

**UNIVERSITATEA DIN BUCURESTI
FACULTATEA DE FIZICA**

TEZA DE DOCTORAT

**STUDIUL UNOR PROPRIETATI
FIZICE ALE ASTEROIZILOR PRIN
METODE OPTICE**

**Autor :
MIREL BIRLAN**

**Coducător științific :
Profesor - Doctor IANCU IOVA**

Iunie 1998

Motto :

« Inter Jovem et Martem interposui planetam »

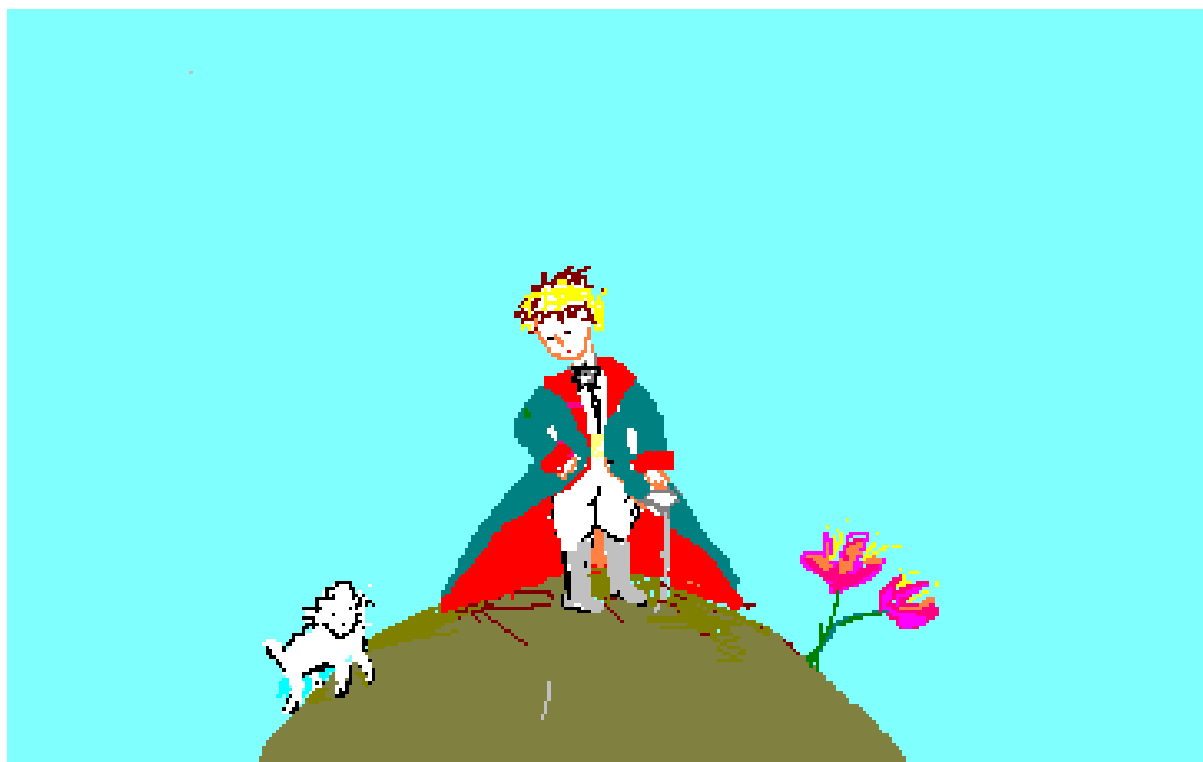
Johannes Kepler, 1596

« Am temeinice motive sa cred ca planeta de pe care venea micul print era asteroidul B-612. Acest asteroid nu a fost zarit decât o singura data, cu telescopul, în anul 1909, de catre un astronom turc .

El a facut atunci , cu prilejul unui Congres International de Astronomie, o mare demonstratie a descoperirii sale. Nimeni însa nu i-a dat crezare, din pricina hainelor pe care le purta. Asa sunt oamenii mari.

Din fericire pentru faima asteroidului B-612, un dictator turc porunci poporului sau, sub pedeapsa cu moartea, sa se îmbrace ca europenii. Astronomul a mai facut o demonstratie în 1920, îmbracat de asta data într-un frac foarte elegant. Si toata lumea, acum, a fost de aceeași parere cu el. »

Antoine de Saint-Exupery, *Micul Print*



CUPRINS

CUVANT INAINTE	5
CAPITOLUL I INTRODUCERE	7
I.1. Istoric ; Descoperire	7
I.2. Date actuale ; Nomenclatura ; Cataloage si baze de date	8
I.3. Caracterizare schematica a populatiei asteroidale pe baza parametrilor dinamici	10
I.4. Caracterizarea asteroizilor pe baza compozitiei lor mineralogice	15
CAPITOLUL II TEHNICI DE OBSERVARE IN DOMENIUL OPTIC	19
II.1. Observarea vizuala	19
II.2. Observarea fotografica	19
II.3. Observarea fotoelectrica	21
II.4. Fotometria CCD	22
CAPITOLUL III DISPOZITIVELE CU TRANSFER DE SARCINA (CCD) IN FOTOMETRIE	24
III.1. Capacitatea MOS	24
III.2. Mecanismele de transfer al sarcinilor electrice	26
III.2.1. Transferul în trei faze	27
III.2.2. Transferul în patru faze	27
III.2.3. Transfer în doua faze	27
III.2.4. Calitatea transferului de sarcini electrice	29
III.3. Organizarea generala a unui CCD	29
III.3.1. Bareta CCD	29
III.3.2. Matricea CCD	30
III.4. Performantele unei camere cu transfer de sarcina electrica (CCD)	32
III.4.1. Randamentul cuantic	32
III.4.2. Sensibilitatea spectrala	33
III.4.3. Eficienta de transfer a sarcinilor electrice	34
III.4.4. Rezolutia spatiala	34
CAPITOLUL IV MARIMI FOTOMETRICE	36
IV.1. Marimi specifice utilizate în fotometria energetica	36
IV.2. Sisteme de magnitudini	39
CAPITOLUL V CARACTERISTICI FIZICE ALE ASTEROIZILOR	43
V.1. Curba de lumina	43
V.2. Forma si dimensiunile asteroizilor	45
V.3. Albedo; Reflectanta spectrala	46
V.4. Perioada de rotatie proprie (spinul) ; Axa de rotatie proprie	49
CAPITOLUL VI FOTOMETRIA CCD A ASTEROIZILOR	51
VI.1. Obtinerea imaginilor CCD	51
VI.1.1. Alegerea asteroizilor si a stelelor standard	52
VI.1.2. Harta de cautare	52
VI.1.3. Identificarea asteroidului în câmpul de observare	53
VI.1.4. Achizitia imaginilor	53
VI.2. Tehnica de procesare a imaginilor	54
VI.2.1. Corectarea imaginilor brute	55
VI.2.2. Extinctia atmosferica	56
VI.2.3. Reducerea la un sistem standard de magnitudini	58
VI.3. Curba de lumina compusa ; Perioada de rotatie proprie	60

CAPITOLUL VII	REZULTATE OBSERVATIONALE	61
VII.1.	Campanii de observatie	61
VII.2.	Observatii de asteroizi cu diametru mai mic de 50 km	65
VII.3.	Observatii de asteroizi cu perioada lunga	74
VII.4.	Asteroizi candidati pentru misiunea ROSETTA	75
VII.5.	Asteroizi nerezolvati	77
VII.6.	Concluzii	80
CAPITOLUL VIII	IMAGINE GLOBALA A POPULATIEI DE ASTEROIZI	82
VIII.1.	Analiza statistica a perioadelor de rotatie	82
VIII.2.	Clase taxonomice : interpretarea evolutiva a claselor taxonomice	85
CONCLUZII		90
BIBLIOGRAFIE		93
ANEXA LUCRARI		98

CUVÂNT ÎNAINTE

Prezenta lucrare este consacrată studiului asteroizilor, în scopul unei mai bune cunoașterii a originii și evoluției lor. Atât numărul mare de obiecte, cât și dificultatea observațiilor ca urmare a dimensiunilor lor relativ reduse (și implicit reducerea accesibilității lor de la sol cu telescoape relativ modeste), fac din această populație de corpuri ale Sistemului Solar un obiect de cercetare pasionant. Asteroizii, alături de comete, sunt probabil singurele obiecte ale Sistemului Solar care nu și-au schimbat prea mult structura fizică și chimică față de cea avută în momentul formării lor. De aici rezidă și interesul referitor la aportul pe care-l poate aduce studiul acestor corpuri în înțelegerea mecanismelor care au dus la formarea sistemului planetar precum și evoluția acestuia până la stadiul actual.

Disponerea unei mari părți a asteroizilor cunoscuți între planetele interne, telurice, și planetele gigante, gazoase, a dat naștere la enunțarea de diverse ipoteze privind originea și formarea lor. Chiar dacă această parte a populației asteroidale situată între Marte și Jupiter a suferit și o evoluție colizională în decursul timpului, opinia acceptată actual de o mare parte a specialiștilor este că evoluția lor termică, mineralogică nu s-a concretizat prin modificări structurale importante.

Asteroizii prezintă interes în egală măsură pentru cercetarea meteoritilor. Cea mai mare parte a meteoritilor reprezintă probabil mostre de material asteroidal care a fost capurat de câmpul gravitațional al Pământului și a reușit să ajungă pe solul terestru fără a se consuma în totalitate în interacțiunea cu atmosfera terestră. Studiile comparative pot servi deopotrivă cunoașterii asteroizilor cât și determinării provenienței meteoritilor; împreună, aceste rezultate vor constitui la rândul lor fapte concrete care pot confirma sau infirma diverse ipoteze de lucru alese în modelarea evoluției Sistemului Solar primordial.

Actualmente se cunosc relativ bine orbitele a peste 7000 asteroizi și pentru încă alți 30000 s-au făcut observații dar nu au fost reconfirmați încă prin calcul de efemerida. În ceea ce privește caracteristicile fizice, intrinseci fiecărui asteroid (perioada de rotație proprie, culori, albedo,...), în bazele de date sunt înmagazinate informații despre aproximativ 1100 asteroizi, însă datele sunt în cea mai mare parte neomogene și greu de prelucrat la scară globală. Statisticile prezentate reflectă necesitatea unui studiu permanent în vederea îmbogățirii cunoștințelor despre aceste corpuri.

Această lucrare își propune studiul caracteristicilor intrinseci, fizice, particulare unui asteroid sau a unui grup de asteroizi. Lucrarea a fost structurată corespunzător scopului propus.

În capitolul întâi se face un scurt istoric al descoperirii acestor corpuri și o succintă trecere în revistă a cunoștințelor actuale referitoare la dinamica și fizica populației asteroidale.

Capitolul doi prezintă o scurtă radiografie a metodelor de observație pe care autorul le-a utilizat în cursul cercetărilor efectuate asupra asteroizilor.

Capitolul trei face o succintă trecere în revistă a dispozitivelor cu transfer de sarcină electrică și o comparație a acestora cu alți detectori utilizați în astronomie în decursul timpului (placă fotografică și fotometrul fotoelectric).

Capitolul patru permite cititorului sa se familiarizeze cu marimile fotometrice utilizate în astronomie.

Capitolul cinci prezinta principalii parametri fizici care pot fi dedusi din observatiile efectuate de la sol.

Tehnica de observatie folosind dispozitivul cu transfer de sarcina electrica (camera CCD), este prezentata în capitolul sase al acestei teze.

Rezultatele campaniilor de observatie efectuate la Observatoarele din Haute Provence, Pic du Midi si La Silla constituie subiectul celui de-al saptelea capitol.

O sinteza a rezultatelor privind perioadele de rotatie cunoscute ale asteroizilor, ca si cunostintele referitoare la grupurile de asteroizi a caror indici de culoare se cunosc, sunt prezentate în capitolul opt.

Concluziile si comentariile tezei sunt succedate de lista bibliografica si de o anexa continând articolele publicate de autor în cadrul acestui subiect.

CAPITOLUL I

INTRODUCERE

I.1. Istoric ; Descoperire

Existenta unei planete în zona unde actualmente se afla centura asteroidala a fost pentru prima data sugerata de Johannes Kepler. « Inter Jovem et Martem interposui planetam » scrie Kepler în anul 1596.

Din observatiile lui Tycho Brahe, Kepler ajunge la concluzia ca Jupiter este mult prea departe de Marte si ca între cele doua exista o alta planeta, pe care nu o putem vedea, dar care se afla în acel loc pentru « a se încadra în planurile Creatorului ».

În 1766 Titius von Wittenburg enunta ipoteza conform careia planetele ar trebui sa se supuna unei legi empirice de forma :

$$a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

în care cu **a** s-a notat semiaxa mare a orbitei planetei, iar **n** este un numar întreg ce ia valorile : **n**=-∞ în cazul planetei Mercur, **n**=0 în cazul lui Venus, **n**=1 în cazul Pamântului, **n**=2 în cazul lui Marte, **n**=4 în cazul lui Jupiter, **n**=5 pentru Saturn.

Prin acceptarea valabilitatii legii empirice enuntate mai sus, astronomul Johann Bode re-enunta ipoteza existentei unei planete între Marte si Jupiter, care si-ar efectua miscarea de revolutie la 2,8 u.a. de Soare si care ar corespunde unei distante data de legea Titius¹ pentru **n**=3.

Descoperirea în 1781 de catre William Herschel a planetei Uranus vine ca un argument în favoarea legii empirice Titius-Bode, întarind totodata ideea existentei unei planete între Marte si Jupiter conform previziunilor acestei legi.

În anul 1800, în urma unei reuniuni a sase astronomi europeni, se adopta o rezolutie, ulterior transmisa tuturor observatoarelor europene ale epocii, în care se propunea efectuarea de cautari sistematice pe sfera cereasca pentru descoperirea « planetei lipsa ».

Sansa acestei descoperiri surâde lui Giuseppe Piazzi de la Observatorul din Palermo. La 13 ianuarie 1801 acesta observa pentru prima data un corp ceresc ce se misca printre stele asemenea planetelor. Calculele efectuate ulterior estimeaza ca acesta se misca în jurul Soarelui, pe o orbita cu semiaxa mare de aproximativ 2,7 u.a.. Noul corp a fost numit Ceres, în cinstea zeitei protectoare a Siciliei².

¹ Ulterior aceasta lege empirica va fi consemnata ca legea Titius-Bode. Ea are doar valoare istorica.

² Giuseppe Piazzi a fost un calugar sicilian, astronom, director al Observatorului din Palermo în perioada 1790-1826.

Primele calcule de efemerida au fost efectuate de Karl Friedrich Gauss si publicate în luna noiembrie 1801. Aceste calcule, bazate pe o idee noua la acea epoca, au permis reidentificarea lui Ceres pe sfera cereasca dupa o perioada cu conditii meteorologice improprii observatiilor.

La 28 martie 1802 astronomul german Wilhelm Olbers descopera un alt corp ceresc ce avea o miscare de revolutie foarte asemanatoare cu cea a lui Ceres. Aceasta data marcheaza momentul descoperirii celei de a doua planete, situata între Marte si Jupiter, numita ulterior Pallas.

Unul din observatorii cei mai asidui ai celor doua planete, Ceres si Pallas, a fost William Herschel. El este cel care utilizeaza pentru prima data în desemnarea lui Ceres si Pallas termenul generic de **asteroid**. Prin acest termen se denumesc acele corpuri cu aspect punctiform (asemanatoare stelelor) dar a caror miscare pe sfera cereasca este asemanatoare cu miscarea aparenta pe sfera cereasca a planetelor mari. Termenul de asteroid s-a impus acestei categorii de corpuri ale Sistemului Solar, alaturi de cel de « mica planeta ».

Desi problema gasirii unui corp situat între Marte si Jupiter era rezolvata la acest moment, existau mai multe semne de întrebare create chiar ca urmare a descoperirilor facute. Doua întrebări majore se impuneau a fi rezolvate :

- « De ce doua corpuri si nu unul singur ? ».
- Urmare a estimarilor facute masa cumulata a celor doua corpuri, Ceres si Pallas, era mult prea mica pentru a putea suplini numai cu prezenta lor planeta masiva presupusa initial.

În următorii cinci ani se mai descopera încă doi asteroizi în aceeași regiune dintre Marte si Jupiter : Juno (în anul 1804) si Vesta (în anul 1807).

Prima ipoteza enuntata cu privire la existenta asteroizilor apartine lui Olbers(1803). Acesta presupune ca asteroizii sunt resturile unei planete masive care, din motive necunoscute, a fost distrusa sau s-a distrus.

O a doua ipoteza de retinut este aceea enuntata de Huth(1807). Aceasta ipoteza porneste de la ideea ca asteroizii au aceeași vârstă cu planetele mari si ca « *pare mult mai probabil ca materia s-a aglomerat în mai multe sfere mici în spatiul dintre Marte si Jupiter* ». În aceste doua ipoteze se pot regasi germenii tuturor ipotezelor moderne enuntate în privinta originii si formarii centurii asteroidale principale.

Un al 5-lea asteroid este descoperit aproximativ 40 de ani mai târziu. Interesul pentru descoperirea de asteroizi creste, iar pâna în anul 1850 se mai descopera încă 10 astfel de corpuri.

Numarul asteroizilor descoperiti creste simtitor odata cu anul 1891, când se pune la punct tehnica de detectie fotografica. Cel mai reprezentativ observator al acestei epoci este astronomul german Max Wolf³ care descopera 231 asteroizi în decursul activitatii sale stiintifice.

I.2. Date actuale ; Nomenclatura ; Cataloage si baze de date

În prezent numarul obiectelor susceptibile de a fi asteroizi este de aproximativ 33 100 iar numarul descoperirilor raportate face ca acest numar sa creasca an de an. Pentru a se evita confuzia în evidenta asteroizilor s-au impus reguli de nomenclatura unanim acceptate de comunitatea astronomica mondiala. Astfel, fiecare asteroid are un numar de ordine si un nume, exemplu : 1 Ceres, 2 Pallas, 3 Juno, 4 Vesta,..., 951

³directorul fondator al Observatorului din Heidelberg

Gaspra, etc. Mai mult, numărul mare al asteroizilor ca și posibilitatea pierderii lor din cauza unui număr insuficient de observații a impus crearea unui catalog mondial unic ce conține elementele osculatoare ale orbitelor asteroizilor asupra cărora s-au făcut observații la cel puțin două opozitii⁴. Catalogul se numește « **Minor planets ephemerids** », este realizat de Institutul de Astronomie Teoretică din Sankt Petersburg și reactualizat anual.

Noii asteroizi descoperiți sunt anunțați la Biroul Internațional al Uniunii Astronomice Internaționale aflat la Observatorul Astronomic Smithsonian-S.U.A. în **Circularele pentru mici planete « Minor Planets Circular »**. La anunțarea unei noi descoperiri, noului asteroid i se atribuie un indicativ provizoriu până la confirmarea lui definitivă și includerea pe lista de obiecte a căror efemerida este calculată la Sankt Petersburg. Indicativul conține anul descoperirii urmat de un grup de două litere. Prima literă specifică perioada din an (exprimată în jumătăți de luna calendaristică) în care s-a făcut descoperirea (în care prin litera **A** se desemnează intervalul 1-15 ianuarie, cu litera **B** intervalul 16-31 ianuarie, etc) ; cea de-a doua literă desemnează numărul descoperirii din intervalul de timp delimitat de prima literă (prima descoperire este notată **A**, a doua descoperire cu **B**, s.a.). De exemplu, asteroidul 1979 DA este descoperit în anul 1979, în a doua jumătate a lunii februarie (litera **D**) și este prima descoperire în intervalul menționat (litera **A**).

Catalogul cu efemeride de asteroizi editat la Sankt Petersburg conține peste 7000 de corpuri, iar în baza de date de la Smithsonian conține peste 30000 asteroizi care au fost observați la o singură opoziție.

Cataloagele conțin date fizice de observație încep să devină consistente după anul 1970, atunci când interesul pentru fotometria asteroizilor crește. O prezentare succintă a celor mai importante baze de date fizice obținute din observații de la sol și din spațiul extraatmosferic este următoarea :

Catalogul TRIAD (Tucson Revised Index of Asteroid Data). Observațiile colorimetrice au fost obținute în urma unui vast program la care au contribuit astronomi din întreaga lume. În fapt, el s-a constituit după ce cantitatea de rezultate publicate impunea o clasare a rezultatelor. Din această cauză, este relativ greu de apreciat calitatea datelor, experimenterii utilizând diferite proceduri de reducere a datelor. Catalogul conține indicii de culoare corespunzători sistemului standard⁵ *UBV* Johnson, la care se adaugă valorile obținute în filtrele *I*, *J* și *K*. Catalogul conține observații efectuate pentru aproximativ 1100 asteroizi. Principalul inconvenient al bazei de date îl constituie neomogeneitatea datelor.

Catalogul ECAS (Eight Color Asteroid Survey).

Este un program desfășurat între anii 1979-1984 și conține observații pentru 589 asteroizi în intervalul⁶ spectral 3500-11000 Å. Observațiile au fost făcute cu același instrument și același fotometru cu multiple canale, dotat cu aceleași filtre pe toată perioada campaniei de observații. Reducerea tuturor observațiilor s-a făcut după o

⁴ un asteroid este la opoziție atunci când Soarele, Pământul și asteroidul se afla pe aceeași dreaptă iar Pământul este situat între Soare și asteroid

⁵ caracteristicile filtrelor sistemului Johnson vor fi prezentate în capitolul 6 al acestei lucrări

⁶ filtrele caracteristice utilizate în programul ECAS sunt :

FILTRU	$\lambda(\text{\AA})$	$\Delta\lambda(\text{\AA})$	FILTRU	$\lambda(\text{\AA})$	$\Delta\lambda(\text{\AA})$
S	3370	470	w	7010	580
U	3590	600	x	8530	810
B	4370	900	p	9480	800
V	5500	570	z	10410	670

procedura standard. Prin aceasta reducere se asigura un caracter de omogenitate datelor si confiera studiilor statistice o încredere sporita.

Atlasul pentru asteroizi cu reflectantele spectrale în domeniul 8000-25000 Å (52-Color Asteroid Survey).

Acest program, derulat în perioada 1983-1985 la telescopul de 3.60 m diametru din Mauna Kea-Hawaii, a permis observarea a 119 asteroizi în intervalul spectral 8000-25000 Å. Baza de date contine rezultatele spectrofotometrice obtinute ca urmare a utilizarii a 52 de filtre de banda îngusta pentru intervalul spectral sus-mentionat.

Baza de date de la Uppsala « Asteroid Photometric Catalogue », reuneste toate curbele de lumina ale asteroizilor, obtinute din observatii la sol de catre astronomi din întreaga lume. Observatiile au fost standardizate înainte de a fi incluse în catalog. De asemenea, aceasta baza de date mai contine datele de aspect (pentru a se putea analiza geometria în care s-a facut observatia), ca si perioada de rotatie proprie, amplitudinea curbei de lumina si pozitia polului asteroidului (atunci când este posibila determinarea lor).

Catalogul IMPS (IRAS Minor Planet Survey).

Baza de date s-a constituit în anul 1994. Ea contine toate datele din observatii de la sol în sistemul UBV Johnson (continute de altfel si în catalogul TRIAD), la care se adauga albedoul radiometric obtinut din prelucrarea datelor transmise de satelitul IRAS⁷. Pentru calculul albedoului s-au folosit observatiile în IR efectuate la patru lungimi de unda, respectiv 12000, 25000, 60000 si 100000 Å.

Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASS)

Acest program, initiat în anul 1990, înca în derulare, are drept scop obtinerea de spectre de reflexie în vizibil si IR apropiat (domeniul 4500-9500 Å), pentru asteroizii de talie mica (diametru mai mic de 20 km). Primele rezultate raportate si puse la dispozitie lumii stiintifice sunt spectrele obtinute pentru 316 asteroizi din centura principala (Xu et al., 1994).

Toate bazele de date prezentate sunt tiparite si exista de asemenea versiuni pe support magnetic (discheta, CD-ROM) sau pot fi accesate prin INTERNET.

European Asteroid Research Node (E.A.R.N.)

Acest serviciu INTERNET reuneste informatiile din toata Europa, referitoare la resursele umane si materiale utilizate în studiul asteroizilor. Prin intermediul acestui nod de retea pot fi accesate bazele de date enumerate anterior, pot fi aflate ultimele propuneri stiintifice ce vizeaza studiul asteroizilor, pot fi obtinute ultimele noutati editoriale în materie. Desi nu este o baza de date propriu-zisa, acest nod de retea reprezinta un mijloc puternic si rapid de lucru, facilitând accesul rapid la informatiile de ultima ora, cum ar fi articolele de specialitate publicate sau în curs de tiparire.

I.3. Caracterizarea schematica a populatiei asteroidale pe baza parametrilor dinamici

Dupa primele descoperiri de asteroizi, atunci când s-a ajuns la concluzia ca exista o centura de astfel de corpuri, definitia pentru asteroid a devenit : « *un corp care orbiteaza în jurul Soarelui si care are orbita exterioara orbitei planetei Marte si interioara orbitei lui Jupiter* ». Aceasta definitie nu este una globala ci doar caracterizeaza asteroizii din punct de vedere dinamic.

Pentru a descrie complet orbita unui corp din Sistemul Solar, este necesara cunoasterea a sase parametri. Semiaxa mare a orbitei **a**, excentricitatea **e**, înclinarea

⁷ InfraRed Astronomical Satellite

i , longitudinea nodului ascendent Ω si argumentul periheliului ω precizeaza marimea si pozitia orbitei în spatiu (**Figura 1**). Cel de-al saselea element este un moment de referinta t_0 sau echivalentul lui, anomalia medie sau anomalia adevarata la momentul t_0 .

