08.027. arXiv: 1110.3414 [astro-ph.EP].
- [208] V. Reshetnyk et al. “Recent optical observations of NHATS target 2015 DP155”. In: *The Astronomer’s Telegram* 11645 (May 2018).
- [209] D. C. Richardson et al. “Gravitational Aggregates: Evidence and Evolution”. In: *Asteroids III*. 2002, pp. 501–515.
- [210] Derek C. Richardson, Pradeep Elankumaran, and Robyn E. Sanderson. “Numerical experiments with rubble piles: equilibrium shapes and spins”. In: *Icarus* 173.2 (2005), pp. 349–361. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.09.007>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103504003124>.
- [211] H. Rickman, J. A. Fernandez, and B. A. S. Gustafson. “Formation of stable dust mantles on short-period comet nuclei”. In: **Astron. Astrophys.** 237.2 (Oct. 1990), pp. 524–535.
- [212] A. S. Rivkin et al. “Hydrated Minerals on Asteroids: The Astronomical Record”. In: *Asteroids III*. 2002, pp. 235–253.
- [213] B. Rowe. “Lightcurve Analysis of 6 Asteroids from RMS Observatory”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (July 2018), pp. 292–294.

- [214] David Parry Rubincam. “Asteroid orbit evolution due to thermal drag”. In: **Journal of Geophysics Research** 100.E1 (Jan. 1995), pp. 1585–1594. DOI: 10.1029/94JE02411.
- [215] David Parry Rubincam. “Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids”. In: **Icarus** 148.1 (Nov. 2000), pp. 2–11. DOI: 10.1006/icar.2000.6485.
- [216] C. T. Russell et al. “Dawn at Vesta: Testing the Protoplanetary Paradigm”. In: *Science* 336.6082 (2012), pp. 684–686. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1219381. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/336/6082/684.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/336/6082/684>.
- [217] J. A. Sanchez et al. “Physical Characterization of Active Asteroid (6478) Gault”. In: *arXiv e-prints* (July 2019). arXiv: 1907.06643 [astro-ph.EP].
- [218] D. J. Scheeres et al. “Dynamical Configuration of Binary Near-Earth Asteroid (66391) 1999 KW4”. In: *Science* 314.5803 (2006), pp. 1280–1283. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1133599. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/314/5803/1280.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/314/5803/1280>.
- [219] Paul Schenk et al. “The Geologically Recent Giant Impact Basins at Vesta’s South Pole”. In: *Science* 336.6082 (May 2012), p. 694. DOI: 10.1126/science.1223272.
- [220] G. V. Schiaparelli. “Notice of Paper, “Sur la relation qui existe entre les Comètes et les Etoiles filantes””. In: **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** 27 (Apr. 1867), p. 246. DOI: 10.1093/mnras/27.6.246.
- [221] D. G. Schleicher, R. L. Millis, and P. V. Birch. “Narrowband Photometry of Comet P/Halley: Variation with Heliocentric Distance, Season, and Solar Phase Angle”. In: **Icarus** 132 (Apr. 1998), pp. 397–417. DOI: 10.1006/icar.1997.5902.