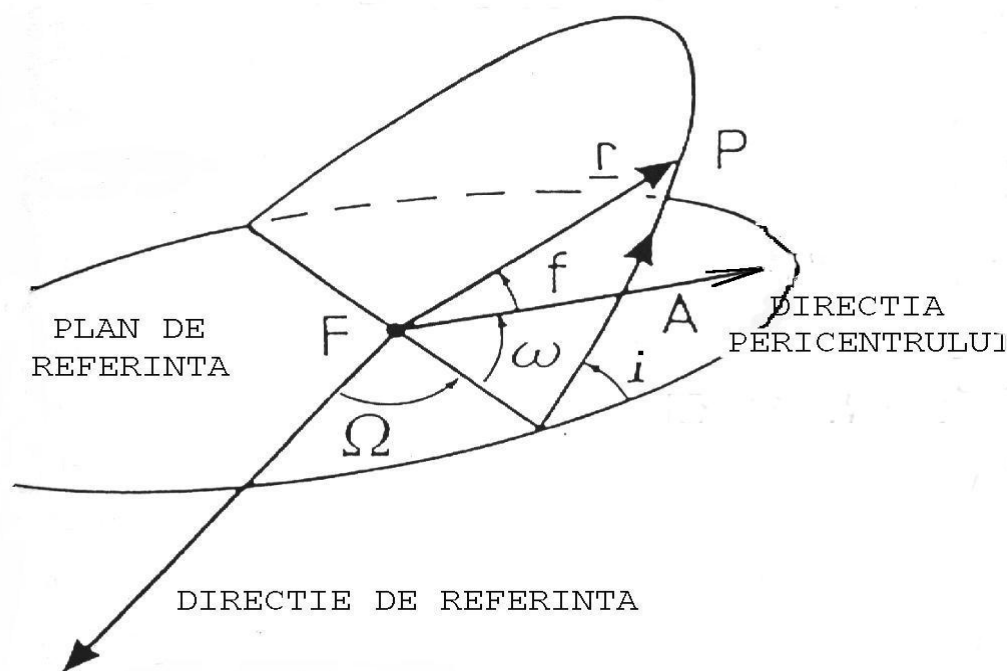


Figura 1. Elementele orbitale necesare pentru a se preciza pozitia unui asteroid fata de un sistem de referinta fix. Cu i s-a notat înclinarea orbitei, iar cu r vectorul de pozitie al asteroidului fata de focarul F

Odata cu descoperirea de noi corpuri, definitia dinamica data asteroizilor nu mai este de actualitate. Astfel, s-au descoperit asteroizi care au orbite exterioare orbitei lui Jupiter dar si obiecte cu orbite interioare orbitei lui Marte. Figura 2 reprezinta bine actuala structura a populatiei asteroidale.

Clasificarea dinamica a acestei populatii se face dupa cum urmeaza :

- cea mai mare parte a asteroizilor își au orbitele între Marte și Jupiter, ce își executa miscarea de revolutie în ceea ce numim « **centura asteroidala principala** » ;
- « **asteroizii troieni** » (în literatura mai sunt desemnati ca grupul asteroizilor troieni si greci), reprezinta grupul asteroizilor ce au orbita identica cu cea a lui Jupiter, la 60 grade de o parte si de alta a acestuia, în punctele Lagrange ale lui Jupiter ;
- « **asteroizii de tip Amor** » sunt asteroizii ce au semiaxa mare a orbitei cuprinsa în intervalul 1,017-1,300 u .a . (orbitele lor intersecteaza orbita planetei Marte) ;

- « **asteroizii de tip Apollo** » sunt asteroizii ce au semiaxa mare a orbitei mai mare decât 1 u.a. dar cu o distanță la periheliu inferioară valorii de 1,017 u.a. (în mod normal ei intersectează orbita Pământului);
- « **asteroizii de tip Atena** » sunt asteroizii cu semiaxa mare superioară valorii de 1 u.a. și o distanță la afeliu superioară valorii de 0,983 u.a. ;

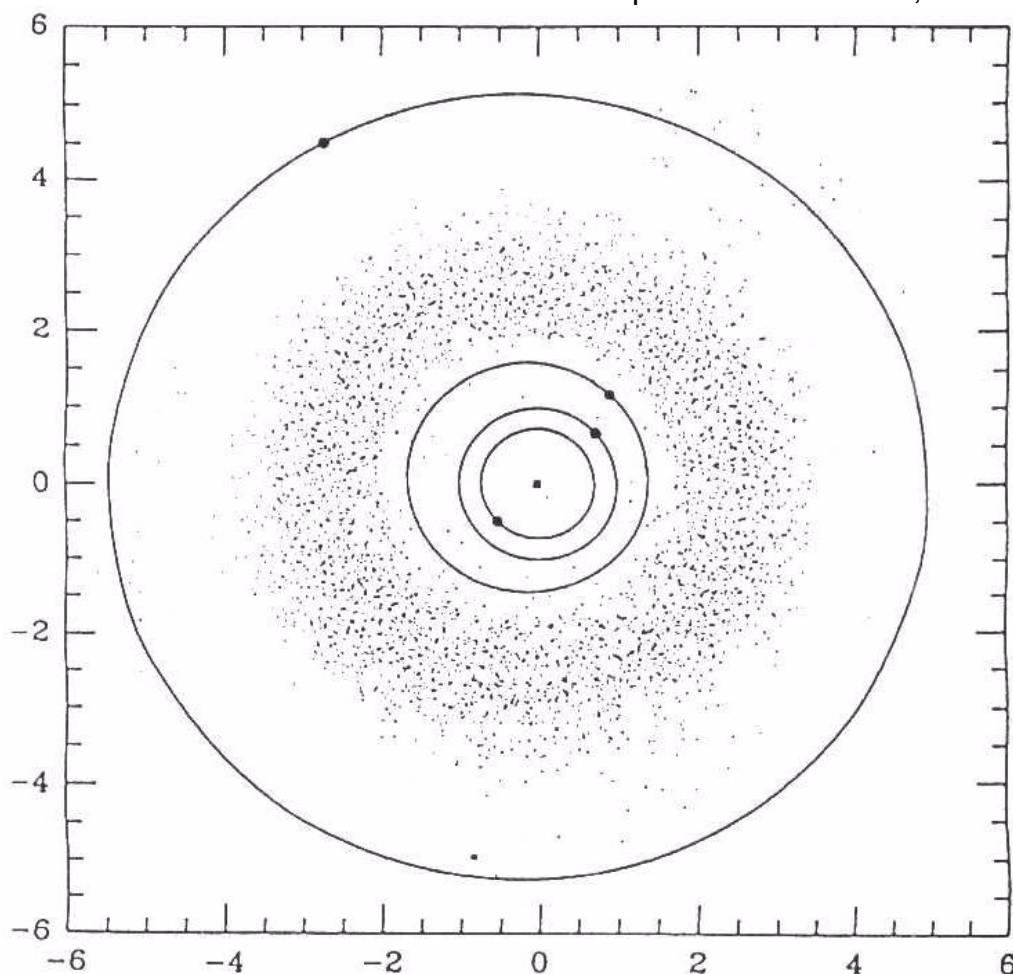


Figura 2. Proiecția, în planul ecliptic, a micilor planete care au semiaxa mare mai mică sau egală cu 6 u.a.⁸ Pe abscisa și pe ordonată este reprezentată semiaxa mare. Cu linie continuă au fost reprezentate orbitele planetelor Jupiter ($a=5$ u.a.), Marte ($a=2$ u.a.), Pământ ($a=1$ u.a.) și Venus ($a=0,72$ u.a.). Punctul din centrul diagramei reprezintă Soarele.

Ultimele trei categorii poartă numele primilor asteroizi de acest tip care au fost descoperiți: 1221 Amor, 1862 Apollo și respectiv 881 Athene.

În literatură se mai utilizează termenul « asteroizi de tip Amor-Apolo-Atena » sau « asteroizi de tip AAA » pentru a desemna asteroizii cu orbită interioară orbitei lui Marte și pe cei care intersectează orbita acestuia.

În afara acestor categorii, în ultimii ani, observațiile au dus la descoperirea unui număr semnificativ de obiecte cu orbite exterioare orbitei lui Jupiter. Orbitele acestora sunt foarte excentrice iar numele generic sub care sunt cunoscuți este acela de « Centauri ».

De asemenea, în ultimul deceniu s-au observat mici corpuri cu semiaxa mare a orbitei superioară celei a planetei Neptun. Denumirea lor generică este de

⁸ u.a reprezintă distanța medie Pământ-Soare ($1\text{u.a.} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$).

« obiecte trans-Neptuniene », însa polemica desemnării lor ca asteroizi sau comete rămâne înca deschisa.

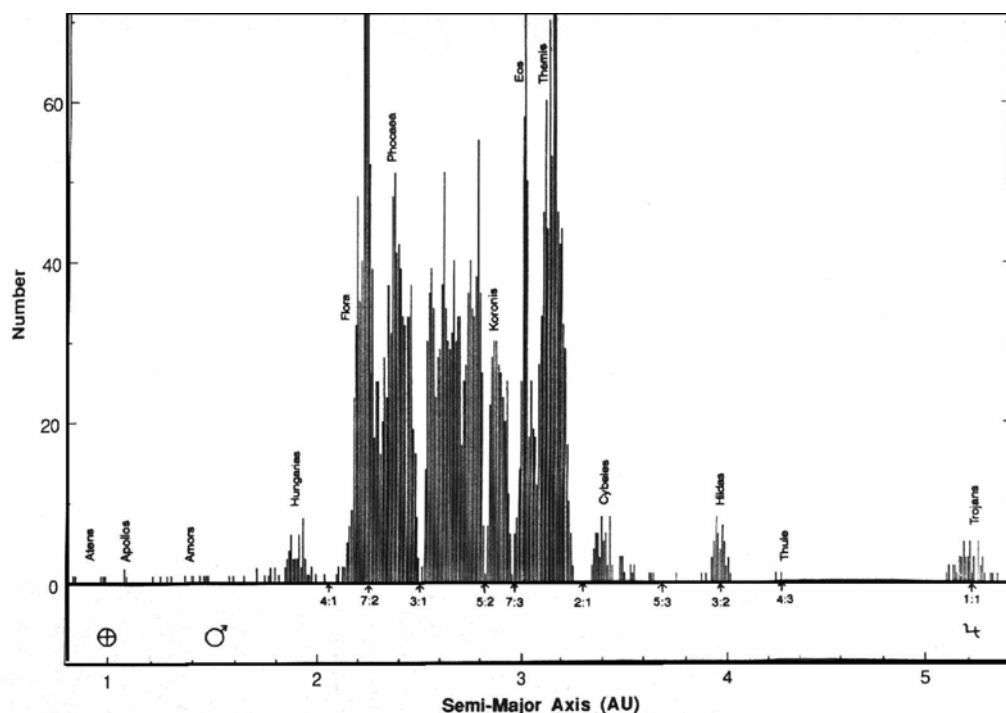


Figura 3. Histograma reprezentând golurile lui Kirkwood. Pe abscisa este reprezentată cu semi-axa mare, iar pe ordonată numărul de obiecte. Cu simbolurile caracteristice sunt reprezentate planetele.(dupa S. Feraz-Mello, 1994)

Analiza mai profunda a centurii asteroidale principale, arata ca asteroizii nu sunt uniform distribuiti în cadrul acesteia. Centura principala contine zone complet depopulate de corpuri (Kirkwood,1867). Aceste regiuni depopulate se numesc « **golurile lui Kirkwood** » si corespund unor orbite ce se afla într-un raport de numere mici cu orbita lui Jupiter (Figura 3). Aceasta conduce la ideea ca Jupiter, prin câmpul lui gravitacional, a fost cauza depopularii acestor zone (cunoscute în literatura si sub numele de rezonante). La intervale de timp egale, câmpul gravitacional al lui Jupiter actioneaza neuniform asupra asteroidului aflat într-o rezonanta. Transferul energetic spre asteroid face ca înclinarea lui sa creasca treptat, pâna când orbita lui devine instabila, haotica, iar asteroidul este scos din zona de rezonanta.

În privinta acestor goluri au fost formulate diverse ipoteze (Greenberg & Scholl, 1979). În prezent, cea mai paluzibila ipoteza pare a fi cea datorata câmpului gravitacional al lui Jupiter. Integrările pe termen lung demonstreaza ca asteroizii aflati în apropierea zonelor depopulate prezinta orbite haotice (Hahn et al. 1991), comparativ cu asteroizii prezenti în zone de aglomerare, care au orbite stabile. Explicarea aglomerarilor si a lacunelor din centura principala nu este triviala. Astfel de zone cu aglomerare de asteroizi se observa si în regiuni de comensurabilitate ale orbitelor lor cu orbita lui Jupiter. Este cazul grupurilor de asteroizi Hilda (rezonanta 3<2) si Thule (rezonanta 4<3). Dinamica acestor grupuri este dificil de explicat prin luarea în considerare doar a influentei câmpului gravitacional al lui Jupiter.

Familiile de asteroizi.

Daca se compara semiaxele mari, excentricitatile, si înclinările asteroizilor din centura asteroidala principala, se vor distinge mai multe grupuri de corpuri cu valori similare ale elementelor orbitale.

Hirayama (1918) descopera aceasta similitudine atunci când studiaza elementele osculatoare ale orbitelor. El enunta ipoteza conform careia aglomerările respective reprezinta fragmente ale aceluiași corp parinte.

Aceste aglomerări au fost denumite **familii**, si familiile de asteroizi se identifica pe baza analizei statistice a elementelor orbitale. Cercetarea în domeniul identificării de familii de asteroizi este un domeniu de actualitate. În anii '80, a fost acceptata identificarea familiilor propusa de Williams (1979). Numarul mare de noi descoperiri din ultimii ani pune în discutie însa aceasta identificare.

Familiile de asteroizi sunt distincte de grupurile de asteroizi constituite ca urmare a izolării lor zonale prin bariere impuse de rezonante (de exemplu grupurile de asteroizi Hungaria, Phocaea, Cybele, Hilda sau asteroizii troieni). Pentru o familie de asteroizi se ia în considerare si morfologia relativ omogena a tuturor asteroizilor identificati ca membri, în timp ce grupurile de asteroizi membrii grupurilor sunt împreuna doar pe considerentele dinamice impuse de barierele de rezonanta.

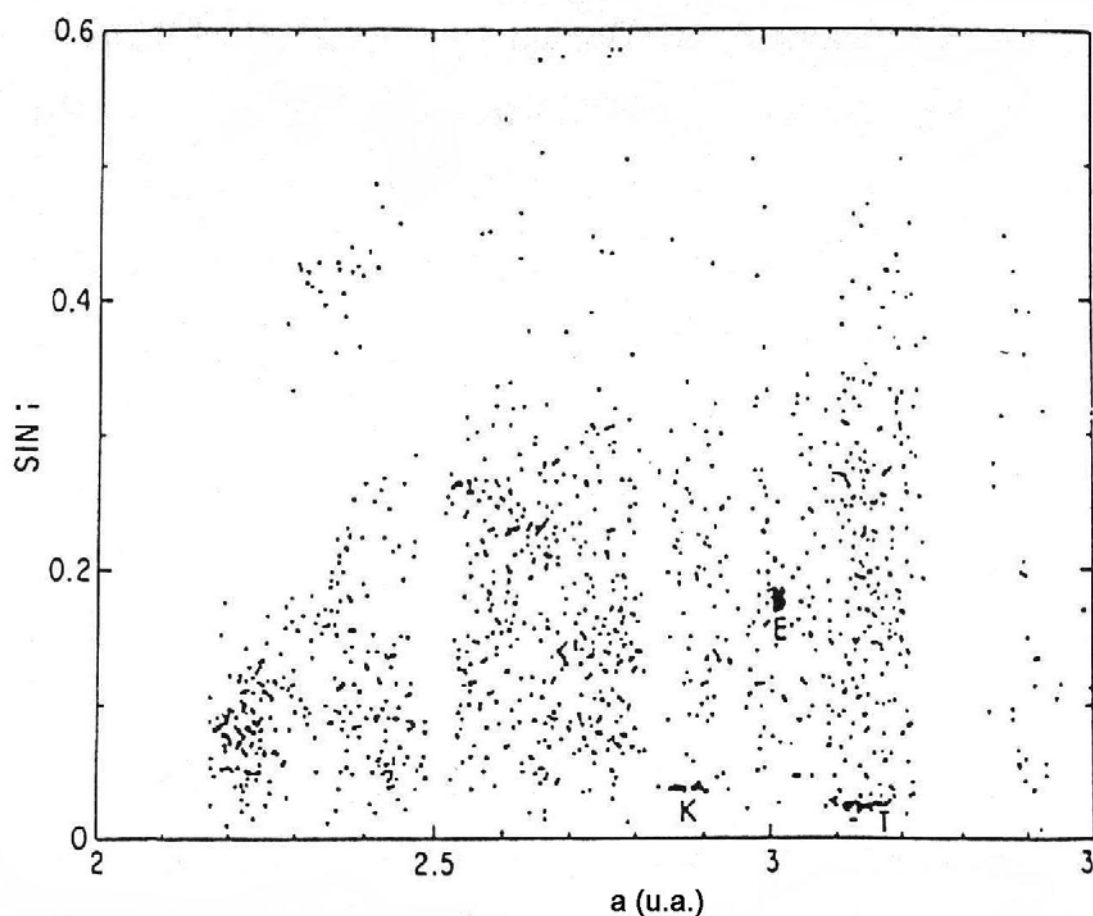


Figura 4. Diagrama înclinare ca funcție de semiaxa mare pentru asteroizii din centura principala; se pot identifica ușor trei mari familii: Eos (**E**), Themis (**T**), și Koronis (**K**)

Ipoteza cea mai acceptata în privința formării familiilor este ca acestea reprezintă rezultatul unei ciocniri distructive a unui asteroid (de talie mare) cu un asteroid « proiectil ». Numai o analiză fizică, chimică și mineralogică, în paralel cu analiza dinamică, ar permite confirmarea apartenenței membrilor familiei respective la același corp primar. Acest fapt este confirmat foarte ușor pentru familiile mari Themis, Eos și Koronis (**Figura 4**).

I.4. Caracterizarea asteroizilor pe baza compoziției lor mineralogice

Cunoașterea compoziției chimice și mineralogice a asteroizilor ne oferă informații esențiale privind procesele primordiale ce au dus la formarea sistemului planetar și evoluția lui până la forma actuală. În zilele noastre cea mai plauzibilă ipoteză privind formarea Sistemului Solar este aceea a colapsului gravitațional al unui nor de materie. Chimia nebuloasei primordiale, abundența cosmogonică a elementelor și compusilor chimici din nebuloasă, temperatura inițială și evoluția temperaturii pe parcursul colapsului gravitațional, sunt jaloane în schitarea scenariului de evoluție spre Sistemul Solar în forma cunoscută astăzi.

Asteroizii se prezintă ca niște adevărate biblioteci de informație în acest sens. În accepția actuală ei păstrează « înghețată » informația despre Sistemul Solar la momentul la care procesul de acrecție a luat sfârșit iar Soarele a început să emită energie prin fuziunea deuteriului.

În scopul realizării studiului mineralogic al asteroizilor se utilizează două metode :

- studiul comparativ cu spectrele de meteoriti ;
- taxonomii de asteroizi ;

Până în prezent informațiile cele mai detaliate despre asteroizi sunt cele obținute de aparatele de bord ale sondei spațiale GALILEO. În traiectoria ei spre Jupiter, la trecerea prin apropierea a doi asteroizi, sonda spațială GALILEO a efectuat observații asupra asteroizilor 951 Gaspra (în anul 1992) și 243 Ida (în 1993). Concluziile desprinse din informațiile recoltate de sonda spațială au confirmat ipotezele de lucru privind mineralogia suprafețelor acestor doi asteroizi, ca și informațiile globale privind forma și dimensiunile corpurilor, deduse pe baza observațiilor de la sol.

Asteroizii nu au lumină proprie. Cele două metode anterior menționate se bazează pe informația provenită de la radiația electromagnetică reflectată de suprafața asteroidului, și se completează una pe cealaltă.

Din punct de vedere istoric, interesul pentru a sesiza diferențe între asteroizi, altele decât cele orbitale, este manifestat încă de la descoperirea lor. Sir William Herschel descrie asteroidul 1 Ceres ca fiind « *rosu, însa nu foarte aprins* » iar asteroidul 2 Pallas ca având o culoare « *albastruie-albă* » (Herschel, 1802). Desigur, observațiile erau făcute cu ochiul liber și în lumină integrală.

Primele spectre de asteroizi sunt obținute de Bobrovnikoff în anul 1929 și între altele, confirmă observațiile vizuale ale lui Herschel. Determinările colorimetrice devin interesante odată cu dezvoltarea tehnicilor de observație cu detector fotoelectric și odată cu standardizarea sistemului de filtre utilizat.

Opinia aproape generală este că meteoritii provin în proporție de peste 90% din fragmente de asteroizi (Wetherill & Chapman, 1988). Din acest punct de vedere este normal să fie utilizați în studiile comparative cu asteroizilor. Rezultatele ar trebui

sa fie echivalente. Totusi, în analiza comparativa efectuata (prima metoda mentionata anterior), trebuie sa se tina cont de transformarile morfologice ce pot apare în meteorit la interactia cu atmosfera terestra (disparitia compusilor volatili ca urmare a temperaturilor degajate prin frecarea cu atmosfera, alterari ale structurilor mineralogice, etc). In paralel, trebuie sa reproducem în laborator structura mineralogica de la suprafata asteroidului, respectiv dimensiunile cristalelor de compusi minerali (regolitelor) de la suprafata, adica a stratului responsabil de raspunsul spectral.

Taxonomia de asteroizi se obtine prin analiza statistica efectuata asupra unui numar de parametri fizici ce caracterizeaza fiecare asteroid din esantionul de lucru. Cu cât numărul asteroizilor din esantion este mai mare, cu atât rezultatul analizei statistice devine mai consistent si mai reprezentativ pentru întreaga populatie asteroidala. Rezultatul unei astfel de analize statistice îl reprezinta clasele taxonomice. Aceste clase sunt constituite din asteroizi ce se grupeaza ca urmare a caracteristicilor lor comune, fara criterii de selectie anterior stabilite.

Intr-o mare masura, clasificarea taxonomica a asteroizilor se aseamana aceleia a gruparii stelelor în clase spectrale (Tholen & Barucci, 1989)⁹. O clasificare taxonomica a asteroizilor stabileste clase de obiecte pe baza culorii si albedoului lor.

De la începutul anilor 1970, atunci când bazele de date fizice au devenit mai consistente, se pot remarca mai multe tendinte de grupare a asteroizilor în functie de culorile acestora. Zellner (1973), Chapman et al. (1975) sunt doua dintre articolele care prezinta rezultate statistice cu diferentierea clara în esantionul studiat a doua si respectiv trei clase taxonomice. Ulterior, marirea esantionului a dus la studii mai aprofundate, în care sunt propuse noi clase.

Odata cu sporirea interesului pentru acest domeniu, au aparut bazele de date specifice acestui gen de studii. Catalogul ECAS (Zellner et al., 1985) împreuna cu albedourile radiometrice obtinute de IRAS marcheaza debutul publicarii actualelor taxonomii. Tholen (1984), Barucci (1987) si Tedesco (1989) publica rezultatele analizelor lor statistice efectuate asupra unor esantioane de asteroizi observati deopotriva în bazele de date ECAS si IRAS. Aceste rezultate au dat nastere taxonomiilor cunoscute în literatura sub numele celor care le-au realizat - taxonomia lui Tholen, taxonomia Barucci, taxonomia Tedesco. Diferentele dintre aceste trei taxonomii sunt minore, desi la aceste rezultate s-a ajuns utilizând metode de analiza statistica diferite. Profilul spectral mediu al acestor clase taxonomice este prezentat în **Figura 5** :

Iata o scurta prezentare a acestor clase :

Asteroizii de tip C(B,G), prezinta un spectru cu profil plat, cu exceptia unei benzi de absorbtie în regiunea UV a spectrului. Este grupul cel mai numeros ca reprezentare. Albedoul lor mediu este de 0,08, ceea ce atesta ca suprafata lor este întunecoasa. Printre ei se pot observa anumiti asteroizi ce prezinta o banda de absorbtie centrata la 3 μm si presupusa ca aparținând moleculelor de apa din minerale.

Asteroizii de tip S reprezinta numeric cea de-a doua clasa între clasele taxonomice unanim acceptate. Ei se disting printr-o banda de absorbtie pronuntata în UV si o a doua banda de absorbtie în IR, centrata la aproximativ 10 000 Å. Albedoul IRAS mediu pentru aceasta clasa taxonomica este aproximativ 0,15. Din analizele statistice ale datelor spectrofotometrice obtinute în intervalul spectral 3000-25000 Å, se poate constata tendinta clasei S de a se separa în subclase (Gaffey et al., 1994,

⁹ în cazul stelelor, cu ajutorul unei litere majuscule se pot denumi caracteristicile spectrale ale unui grup de stele cu proprietati similare.

Howell et al, 1995, Bîrlan et al., 1996), iar explicatia trebuie cautata în dozajul diferit al componentelor mineralogice de la suprafata diverselor subgrupuri.