- [222] J. V. Scotti and H. J. Melosh. “Estimate of the size of comet Shoemaker-Levy 9 from a tidal breakup model”. In: **Nature** 365.6448 (Oct. 1993), pp. 733–735. DOI: 10.1038/365733a0.
- [223] E. M. Shoemaker and E. F. Helin. *Near-earth asteroids as targets for exploration*. Tech. rep. Jan. 1978, pp. 20–21.
- [224] H. Sierks et al. “Images of Asteroid 21 Lutetia: A Remnant Planetesimal from the Early Solar System”. In: *Science* 334.6055 (2011), pp. 487–490. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1207325. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/334/6055/487.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/334/6055/487>.
- [225] Stephen M. Slivan. “Spin vector alignment of Koronis family asteroids”. In: **Nature** 419.6902 (Sept. 2002), pp. 49–51. DOI: 10.1038/nature00993.
- [226] Stephen M. Slivan and Lawrence A. Molnar. “Spin vectors in the Koronis family: III. (832) Karin”. In: **Icarus** 220.2 (Aug. 2012), pp. 1097–1103. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.06.038.
- [227] K. W. Smith et al. “(6478) Gault”. In: *Central Bureau Electronic Telegrams* 4594 (Jan. 2019).
- [228] A. B. Sonka et al. “Photometric observations of Near Earth Asteroid 2012 TC4”. In: *Romanian Astronomical Journal* 27 (Dec. 2017), pp. 223–231.
- [229] Adrian Bruno Sonka, Andreea Ioana Gornea, and Mirel Birlan. “Photometric Monitoring of PHA (3122) Florence”. In: *Romanian Astronomical Journal* 28.2 (May 2018), pp. 79–86.
- [230] R. B. Southworth and G. S. Hawkins. “Statistics of meteor streams”. In: *Smithsonian Contributions to Astrophysics* 7 (Jan. 1963), pp. 261–285.
- [231] R. D. Stephens and B. D. Warner. “Lightcurve Observations of (348400) 2005 JF21: An NEA Binary”. In: *Minor Planet Bulletin* 43 (Jan. 2016), pp. 22–24.
- [232] M. V. Sykes et al. “2MASS observations of the solar system”. In: *Asteroids, Comets, and Meteors: ACM 2002*. Ed. by Barbara Warmbein. Vol. 500. ESA Special Publication. Nov. 2002, pp. 481–484.

- [233] Gy. M. Szabó et al. “Photometric observations of 9 Near-Earth Objects”. In: **Astron. Astrophys.** 375 (Aug. 2001), pp. 285–292. DOI: 10.1051/0004-6361:20010813. arXiv: astro-ph/0106017 [astro-ph].
- [234] H. Tan and X. Gao. “Lightcurve Analysis for Near-Earth Asteroid 2012 TC4”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (July 2018), pp. 220–221.
- [235] Gonzalo Tancredi. “A criterion to classify asteroids and comets based on the orbital parameters”. In: **Icarus** 234 (July 2014), pp. 66–80. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.02.013.
- [236] Anthony Taylor, Jonathan C. McDowell, and Martin Elvis. “A Delta-V map of the known Main Belt Asteroids”. In: *Acta Astronautica* 146 (May 2018), pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.02.014.
- [237] E. F. Tedesco et al. “IRAS Minor Planet Survey V6.0”. In: *NASA Planetary Data System*, IRAS-A-FPA-3-RDR-IMPS-V6.0 (Oct. 2004), IRAS-A-FPA-3-RDR-IMPS-V6.0.
- [238] E. F. Tedesco et al. *The IRAS Minor Planet Survey*. Tech. rep. Dec. 1992.
- [239] Christian Thalmann et al. “SPHERE ZIMPOL: overview and performance simulation”. In: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*. Ed. by Ian S. McLean and Mark M. Casali. Vol. 7014. International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2008, pp. 1199–1210. DOI: 10.1117/12.789158. URL: <https://doi.org/10.1117/12.789158>.
- [240] Audrey Thirouin et al. “The mission accessible near-earth objects survey (MANOS): first photometric results”. In: *The Astronomical Journal* 152.6 (2016), p. 163.
- [241] Francois Tisserand. “Memoire sur les mouvements seculaires des plans des orbites de trois planetes”. In: *Annales de l’Observatoire de Paris* 16 (Jan. 1882), E.1–E.
- [242] J. L. Tonry et al. “ATLAS: A High-cadence All-sky Survey System”. In: **Pub. Astron. Soc. Pac.** 130.6 (June 2018), p. 064505. DOI: 10.1088/1538-3873/aabadf. arXiv: 1802.00879 [astro-ph.IM].

- [243] J. L. Tonry et al. “The Pan-STARRS1 Photometric System”. In: **Astrophys. J.** 750, 99 (May 2012), p. 99. DOI: 10.1088/0004-637X/750/2/99. arXiv: 1203.0297 [astro-ph.IM].
- [244] K. Tsiganis, H. Varvoglis, and A. Morbidelli. “Short-lived asteroids in the 7/3 Kirkwood gap and their relationship to the Koronis and Eos families”. In: **Icarus** 166.1 (Nov. 2003), pp. 131–140. DOI: 10.1016/j.icarus.2003.08.007.
- [245] Fumihiko Usui et al. “A comparative study of infrared asteroid surveys: IRAS, AKARI, and WISE”. In: **Publications of the ASJ** 66.3, 56 (June 2014), p. 56. DOI: 10.1093/pasj/psu037. arXiv: 1403.7854 [astro-ph.EP].
- [246] O. Vaduvescu et al. “The EURONEAR Lightcurve Survey of Near Earth Asteroids”. In: *Earth Moon and Planets* 120 (Aug. 2017), pp. 41–100. DOI: 10.1007/s11038-017-9506-9.
- [247] A. Vecchione, A. Noschese, and A. Catapano. “Lightcurve Analysis and Rotation Period for (140158) 2001 SX169”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (Apr. 2018), pp. 183–184.
- [248] Peter Vereš et al. “Absolute magnitudes and slope parameters for 250,000 asteroids observed by Pan-STARRS PS1 - Preliminary results”. In: **Icarus** 261 (Nov. 2015), pp. 34–47. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.08.007. arXiv: 1506.00762 [astro-ph.EP].
- [249] P. Vernazza et al. “A basin-free spherical shape as an outcome of a giant impact on asteroid Hygiea”. In: *Nature Astronomy* 4 (Feb. 2020), pp. 136–141. DOI: 10.1038/s41550-019-0915-8.
- [250] P. Vernazza et al. “Compositional differences between meteorites and near-Earth asteroids”. In: **Nature** 454.7206 (Aug. 2008), pp. 858–860. DOI: 10.1038/nature07154.
- [251] P. Vernazza et al. “The impact crater at the origin of the Julia family detected with VLT/SPHERE?” In: **Astron. Astrophys.** 618, A154 (Oct. 2018), A154. DOI: 10.1051/0004-6361/201833477.

- [252] P Vernazza et al. “A basin-free spherical shape as an outcome of a giant impact on asteroid Hygiea”. In: *Nature Astronomy* 4.2 (2020), pp. 136–141.
- [253] Pierre Vernazza and Pierre Beck. “Composition of Solar System Small Bodies”. In: *Planetesimals: Early Differentiation and Consequences for Planets*. Ed. by Linda T. Elkins-Tanton and Benjamin P. Editors Weiss. Cambridge Planetary Science. Cambridge University Press, 2017, pp. 269–297. DOI: 10.1017/9781316339794.013.
- [254] J. Veverka et al. “NEAR at Eros: Imaging and Spectral Results”. In: *Science* 289.5487 (2000), pp. 2088–2097. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.289.5487.2088. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/289/5487/2088.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/289/5487/2088>.
- [255] J. Veverka et al. “NEAR Encounter with Asteroid 253 Mathilde: Overview”. In: *Icarus* 140.1 (1999), pp. 3–16. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1006/icar.1999.6120>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103599961201>.
- [256] M. Viikinkoski et al. “(16) Psyche: A mesosiderite-like asteroid?” In: **Astron. Astrophys.** 619, L3 (Nov. 2018), p. L3. DOI: 10.1051/0004-6361/201834091. arXiv: 1810.02771 [astro-ph.EP].
- [257] D. Vokrouhlický and D. Čapek. “YORP-Induced Long-Term Evolution of the Spin State of Small Asteroids and Meteoroids: Rubincam’s Approximation”. In: *Icarus* 159.2 (2002), pp. 449–467. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6918>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103502969186>.
- [258] D. Vokrouhlický and P. Farinella. “The Yarkovsky Seasonal Effect on Asteroidal Fragments: A Nonlinearized Theory for Spherical Bodies”. In: **Astronom. J.** 118.6 (Dec. 1999), pp. 3049–3060. DOI: 10.1086/301138.
- [259] D. Vokrouhlický et al. “Spin axis of (2953) Vysheslavia and its implications”. In: *Icarus* 180.1 (2006), pp. 217–223. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.09.001>.