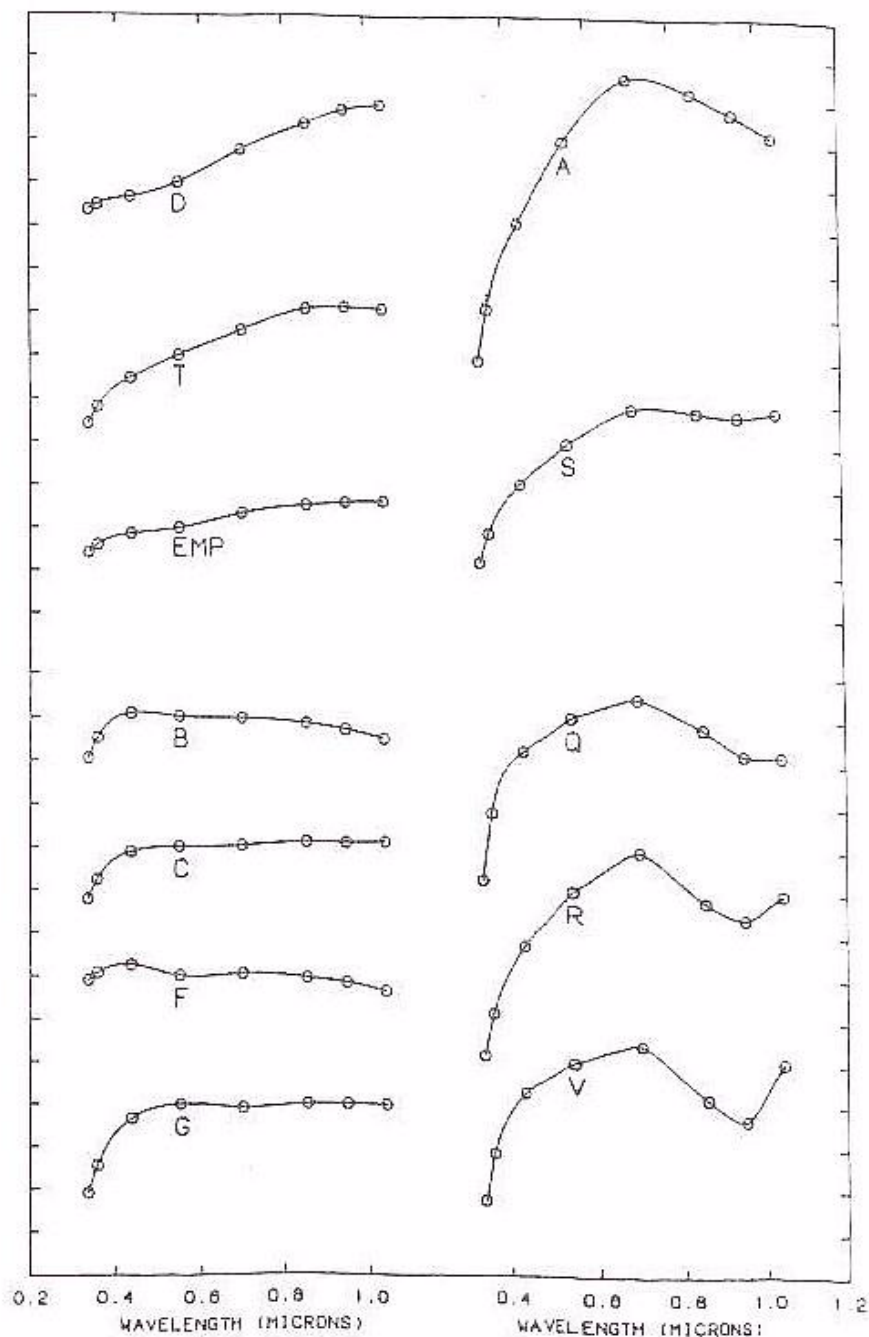


Figura 5. Profilul mediu al principalelor clase taxonomice (Tholen & Barucci, 1989). Toate spectrele sunt normalizate la vizibil ($\lambda=5500\text{\AA}$).

Asteroizii de tip M sunt caracterizati de un spectru de reflexie usor crescator cu lungimea de unda, si cu un albedo mediu în jurul valorii 0,20. Spectrul lor de reflexie nu prezinta benzi de absorbtie evidente. Albedoul radiometric relativ ridicat, ca si rezultatele obtinute din detreminari radar, duc la concluzia ca la suprafata acestora exista un mare procent de metale inclus în minerale (între 30% si 90% metale).

Asteroizii de tip D prezinta un spectru crescator spre lungimi de unda mari, însa albedoul clasei este în jurul valorii de 0,05, cel mai scazut din toate clasele taxonomice.

Asteroizii de tip A se remarca printr-o puternica descrestere a reflectantei spectrale sub lungimea de unda de 7000 Å, si cu o pronuntata absorbtie în IR la aproximativ 10000 Å, iar reflectanta spectrala creste simtitor la lungimi de unda între 12000 si 25000Å. Albedoul mediu al clasei este de aproximativ 0,36 si este relativ ridicat în comparatie cu celelalte corpuri din Sistemul Solar.

Asteroizii de tip V sunt denumiti astfel dupa asteroidul 4 Vesta, primul dintre asteroizii acestei clase. Desi pâna în anul 1994 se punea la îndoiala existenta acestei clase, numarul de asteroizi ai clasei fiind mic, prin programul SMASS s-au identificat multi asteroizi cu spectru asemanator si care sunt de talie mica (Xu et al., 1994). Ei se remarca printr-un spectru cu doua benzi de absorbtie, una în regiunea UV a spectrului iar cealalta centrata la 9000 Å.

Asteroizii de tip E sunt caracterizati de un spectru de reflexie analog tipului M (monoton crescator cu lungimea de unda). Deosebirea de clasa M o reprezinta valoarea medie a albedoului radiometric (0,45-0,50).

În scopul de a vedea care sunt mineralele de la suprafata asteroizilor, sunt abordate diverse alte domenii de studiu. Prin prisma studiilor taxonomice, cele mai interesante sunt analizele de laborator efectuate pe pulberi de meteoriti si observatiile spectroscopice de comete.

CAPITOLUL II

TEHNICI DE OBSERVARE IN DOMENIUL OPTIC

Observarea asteroizilor se face cu doua scopuri (Nadolschi, 1971) :

- astrometric - adica pentru obtinerea pozitiei cât mai exacte a asteroidului pe sfera cereasca ;
- astrofizic - în vederea studierii parametrilor fizici ai asteroidului ;

În scopul cunoasterii cât mai complete a structurii si proprietatilor fizice ale asteroizilor, tehnicile de observatie s-au dezvoltat pentru a acoperi un domeniu spectral cât mai larg.

În acest capitol vor fi prezentate succint tehnicile de observatie vizuala, fotografica, fotometrica si fotometria cu camera CCD. În afara de tehnicile mentionate, mai exista si tehnici radar, interferometrice si radiometrice ; acestea nu fac obiectul acestei teze.

I.1. Observarea vizuala

În studiul asteroizilor, metoda vizuala a servit la descoperirea de noi corpuri, la estimarea pozitilor lor aparente pe sfera cereasca si la estimarea stralucirii acestora. Descoperirea asteroizilor prin metoda vizuala se realizeaza prin compararea hartii unei anumite zone de pe sfera cereasca mai multe zile la rând si analizarea pozitilor obiectelor ceresti. Dacă se constata prezenta unui corp ceresc ce si-a schimbat pozitia de la o noapte la alta, atunci el apartine Sistemului Solar si este foarte probabil sa fie un asteroid sau o cometa. Dezavantajele metodei constau în limitarea impusa de acuitatea vizuala a observatorului si de imprecizia masuratorilor.

II.2. Observarea fotografica

Aceasta metoda a început sa fie utilizata în studiul asteroizilor între anii 1890 - 1900. În aceasta metoda se utilizeaza ca receptor emulsia fotografica. Metoda se utilizeaza înca pentru descoperirea de noi asteroizi, dar si pentru calculul pozitilor lor aparente (astrometrie). În trecut s-a folosit si în estimarea stralucirii lor ca functie de înnegrirea produsa pe placa fotografica.

Descoperirea de noi asteroizi se poate face prin trei metode :

- prima consta în efectuarea unei expuneri de aproximativ 30-60 minute, a aceleiasi regiuni din sfera cereasca. Dacă în zona respectiva se afla un asteroid, acesta se va remarca pe placa fotografica printr-un segment de dreapta (portiune din traectoria aparenta) printre punctele imagini ale stelelor din câmp (**Figura 6**).

Metoda a fost imaginata de Max Wolf în anul 1891. Descoperirile facute cu ajutorul acestei metode sunt limitate de sensibilitatea emulsiei fotografice utilizate si de stralucirea asteroidului.

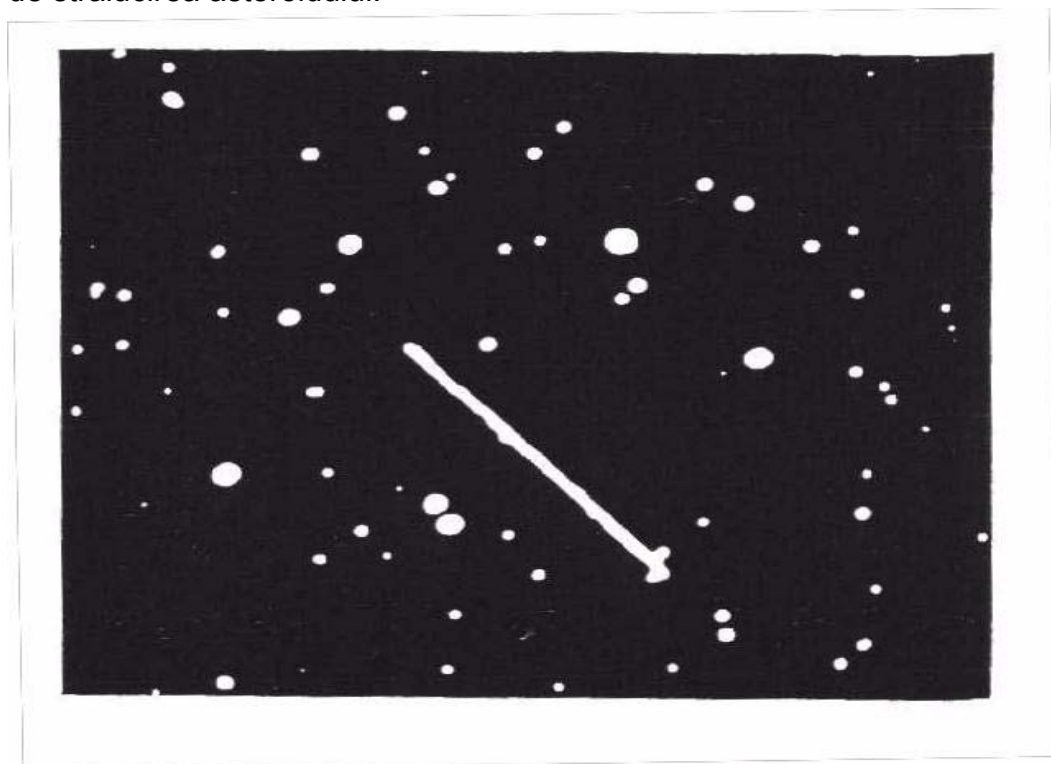


Figura 6. Asteroidul 1580 Betulia fotografiat în anul 1976 cu telescopul Schmidt din Uppsala, Suedia.

- daca se vizeaza o zona pe sfera cereasca si în plus, la compensarea miscarii diurne se adauga o compensare a miscarii estimate pe care ar avea-o asteroidul pe sfera cereasca, aceasta va duce la obtinerea de imagini ale stelelor ca si segmente de dreapta pe placa fotografica, iar imaginea asteroidului va fi punctiforma. Avantajul principal al unei astfel de observatii îl constituie posibilitatea descoperirii de asteroizi ce reflecta mai putina lumina si în consecinta nu pot fi observati în tipul de observatie prezentat anterior. Prin faptul ca fluxul luminos de la asteroid se acumuleaza în aceeasi imagine punctiforma, se pot face observatii de asteroizi mult mai slabi (magnitudine mai mare).

- daca se fac doua expuneri a aceleiasi zone pe sfera cereasca, la un interval de 15-30 minute una de cealalta, iar între cele doua observatii instrumentul se deplaseaza putin astfel ca imaginile obiectelor pe placa sa fie dublate, se vor obtine câte doua imagini ale aceluiasi obiect astfel : stelele, care apar imobile, se vor remarca prin faptul ca distanta între cele doua imagini este aceeaasi pentru toate, iar segmentul de dreapta trasat între imaginile aceleiasi stele este paralel cu al celorlalte stele de pe placa.

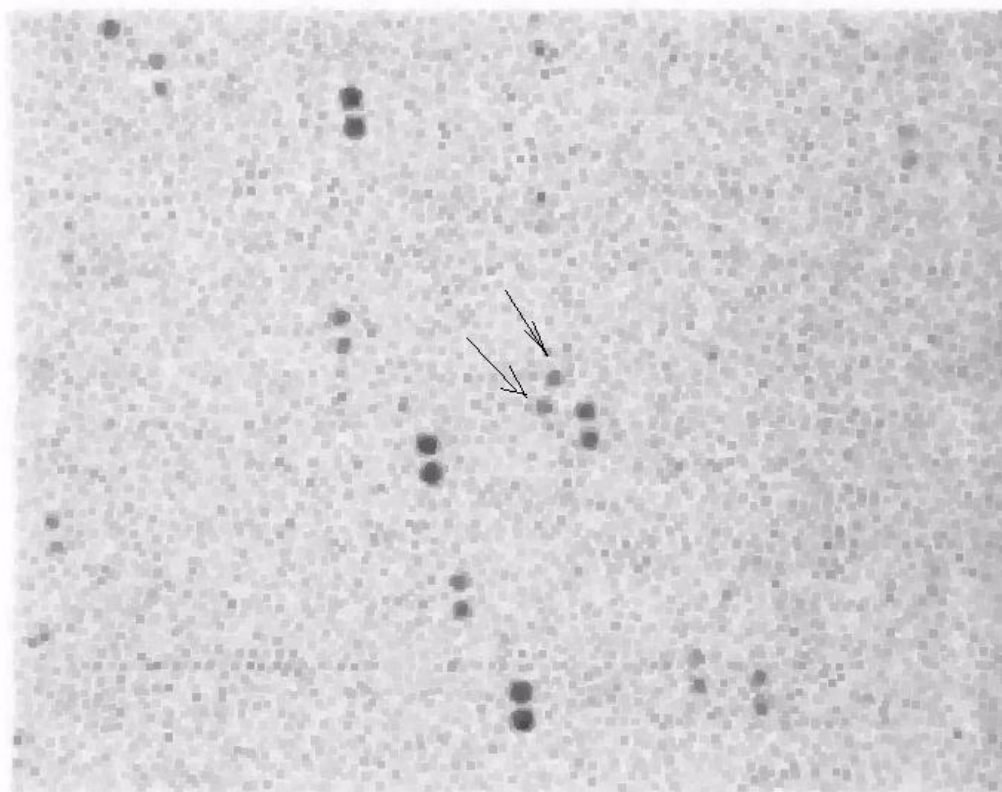


Figura 7. Placa fotografica realizata prin dubla expunere, cu o usoara deplasare a câmpului. Sagetile indica imaginile asteroidului. Miscarea lui proprie îl fac distinct în câmpul de stele.

Daca exista un asteroid în câmp, atunci este foarte probabil ca segmentul de dreapta trasat între cele doua imagini sa nu fie paralel cu cele ale stelelor si nici distanta între cele doua imagini ale asteroidului sa nu fie aceeași cu distanta între doua imagini ale oricarei stele din câmp (Figura 7).

Saltul produs de emulsia fotografica în cunoasterea populatiei asteroidale a fost considerabil. Prin faptul ca s-au immortalizat cerul la o epoca data, aceste imagini se utilizeaza drept comparatii cu imaginile actuale ale acelorasi zone, în studii privind miscarea polului Pamântului, a miscarilor proprii ale stelelor, etc.

Observatia fotografica se utilizeaza în continuare în calculele astrometrice si în îmbunatatirea calitatii orbitelor asteroizilor cunoscuti, în cadrul unor programe internationale (Bîrlan & Bocsa, 1996).

II.3. Observarea fotoelectrică

Daca în cadrul unei observatii astronomice se utilizeaza ca receptor al luminii de la astru un fotometru, atunci vom vorbi despre o metoda fotoelectrică de investigare. Aceasta metoda (cunoscuta si sub numele de fotometrie de apertura) a aparut în anii 1950 si se mai utilizeaza înca. Partea esentiala a unui fotometru o constituie un detector fotoelectric eficient si liniar ca raspuns cum sunt fotocatozii dintr-un fotomultiplicator. Tubul fotocatodic cu un singur canal reprezinta cel mai simplu tip de detector utilizat. El functioneaza pe baza efectului fotoelectric. În cazul fotonilor incidenti, conditia ce trebuie îndeplinita este ca energia lor sa fie suficienta pentru a putea produce electroni la interactia cu fotocatodul. Fotoelectronul astfel produs este accelerat de un câmp electric si dirijat spre prima dinoda, de unde

smulge încă un electron ; apoi cei doi electroni sunt accelerați și dirijați spre cea de-a doua dinodă iar în urma interacției cu aceasta se vor produce 4 electroni, s.a.m.d., astfel ca la celălalt capăt al fotomultiplicatorului se va obține un curent electric măsurabil proporțional cu fluxul incident al astrului observat. (Figura 8).

Observarea fotoelectrică se utilizează pe larg pentru stabilirea stralucirii stelelor ; acestea constituie etaloane pentru determinarea stralucirii altor obiecte ceresti punctiforme cum sunt asteroizii.

Prin interpunerea în calea fasciculului luminos incident a unui filtru se pot face analize ale radiației electromagnetice reflectate de asteroizi în diverse regiuni (benzi) bine precizate ale spectrului (observații colorimetrice).

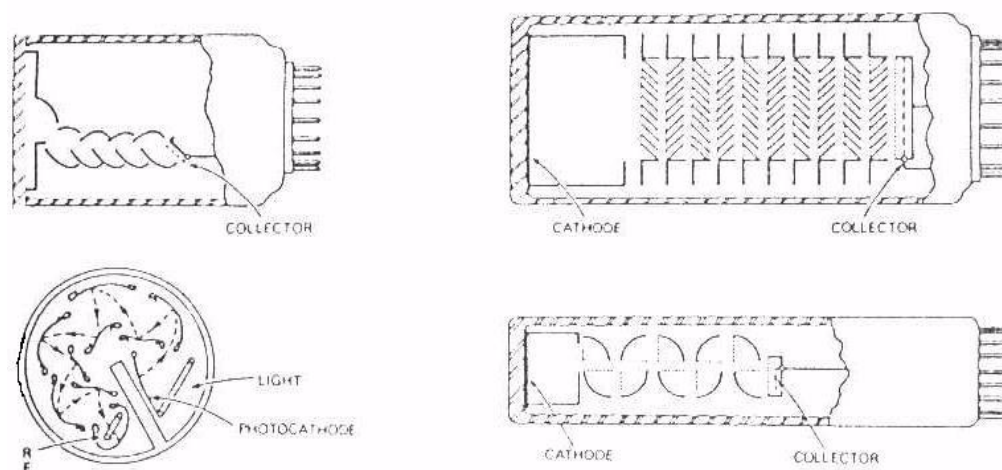


Figura 8. Diverse variante de fotometre (Budding, 1993).

De asemenea, cu ajutorul unui fotometru montat la un telescop, se va putea calcula gradul de polarizare al luminii provenite de la un asteroid (prin plasarea unui polarizor în fața fotometrului) ; prin observarea directă a ocultății unei stele se poate estima diametrul unui asteroid. În prezent observarea fotometrică utilizând ca detector fotometrul fotoelectric a fost înlocuită pentru majoritatea instrumentelor de observație. Fotometrului fotoelectric i-a fost preferat un detector dintr-o nouă generație : dispozitivul cu transfer de sarcină electrică (CCD).

II.4. Fotometria CCD

Această nouă metodă de observație a apărut la începutul anilor 1980 și este cea mai modernă și cea mai des utilizată în observațiile astronomice. Metoda a putut fi concepută ca urmare a progreselor înregistrate în domeniul fizicii solidului și al tehnicii de calcul. La baza metodei se află dispozitivul cu transfer de sarcină electrică, cunoscut sub numele de **CCD**¹⁰. Spre deosebire de fotometrul fotoelectric, unde este posibilă observarea pe rând a câte unui singur obiect, matricea CCD permite observarea unei suprafețe de pe sfera cerească, deci observarea simultană a mai multor obiecte. Din acest punct de vedere metoda se apropie de cea fotografică, și acolo înregistrându-se o suprafață de pe sfera cerească. Diferența dintre observația cu CCD și cea cu placă fotografică este că în acest caz imaginea brută, înmagazinată pe un suport magnetic (de exemplu discul dur al unui calculator), poate fi procesată ulterior pe un calculator ori de câte ori este nevoie și

¹⁰ abrevierea expresiei Charge Coupled Device

cu oricâte corectii sunt necesare. În cazul metodei fotografice, dezvoltarea cliseului este singurul moment în care se poate interveni în « procesarea » imaginii ; parametrii de expunere gresit alesi sau dezvoltarea defectuoasă duc la pierderea cvasi-totală a informației cautate.

Un alt aspect ce apropie observarea cu CCD de cea fotografică îl constituie posibilitatea determinării pe imaginile CCD atât a parametrilor dinamici ai asteroizilor, adică efectuarea de observații astrometrice, cât și a parametrilor fizici, prin fotometrie, spectrofotometrie sau spectroscopie CCD.

Un alt avantaj ce vine în sprijinul acestei metode îl reprezintă sensibilitatea receptorului, putându-se face determinări pentru obiecte ceresti cu straluciri inaccesibile cu emulsia fotografică și fotometrul.

CAPITOLUL III

DISPOZITIVELE CU TRANSFER DE SARCINA (CCD) IN FOTOMETRIE

Dispozitivele cu transfer de sarcini electrice, foarte des cunoscute ca CCD, au început să se dezvolte la laboratoarele Bell din Murray Hill (SUA). Debutul acestora se face în anul 1970 ca urmare a studiilor întreprinse de Boyle și Smith.

Principiul ce stă la baza construirii unui CCD îl reprezintă posibilitatea stocării și deplasării unei informații analogice sub forma de pachete de sarcini electrice în cadrul unei structuri de material semiconductor. Sarcinile electrice sunt acumulate în cadrul unor structuri MOS (metal-oxid-semiconductor). De exemplu, în cadrul unui singur cip de siliciu putem regăsi câteva mii de astfel de capacități MOS. Aceste capacități sunt legate între ele prin sisteme de transfer iar prin aplicarea de pulsuri electrice într-o asemenea structură, sarcinile electrice se pot deplasa din aproape în aproape, de la o capacitate la vecina ei.

CCD-urile sunt utilizate în diverse domenii, cum ar fi:

- memoriile;
- liniile de întârziere;
- corelatorii;
- detectorii optici;

Categoria de interes pentru astronomie o reprezintă detectorii. Pentru un detector fotosensibil în registrul unui CCD, sarcinile electrice sunt produse prin efect fotoelectric extern. Locul de stocare al sarcinilor electrice este reprezentat de elementele fotosensibile care se mai numesc și fotoelemente. Aceste elemente fotosensibile pot fi organizate fie în linie (barete CCD), fie în mozaic (matrici CCD).

Dupa o perioada de expunere la lumina (timp de integrare) fotosarcinile produse sunt transferate, unele dupa altele, la un element de lectura. Semnalul electric obtinut la etajul de iesire este proportional cu fluxul luminos incident ce cade pe suprafata fotosensibila. Se va observa astfel un semnal electric la iesire, sincronizat cu cadenta de citire a CCD-ului si corespunzator cantitatii de sarcini electrice continute în pachet.

Injectia de sarcini electrice, stocarea acestora, transferul lor în cadrul structurii semiconductorului, precum și lectura pulsurilor, fac parte din funcțiile de baza ale unui CCD.

III.1. Capacitatea MOS

O capacitate MOS este constituită dintr-un substrat semiconductor dopat, acoperit de un strat izolator (de exemplu dioxid de siliciu), deasupra caruia este depus un electrod metalic (denumit de obicei grila).

Oxidul izolator este un strat fin de câțiva zeci de microni. Grila poate fi o depunere de aluminiu sau o depunere de siliciu policristalin puternic dopat pentru a se comporta asemenea unui conductor.

Prezența stratului de oxid de siliciu face structura MOS izolatoare (ca și un condensator de exemplu). Vom studia modul în care se stochează sarcinile electrice într-o astfel de capacitate MOS. Un atom de **Si** are 4 electroni în banda de valență. Fiecare electron de valență se asociază cu câte un electron din banda de valență ai atomilor vecini și astfel se obțin legături covalente. În cazul cristalului de siliciu pur vom găsi 8 electroni pe ultimul strat electronic al fiecărui atom. Dacă însă în structura semiconductorului intrinsec apare un atom pentavalent, atunci vom avea un surplus de electroni de valență la realizarea legăturilor covalente. Astfel, se creează legăturile covalente necesare, însă unul din electronii din nivelul de valență nu va fi niciodată compensat. Vom avea cazul unui semiconductor extrinsec de tip **n** (cu impurități donoare). Invers, dacă în semiconductorul intrinsec se va introduce un atom trivalent, atunci numărul de electroni necesari realizării celor patru legături covalente este insuficient, vom avea totdeauna o sarcină electrică pozitivă necompensată, numită generic **gol**, iar semiconductorul devine extrinsec de tip **p** (cu impurități acceptoare).

Să considerăm ca substratul de siliciu este de tip **p** (situația cea mai des întâlnită în cadrul CCD-urilor). În acest caz golurile reprezintă purtătorii majoritari. Se vor putea găsi câțiva electroni liberi care ajung în banda de conducție a cristalului și pot circula liberi printre atomi. Acești electroni sunt generați datorită agitației termice și se numesc purtători minoritari.

Dacă vom polariza pozitiv grila unei capacități MOS cu o tensiune de ordinul zecilor de volți, în substratul de siliciu dopat se va crea un volum în care purtătorii majoritari practic lipsesc. Aceasta se numește zona de sarcină spațială (Figura 9).

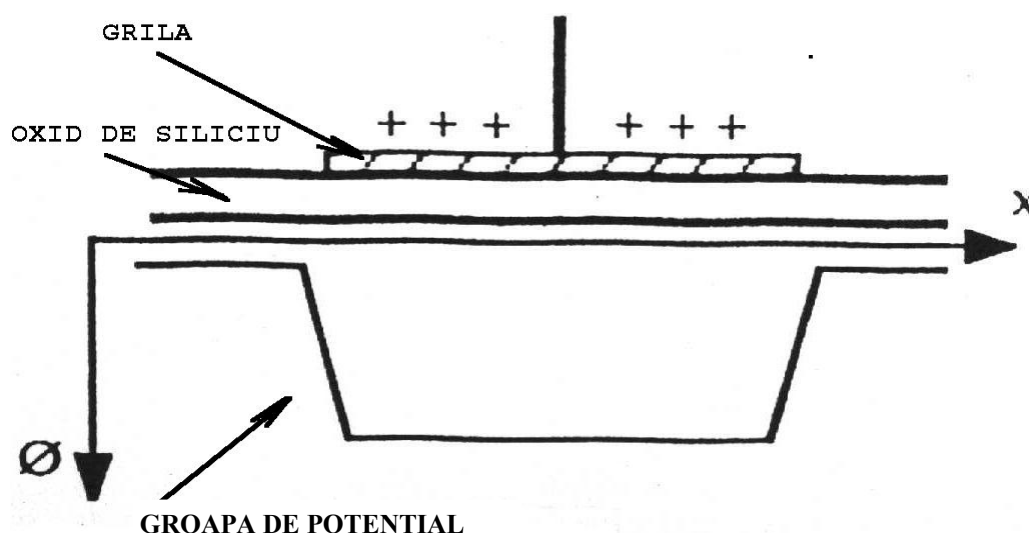


Figura 9. Schema unei capacități MOS polarizate la un potențial Φ

Starea astfel descrisă nu corespunde unei stări de echilibru termodinamic. În timp, în zona de sarcină spațială se generează perechi electron-gol. Acestea sunt separate de câmpul electric iar electronii se vor acumula spre suprafața substratului de siliciu imediat sub grila. Aceasta concentrare de purtători minoritari în cadrul

substratului de siliciu creaza un strat de inversie. Prezenta purtatorilor minoritari face ca potentialul de suprafata sa se diminueze treptat, odata cu acumularea unui numar din ce în ce mai mare de purtatori minoritari în regiunea de inversie. În functie de tehnologia utilizata pentru fabricarea substratului, groapa de potential poate sa se întinda pe o profunzime de 3-5 microni, începând cu suprafata spre oxid a substratului.