- org/10.1016/j.icarus.2005.08.013. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103505003180>.
- [260] D. Vokrouhlický et al. “The Yarkovsky and YORP Effects”. In: *Asteroids IV*. Ed. by P. Michel, F. E. DeMeo, and W. F. Bottke. 2015, pp. 509–531. DOI: 10.2458/azu\_uapress\_9780816532131-ch027.
- [261] D. Vokrouhlický et al. “Yarkovsky footprints in the Eos family”. In: *Icarus* 182.1 (May 2006), pp. 92–117. DOI: 10.1016/j.icarus.2005.12.011.
- [262] David Vokrouhlický. “The Yarkovsky effect in the dynamics of the Solar System”. In: *The Restless Universe*. Ed. by Bonnie A. Steves and Andrzej J. Maciejewski. Jan. 2001, pp. 53–78.
- [263] Kevin J. Walsh et al. “Introducing the Eulalia and new Polana asteroid families: Re-assessing primitive asteroid families in the inner Main Belt”. In: *Icarus* 225.1 (July 2013), pp. 283–297. DOI: 10.1016/j.icarus.2013.03.005. arXiv: 1305.2821 [astro-ph.EP].
- [264] B. D. Warner. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2014 June-October”. In: *Minor Planet Bulletin* 42 (Jan. 2015), pp. 41–53.
- [265] B. D. Warner. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2014 March-June”. In: *Minor Planet Bulletin* 41 (Oct. 2014), pp. 213–224.
- [266] B. D. Warner. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2015 June-September”. In: *Minor Planet Bulletin* 43 (Jan. 2016), pp. 66–79.
- [267] B. D. Warner. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2015 March-June”. In: *Minor Planet Bulletin* 42 (Oct. 2015), pp. 256–266.
- [268] B. D. Warner. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 April-July”. In: *Minor Planet Bulletin* 43 (Oct. 2016), pp. 311–319.

- [269] B. D. Warner. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2017 October-December”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (Apr. 2018), pp. 138–147.
- [270] B. D. Warner. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2018 April-June”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (Oct. 2018), pp. 366–379.
- [271] B. D. Warner. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2018 January-April”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (July 2018), pp. 248–256.
- [272] B. D. Warner and R. D. Stephens. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2018 July-September”. In: *Minor Planet Bulletin* 46 (Jan. 2019), pp. 27–40.
- [273] B. D. Warner et al. “Lightcurve Analysis of NEA (190166) 2005 UP156: A New Fully-Synchronous Binary”. In: *Minor Planet Bulletin* 44 (Oct. 2017), pp. 324–325.
- [274] B. D. Warner et al. “Lightcurve Analysis of the Near-Earth Asteroid 2015 TB145”. In: *Minor Planet Bulletin* 43 (Apr. 2016), pp. 141–142.
- [275] Brian D Warner. “Near-earth asteroid lightcurve analysis at cs3-palmer divide station: 2016 january-april”. In: *Minor Planet Bulletin* 43 (2016), pp. 240–250.
- [276] Brian D Warner. “Near-Earth asteroid lightcurve analysis at CS3-palmer divide station: 2014 June-October”. In: *Minor Planet Bulletin* 42 (2015), pp. 41–53.
- [277] Brian D Warner. “Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2017 July Through October”. In: *Minor Planet Bulletin* 45 (2018), pp. 19–34.
- [278] Brian D. Warner. “Asteroid lightcurve analysis at the Palmer Divide Observatory - spring 2005”. In: *Minor Planet Bulletin* 32.4 (Dec. 2005), pp. 90–92.