Dupa un timp, vom regasi un numar egal de electroni la suprafata si de goluri în volum. Timpul în care se realizeaza aceasta situatie de echilibru se numeste **timp de relaxare termica** si poate fi între o secunda si câteva zeci de secunde, socotite de la polarizarea electrodului. Acest timp de relaxare depinde de tipul de siliciu, starea suprafetei dintre substrat si oxid, precum si de temperatura.

CCD-ul se utilizeaza atunci când regimul capacitatii MOS este în dezechilibru. Altfel spus, un CCD functioneaza atâta timp cât purtatorii minoritari produsi datorita agitatiei termice sunt în numar neglijabil. Purtatorii de sarcina utili sunt aceia generati voluntar datorita sistemului de injectie electrica (produsi ca urmare a polarizarii capacitatilor MOS) sau cei care sunt generati prin efect fotoelectric. Acesti purtatori sunt stocati la suprafata dintre substrat si izolator iar stratul de inversie astfel produs este transportorul informatiei.

De subliniat faptul ca operatiile de injectie de sarcini electrice, transfer si lectura a informatiei trebuie sa se faca într-un timp mult mai mic decât timpul de relaxare termica. În particular, în astronomie, unde sursele de fotoni sunt de regula slabe, este nevoie de aplicarea de metode adecvate (de exemplu racirea cu azot lichid sau heliu lichid) pentru ca timpul de relaxare termica sa fie de ordinul câtorva ore.

III.2. Mecanismele de transfer al sarcinilor electrice

Sa consideram doua capacitati MOS distincte si plasate una alaturi de cealalta, fiecare la câte un potential V_1 si respectiv V_2 . Grilele sunt suficient de departe una fata de cealalta astfel ca cele doua gropi de potential din substratul de siliciu sunt distincte. Pentru distante între grile de ordinul micronului bariera de potential dintre cele doua regiuni de sarcina spatiala dispare iar cele doua zone vor comunica.

Posibilitatea comunicarii între doua gropi de potential ale capacitatilor MOS vecine sta la baza mecanismului de transfer de sarcini electrice în CCD. Aplicând tensiuni variabile la capacitati vecine putem transfera pachete de sarcini electrice din aproape în aproape, sarcinile electrice acumulându-se acolo unde groapa de potential este cea mai profunda. Semnalele electrice de comanda care se aplica la electrozi sunt periodice (secventiale) si de aceea se mai numesc si **ceasuri**.

Mai multi electrozi pot fi legati împreuna de o maniera periodica si astfel putem transfera simultan mai multe pachete de sarcini de-a lungul unui CCD. Un grup de astfel de electrozi având o legatura electrica comuna se numeste **faza**. Fiecare faza este comandata de un semnal de ceas diferit. Ansamblul de semnale de ceas constituie o cronograma care este specifica fiecarui CCD (aceasta cronograma trebuie sa optimizeze functionarea CCD-ului ; astfel, trebuie gasita durata pulsurilor ceasului, numarul optimal de pulsuri trimise spre CCD, ca si faza relativa a pulsurilor). În functie de aplicatiile particulare ale CCD-ului, cronograma poate fi ajustata, cu conditia ca functionarea dispozitivului CCD sa permita astfel de adaptari.

Metodele de transfer de sarcini electrice sunt numeroase. Ele se disting în general prin numarul de faze care permit functionarea dispozitivului.

III.2.1. Transferul în trei faze

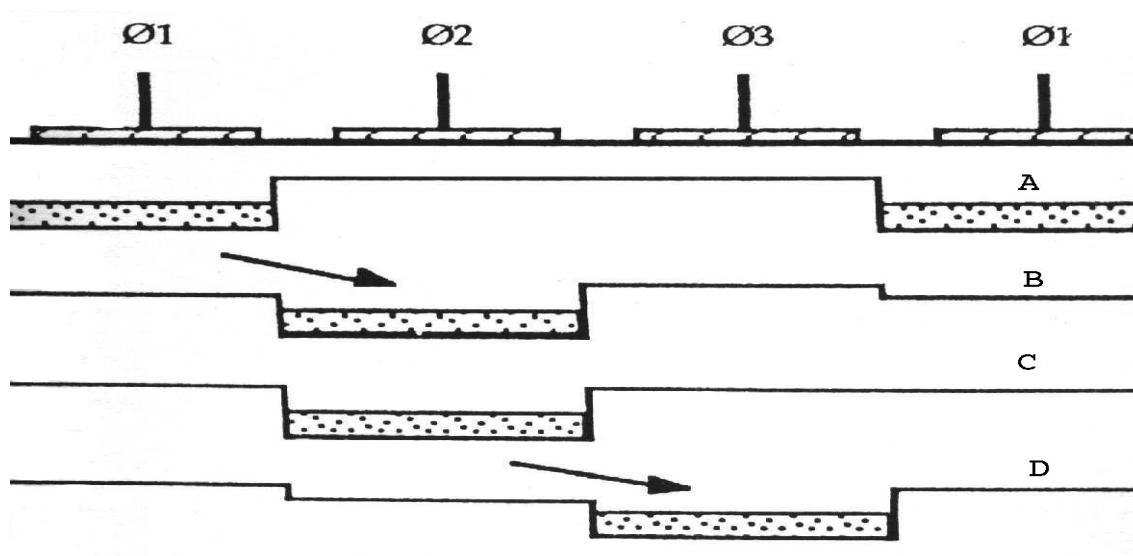


Figura 10. Schema transferului în trei faze din cadrul unui dispozitiv cu transfer de sarcini electrice

Dupa cum se prezinta în Figura 10A, o groapa de potential este realizata sub electrodul 1 prin polarizarea acestuia. Sarcinile electrice se vor acumula deci sub acest electrod. Polarizam progresiv electrodul 2 în acelasi timp cu depolarizarea electrodului 1 (Figura 10B). Sarcinile electrice acumulate sub electrodul 1 vor migra progresiv spre electrodul 2. Aceasta operatie se va reproduce între electrodul 2 si electrodul 3 (Figura 10D). Operatiunea va continua, iar ceea ce este de remarcant este ca pachetele de sarcini electrice nu se vor putea amesteca, pentru ca stratul semiconductor, de latimea unui electrod, separa aceste pachete unul de celalalt.

III.2.2. Transferul în patru faze

În transferul cu patru faze exista o bariera dubla de potential între doua pachete succesive de sarcini. Aceasta tehnica evita toate riscurile de a se amesteca sarcinile electrice din doua pachete consecutive, în cazul în care pulsurile ceasurilor nu sunt în faza ele între ele de o maniera optima. Acest tip de transfer se utilizeaza mai ales în cazul în care sunt cerute viteze de lectura mari (frecventa mai mare de 10 MHz).

Registrele în 3 sau 4 faze se mai numesc si registre non-directionale, deoarece sensul de propagare este fixat de ordinea în care se succed semnalele ceasului si nu de structura intrinseca a registrelor. Prin modificarea cronogramei este posibila schimbarea sensului de transfer în CCD.

III.2.3. Transfer în doua faze

În acest caz sensul de deplasare al sarcinilor electrice este aparent nedeterminat. Pentru a rezolva aceasta problema, fiecare celula capacitiva este

prevazuta cu un electrod construit asimetric. Aceasta asimetrie se obtine fie prin dopare diferita, fie prin varierea grosimii grilei. Asimetria electrodului va induce o groapa de potential, ea însasi asimetrica. Sensul de deplasare este în acest caz dat de forma particulara a electrodului.

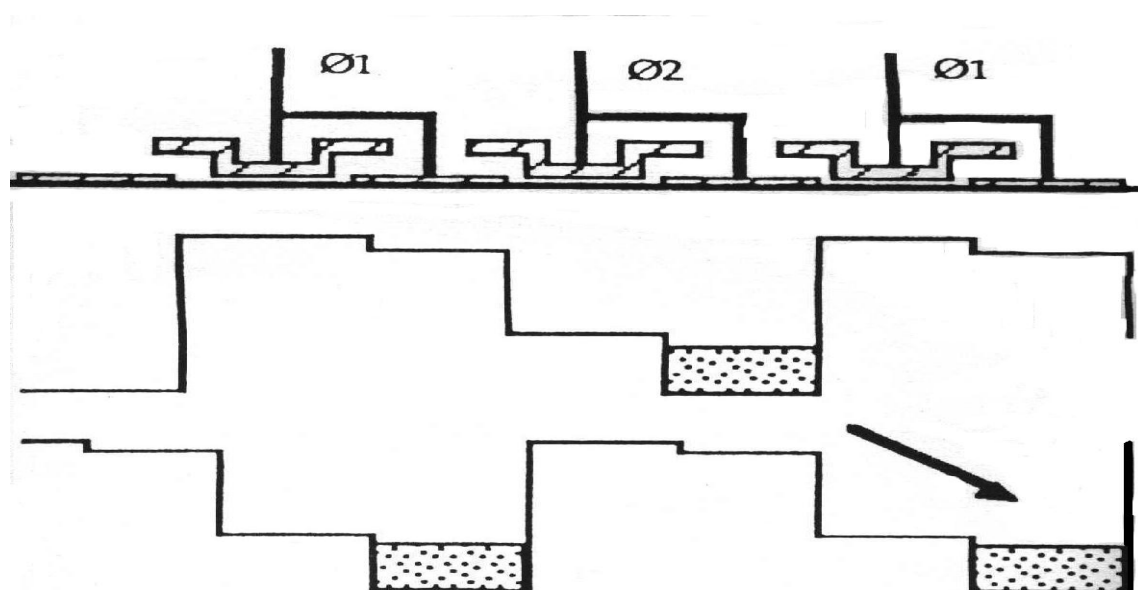


Figura 11. Transferul în doua faze într-o constructie de CCD cu electrozi asimetrici.

O varianta de transfer în cazul CCD-ului cu electrozi asimetrici este de a mentine o faza la un nivel intermediar, în timp ce la cealalta faza tensiunea aplicata variaza de o parte si de cealalta a primului nivel.

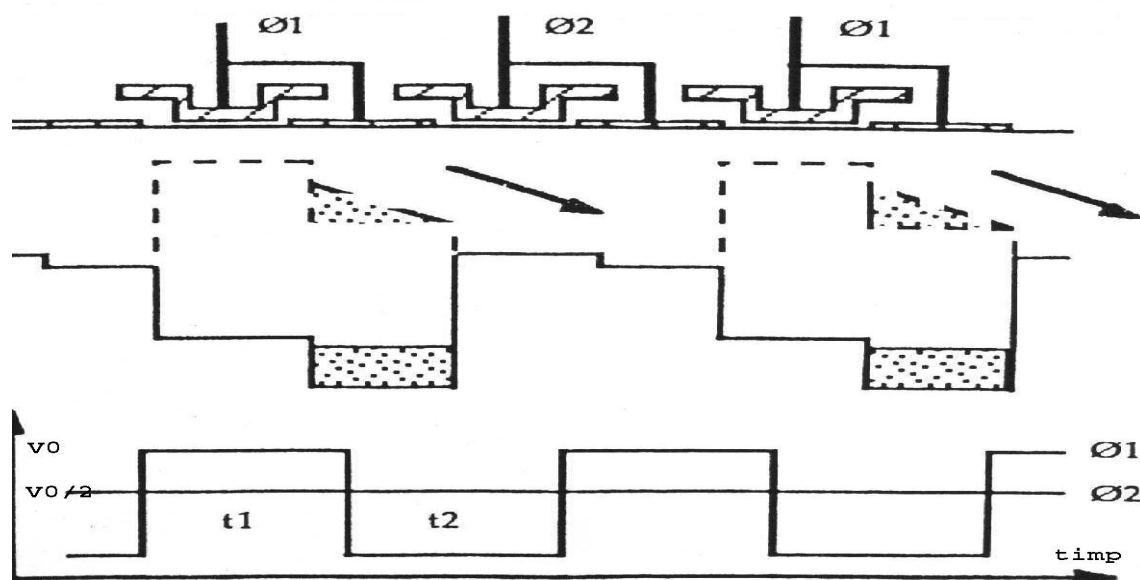


Figura 12. Transferul de sarcini în doua faze, cu variatia tensiunii aplicate pe una din faze.

Interesul pentru aceasta metoda rezida în simplitatea manevrei, însa performantele sunt medii în ceea ce priveste transferul de sarcini din fiecare pachet.

III.2.4. Calitatea transferului de sarcini electrice

În cursul comutării fazelor o parte din sarcini rămân în urma pachetului. Acestea pot fi recuperate de pachetul ulterior sau pot să se recombine în substratul de siliciu. Acest fenomen se numește **ineficacitate de transfer**. Recombinarea în volumul substratului poate fi foarte bine atenuată dacă acesta (substratul, considerat deja de tip **p**) este polarizat la o tensiune negativă.

Sursa principală a întârzierii unor sarcini electrice ale unui pachet o reprezintă impuritățile prezente la suprafața substratului de siliciu cu izolatorul. Aceste sarcini electrice pot fi eliberate de către succesorul pachetului de origine al sarcinilor electrice întârziate.

Pentru a se diminua acest efect, la suprafața de separație semiconductor-izolator se introduce un strat subțire de siliciu dopat **n**, care are drept efect îndepărtarea pachetului de sarcini electrice de izolator (Figura 13).

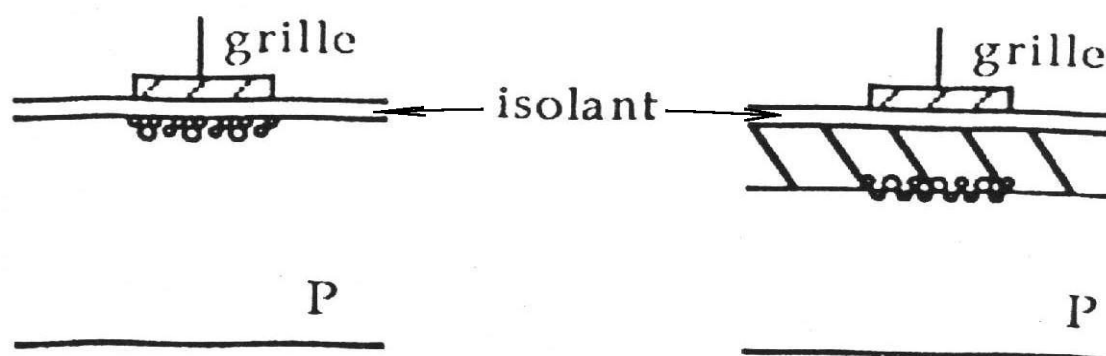


Figura 13. Marirea capacității de transfer prin introducerea unui strat subțire de semiconductor de tip **n**

III.3. Organizarea generală a unui CCD

În general un CCD se prezintă sub două forme constructive: liniară sau matricială.

III.3.1. Bareta CCD

Aceasta este alcătuită dintr-o linie fotosensibilă și din unul sau mai multe registre de transfer. În Figura 14 este prezentată o bareta CCD cu două registre de transfer.

Unul din registre primește informația de la pixelii pari, iar celălalt de la pixelii impari. Linia fotosensibilă poate include între câteva sute până la câteva mii de capacități MOS. Termenul consacrat pentru o capacitate MOS dintr-un CCD este **pixel**¹¹. În general mărimea unui pixel este de ordinul zecilor de micrometri. Linia fotosensibilă este încadrată de electrozii de transfer.

¹¹ noțiunea de pixel își are originea în « picture element » și desemnează aici o capacitate MOS

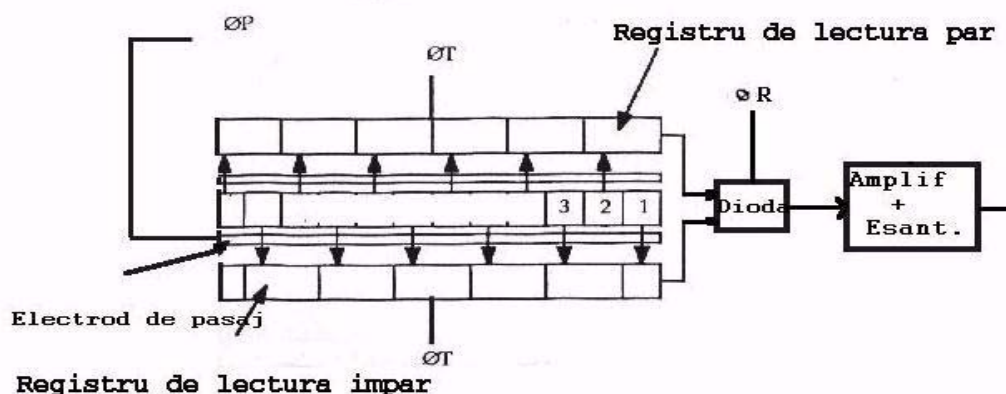


Figura 14. Bareta CCD cu doua registre de transfer.

Dupa timpul de integrare (timpul în care potentialul pe fiecare capacitate se mentine constant si în fiecare groapa de potential se acumuleaza electroni ca urmare a efectului fotoelectric), sarcinile sunt transferate simultan celor doua registre prin intermediul electrodului de pasaj. Pachetele de sarcini sunt transferate secvential în cele doua registre. Aceste registre sunt protejate de lumina prin masti de aluminiu. Dioda de iesire receptioneaza pe rând câte un pachet de sarcini electrice: alternativ, câte un pachet provenind de la registru par si un pachet provenind de la registru impar. La acest nivel se reconstituie informatia continuta în linia fotosensibila. In cursul transferului pachetelor de sarcini o alta imagine poate fi înregistrata în bareta fotosensibila. Ea poate fi transferata la rândul ei ca si precedenta, iar procesul se poate continua. In acest caz timpul de integrare este egal cu timpul de lectura al baretei.

Pentru a se obtine o imagine este suficient sa deplasam bareta CCD paralel cu ea însasi, sau sa deplasam imaginea prin fata baretei CCD fixa. Pe toata perioada miscarii, CCD-ul va fi citit periodic. Liniile astfel înregistrate, puse una sub cealalta, vor reconstitui imaginea.

Acest principiu este deja utilizat atunci când se digitizeaza un document. Mai concret, faxul, copiatorul sau scanner-ul functioneaza dupa acest principiu.

In astronomie însa, obiectele sunt slabe, numarul de fotoni receptionati în unitatea de timp pe unitatea de suprafata este mic si deci acest gen de baleiaj ar trebui sa se desfasoare relativ lent. Pentru astronomie se prefera utilizarea unor dispozitive dispuse pe o suprafata.

III.3.2. Matricea CCD

O matrice CCD reprezinta un ansamblu de fotoelemente dispuse pe linii si coloane. Aceasta structura permite înregistrarea unei imagini bidimensionale. Functie de mecanismul de transfer, matricile CCD se pot grupa în doua categorii:

- matrici CCD cu transfer interlinie;
- matrici CCD cu transfer de banda;

CCD cu transfer interlinie

Organizarea interlinie este prezentata în Figura 15.

Fiecare coloana fotosensibilă este asociată unui registru corespunzător care are aceleași proprietăți optoelectronice cu bareta fotosensibilă și care este protejat de lumina printr-o mască de aluminiu. Informația luminoasă poate circula în aceste registre verticale fără a fi perturbate de fluxul luminos incident. La sfârșitul fiecărui timp de integrare sarcinile generate în elementele fotosensibile sunt transferate în bloc în registrele verticale corespunzătoare. Durata acestui transfer este foarte scurtă, de ordinul microsecundelor. Apoi, pachetele de sarcini sunt transferate linie cu linie, într-un registru orizontal. Acest registru este citit de meniera în care informația ajunge în mod secvențial la etajul de ieșire. După lectura completă a registrului orizontal, acesta este ocupat cu o nouă linie a imaginii, iar procesul se repetă până la lectura întregii matrici CCD.

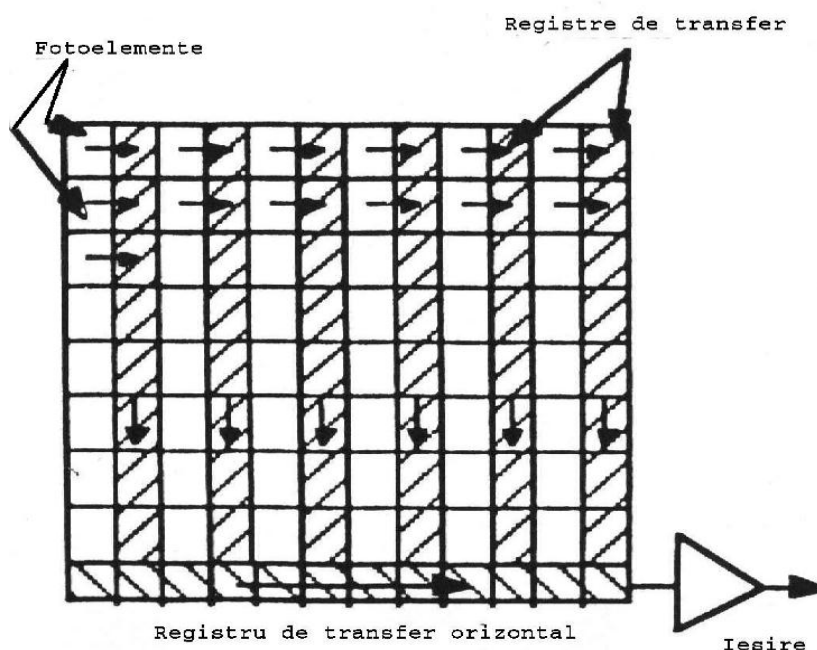


Figura 15. Schema unei matrici CCD cu transfer interlinie.

CCD cu transfer de banda

În această organizare vom întâlni două matrici CCD distincte pe același cip de siliciu. Una din matrici este expusă la lumină și recepționează fotonii, iar cea de-a doua este structural identică cu prima, și acoperită de o mască ce o face insensibilă la lumină. Cea de-a doua matrice constituie zona de memorie. După perioada de integrare a semnalului luminos provenit de la regiunea vizată din sfera cerească, sarcinile sunt foarte repede transferate în zona memoriei. Elementele fotosensibile sunt organizate ele însele în registre verticale de transfer. În timpul transferării pachetelor de sarcini electrice de la elementele fotosensibile la memorie, ceasurile celor două matrici sunt sincrone.

La fiecare bataie a ceasurilor, conținutul unei linii este transferat în bloc vecinei sale. Informația totală astfel înmagazinată în memorie va fi transferată apoi unui registru orizontal, linie după linie, ca și în cazul precedent.

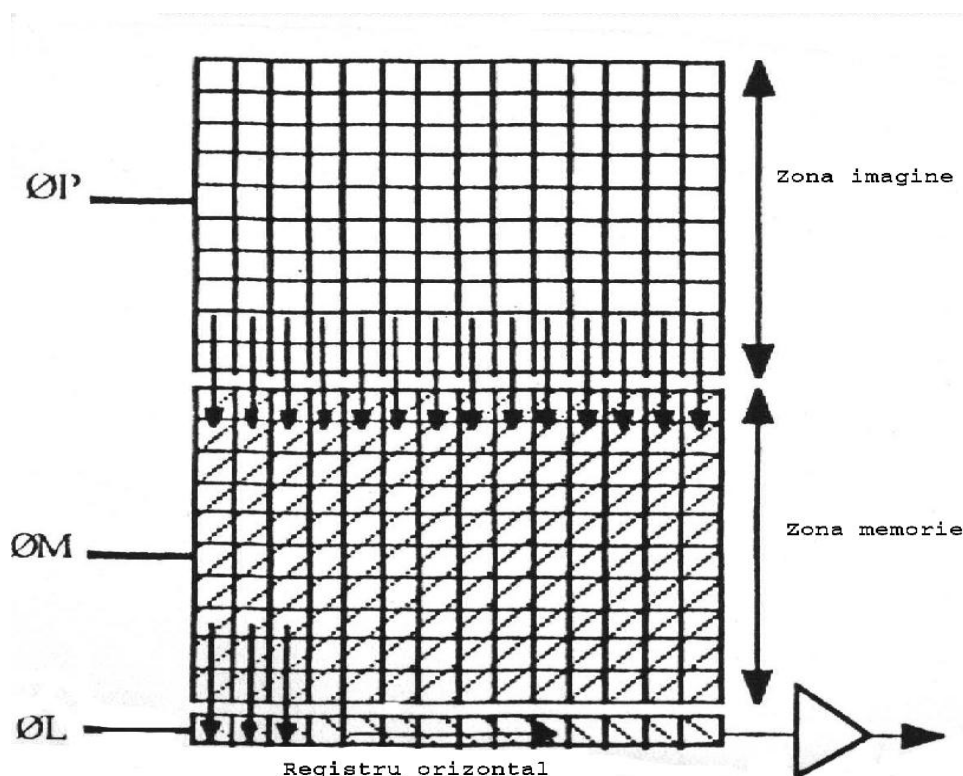


Figura 16. Schema unui CCD cu transfer de bandă.

III.4. Performantele unei camere cu transfer de sarcina electrica - (CCD)

Cipul de siliciu în general este încapsulat într-o placă ceramică. Pentru a impresiona elementele fotosensibile, lumina trece printr-o fereastră de sticlă ce protejează dispozitivul de eventuale accidente. Aceasta conferă o mare robustețe și o mare stabilitate mecanică pentru dispozitivul CCD.

Pentru a putea compara performanțele a două CCD-uri, vom prezenta câteva mărimi specifice.

III.4.1. Randamentul cuantic

În literatură este cunoscut sub abrevierea QE (quantum efficiency) și este dat de raportul dintre numărul mediu de fotoelectroni obținuți pe un pixel într-o secundă și numărul mediu de fotoni incidenti pe un pixel în timp de o secundă.

$$QE = \frac{Nr. mediu_de_fotoelectroni / pixel / s}{Nr. mediu_de_fotoni_incidenti / pixel / s}$$

Randamentul cuantic este totdeauna inferior unității. Aceasta înseamnă că nu toți fotonii incidenti pe un pixel pot provoca un fotoelectron. În funcție de tehnologia utilizată, randamentul cuantic poate fi între 40% și 80% (pentru cazul unei emulsii fotografice, randamentul cuantic este de 2%-4%).

Raportul semnal-zgomot într-un detector CCD ideal este dat de fluctuația statistică a numărului de fotoni incidenti în unitatea de timp.

$$\left[\frac{\text{semnal}}{\text{zgomot}} \right]_{ph}^2 = \frac{N^2}{\sigma^2}$$

unde **N** reprezinta numarul de fotoni incidenti pe durata masuratorii, iar σ este eroarea statistica a semnalului masurat. Pentru cazul în care **N** este un numar mare, atunci distributia fotonilor este de tip Poisson, ceea ce permite scrierea variatiei statistice ca fiind egala cu numarul mediu de fotoni incidenti.

Daca vom aproxima numarul de fotoni incidenti **N** ca fiind egal cu numarul mediu de fotoni, atunci relatia anterioara se mai poate scrie:

$$\left[\frac{\text{semnal}}{\text{zgomot}} \right]_{ph}^2 = N$$

În realitate, într-un detector CCD exista si un zgomot intrinsec, astfel ca raportul semnal - zgomot este mai mic decât cel calculat anterior. Pentru acest motiv vom defini **criteriul de calitate** al unui detector ca fiind:

$$DQE = \frac{\left[\frac{\text{semnal}}{\text{zgomot}} \right]_{masurat}^2}{\left[\frac{\text{semnal}}{\text{zgomot}} \right]_{ph}^2}$$

Acest criteriu de calitate mai poate fi exprimat si ca raportul între variatia statistica a zgomotului fonic si variatia statistica a semnalului masurat la iesirea din detector:

$$DQE = \frac{\sigma_{ph}^2}{\sigma_{masurat}^2} = \frac{\sigma_{ph}^2}{\sigma_{ph}^2 + \sigma_{intrinsec}^2}$$

Fotonii **X** sau γ duc la situatii particulare, deoarece la incidenta pe elementul fotosensibil fiecare poate produce mai multe perechi electron-gol. Pentru acest caz se defineste **eficacitatea de a colecta sarcinile electrice** (CCE = Charge Collection Efficiency), marime ce permite evaluarea posibilitatilor unui CCD de a colecta toate sarcinile electrice produse de un singur foton într-un pixel.

III.4.2 Sensibilitatea spectrala

În general curba de raspuns pentru un CCD nu se deosebeste prea mult de cea a siliciului. Un CCD poate raspunde foarte bine observatiilor efectuate în domeniul spectral 4000-10000 Å. În domeniul 7000-10000 Å, unde atât ochiul cât si placa fotografica nu mai sunt sensibili, utilizarea unui detector CCD este esentiala.

În Figura 17 este prezentat raspunsul spectral al unei matrici Thompson TH7852, exprimat în curentul la intrarea în dioda de iesire în functie de fluxul luminos - exprimat în wati si care revine la un pixel. De remarcat faptul ca aceasta

sensibilitate spectrala poate fi diferita de la un pixel la altul. De acest fapt trebuie ținut cont atunci când se fac determinări radiometrice absolute.

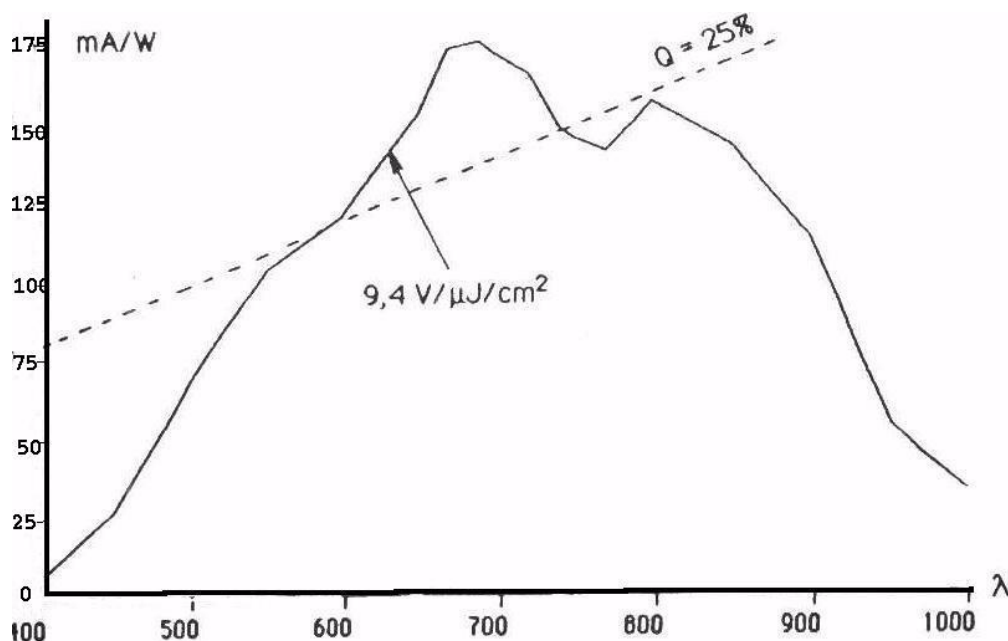


Figura 17. Răspunsul spectral în domeniul 100-1000 nm al unei matrici CCD fabricate de firma Thompson.

III.4.3. Eficienta de transfer a sarcinilor electrice

Aceasta mărime este introdusă ca urmare a posibilelor pierderi înregistrate de un pachet de sarcini electrice atunci când acesta este transferat de la un etaj al registrului la următorul. Dacă N_0 este numărul de sarcini dintr-un pachet pe o grila iar N_t numărul de sarcini ale aceluiași pachet după ce a fost transferat pe grila următoare, vom putea scrie eficiența de transfer (CTE=Charge Transfer Efficiency) ca fiind:

$$CTE = 1 - \frac{(N_0 - N_t)}{N_0}$$

În general registrele CCD au o eficiență de transfer ce se apropie de perfecțiune (0.99999). Eficiența este influențată de temperatură și de numărul de sarcini continute într-un pachet.

III.4.4. Rezoluția spațială

Pentru un dispozitiv CCD, rezoluția spațială a unui domeniu spectral ales este influențată de:

- dimensiunea unui pixel; cu cât dimensiunea unui pixel este mai mare cu atât rezoluția spațială se micșorează, detaliile imaginii continute într-un pixel se mediază spațial. În mod curent, un pixel are o dimensiune de 10-30 microni. Dacă vom compara cu emulsiile fotografice, un CCD este inferior ca rezoluție spațială, deoarece granulele emulsiei pot atinge

dimensiuni de 5 microni. În observațiile astronomice putem compensa acest inconvenient, prin mărirea imaginii obiectului pe suprafața dispozitivului CCD.

- ineficacitatea de transfer care diluează sarcinile dintr-un pachet pe măsura ce se efectuează transferul.
- difuzarea sarcinilor electrice în substratul de siliciu pe durata integrării. Acest fenomen este specific regiunii IR a spectrului. Fotonii acestei regiuni sunt absorbiți în profunzimea substratului de siliciu, practic neutru electric din cauza faptului că ea se află în afara regiunii ocupate de groapa de potențial. Electronul astfel creat poate fi ori recombinat, ori captat de groapa de potențial din imediată lui apropiere. Incertitudinea în destinația fotoelectronilor în cauză se numește **diafotie**.

CAPITOLUL IV

MARIMI FOTOMETRICE

Marimile si unitatile de masura fotometrice au fost adoptate pentru sensibilitatea ochiului omenesc si la lungimile de unda ale domeniului vizibil. Atunci când se vorbește de ochiul omenesc, se face referire la un « ochi mediu » deoarece nu toata lumea are aceeasi acuitate vizuala.

Fotometria are drept scop masurarea luminii asociate unei senzatii luminoase vizuale. **Radiometria**, sau fotometria energetica, se ocupa de energia transportata de o unda electromagnetica, indiferent de lungimea de unda (Pierre Léna, 1989).

În astronomie s-a dezvoltat o terminologie specifica a marimilor (cazul notiunii de magnitudine).

IV.1. Marimi specifice utilizate în fotometria energetica

Largimea unui fascicul reprezinta o marime geometrica ce delimiteaza un fascicul ce transporta energie. Dacă vom considera ca dintr-un element de suprafata dS_1 al unui corp se emite radiatie si ea este receptionata pe un element de suprafata dS_2 situat la distanta r , largimea fasciculului se va scrie:

$$\frac{1}{r^2} \cdot dS_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot dS_2 \cdot \cos \theta_2 = d\sigma_1 \cdot d\Omega$$

situatia este prezentata în Figura 18: Prin $d\sigma_1$ este desemnata proiectia suprafetei dS_1 pe planul perpendicular la directia de propagare a fasciculului; $d\Omega$ reprezinta unghiul solid sub care se vede dS_2 din centrul lui dS_1 .

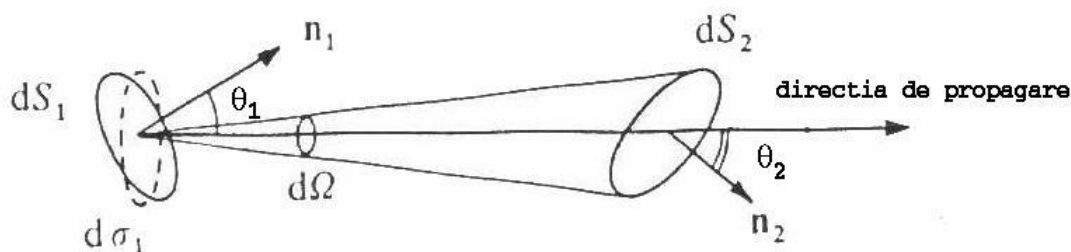


Figura 18. Schema pentru definirea largimii unui fascicul

În vid, lărgimea fasciculului rămâne constantă (într-un fascicul luminos conservarea energiei este echivalentă cu invarianta produsului dintre lărgimea fasciculului și pătratul indicelui de refracție al mediului prin care acesta se propaga) (Lena, 1989).

Puterea transportată

Dacă vom considera un fascicul de vector de undă $\vec{k}$ cu frecvență cuprinsă între ν și $\nu + d\nu$ și de unghi solid $d\Omega$, ce traversează o suprafață $d\sigma$ normală la direcția de propagare $\vec{k}$ într-un punct $\mathbf{M}$, atunci puterea transportată poate fi calculată ca fiind:

$$dP_\nu = I_\nu(k, \mathbf{M}) \cdot d\sigma \cdot d\Omega \cdot d\nu$$

unde I_ν reprezintă intensitatea specifică a fasciculului în punctul $\mathbf{M}$, pe direcția $\vec{k}$. Unitatea de măsură este $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$.

Trebuie făcută distincție între receptorii sensibili la intensități și cei sensibili la câmp electric E_ν . Cele două mărimi, E_ν și I_ν sunt legate prin relația:

$$I_\nu = \frac{\epsilon \cdot c \cdot \langle E_\nu^2 \rangle}{2}$$

care exprimă faptul că valoarea medie a fluxului printr-o suprafață este egală cu puterea ce traversează acea suprafață.

Atunci când I_ν măsoară puterea transmisă printr-o suprafață el se numește **luminanță** sau **stralucire monocromatică**.

Dacă se integrează luminanța după toate direcțiile (pentru un unghi solid de 4π sr) se va obține mărimea numită **radianta** ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$).

Iluminarea monocromatică reprezintă puterea recepționată pe unitatea de suprafață normală la direcția de propagare.

$$\epsilon_\nu \cdot d\nu = \frac{dP_\nu}{dS_2 \cdot \cos \theta_2}$$

unde ϵ_ν reprezintă iluminarea monocromatică produsă de surse de lumină situate în fața suprafeței ce recepționează energia:

$$\epsilon_\nu = \int_{m-surse} I_\nu \cdot \cos \theta_1 \cdot d\Omega$$

În Sistemul Internațional de unități iluminarea monocromatică se măsoară în $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$.

Iluminarea monocromatică totală nu depinde de dimensiunile unghiulare ale sursei. În astronomie, deseori i se atribuie numele **\$flux\$**. Definiția acestui termen, corespunzătoare calității ce i se atribuie în transferul de radiație, nu este aceeași cu definiția dată în radiometrie, unde cuvântul **\$flux\$** desemnează puterea totală transportată de radiație (cu unitatea de măsură *Watt*\$).

Unitatea de măsură pentru iluminarea monocromatică (**\$fluxul\$** din astronomie) este *Jansky* (Jy):

$$1 \text{ Jansky} = 10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

Magnitudinile reprezintă unități relative logaritmice de iluminare.

Dacă în locul reprezentării în funcție de frecvență se vor utiliza derivatele energiei - $(h\nu)$ - radiației, sau derivatele în funcție de lungimea de undă (λ) sau a numărului de undă, vom putea defini alte mărimi, omoloage celor prezentate anterior. În plus, puterile pot fi măsurate în watt sau în număr de fotoni în unitatea de timp (în cazul când considerăm frecvența fotonilor ca fiind cunoscută). O trecere în revistă a acestor mărimi este următoarea:

Luminanță redusă. Să considerăm cantitatea:

$$\lambda \cdot I_\lambda = \nu \cdot I_\nu$$

Această mărime se măsoară în $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$, adică este independentă de lungimea de undă sau de frecvență considerată. Interesul pentru această mărime este mare în astronomie în cazul studiului spectrelor cu domeniu spectral de mare întindere.

Luminozitatea reprezintă puterea totală emisă de o sursă astrofizică (stea) al cărui volum este delimitat printr-o suprafață. Această mărime este dată de relația:

$$L = \int_S \int_{4\pi} \int_\nu dP_\nu$$

Luminozitatea monocromatică în acest caz va fi dată de formula:

$$L = \int_\nu L_\nu d\nu$$

Gradul de polarizare este o mărime importantă în astrofizică deoarece reflectă fie o proprietate a sursei ce produce radiația (câmp magnetic, particule orientate pe aceeași direcție, difuzie anizotropă), fie a receptorului care nu înregistrează decât o componentă a polarizării (cazul radiofrecvențelor), fie ca instrumentele de observație modifică acest parametru. Dacă vom considera o undă plană descrisă printr-un câmp electric de forma:

$$E_x = E_{0x} \cos(2\pi\nu \cdot t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_1)$$

$$E_y = E_{0y} \cos(2\pi\nu \cdot t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_2)$$

unde E_{0x} și E_{0y} reprezintă amplitudinile pe axele x și y , ν este frecvența undei, $\vec{k}$ vectorul de undă iar φ_1 și φ_2 fazele. Polarizarea se va putea scrie conform parametrilor lui Stokes:

$$I = E_{0x}^2 + E_{0y}^2$$

$$Q = E_{0x}^2 - E_{0y}^2$$

$$U = 2E_{0x}E_{0y} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$V = 2E_{0x}E_{0y} \sin(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Gradul de polarizare pentru o undă oarecare va fi reprezentat de raportul:

$$\Pi = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}$$

unde pentru marimile utilizate se vor considera mediile temporale.

IV.2. Sisteme de magnitudini

Magnitudinea este o masura a iluminarii produse de o sursa cereasca. Daca obiectul este o stea, atunci aceasta este bine delimitata spatial si practic punctiforma. Când se analizeaza un obiect ce prezinta un diametru non-neglijabil, de exemplu o galaxie sau un nor de gaz interstelar, se defineste marimea **magnitudine pe secunda de arc patrat**.

Consideram ca $e(\lambda)$ este iluminarea monocromatica obtinuta de la o sursa oarecare, fara sa se ia în calcul influenta atmosferei terestre.

Magnitudinea aparenta $m(\lambda_0)$ corespunzatoare unei lungimi de unda λ_0 este data de relatia:

$$m_{\lambda_0} = -2,5 \lg \frac{e(\lambda_0)}{e_0} = -2,5 \lg e(\lambda_0) + q(\lambda_0)$$

unde e_0 reprezinta o iluminare monocromatica etalon (de exemplu cea a unei stele) iar $q(\lambda_0)$ este o constanta de integrare¹².

În practica masuratorile se fac de regula într-o banda spectrala si eventual cu ajutorul unui filtru de transmisie $t(\lambda)$. În functie de banda spectrala aleasa, se pot defini mai multe sisteme de magnitudini. Pentru aceasta situatie, magnitudinea relativa a unei surse, observate într-un interval spectral (λ_1, λ_2) se va scrie:

$$m(\lambda) = -2,5 \lg \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} t(\lambda) \cdot e(\lambda) d\lambda + q_\lambda$$

Daca ne propunem sa aflam care este magnitudinea aparenta pentru toate lungimile de unda, relatia se va scrie:

$$m_b = -2,5 \cdot \frac{\int_0^\infty e(\lambda)}{e_b}$$

cu $e_b = 2.521 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

m_b se numeste de **magnitudine bolometrica**. Daca se cunoaste magnitudinea bolometrica a unei stele ca si distanta D pâna la ea, atunci, în conditiile în care consideram ca steaua emite radiatie în mod izotrop, luminozitatea acesteia se poate calcula din formula:

$$m_b = -0,25 + 5 \cdot \lg D - 2,5 \lg \frac{L}{L_0}$$

unde $L_0 = 3.827 \cdot 10^{26} \text{ W}$ reprezinta luminozitatea solara.

¹² relatia poate fie explicata conform legii Weber-Fechner : »Variatia intensitatii senzatiei produse de un excitant fizic este proportionala cu raportul dintre variatia intensitatii excitatiei si intensitatea excitatiei initiale ».

Dacă vom dori să comparăm luminozitățile astrelor, mărimea aparentă nu este suficientă deoarece nu se cunoaște distanța dintre observator și sursă. Se introduce astfel noțiunea de **mărime absolută**, pe care o definim ca fiind valoarea mărimei pe care ar avea-o steaua studiată, dacă ar fi plasată la o distanță de 10 parseci (pc)¹³ de observator și ar fi corectată de eventuala absorbție interstelară. Între mărimea aparentă m și mărimea absolută M există relația:

$$M = m + 5 - 5 \lg D - A$$

în care D reprezintă distanța până la stea, iar A reprezintă absorbția mediului interstelar.

O altă mărime des utilizată în astronomie (astrofizică) o reprezintă **indicele de culoare**. Acesta se definește ca fiind diferența între două mărimi aparente ale aceluiași corp ceresc, obținute la două lungimi de undă diferite.

$$i.c. = m_{\lambda_2} - m_{\lambda_1}$$

În cazul asteroizilor se utilizează un calcul de mărime ceva mai elaborat dat fiind faptul că aceste corpuri aparțin Sistemului Solar, nu au lumină proprie, iar mișcarea lor în raport cu stelele este sesizabilă.

Mărimea la opoziție reprezintă strălucirea pe care o are asteroidul în momentul opoziției. În această geometrie asteroidul reflectă spre Pământ lumina incidentă cu întreaga emisferă iluminată. Mărimea medie la opoziție se definește ca fiind:

$$B(a,0) = B(1,0) + 5 \lg a \cdot (a - 1)$$

unde $B(1,0)$ reprezintă mărimea absolută a asteroidului, iar a este semiaxa mare a orbitei acestuia.

Această formulă este aproximativă și nu poate fi aplicată la întreaga populație de asteroizi. Cel mai bine aproximati prin această formulă sunt asteroizii care au orbite aproximativ circulare și cu o înclinare apropiată de zero (sunt situați în planul ecliptic). Pentru asteroizii care intersectează orbita Pământului, erorile între mărimea reală și cea calculată după relația anterioară pot fi de ordinul unei mărimi.

Mărimea redusă reprezintă strălucirea unui asteroid, dacă acesta s-ar afla la o distanță de 1 *u.a.* față de Soare și 1 *u.a.* față de Pământ. Această mărime este analoagă mărimei absolute a unei stele. Calculul mărimei reduse se face prin scăderea din mărimea aparentă a valorii $5 \lg(r \cdot \Delta)$ (unde r - este distanța dintre asteroid și Soare, iar Δ - este distanța dintre asteroid și Pământ).

Mărimea absolută se determină reprezentând grafic mărimea redusă în funcție de unghiul de fază¹⁴. Tangenta porțiunii liniare a curbei mărimei reduse intersectează axa ordonatelor pe care este reprezentată mărimea redusă într-un punct a căreiordonată reprezintă mărimea absolută (Figura 19).

¹³ 1pc=3,086·10¹⁶m=3,26 ani-lumină

¹⁴ unghiul de fază este unghiul ce se formează între direcția asteroid-Soare și direcția asteroid-Pământ

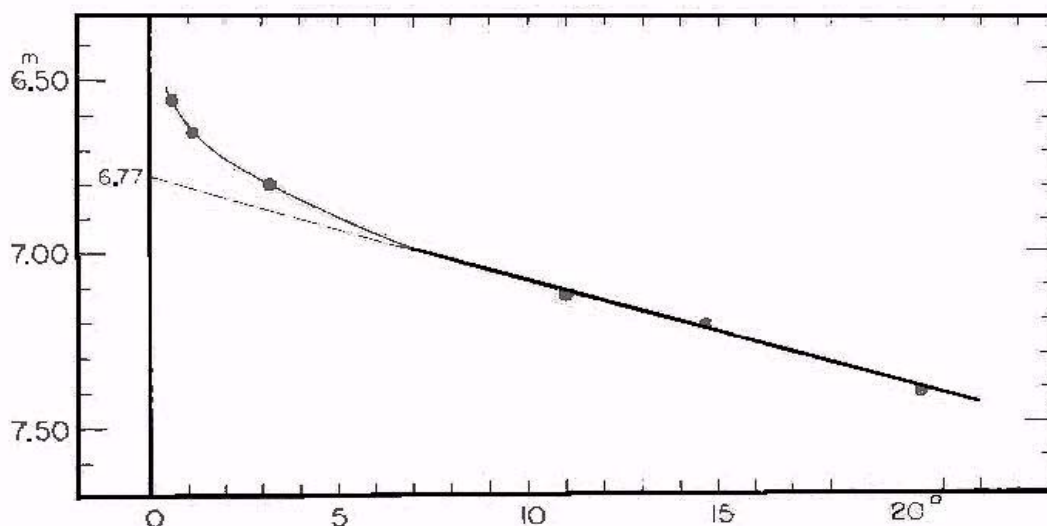


Figura 19. Reprezentarea magnitudinii reduse ca funcție de unghiul de fază pentru asteroidul 20 Massalia. Prin prelungirea porțiunii liniare a graficului, se obține magnitudinea absolută cu valoarea 6,77 magnitudini

De remarcat că la unghiuri de fază mici apare **efectul de opoziție**. Magnitudinea redusă nu mai are o variație aproape liniară cu unghiul de fază. La valori apropiate de zero ale unghiului de fază magnitudinea redusă scade (strălucirea asteroidului crește) cu aproximativ 0.33 magnitudini. Explicația acestui fenomen este similară cu cea oferită de Seeliger în anul 1887 pentru un fenomen ce se petrece cu inelele lui Saturn. Variația în magnitudine se poate explica prin luarea în considerare a « reliefului » asteroidului. La unghiuri de fază cuprinse între 5-30 grade, părțile mai înalte ale suprafeței umbresc anumite regiuni ale suprafeței asteroidului. Pe măsura ce unghiul de fază se micșorează, această umbră scade, toată suprafața iluminată aducându-și contribuția la fluxul reflectat de asteroid spre observatorul aflat pe Pământ.

Panta tangentei porțiunii liniare a Figurii 19 se numește **coeficient de fază** și se notează β . Acest coeficient depinde în mare măsură de proprietățile suprafeței asteroidului. Prin dezvoltarea unei teorii de împrăștiere multiplă a luminii reflectate se poate obține interpretarea fizică a acestui coeficient precum și o legătură între magnitudinea absolută și albedoul asteroidului.

Dacă se efectuează o observație cu scopul de a calcula magnitudinea unui asteroid, primul parametru ce se poate calcula este magnitudinea aparentă. Prin eliminarea parametrilor geometrici din acest calcul se poate deduce magnitudinea redusă. Prin reprezentarea magnitudinii reduse ca funcție de unghiul de fază se va obține magnitudinea absolută a asteroidului.

Problema inversă apare atunci când ne propunem să observăm un asteroid. Parametrii orbitali la un moment dat vor fi determinați prin calcul de efemerida. Pe sfera cerească însă, asteroidul este văzut cu magnitudinea lui aparentă. Din magnitudinea absolută, magnitudinea aparentă se va calcula după formula:

$$V(a,0) = 5 \cdot \lg r \cdot \Delta + V(1,0) - 2,5 \cdot \lg[(1 - \beta)\Phi_1 + \beta \cdot \Phi_2]$$

Această formulă este empirică, acceptată de Uniunea Astronomică Internațională și a fost aleasă pentru a reprezenta bine întreaga populație asteroidală. Φ_1 și Φ_2 sunt două constante empirice determinate prin relațiile:

$$\Phi_1 = \exp \left[-A_1 \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right)^{B_1} \right]$$

$$\Phi_2 = \exp \left[-A_2 \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right)^{B_2} \right]$$

unde: $A_1 = 3,33$; $A_2 = 1,87$; $B_1 = 0,63$ si $B_2 = 1,22$

CAPITOLUL V

CARACTERISTICI FIZICE ALE ASTEROIZILOR

Principalele marimi ce pot fi deduse în urma unei observatii fotometrice sunt curba de lumina si perioada de rotatie proprie (spinul) asteroidului. Prin cumularea rezultatelor obtinute la trei sau mai multe opozitii, din curbele de lumina rezultate se poate deduce pozitia axei de rotatie proprie, precum si sensul de rotatie al acestuia.

V.1. Curba de lumina

Ca si celelalte corpuri ale Sistemului Solar, în afara miscarii de revolutie, asteroizii prezinta si o rotatie proprie. Daca se reprezinta fluxul luminos reflectat de un asteroid într-o noapte de observatie, ca functie de timp, se constata ca el poate fluctua de o maniera periodica. Acest fapt a fost constatat pentru prima data în anul 1901 din observatii vizuale efectuate asupra asteroidului 433 Eros.