- [279] Brian D. Warner, Alan W. Harris, and Petr Pravec. “The asteroid lightcurve database”. In: **Icarus** 202.1 (July 2009), pp. 134–146. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.02.003.
- [280] Brian D Warner et al. *A practical guide to lightcurve photometry and analysis*. Vol. 300. Springer, 2006.
- [281] Brian D Warner, RD Stephens, JW Brinsfield, et al. “The Minor Planet Bulletin”. In: *Association of Lunar and Planetary Observers* 39.2 (2012), pp. 84–85.
- [282] S. Watanabe et al. “Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile”. In: *Science* 364.6437 (2019), pp. 268–272. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.aav8032. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/364/6437/268.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/364/6437/268>.
- [283] M. Weiler et al. “The dust activity of comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) between 3 AU and 13 AU from the Sun”. In: **Astron. Astrophys.** 403 (May 2003), pp. 313–322. DOI: 10.1051/0004-6361:20030289.
- [284] G. W. Wetherill. “Steady state populations of Apollo-Amor objects”. In: **Icarus** 37.1 (Jan. 1979), pp. 96–112. DOI: 10.1016/0019-1035(79)90118-0.
- [285] G. W. Wetherill. “Where do the meteorites come from? A re-evaluation of the earth-crossing apollo objects as sources of chondritic meteorites”. In: **Geochimica Cosmochimica Acta** 40.11 (Nov. 1976), pp. 1297–1317. DOI: 10.1016/0016-7037(76)90120-4.
- [286] Fred L. Whipple. “On meteor masses and densities.” In: **Astronom. J.** 57 (Jan. 1952), p. 28. DOI: 10.1086/106660.
- [287] Iwan P Williams. “The origin and evolution of meteor showers and meteoroid streams”. In: *Astronomy & Geophysics* 52.2 (Apr. 2011), pp. 2.20–2.26. ISSN: 1366-8781. DOI: 10.1111/j.1468-4004.2011.52220.x. eprint: <https://academic.oup.com/astrogeo/article-pdf/52/2/2.20/19333485/52-2-2.20.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2011.52220.x>.

- [288] James Gerard Williams. “Secular Perturbations in the Solar System.” PhD thesis. UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES., Jan. 1969.
- [289] J. Wisdom. “Meteorites may follow a chaotic route to Earth”. In: **Nature** 315.6022 (June 1985), pp. 731–733. DOI: 10.1038/315731a0.
- [290] Edward L. Wright et al. “The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance”. In: **Astronom. J.** 140.6 (Dec. 2010), pp. 1868–1881. DOI: 10.1088/0004-6256/140/6/1868. arXiv: 1008.0031 [astro-ph.IM].
- [291] Q. Ye et al. “Continued Activity of (6478) Gault”. In: *The Astronomer’s Telegram* 12450 (Jan. 2019).
- [292] Q. Ye et al. “Multiple Outbursts of Asteroid (6478) Gault”. In: **Astrophys. J. Lett.** 874, L16 (Apr. 2019), p. L16. DOI: 10.3847/2041-8213/ab0f3c. arXiv: 1903.05320 [astro-ph.EP].
- [293] J. W. Young and A. W. Harris. “Photoelectric lightcurve and phase relation of the asteroids 505 Cava”. In: **Icarus** 64.3 (Dec. 1985), pp. 528–530. DOI: 10.1016/0019-1035(85)90073-9.
- [294] N. Zacharias et al. “VizieR Online Data Catalog: UCAC4 Catalogue (Zacharias+, 2012)”. In: *VizieR Online Data Catalog*, I/322A (July 2012), I/322A.
- [295] V. Zappalà et al. “Asteroid families: Search of a 12,487-asteroid sample using two different clustering techniques.” In: **Icarus** 116.2 (Aug. 1995), pp. 291–314. DOI: 10.1006/icar.1995.1127.
- [296] Vincenzo Zappala et al. “Asteroid Families. II. Extension to Unnumbered Multiopposition Asteroids”. In: **Astronom. J.** 107 (Feb. 1994), p. 772. DOI: 10.1086/116897.
- [297] Vincenzo Zappala et al. “Asteroid Families. I. Identification by Hierarchical Clustering and Reliability Assessment”. In: **Astronom. J.** 100 (Dec. 1990), p. 2030. DOI: 10.1086/115658.
- [298] V Zappala et al. “An analysis of the amplitude-phase relationship among asteroids”. In: *Astronomy and Astrophysics* 231 (1990), pp. 548–560.