Din observatiile fotometrice, daca se reprezinta grafic variatia stralucirii aparente (magnitudinii aparente) a asteroidului în functie de timp vom obtine **curba de lumina** sau fragmente de curbe de lumina. Prin cumularea mai multor curbe de lumina individuale se poate obtine o **curba de lumina compusa** (Figura 20). Cea mai mare parte a asteroizilor observati prezinta curbe de lumina cu doua maxime si doua minime. Variatia maxima în cadrul curbei de lumina se numeste **amplitudine**. Amplitudinea curbei de lumina pot varia de la câteva sutimi si câteva zecimi de magnitudine. Pentru câteva exceptii, aceasta variatie poate ajunge pâna la 2,0 magnitudini (cazul asteroidului 1620 Geographos).

Variatia în stralucire a unui asteroid poate fi separata în trei componente:

- variatia în stralucire datorata schimbarii distantei dintre Soare si Pamânt;
- variatia datorata rotatiei proprii a asteroidului ca urmare a modificarii periodice a ariei ce reflecta si/sau a modificarii reflectantei suprafetei asteroidului vizibile dinspre observator;
- variatia datorata modificarii unghiului de faza.

Primul efect poate fi înlaturat usor din datele de observatie brute prin introducerea notiunii de magnitudine redusa. Celelalte doua efecte sunt mai greu de separat iar ambele prezinta interes în studiul perioadei de rotatie proprii, a formei asteroidului si a orientarii axei de rotatie proprii, precum si în studiul dependentei stralucirii în functie de unghiul de faza.

Curba de lumina este datorata exclusiv rotatiei proprii a asteroidului.

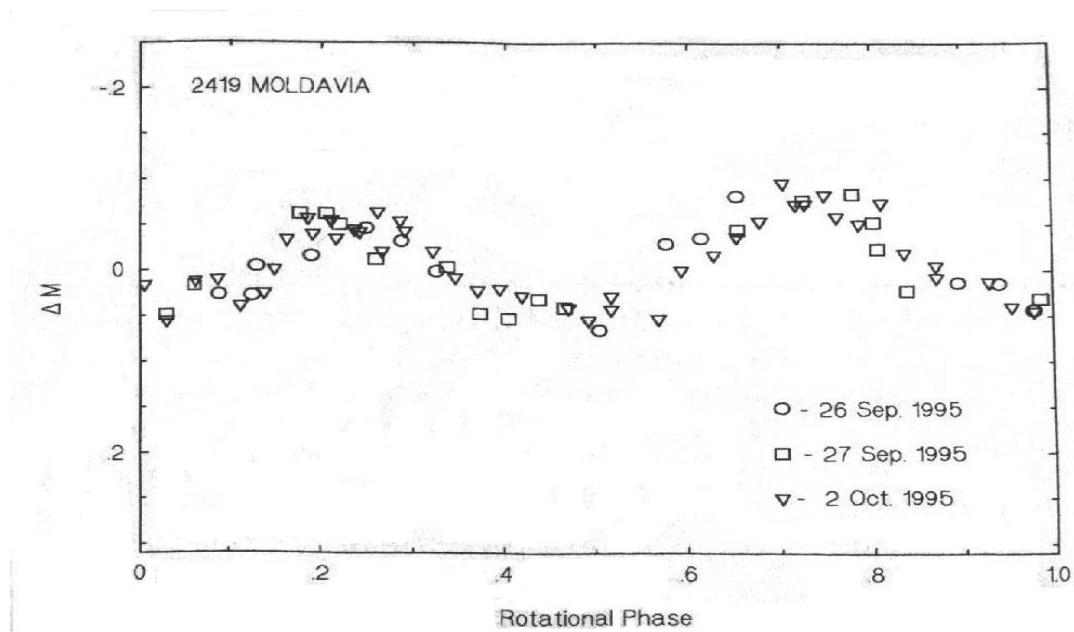


Figure 20. Curba de lumina compusa a asteroidului 2419 Moldavia, estimata în urma observatiilor efectuate de autor la Observatorul din Haute Provence

De asemenea, amplitudinea si profilul curbei de lumina pot fi diferite de la o opozitie la alta pentru acelasi asteroid (Figura 21). Aceasta se explica global prin modificarea aspectului¹⁵ asteroidului de la o opozitie la alta.

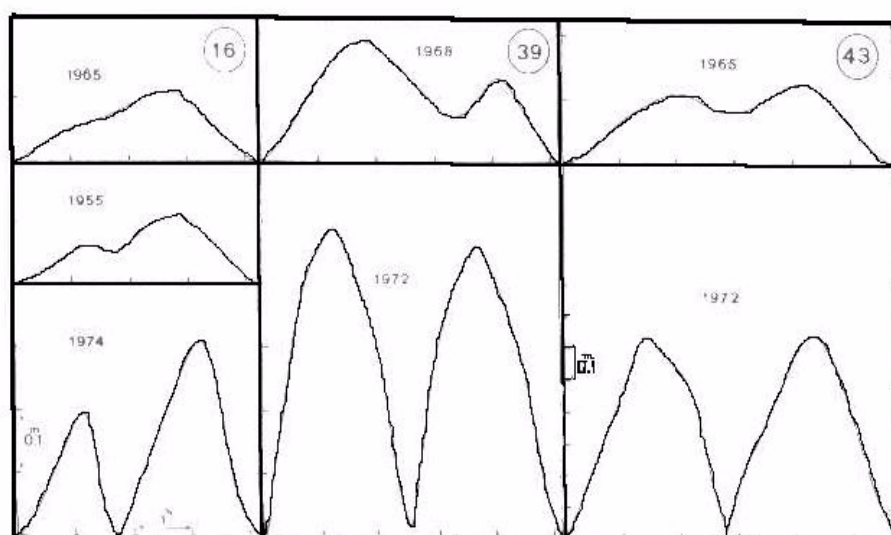


Figure 21. Curbe de lumina ale asteroizilor 16 Psyche, 39 Laetitia si 43 Ariadne obtinute la diverse opozitii (pe abscisa este reprezentat timpul, pe ordonata stralucirea) ; din imagine se poate vedea ca variatia în stralucire difera de la o opozitie la alta.

¹⁵ prin unghi de aspect se noteaza unghiul facut de axa de rotatie proprie a asteroidului cu directia pe care este situat observatorul (directia de vizare)

V.2. Forma si dimensiunile asteroizilor

Pentru a explica în detaliu o curba de lumina în cadrul unui model de asteroid, nu este suficienta luarea în considerare numai a dependentei variației de magnitudine de forma asteroidului și de poziția axei de rotație proprie și trebuie să se țină cont și de posibilele forme de relief, ca și de posibila variație a albedoului de la o regiune la alta a suprafeței asteroidului.

Curba de lumina este un parametru intrinsec fiecărei mici planete. Explicațiile cele mai plauzibile în explicarea acestei variații în strălucire a asteroidului sunt (Figura 22):

- asteroidul nu este sferic ;
- asteroidul prezintă pe suprafața sa regiuni a caror reflectivitate este diferită (diferența de albedo de la o zonă la alta) ;

Să ne imaginăm un asteroid care are forma elipsoidală, care se rotește în jurul unei axe de rotație proprii. În funcție de unghiul pe care-l face axa de rotație cu direcția de vizare, curba de lumina poate avea o amplitudine nulă (nu putem spune nimic despre curba lui de lumina) sau o amplitudine maximă. Această variație este dată de schimbarea suprafeței efective ce reflectă spre observator. În cazul unei înclinări nenule a axei de rotație față de direcția de vizare, curba de lumina va avea două maxime și două minime.

Dacă însă asteroidul este considerat sferic, însă pe suprafața acestuia se află o regiune suficient de întinsă pentru ca influența ei în fluxul de lumina reflectată spre observator să fie sesizabilă, vom întâlni mai multe situații. Astfel, în funcție de unghiul dintre axa de rotație proprie și direcția de vizare, vom putea observa o modificare a strălucirii asteroidului ori de câte ori la fluxul reflectat spre observator va contribui și regiunea de reflectanță diferită (albedo diferit). Curba de lumina la înclinare nenulă a axei de rotație proprii (față de direcția de observație) va avea o singură variație.

Putem conchide deci că amplitudinea curbei de lumina depinde de forma corpului, variațiile de albedo ale suprafeței asteroidului ca și de orientarea axei de rotație proprii.

În mod evident, în practica de observație aceste modele nu se întâlnesc, însă ele permit ajustarea calculelor pe modele mult mai apropiate de realitate.

Pornind de la curbele de lumina putem studia viteza de rotație (spinul), forma asteroidului ca și orientarea polului acestuia.

Prin analiza mai multor curbe de lumina ale aceluiași asteroid putem afla funcția de fază. Aceasta permite formularea de ipoteze privind structura fizică a suprafeței asteroidului.

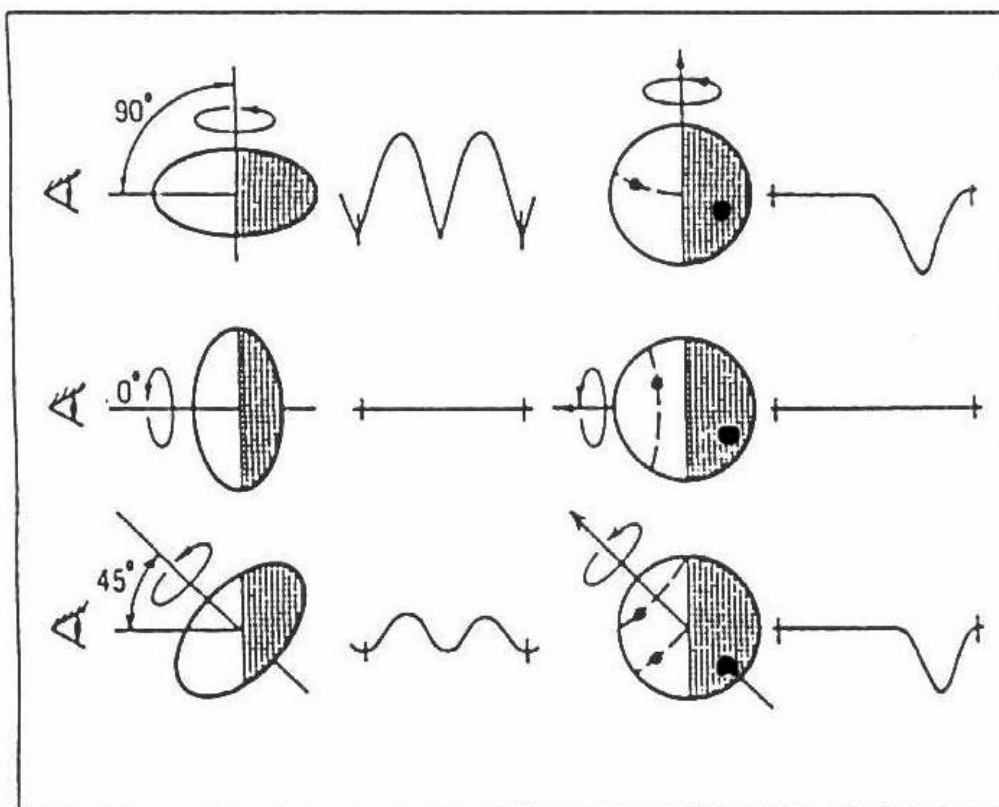


Figure 22. Doua modele de asteroizi ce permit o explicare intuitiva a posibilei variatii a stralucirii asteroizilor

V.3. Albedo ; Reflectanta spectrala

Consideram o suprafata S . Un element de suprafata $d\sigma$ delimitat pe aceasta este plasat în calea unui fascicul de lumina paralela de intensitate L , iar la incidenta normala receptioneaza cantitatea de lumina L . Pentru un unghi de incidenta i , elementul de suprafata va receptiona o cantitate de lumina proportionala cu $L \cdot \cos i \cdot d\sigma$.

Intensitatea luminii reflectate difuzate, la o distanta unitara de suprafata S , va depinde deopotriva de unghiul de vizare ε si de directia azimutala a planului de reflexie. Prin integrarea dupa toate azimuturile, la un unghi de vizare ε fixat, se va obtine o intensitate medie reflectata pe directia ε , proportionala cu L si $d\sigma$ de forma :

$$k \cdot L \cdot d\sigma \cdot f(i, \varepsilon)$$

în care constanta s-a notat k iar $f(i, \varepsilon)$ o functie ce depinde de geometria observatiei.

Albedoul în acceptiunea Lambert (1897) se va obtine prin raportul dintre lumina reflectata (obtinuta prin integrarea dupa toate directiile de vizare din emisfera vizibila) si întreaga cantitate de radiatie incidenta.

$$a' = 2 \cdot \pi \cdot k \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{f(i, \varepsilon)}{\cos i} \right) \cdot \sin \varepsilon \cdot d\varepsilon$$

Acest albedo va fi o functie de unghiul de incidenta i , cu exceptia cazului în care $f(i, \varepsilon) = \cos i \cdot f(\varepsilon)$.

Experimental se constata ca elementele de suprafata nu contribuie cu aceeasi pondere la calculul albedoului. Ponderarea rezultatului în functie de unghiul de incidenta duce la definirea albedoului în acceptiunea lui Seeliger (1888) :

$$a = \int_0^{\frac{\pi}{2}} a' \cdot \sin i \cdot di = 2 \cdot \pi \cdot k \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tan i \cdot di \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(i, \varepsilon) \cdot \sin \varepsilon \cdot d\varepsilon$$

Definitia **albedoului în sensul lui Seeliger** este urmatoarea : « *Un element de suprafata este iluminat succesiv de trenuri de unda în lumina paralela venind din directii aleatoare. Media raporturilor dintre lumina reflectata si lumina incidenta poarta numele **albedo**.* »

O definitie a albedoului mult mai apropiata de cea necesara studiilor astronomice este urmatoarea (Bond, 1861) : « *Fie o sfera **S** aflata în lumina paralela. In aceste conditii, **albedoul** reprezinta raportul dintre întreaga cantitate de radiatie emisa de sfera **S** si întreaga cantitate de radiatie incidenta pe aceasta.* »

Daca r este raza sferei **S** aflata în lumina paralela incidenta de intensitate L , atunci întreaga cantitate de radiatie incidenta pe sfera va fi $\pi \cdot r^2 \cdot L$. Zona pe sfera care este situata între unghiurile de incidenta i si $i+di$ va avea o suprafata efectiva $2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \cos i \cdot \sin i \cdot di$ si va reflecta fractiunea **aa** din lumina incidenta. In acest caz, **albedoul Bond** se va scrie :

$$A = 2 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} a' \cdot \sin i \cdot \cos i \cdot di$$

Albedoul Bond este preferat în astronomie din mai multe considerente :

- reflecta mult mai fidel conditiile concrete de observatie ;
- la explicarea influentei radiatiei solare asupra temperaturii unei planete, acolo unde cantitatea de caldura absorbita de suprafata este determinanta, prin utilizarea albedoului Bond se obtin rezultate mai apropiate de cele experimentale ;
- pentru numeroase corpuri ale Sistemului Solar relatia dintre cantitatea de lumina reflectata în functie de unghiul de faza este cunoscuta iar albedoul Bond poate fi calculat fara a se face ipoteze simplificatoare.

Din aceste considerente, **albedoul Bond** se mai întâlnește în literatura si sub numele **albedo fizic**. (Russell, 1916).

Stralucirea unui asteroid este în strânsa legatura cu geometria sistemului Soare-Pamânt-asteroid (unghiul de faza). Fie $\Phi(\alpha)$ functia de faza. Consideram ca functia de faza are valoarea egala cu unitatea pentru $\alpha = 0$, si pozitiva subunitara în rest. Intreaga cantitate de radiatie electromagnetica reflectata de corpul ceresc va fi proportionala cu valoarea:

$$\int_0^{\pi} \Phi(\alpha) \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha$$

Daca r reprezinta raza medie a discului asteroidului, R distanta asteroid-Soare, M_0 stralucirea aparenta a asteroidului la unghi de faza zero ($\alpha=0$), si Δ distanta asteroid-Pamânt, iar toate distantele sunt masurate în unitati astronomice(u.a.), vom putea scrie fractiunea din cantitatea de radiatie solara ce

cade pe suprafata asteroidului de forma $\frac{r^2}{4R^2}$. Daca asteroidul difuzeaza în toate directiile atunci întreaga cantitate de radiatie emisa de acesta va fi de $M_0 \cdot \Delta^2$ ori mai mare. Prin definitie, albedoul fizic se va putea scrie:

$$A = \frac{R^2 \cdot M_0 \cdot \Delta^2}{r^2} \cdot 2 \int_0^\pi \Phi(\alpha) \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha$$

Prima parte a acestei relatii a albedoului se noteaza **p**, depinde numai de geometria sistemului si se numeste **albedo geometric**:

$$p = \frac{R^2 \cdot M_0 \cdot \Delta^2}{r^2}$$

Daca se noteaza cu σ semi-diametrul unghiular al asteroidului vazut de pe Pamânt, cu s semi-diametrul unghiular al Soarelui vazut de un observator situat pe asteroid si cu S semi-diametrul Soarelui vazut de pe Pamânt, relatia pentru albedoul geometric se poate rescrie :

$$p = \frac{M_0 \cdot \sin^2 S}{\sin^2 \sigma \cdot \sin^2 s} = \frac{M_0 \cdot R^2}{\sin^2 \sigma}$$

Integrala din formula albedoului se noteaza **q** si depinde de functia de faza (implicit si de legea de împrastiere a radiatiei incidente pe suprafata asteroidului):

$$q = 2 \cdot \int_0^\pi \Phi(\alpha) \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha$$

iar relatia dintre **albedoul fizic** si **albedoul geometric** se poate scrie:

$$A = p \cdot q$$

Din expresia albedoului, se constata ca estimarile de albedo depind de cunoasterea functiei de faza precum si de geometria sistemului asteroid-Soare-Pamânt în momentul observatiei.

De asemenea, albedoul unui asteroid poate fi estimat, daca se stabileste o legatura între el si un alt parametru fizic. De exemplu, albedoul obtinut prin prelucrarea datelor IRAS a fost calculat prin scrierea bilantului energetic, în conditiile restrictive impuse de modelul fizic considerat. **Modelul termic standard** are la baza urmatoarele ipoteze simplificatoare :

- asteroidul se considera sferic ;
- asteroidul nu prezinta miscare de rotatie proprie ;
- observatiile sunt presupuse a fi facute la unghi de faza zero ;
- suprafata asteroidului se presupune a fi în echilibru termodinamic cu radiatia incidenta pe aceasta.

Bilantul energetic se va scrie dupa relatia matematica (Tedesco et al. 1992) :

$$\pi \cdot r^2 \cdot (1 - A) \cdot S = \beta \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\pi T^4(\theta, \Phi) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi$$

unde notatiile folosite corespund urmatoarelor marimi fizice:

R - diametrul asteroidului;

A - albedoul Bond (albedoul fizic);

S - fluxul solar la distanta la care se afla asteroidul;

β - constanta de ajustare a temperaturii suprafetei pentru a compensa distributia unghiulara a emisiei termice ;

ε - emisivitatea la lungimea de unda λ ;

σ - constanta Stefan-Boltzmann;

$T(\theta, \phi)$ - temperatura asteroidului la longitudinea θ si latitudinea ϕ .

Albedoul este o marime globala ce caracterizeaza comportamentul unui corp ceresc, iar în practica se încearca luarea în considerare a efectelor pe un interval spectral cât mai larg. Putem face din acest punct de vedere analogia albedoului cu magnitudinea bolometrica. Daca însa ne intereseaza comportamentul asteroidului pe un interval spectral bine determinat, atunci se va utiliza notiunea de **reflectanta spectrala**.

Reflectanta spectrala R este o marime în directa legatura cu indicele de culoare ($i.c.$), conform relatiei matematice :

$$\lg R = \pm 0,4 \cdot i.c.$$

V.4. Perioada de rotatie proprie (spinul) ; Axa de rotatie proprie

Spinul

Daca asociem un asteroid unui elipsoid, atunci putem defini perioada de rotatie proprie - spinul - asteroidului ca fiind intervalul de timp dintre doua maxime (sau doua minime) consecutive ale curbei de lumina.

În general, perioadele de rotatie proprii ale asteroizilor au valori de aproximativ 8,5 ore, asemanatoare cu cele ale marilor planete (Alfven, 1964). Acest lucru se confirma experimental, pentru multi din asteroizii observati, perioadele de rotatie proprii sunt cuprinse între 6 ore si 13 ore. Exista însa si exceptii, cum ar fi asteroii 1566 Icarus, 2419 Moldavia cu un spin de aproximativ 2,5 ore, sau 182 Elsa, cu un spin de 80 ore.

Aceasta dispersie a spinului poate fi interpretata ca fiind rezultatul unei superpozitii a spinului suplimentar, obtinut ca urmare a unor ciocniri mutuale în populatia asteroidala, peste spinul initial al planetesimalelor formate în nebuloasa planetara primordiala, respectiv a compunerii momentului unghiular rezultat în urma ciocnirilor ce au avut loc în centura asteroidala cu momentul unghiular initial rezultat în urma acretiei materiei.

Din unele curbe de lumina se poate presupune existenta asteroizilor dubli (asteroizi binari). Prin asteroizi binari se înțelege un complex de doi asteroizi aflati în contact si care evolueaza împreuna pe aceeasi orbita. Observational, aceasta se manifesta printr-o curba de lumina în care se pot distinge doua perioade de rotatie proprii: o rotatie de scurta perioada suprapusa peste o rotatie de lunga perioada. Acesta este cazul asteroidului 4769 Castalia. Pentru asteroidul 288 Glauke, perioada de rotatie proprie a fost estimata la 2 luni, ceea ce pentru un sistem binar de asteroizi ar putea reprezenta precesia sistemului în jurul axei comune de rotatie. De asemenea, exista modele si ipoteze de lucru care prezic existenta de complexe asteroidale de patru sau mai multe corpuri, neconfirmate pâna acum de observatii.

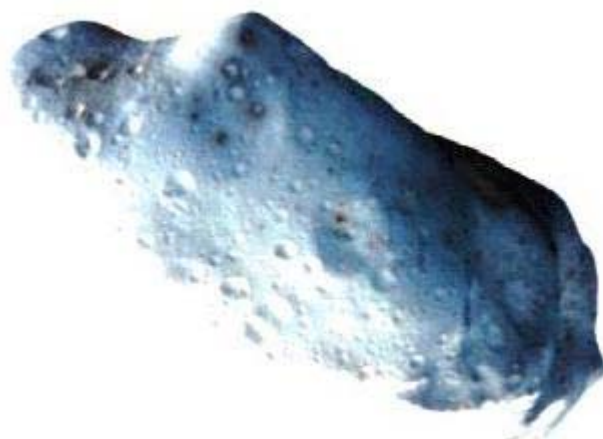


Figure 23. Imaginea obtinuta de sonda spatiala Galileo pentru asteroidului 243 Ida arata ca acesta are un satelit de aproximativ un km diametru. Satelitul fost numit Dactyl. Cu mijloacele de observatie existente pe Pamânt, satelitul lui Ida nu este sesizabil. Oare câte astfel de sisteme exista înca în centura asteroidala

Axa de rotatie proprie

Din familia de curbe de lumina obtinute pentru un asteroid la diverse opozitii, se poate estima pozitia axei de rotatie proprii, sau echivalentul ei, respectiv polul asteroidului. Datele fotometrice au condus la dezvoltarea mai multor metode de calcul. Dintre acestea merita a fi subliniate metoda epocii si metodele analitice.

Metoda epocii sau metoda astrometriei fotometrice, presupune utilizarea diverselor seturi de curbe de lumina obtinute la diverse opozitii (epoci) si analizarea decalajului de timp între momentul teoretic calculat pentru începerea unei curbe de lumina si momentul observat.

Metodele analitice s-au dezvoltat pornind de la o relatie empirica între amplitudinea curbei de lumina si magnitudinea aparenta, iar cu ajutorul unui model de asteroid se calculeaza pozitia polului. O a doua tehnica porneste de la un model de asteroid si, cu ajutorul unei metode de integrare numerica aplicata unui set de date fotometrice, se estimeaza pozitia polului.

Pe lângă aceste metode amintite, fiecare tehnica de observatie (polarimetrica, radar,etc) si-a dezvoltat propriul model si propria metoda de investigare a pozitiei axei de rotatie.

CAPITOLUL VI

FOTOMETRIA CCD A ASTEROIZILOR

Scopul unei observatii fotometrice este acela de a determina stralucirea unui corp ceresc în functie de diversi parametri (lungimea de unda, timpul, pozitia corpului în momentul observatiei). In cazul astrelor, dependenta stralucirii de lungimea de unda este principalul factor de interes; exceptia o constituie cazul în care scopul este stabilirea timpului de variatie a stralucirii obiectului (calculul perioadei de rotatie proprii). Acest scop este acelasi indiferent de tehnica de observatie utilizata : fotometria de apertura sau fotometria CCD.

Deoarece fotometria de apertura este o metoda clasica în astronomie, acest capitol va prezenta tehnica fotometriei CCD cu aplicatie directa la asteroizi.

Masuratorile fotometrice brute depind de parametrii specifici echipamentului cu care se face observatia, de stratul atmosferic pe care lumina îl parcurge în drumul pâna la detector, ca si de spatiul interstelar prin care aceasta trece. Datele brute trebuie prelucrate unitar si de o maniera care sa permita înlaturarea acestor efecte colaterale, nerelevante, artefacte în studiul corpului ceresc.

Daca se utilizeaza filtre de banda medie, termenul generic utilizat este de **masuratoare fotometrica**, iar pentru cazul în care se utilizeaza filtre de banda îngusta se va vorbi despre o masuratoare spectrofotometrica. Toate observatiile efectuate cu sistemul de filtre utilizat vor alcatui un **sistem fotometric**.

In astronomia stelara cel mai des utilizat sistem fotometric este sistemul UBV Johnson. Acesta utilizeaza filtre ce au caracteristicile prezentate în Tabelul 1.

Termenul de banda medie în astronomie se utilizeaza pentru filtrele care prezinta o largime de 10-20% din valoarea lungimii de unda corespunzatoare maximului de transmitanta a filtrului.

Tabelul 1. Sistemul de filtre în sistemul UBV Johnson. In a doua coloana este prezentata lungimea de unda corespunzatoare maximului de sensibilitate iar in coloana a treia largimea filtrului.

Filtru	Maximul de sensibilitate (Å)	Intervalul spectral (Å)
U	3590	470
B	4370	600
V	5500	900

VI.1. Obținerea imaginilor CCD

O campanie de observatie trebuie pregatita în prealabil. In cazul asteroizilor, aceasta etapa de pregatire presupune între altele alegerea obiectelor ce se doreste a fi observate (selectionarea candidatilor), alegerea stelelor standard pentru reducerea masuratorilor la un sistem standard de magnitudini, ca si delimitarea câmpului pe care se face observatia si realizarea hartilor ceresti de cautare.

O noapte de observatie implica nu numai observarea obiectului si a stelelor standard, ci si realizarea de achizitii de imagini care privesc strict detectorul CCD si care sunt esentiale în reducerea observatiilor.

VI.1.1. Alegerea asteroizilor si a stelelor standard

Alegerea obiectelor de observat este o etapa importanta în succesul unei misiuni de observatie. De regula, din populatia asteroidala se aleg obiectele care prezinta o configuratie geometrica favorabila. Acesti asteroizi sunt asteroizii aflati la opozitie, moment la care stralucirea lor este maxima (magnitudine mica). Geometrie favorabila înseamna, de asemenea, ca pozitia pe care o ocupa asteroidul pe sfera cereasca este vizibila din locul de pe suprafata Pamântului unde se afla situat instrumentul de observatie, si ca asteroidul este vizibil noaptea.

Toate aceste situatii se pot decide în urma calculului de efemerida¹⁶.

Stelele standard sunt stele de catalog, a caror magnitudine si indici de culoare sunt bine determinate. Atunci când ne propunem sa studiem fotometric un asteroid, trebuie sa ne asiguram ca stelele standard utilizate au un raspuns spectral apropiat de cel al clasei spectrale din care face parte Soarele (respectiv indicele de culoare *b-v* este superior valorii 0.6 si inferior valorii 0,9 magnitudini).

Cu exceptia precautiilor legate de clasa spectrala a stelelor standard, o alta precautie este aceea ca stelele sa fie vizibile pe perioada observatiei asteroidului si pe toata durata noptii. In practica se vor alege mai multe stele standard, care sa fie observate pe toata perioada campaniei de observatie. Uzual se utilizeaza trei stele standard, alese astfel încât de la începutul si pâna la sfârșitul noptii de observatie stelele standard sa fie observabile atât aproape de zenit (masa de aer apropiata de unitate) cât si aproape de orizont (astfel ca masa de aer sa fie mai mica decât valoarea 2). Stelele standard se aleg astfel ca magnitudinea lor sa fie cât mai apropiata de cea a asteroizilor de studiat.

VI.1.2 Harta de cautare

In general, în pregatirea unei campanii de observatie este important de stiut care este configuratia pe sfera cereasca a zonei unde se afla obiectul. Cum un asteroid aflat în centura principala are o miscare proprie semnificativa în comparatie cu stelele, putem constata ca de la o noapte la alta câmpul stelar pe care trebuie facuta identificarea asteroidului este diferit. De aceea este necesara trasarea în prealabil a hartilor ceresti de cautare a obiectului (Vaduvescu & Birlan, 1996).

In cazul fotometriei de apertura, aceasta etapa premergatoare observatiei se face vizual si este esentiala în derularea campaniei de observatie. Nici în cazul fotometriei CCD etapa realizarii hartilor de cautare nu poate fi complet exclusa, mai ales pentru instrumentele realizate pâna în anii a60 si care nu au fost automatizate si la care punctarea unei zone date pe sfera cereasca, ca si urmarirea acesteia, nu sunt totdeauna evidente.

Pentru un telescop obisnuit (diametru 50-100 cm) în general câmpul acoperit de o camera CCD obisnuita (de exemplu 700x700 pixeli) este mic (de ordinul minutelor sau zecilor de minute de arc). De aceea, în functie de marimea câmpului, în realizarea hartilor de cautare, fie se lucreaza cu stele din catalog (PPM, SAO,

¹⁶ efemerida reprezinta un sir de pozitii pe care asteroidul le va ocupa, pozitii cu atât mai precise cu cât elementele orbitate sunt mai bine cunoscute

Guide-Star, Hyparcos), fie se utilizeaza imagini ale cerului din atlasele existente, peste care se suprapune fragmentul de traiectorie obtinut din calculul de efemerida pentru asteroidul în cauza (deseori se utilizeaza imaginile din atlasul fotografic « Mount Palomar Survey »).

VI.1.3. Identificarea asteroidului în câmpul de observare

Odata realizate etapele premergatoare observatiei, se poate trece la efectuarea observatiei efective. In acest sens, prima etapa o constituie identificarea obiectului de observat pe câmpul stelar. In cazul fotometriei de apertura, aceasta se va face vizual, prin confruntarea hartii de cautare cu configuratia observata în imediata vecinatate a punctului pe ale carui coordonate a fost fixat telescopul. Aceasta etapa este mai lunga sau mai scurta în functie de experienta de lucru a observatorului si de cât de bine vizeaza instrumentul, dar si de magnitudinea obiectului.

In cazul instrumentelor automatizate, care puncteaza bine, procesul de identificare demareaza cu initializarea programului de ghidare automata. Aceasta initalizare se efectueaza la începutul noptii de observatie, folosindu-se stele stralucitoare de catalog. Initializarea din debutul noptii, în mod normal, este suficienta pentru observatiile din tot cursul noptii. Acest proces de initializare a instrumentului, poate fi repetat ori de câte ori experimentatorul constata disfunctionalitati în vizare a telescopului.

Aceeasi confruntare vizuala se poate face în cazul utilizarii unei camere CCD. Daca însa telescopul puncteaza bine iar câmpul acoperit de CCD este suficient de mare, atunci cea mai des utilizata metoda este cea de a se compara doua imagini CCD brute, obtinute la circa 10 minute interval una de cealalta. Intervalul de timp scurs între momentele la care s-au efectuat cele doua imagini este suficient pentru ca asteroidul sa se deplaseze câtiva pixeli în raport cu stelele din câmpul camerei CCD. Daca se vor imprima cele doua imagini si se va face o suprapunere a câmpului de stele, se va stabili imediat care din imagini este asteroidul prin aceea ca imaginile obtinute pentru asteroid sunt decalate.

VI.1.4. Achizitia imaginilor

Achizitia imaginilor este cea mai importanta etapa a unei nopti de observatie. Trebuie sa retinem însa ca achizitia de imagini ce contin asteroidul nu este singura manevra astronomica ce trebuie realizata în decursul unei nopti de observatie. Astfel, pe lângă imaginile ce contin asteroidul, se vor lua imagini necesare reducerii datelor brute si imagini ale stelelor standard.

In vederea reducerii imaginilor brute, trebuie sa realizam operatiuni ce vizeaza eliminarea influentelor induse de camera CCD. O camera CCD contine detectorul propriu-zis (matricea CCD) si un lant electronic de amplificare a semnalului. De aceea, din imaginile brute trebuie înlaturate influentele ce depind de caracteristicile CCD-ului. Vom aplica astfel niste corectii imaginilor brute. Astfel, este necesara realizarea unor harti de sensibilitate a pixelilor (**corectia de flat-field**), si înregistrarea unor imagini ale zgomotului de lectura sau/si ale zgomotului datorat agitatiei termice (**corectia de bias+corectia termica**).

In cazul fotometriei de apertura cu fotometru, tehnica de observatie se compune din înregistrari succesive ale obiectului de studiu, fondului cerului în imediata apropiere a asteroidului (cu precautia ca în apertura sa nu se afle nici o stea

orât de slabă ar fi), după care o înregistrare pe una sau mai multe stele standard. Schematic, acest procedeu se poate exprima astfel :

$$A \rightarrow F \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow A \dots$$

unde cu **A** s-a notat asteroidul, cu **F** fondul cerului iar cu **S₁** și **S₂** stelele standard.

În fotometria CCD procedura este puțin diferită și simplificată. Realizarea de măsuratori diferențiale prin raportarea asteroidului la stele de comparație de pe aceeași imagine CCD mărește consistența observațiilor și permite reorientarea judicioasă în timp util, pe parcursul unei misiuni de observație a timpului afectat candidaților aleși.

Observațiile fotometrice efectuate asupra unui asteroid cu scopul studierii perioadei de rotație proprii presupune o supraveghere sistematică a aceluiași candidat timp de una sau mai multe nopți. Specificul observațiilor fotometrice asupra asteroizilor permite efectuarea de imagini a mai multor asteroizi pe parcursul aceleiași nopți de observație. De aceea, dacă ar fi să reprezentăm schematic secvența caracteristică de observație, aceasta ar fi (pastrând simbolurile anterioare) :

$$A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow \dots$$

Se poate remarca lipsa în lanțul de observații a etapei achiziției informației privind fondul cerului în apropierea obiectului, această informație fiind deja conținută în imaginea cu obiectul de studiu.

Printr-o preprocesare grosieră, în condițiile în care presupunem că o stea de comparație (de pe aceeași imagine CCD cu asteroidul) nu este o stea variabilă¹⁷ prin măsurarea pe imaginea obținută a raportului dintre fluxul asteroidului și fluxul comparației, se poate constata dacă rezultatele sunt consistente sau nu, dacă variația măsurată are un comportament monoton. Dacă valorile obținute nu sunt consistente (variază aleator), atunci se poate schimba tehnica de observație prin focalizarea atenției numai asupra asteroidului în cauză, prin monitorizarea lui permanentă timp de mai multe ore consecutive :

$$A_1 \rightarrow A_1 \rightarrow A_1 \rightarrow \dots$$

Astfel, în cazul în care rezultatele anterioare erau contradictorii, vom avea certitudinea că în cazul în care asteroidul prezintă o variație rapidă a strălucirii (o perioadă de rotație proprie mică) aceasta nu va fi omisă.

VI.2. Tehnica de procesare a imaginilor

Scopul fotometriei cu detector CCD este același ca și cel al fotometriei tradiționale: înregistrarea cât mai fidelă a variațiilor intrinseci de luminosități a unui corp ceresc în unul sau mai multe filtre. Pentru a se atinge acest scop este necesară transformarea imaginilor brute în imagini cu o scară liniară de intensități. Pentru aceasta, din imaginile brute trebuie înlăturate câteva efecte sistematice. Acestea sunt: corecția de offset (corecție aditivă), corecția de flat-field (corecție multiplicativă) și corecția datorată particulelor cosmice.

¹⁷ stea a cărei strălucire (optică sau radio) variază în timp, periodic sau neregulat ; aceste variații pot fi de natură fizică sau geometrică (stele binare sau stele nesferice)

VI.2.1. Corectarea imaginilor brute

Corectia de offset. Tensiunea pozitivă utilizată pentru menținerea fotoelectronilor în gropile de potențial pe durata expunerii (pe durata timpului de integrare) va genera un curent în momentul citirii CCD-ului. De asemenea, agitația termică pentru un semiconductor aflat la temperatura camerei constituie un factor de zgomot în semnalul util venit de la un obiect ceresc.

Zgomotul datorat agitației termice poate fi micșorat dacă CCD-ul va fi răcit, el încetând teoretic în apropiere de zero absolut. În practică însă răcirea camerei CCD la temperatura azotului lichid este deja suficientă. La 80K curentul electric datorat agitației termice din CCD este neglijabil comparativ cu zgomotul de lectură. În acest caz zgomotul de lectură este chiar offset-ul căutat.

Metoda cea mai simplă de măsurare a offset-ului în cazul răcirii cu azot lichid este de a înregistra o imagine cu timp de integrare zero (cu obturatorul mecanic al CCD-ului închis), și apoi scăderea, din imaginea brută de prelucrat a acestei imagini caracteristice offset-ului.

Dacă însă camera CCD lucrează la o temperatură mai mare de 80 K (-20,-40C) - cazul camerei CCD de la instrumentul ecuatorial al Institutului Astronomic al Academiei Române-atunci zgomotul de lectură este practic nesemnificativ curentului datorat agitației termice. În acest caz trebuie să se lucreze cu mai multă precauție. Astfel, se vor realiza așa-numitele hărți termice ale camerei, la diverși timpi de integrare. În vederea realizării acestor hărți termice, se va debransa comanda obturatorului mecanic ; astfel se vor realiza imagini cu diverși timpi de integrare și cu obturatorul închis.

În practică, la începutul și/sau la sfârșitul unei nopți de observație se efectuează un set de imagini de offset ; la prelucrarea imaginilor brute se va lucra cu un offset mediu, prin realizarea unei medii aritmetice a imaginilor de offset obținute pe parcursul acelei serii de observație.

Corectia de flat-field. Într-un CCD fiecare pixel reacționează diferit la radiația electromagnetică. În vederea procesării ulterioare a imaginilor de interes astronomic, este necesară realizarea hărților de sensibilitate a pixelilor CCD-ului atunci când aceștia sunt expuși în mod uniform și simultan la o radiație incidentă. Aceste imagini se numesc imagini de flat-field, sau imagini de plajă de lumină uniformă. În mod teoretic, timpul de integrare-pentru a realiza o hartă cât mai fidelă a pixelilor CCD-ului-ar trebui să fie infinit. Practic, imaginea de flat-field se poate obține prin două metode:

i) flat-field obținut pe o zonă din cer. Înainte de începerea observațiilor, în crepuscul, înaintea apariției stelelor pe cer, se fac expuneri ale unei zone oarecare de pe sfera cerească. Lumină incidentă a sferei cerești va fi difuzată uniform pe fiecare pixel al CCD-ului. Dacă din motive obiective (incidente în luarea imaginilor, modificarea comportamentului camerei CCD pe parcursul unei nopți de observație, etc) un observator este constrâns să înregistreze imagini de flat-field în cursul nopții, el trebuie să caute pe sfera cerească acele zone în care nu există surse de lumină (stele sau obiecte nonstelare).

ii) înainte de observații se face o expunere a CCD-ului cu lumină reflectată de pe un panou alb, situat în interiorul cupolei, și uniform iluminat.

Timpul de integrare pentru obținerea unei imagini de flatfield este ales astfel încât să nu satureze CCD-ul (în principiu 66-70% din dinamica lui). Aceste condiții permit obținerea unei imagini cu un raport semnal / zgomot foarte mare.

Efectul de flat-field fiind multiplicativ, pentru a elimina efectul lui imaginea bruta cu obiectul studiat se va diviza la imaginea de flat-field.

Corectia de particule cosmice. Atunci când se face o expunere în vederea obținerii unei imagini, pe lângă asteroidul de studiu și stelele adiacente din câmpul ales, pe imagine mai apar pixeli aprinși de o manieră aleatoare-dacă se compara două imagini consecutive ale aceluiași câmp stelar. Numarul de fotoelectroni colectați pe acel pixel este mult diferit de numarul de fotoelectroni ai pixelilor ce-l înconjoara. Explicatia acestui fenomen este data de radiatia cosmica ce cade pe matricea CCD. În functie de unghiul sub care aceasta cade pe suprafata matricii CCD, se pot aprinde unul sau mai multi pixeli.

Acest efect este nedorit mai ales în cazul în care pixelul aprin de radiatia cosmica se afla pe aria ce delimiteaza imaginea unei stele sau în imediata ei vecinatate. Pentru a înlătura efectul acesteia, din imaginile brute este necesar să înlocuim valoarea pixelului respectiv cu o valoare medie obtinuta ca media aritmetica a pixelilor vecini. Evident ca aceasta tehnica de « cauterizare » a imaginii nu este ideala, însă elimina acest efect nedorit ce poate fi provocat de radiatia-cauza a aprinderii pixelului. De exemplu, un pixel impresionat de o radiatie cosmica poate fi în aria impresionata de corpul de studiu. Numarul de fotoelectroni contorizati de acesta poate fi mai mare cu unul sau doua ordine de marime decât cel contorizat de pixelii vecini. Dacă el este situat printre pixelii aprinși ce constituie un obiect ceresc, măsurătorile de flux efectuate asupra unei imagini necauterizate au erori sensibil mai mari decât cele efectuate asupra aceluiași obiect însă având aceeași imagine cauterizata.

Dacă notăm cu **I** imaginea bruta obtinuta din observatii, cu **Off** nivelul offset-ului mediu, iar cu **FF** imaginea de plaja de lumina uniforma (flat-field), atunci imaginea finala **IF** se va obtine după relatia:

$$IF = \frac{1}{N} \cdot \frac{I - Off}{FF - Off}$$

unde cu **N** s-a notat o constanta de normalizare aleasa astfel încât operațiile de mai sus să se desfășoare obținându-se o valoare medie unitara pentru un pixel mediu al imaginilor.

Trebuie să precizăm că operația de scădere a imaginilor ca și operația de împărțire se realizează pixel cu pixel, adică se lucrează totdeauna cu informația obținută pe același suport fizic (celula MOS).

VI.2.2. Extinctia atmosferica

Ca și în observatiile fotometrice efectuate asupra stelelor sau obiectelor nonstelare, în vederea obținerii unor valori cât mai exacte, și în cazul asteroizilor se caută minimizarea efectelor ce alterează rezultatele. Extinctia atmosferica este unul dintre ele.

La traversarea atmosferei terestre de către fasciculul de radiație provenita de la un astru, fluxul este parțial absorbit de către atmosfera. Stratul de aer traversat de lumina va produce o diminuare a fluxului luminos al unei stele după o lege de forma:

$$v = v_0 + k_v \cdot X$$

unde cu **v** vom nota magnitudinea observata pe Pamânt în prezenta atmosferei; **v₀** reprezintă magnitudinea care ar fi observata pe Pamânt în absenta

atmosferei; k_v este coeficientul de extincție, iar X este masa de aer (un număr ce reprezintă raportul dintre cantitatea de aer dintr-un tub cilindric, cu generatoarea paralela cu direcția de vizare și cantitatea de aer dintr-un tub cilindric vertical pe locul observației -la zenit- și de aceeași secțiune normală). Masa de aer are valori unitare ($X=1$) pentru un obiect aflat la zenit, și o valoare supraunitară în rest.

Dacă vom nota cu z distanța zenitală, masa de aer X este bine aproximată prin secanta distanței zenitale al asteroidului :

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

unde cu φ s-a notat latitudinea observatorului, δ reprezintă declinația corpului de studiu, iar H reprezintă unghiul orar. Această valoare, deși aproximativă, se încadrează în limita erorilor observaționale, deci este operațională pentru o observație.

În practică, în locul formulei magnitudinii prezentată anterior, se mai utilizează o formulă echivalentă în care se folosesc indicii de culoare. De exemplu, dacă se observă același corp ceresc în două filtre (să spunem filtrele B și V Johnson), indicii de culoare se va scrie:

$$b - v = (b_0 - v_0) + k_{b-v} \cdot X$$

Această nouă expresie prezintă câteva avantaje. Astfel, prin diferența celor două magnitudini se pot înlătura mulți factori de eroare care provin fie din lanțul de amplificare utilizat, fie din lumina parazită care eventual poate apărea în instrumentul optic utilizat (luneta sau telescop). Prin k_{b-v} se notează diferența dintre coeficienții de extincție în filtrele **B** și **V** respectiv. De această dată diferența $b-v$ o putem identifica diferenței dintre magnitudinile instrumentale ale corpului ceresc (de exemplu, dacă detectorul este un fotometru, diferența $b-v$ va fi diferența între două semnale electrice).

Magnitudinea instrumentală $-v-$ a unui corp ceresc este dată de logaritmul numărului de sarcini electrice - N_v - obținute din aria impresionată de fotonii incidenti:

$$v = -2.5 \cdot \lg N_v$$

În general coeficientul de extincție nu este constant și el depinde de domeniul spectral utilizat. Atmosfera terestră absoarbe puternic radiația spre UV și mai puțin pe cea din partea IR a spectrului vizibil. Ca urmare, coeficientul de extincție este diferit în filtrul **B** față de cel din filtrul **V**, diferența k_{b-v} este o cantitate pozitivă (Binzel, 1989).

Coeficientul de extincție mai este influențat și de spectrul stelei observate. De exemplu, dacă o stea emite mai multă radiație în regiunea albastru a spectrului (stea albastră), această stea va suferi o extincție atmosferică diferită de o stea care emite mai mult în zona roșie a spectrului. De aceea, în formula anterioară trebuie introdus un termen suplimentar care să țină cont de caracteristicile intrinseci ale stelei, termen care să fie proporțional cu $(b_0 - v_0)$, ceea ce reprezintă o aproximare de ordinul doi în estimarea magnitudinii. Introducerea noii considerații îmbunătățește rezultatele, iar aproximarea este suficientă pentru o precizie de până la 0,001 magnitudini.

Dacă vom lua în considerare și dinamica stratului de aer parcurs de radiație, atunci coeficienții de extincție vor putea fi scrși ca funcții temporale:

$$k_v = \sum_{i=0}^n E_i \cdot (t - t_0)^i + (b_0 - v_0) \cdot k_v''$$

$$k_{b-v} = F_0 + (b_0 - v_0) \cdot k_{b-v}''$$

în care notațiile au următoarele semnificații:

- E_0 , F_0 reprezinta partea constanta a coeficientului de extinctie, respectiv a diferentei dintre coeficientii de extinctie;
- k_{b-v} este diferenta dintre coeficientii de extinctie de ordinul doi;
- E_i ($i=1, \dots, n$) coeficientii unei serii de puteri a timpului.

Aceasta dezvoltare separa componentele extinctiei : componenta extinctiei care variaza în timp este presupusa independenta de culoare, iar componenta ce depinde de culoare (F_0 , k^{aa}_v , k^{aa}_{b-v}) nu este functie de timp. Justificarea fizica rezulta din faptul ca dependenta esentiala a culorii data de dispersia Rayleigh pe moleculele atmosferei este constanta. In cazul în care consideram extinctia constanta, se pot calcula rapid, printr-o regresie coeficientii k_{b-v} si b_0-v_0 , si afla v_0 si k_v . Daca se considera cazul unei extinctii variabile în timp, v_0 si $k_v(t)$ nu pot fi calculate pornind numai de la observatiile efectuate asupra unei singure stele. Problema se va rezuma la a observa cel putin doua stele în cursul noptii. Sa consideram doua stele pe sfera cereasca, la doua pozitii diferite. Daca la un moment dat, radiatia provenita de la ele parcurge mase de aer egale (aceeasi înaltime deasupra orizontului), atunci extinctia atmosferica este aceeași pentru amândoua. In acest caz diferenta de magnitudini este cea adevarata $v_{01}-v_{02}$. Atunci, pentru orice moment anterior sau ulterior, coeficientul de extinctie se va scrie :

$$k_v = \frac{(v_1 - v_2) - (v_{01} - v_{02})}{X_1 - X_2}$$

Pentru reducerea unor observatii fotometrice de asteroizi se utilizeaza doua grupuri de stele, denumite dupa functia fiecaruia:

- grupul stelelor de comparatie;
- grupul stelelor standard.

Stelele de comparatie se aleg dintre stelele care se afla pe aceeași imagine CCD cu asteroidul. Se cauta ca magnitudinea lor sa fie apropiata de cea a asteroidului si sa fie prezente în toate imaginile obtinute în acea noapte. Asupra lor se fac masuratori pentru a se evidentia daca avem de-a face cu o variatie intrinseca a acestora (stele variabile). Ideal ar fi ca steaua de comparatie sa aiba si acelasi tip spectral cu cel al Soarelui, însa acest lucru nu este usor pentru asteroizi de magnitudini 13-16, deoarece de cele mai multe ori stelele de comparatie nu sunt stele de catalog (nu au determinate pozitia si tipul spectral). Tot stelele de comparatie pot fi utilizate ulterior pentru verificarea coeficientului de extinctie al noptii si în unele cazuri chiar la calculul coeficientului de extinctie al noptii de observatie. Motivul principal al utilizarii lor îl constituie numarul mare de imagini pe care le obtinem asupra acestor stele în decursul unei nopti de observatie (egal cu numarul de imagini obtinute asupra asteroidului).

Stelele standard servesc la calculul coeficientului de extinctie atmosferica si la reducerea observatiilor asteroidului la un sistem standard de magnitudini.

VI.2.3. Reducerea la un sistem standard de magnitudini

Realizarea unei etalonari în astronomie reprezinta totdeauna o problema delicata. Pentru a putea face o standardizare a datelor, trebuie sa definim, sau sa avem definite, un numar de stele ale caror proprietati sunt bine cunoscute si care se potrivesc problematicii abordate. Din aceasta cauza spunem ca determinarile din observatii sunt **masuratori** relative sau **diferentiale**. In cazul observatiei fotometrice a asteroizilor, acestia vor fi comparati cu stelele din vecinatatea lor. Daca pentru reducerea observatiilor CCD de asteroizi, pentru comparatie vom utiliza stele de pe

aceeasi imagine, atunci vom putea calcula o magnitudine diferentiala care este egala cu diferenta dintre cele doua magnitudini instrumentale, ale asteroidului, respectiv a stelei de comparatie. In absenta atmosferei terestre aceasta magnitudine diferentiala se va scrie:

$$\delta v = v_a - v_c - k_{va} \cdot X_a + k_{vc} \cdot X_c$$

în care indicii **a** si **c** sunt referitori la asteroid si la steaua de comparatie.

Daca vom considera cazul cel mai simplu, în care coeficientul de extinctie k_v nu depinde de culoare si de timp, atunci $k_{va}=k_{vc}$ si corectia de extinctie depinde numai de masa de aer dintre asteroid si steaua de comparatie. Pentru o stea de comparatie aflata pe aceeaasi imagine CCD cu asteroidul, cele doua mase de aer sunt practic egale, iar în ipoteza coeficientului de extinctie nedepinzând de culoare, magnitudinea diferentiala se poate scrie:

$$\delta v = v_a - v_c$$

Pentru a putea utiliza concomitent diversele observatii efectuate la diverse epoci (de la diferite opozitii) si pentru a le putea compara între ele, este nevoie de transformarea acestor magnitudini diferentiale si deci aducerea lor la o scara de magnitudini standard. Trecerea la un sistem standard de magnitudini se va face prin intermediul stelelor standard, de magnitudine bine cunoscuta. Printr-o transformare liniara simpla a magnitudinilor instrumentale (v_0 , b_0) acestea se pot raporta la un sistem absolut (**B**, **V**):

$$V = v_0 + \varepsilon \cdot (b_0 - v_0) + \zeta_v$$

$$(B - V) = \mu \cdot (b_0 - v_0) + \zeta_{b-v}$$

în care constantele de transformare ε , μ , ζ_v , ζ_{b-v} se vor calcula prin intermediul valorilor masurate ale magnitudinii **v** si indicelui de culoare (**b-v**) masurati si a valorilor tabelate ale lui **V** si (**B-V**) pentru stelele standard.

Conversia magnitudinii unui asteroid din sistemul instrumental în cel al unui sistem standard (**V_a**) se face prin relatia (Harris & Lupishko, 1989):

$$V_a = \delta v - (t - t_0) \cdot \frac{\delta m}{\delta t} + v_c - 5 \cdot \log_{10} r \cdot \Delta + \zeta_v + \varepsilon \cdot (b_0 - v_0)_a$$

unde s-au folosit urmatoarele notatii :

δv - reprezinta magnitudinea diferentiala;

t - timpul la momentul observatiei (U.T.);

t₀ - momentul de timp ales ca origine;

$\frac{\delta m}{\delta t}$ - reprezinta diferenta magnitudinii de la o noapte la alta si prevazuta de

calculul de efemerida; întregul termen va da corectia magnitudinii pentru modificarea geometriei sistemului (distanța si faza);

v_c - magnitudinea instrumentala a stelei de comparatie;

termenul logaritmic reprezinta termenul de aducere - ipotetica - a asteroidului la o distanta de 1 u.a. fata de Soare si 1 u.a. fata de Pamânt, iar ultimii doi termeni reprezinta trecerea de la sistemul magnitudinilor instrumentale la cel al magnitudinilor standard.

VI.3. Curba de lumina compusa ; Perioada de rotatie proprie

În cea mai mare parte a cazurilor, în cadrul unei singure nopți de observatie nu este posibilă acoperirea cu observatii a unei întregi perioade de rotatie proprii. Chiar dacă acest lucru este posibil, efectuarea de observatii suplimentare într-o alta noapte de observatie nu face decât să întărească certitudinea privind spinul asteroidului.

Deoarece variatia luminozitatii asteroidului (atunci când aceasta variatie exista) este aproape periodică, putem suprapune observatiile mai multor nopți succesive de observatie și construi o **curba de lumina compusa**. Acest lucru se poate realiza într-o manieră eficientă printr-o procedură de fitare (ajustare) folosind seriile Fourier (Harris et al. 1989).

Astfel, curba de lumina o putem exprima ca fiind seria :

$$V(\alpha, t) = \overline{V(\alpha)} + \sum_{l=1}^n \left[A_l \cdot \sin \frac{2\pi \cdot l}{P} \cdot (t - t_0) + B_l \cdot \cos \frac{2\pi \cdot l}{P} \cdot (t - t_0) \right]$$

unde s-au utilizat următoarele notații :

$V(\alpha, t)$ - mărimea redusă pentru unghiul de fază α și momentul t ;

$\overline{V(\alpha)}$ - mărimea medie la unghiul de fază α ;

A_l ; B_l - coeficienții Fourier ai seriei ;

P - **perioada de rotatie proprie** :

t_0 - o origine a timpului arbitrar aleasă, cât mai aproape de mijlocul intervalului de observatie considerat.

Prin metoda celor mai mici pătrate, pentru o valoare fixată a perioadei P și a lui n , această funcție poate fi fitată.

În practică, vom căuta să determinăm ordinul n și perioada (sau perioadele) P , ca și gradul de incertitudine în estimarea perioadei alese. În unele cazuri soluția nu este unică. Neunicitatea soluției are două cauze majore :

- setul de date analizat este limitat în timp ;
- amplitudinea curbei de lumina este mică și mult prea înecată în zgomot pentru a putea face o estimare precisă a perioadei.

În procedeul sus-mentionat facem « *a priori* » presupunerea că pe durata observațiilor curba de lumina nu schimbă formă. În practică, profilul curbei de lumina poate să se schimbe lent, din cauza schimbării unghiului de aspect și a unghiului de fază.

În general, pentru a se stabili curba de lumina compusă și a se calcula perioada de rotatie proprie, se utilizează observațiile efectuate asupra unui asteroid în decursul unei misiuni de observatie (un interval temporal de 1 - 10 zile).

CAPITOLUL VII

REZULTATE OBSERVATIONALE

În campaniile de observatii asteroizii alesi spre a fi observati au fost alesi conform urmatoarelor criterii :

- I. în scopul maririi cunostintelor despre populatia asteroidala, am urmarit acele corpuri care nu au mai fost observate pâna acum, sau acele corpuri pentru care, în ciuda faptului ca au fost monitorizate, nu s-au putut trage concluzii privind curba lor de lumina si perioada de rotatie proprie ;
- II. printre obiectele observate, un interes aparte l-am acordat asteroizilor posibili candidati spre a fi observati cu instrumentele viitoarei misiuni spatiale ROSETTA ;
- III. un inters aparte a fost acordat asteroizilor cu diametru mai mic de 50 km, în scopul maririi cunostintelor despre aceasta categorie de corpuri care prezinta o diversitate a distributiei perioadelor lor de rotatie proprii, cu posibilele conotatii cosmogonice ce le-ar putea aduce ;
- IV. o alta categorie de asteroizi ce a fost în atentia observatorilor au fost asteroizii a caror perioada de rotatie proprie, presupusa lunga (perioada de rotatie proprie mai mare de 10 ore), dar care nu au fost rezolvati desi au fost monitorizati anterior de alti cercetatori.

Prin prisma acestor criterii, am observat un numar de 21 asteroizi. Dintre acestia, 19 asteroizi au diametrul estimat sub 50 km . Sase asteroizi dintre cei observati erau presupusi anterior ca având perioada de rotatie proprie lunga si complexa. Printre cei 21 asteroizi observati, 6 dintre ei sunt posibile obiecte de studiu ale misiunii spatiale ROSETTA.

VII.1. Campanii de observatie

Observatiile au fost efectuate pe parcursul mai multor campanii. Aceste campanii s-au defasurat într-un interval de 3 ani dupa cum urmeaza :

- 20 ianuarie - 1 februarie 1995 campanie la Observatorul din Pic du Midi, Franta ;
- 22 septembrie - 7 octombrie 1995 campanie la Observatorul din Haute Provence, Franta ;
- 5 - 26 iulie 1996 campanie la Observatorul European din Emisfera Australa, La Silla, Chile.

În cursul campaniilor s-a utilizat urmatorul echipament de observare:

Observatorul de la Pic du Midi, Pirinei, Franta :

Telescop Cassegrain cu diametrul oglinzii principale de 100 cm ;
 Camera CCD Thompson 7863, 384x288 pixeli, racita cu aer lichid ;
 Program de achizitie a imaginilor : ZAP ;
 Filtru utilizat : V Johnson.

Observatorul din Haute Provence, Franta :

Telescop Newton cu diametrul oglinzii principale de 120 cm ;
 Camera CCD Tektronix TK 512, 512 x 512 pixeli, racita cu aer lichid ;
 Program de achizitie a imaginilor : IHAP ;
 Filtru utilizat : V Johnson.

Observatorul European din Emisfera Australa, La Silla, Chile :

Telescopul Newton ESO50 cu diametrul oglinzii principale de 50 cm ;
 Fotometru EMI 9789QB ;
 Programul pentru achizitia datelor este propriu instrumentului ;
 Filtru utilizat : V Cousins ($\lambda=5227\text{\AA}$; $\Delta\lambda=1040\text{\AA}$).

Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla, Chile :

Telescopul DUTCH, cu diametrul oglinzii principale de 92 cm ;
 Camera CCD TEK, 512x512 pixeli, racita cu aer lichid ;
 Program de achizitie a imaginilor : MIDAS ;
 Filtru utilizat : V Bessel ($\lambda=5442\text{\AA}$, $\Delta\lambda=1171\text{\AA}$).

Campaniile de observatie au fost pregatite în prealabil prin alegerea candidatilor functie de perioada lor optima de observatie, de pozitia observatorului pe suprafata Pamântului si de limitele de accesibilitate impuse de instrument. Ori de câte ori a fost necesar, s-au întocmit harti de cautare a asteroidului. Stelele standard au fost alese dintre stele cu proprietati spectrale asemanatoare Soarelui. Sursa a constituit-o catalogul lui Landolt (Landolt, 1983) .

Pentru procesarea imaginilor CCD s-au utilizat mai multe pachete de programe. Dintre acestea cele mai des utilizate au fost pachetele de programe ASTROL si MIDAS.

O noapte de observatie din cadrul unei campanii pentru determinari de curbe de lumina pentru asteroizi necesita un volum de munca remarcabil. Atunci când vremea este favorabila, timpul de lucru efectiv în cursul unei nopti este cuprins între 8 si 12 ore, în functie de anotimp. In termen de imagini acest lucru înseamna între 120 si 180 imagini achizitionate pe fiecare noapte. Dupa o saptamâna de observatii, volumul imaginilor achizitionate se apropie de 1 000 ceea ce înseamna între 100 si 500 Mb de informatie care trebuie procesata ulterior.

Intre cele trei campanii de observatie efectuate, campania de la Pic du Midi a fost cea mai putin fructuoasa. In afara câstigului reprezentat de initierea în manipularea telescopului, a camerei CCD si a pachetului de programe de achizitie, vremea nefavorabila nu a permis efectuarea programului de observatie. La polul opus, campania de observatie cea mai fructuoasa a fost cea de la Observatorul European din Emisfera Australa din La Silla, Chile : din 12 nopti de observatie aprobate, 11 nopti au putut fi integral folosite pentru observatii.

O prezentare asteroizilor observati este facuta în Tabelul 1.

1995 09 26	03 28 29.5	+10 37.8	52.4	-8.0	3.058	2.320	14.63	10.35
1995 09 27	03 28 21.4	+10 32.9	52.4	-8.0	3.058	2.310	14.41	10.35
1995 09 28	03 28 12.0	+10 27.8	52.3	-8.1	3.059	2.300	14.18	--
1995 09 29	03 28 01.2	+10 22.7	52.2	-8.2	3.059	2.290	13.94	--

2209 Tianjin

1996 07 24	18 13 11.6	-20 32 40	272.4	+2.8	2.960	2.026	9.40	
1996 07 25	18 12 34.0	-20 33 55	272.2	+2.8	2.959	2.033	9.74	

2419 Moldavia

1995 09 26	01 17 05.9	+03 09.5	18.9	-4.6	2.168	1.190	7.81	11.50
1995 09 27	01 16 22.4	+03 00.4	18.7	-4.6	2.168	1.186	7.30	11.49
1995 10 02	01 12 30.1	+02 14.1	17.5	-5.0	2.163	1.171	4.81	--

2446 Lunacharsky

1996 07 11	22 03 09.4	-18 03 55	325.8	-5.7	2.030	1.129	17.92	
1996 07 12	22 02 51.6	-18 06 44	325.7	-5.7	2.031	1.124	17.48	

2703 Rodari

1996 07 23	23 34 54.8	-12 51 38	348.4	-9.3	2.227	1.428	20.25	
1996 07 24	23 34 51.8	-12 55 03	348.4	-9.3	2.228	1.420	19.93	

2921 Sophocles

1995 10 01	00 15 52.8	+00 17.2	3.7	-1.3	2.773	1.773	1.40	11.17
1995 10 02	00 15 10.2	+00 12.2	3.5	-1.3	2.774	1.775	1.80	--

2950 Rousseau

1996 07 24	18 17 47.5	-21 07 30	273.4	+2.2	3.005	2.066	8.93	
1996 07 25	18 17 02.7	-21 10 43	273.3	+2.2	3.003	2.070	9.27	

3247 DiMartino

1995 09 28	01 15 04.5	+04 21.8	18.9	-3.3	2.680	1.698	5.50	--
1995 09 29	01 14 10.9	+04 17.2	18.7	-3.3	2.679	1.695	5.07	--
1995 09 30	01 13 16.5	+04 12.6	18.5	-3.2	2.679	1.693	4.64	10.96

3623 Chaplin

1995 10 01	23 12 23.0	-09 25.5	345.3	-3.9	2.615	1.661	8.37	10.43
1995 10 02	23 11 45.9	-09 29.3	345.2	-3.9	2.615	1.667	8.77	--

3776 Vartiovuori

1996 07 11	18 08 18.1	-57 10 11	270.4	-33.7	3.128	2.260	11.43	
1996 07 12	18 07 03.2	-57 10 13	270.4	-33.7	3.128	2.265	11.56	

3986 Rozhkovskij

1995 09 26	22 46 25.0	+01 05.7	343.4	+8.2	2.231	1.265	9.13	10.93
1995 09 27	22 45 35.9	+01 00.0	343.2	+8.2	2.230	1.268	9.60	10.93

4258 Ryazanov

1996 07 11	14 50 02.6	-16 21 39	224.3	-0.0	2.956	2.365	18.01
1996 07 12	14 50 12.8	-16 23 26	224.3	-0.0	2.955	2.377	18.15

5046 1981 DQ

1995 09 28	22 47 47.9	+10 03.2	347.3	+16.3	2.478	1.527	9.28	--
1995 09 29	22 47 12.7	+09 52.6	347.1	+16.2	2.478	1.530	9.57	--
1995 09 30	22 46 38.6	+09 41.9	346.9	+16.1	2.477	1.533	9.88	11.35

5224 Abbe

1996 07 24	15 03 29.1	-27 57 45	230.6	-10.2	2.265	1.712	24.99
1996 07 25	15 04 14.2	-27 57 16	230.8	-10.1	2.265	1.723	25.12

Intrucât criteriile prezentate la începutul capitolului au primat în alegerea corpurilor de studiu, curbele de lumina compuse obținute vor fi prezentate în subcapitole distincte.

Pentru fiecare asteroid în parte s-au aplicat procedurile standard pentru estimarea curbei de lumina compuse, a perioadei de rotație proprii și a amplitudinii curbei de lumina. Pentru fiecare curba de lumina se va face o succintă prezentare.

VII.2. Observatii de asteroizi cu diametru mai mic de 50 km

Acești asteroizi ocupa cea mai mare pondere în grupul de asteroizi studiați.

440 Theodora a fost observat două nopți în 24 și 25 iulie 1996 în Chile. În Figura 24 este prezentată curba de lumina compusă obținută în urma celor două nopți de observație. Perioada de rotație proprie a fost estimată la $4,828 \pm 0,004$ ore iar amplitudinea curbei de lumina la $0,43 \pm 0,03$ magnitudini.

727 Nipponia a fost observat timp de 4 nopți în 9, 20, 22 și 23 iulie 1996 la Observatorul European din Emisfera Sudică din Chile. În Figura 25 este prezentată curba de lumina compusă. Perioada de rotație proprie a fost estimată la $4,6 \pm 0,1$ ore. Amplitudinea curbei de lumina este $0,14 \pm 0,02$ magnitudini.

888 Parysatis a fost observat timp de trei nopți în 20, 22 și 23 iulie 1996. În Figura 26 este prezentată curba de lumina compusă ca rezultat al observațiilor efectuate pe parcursul celor trei nopți. Perioada de rotație proprie a fost estimată la $5,49 \pm 0,01$ ore. Amplitudinea curbei de lumina este de aproximativ $0,23 \pm 0,02$ magnitudini.

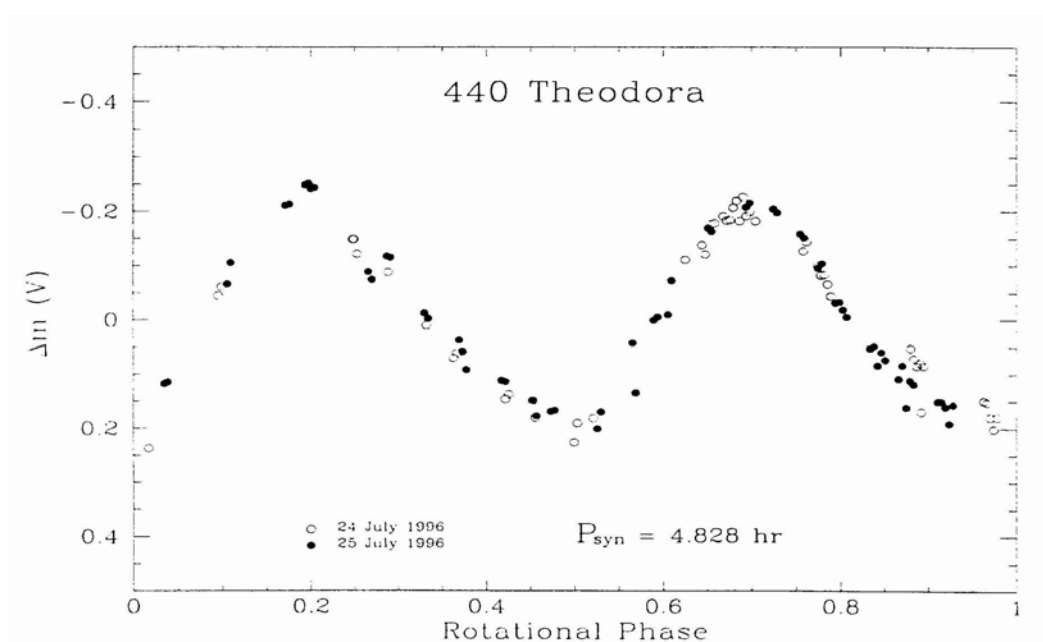


Figure 24. Curba de lumina compusa a asteroidului 440 Theodora, care a fost obtinuta prin prelucrarea observatiilor facute la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

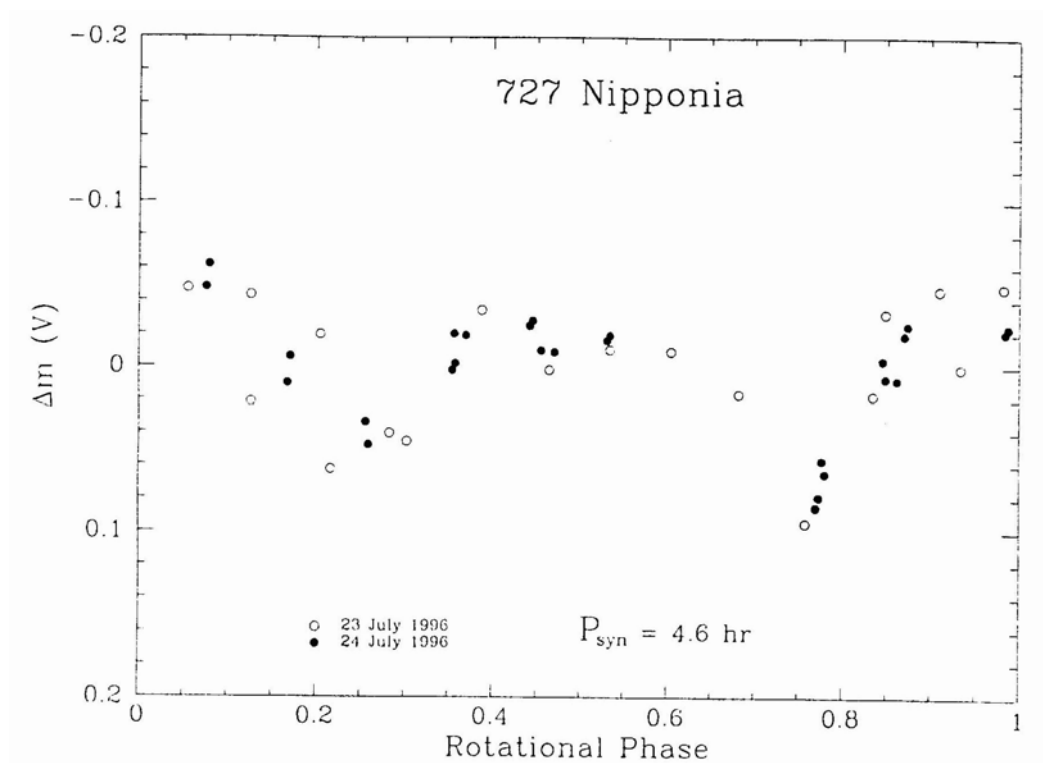


Figure 25. Curba de lumina compusa a asteroidului 727 Nipponia, care a fost obtinuta prin prelucrarea observatiilor facute la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

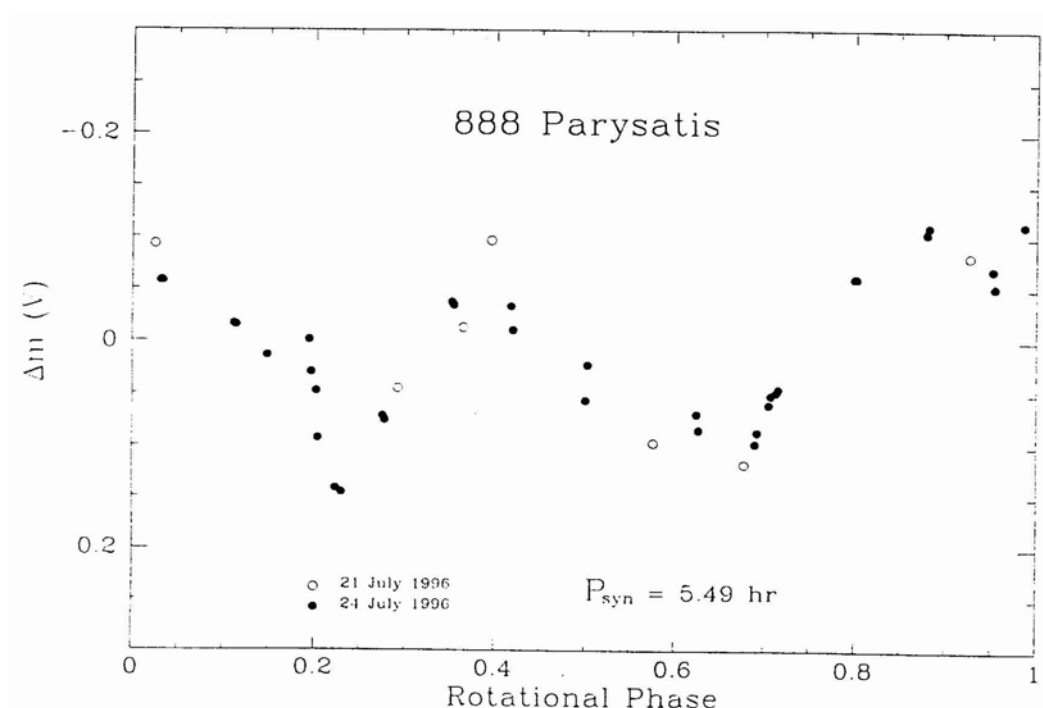


Figure 26. Curba de lumina compusa a asteroidului 888 Parysatis, care a fost obtinuta prin prelucrarea observatiilor facute la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

2209 Tianjin a fost observat timp de doua nopti în 24 si 25 iulie 1996. In Figura 27 este prezentata curba de lumina compusa. Perioada de rotatie proprie este estimata la $9,47 \pm 0,01$ ore. Amplitudinea curbei de lumina este $0,42 \pm 0,03$ magnitudini.

2419 Moldavia a fost descoperit în 1974 la Nauchnyj de catre N.S. Chernykh, numele fiindu-i atribuit de la fosta R.S.S. Moldoveneasca. Diametrul estimat este 7,28 km. Acest asteroid a fost observat timp de 3 nopti, în 26, 27 septembrie si 2 octombrie 1995 la Observatorul din Haute-Provence. In urma reducerii datelor de observatie din primele doua nopti este dificil de estimat comportamentul acestui asteroid. De aceea în cea de-a treia noapte s-a efectuat o supraveghere sistematica (Birlan, 1996). Asteroidul 2419 Moldavia se dovedeste a fi un asteroid cu o perioada de rotatie foarte scurta. Perioada de rotatie proprie este $2,412 \pm 0,003$ ore iar amplitudinea curbei de lumina este 0,14 magnitudini (Figura 28).

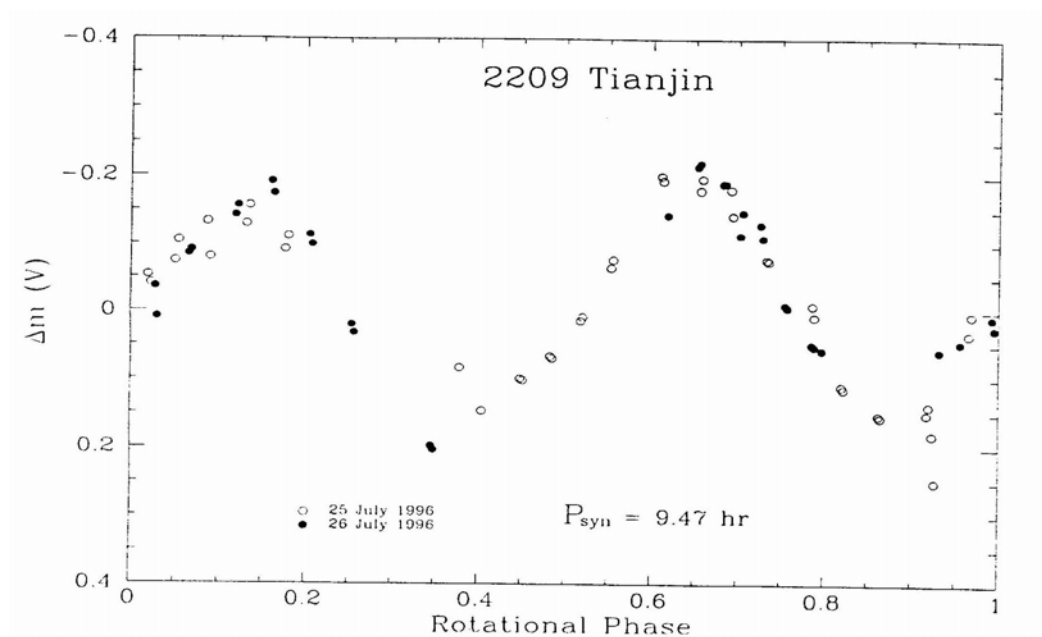


Figure 27. Curba de lumina compusa a asteroidului 2209 Tianjin, care a fost obtinuta prin prelucrarea observatiilor facute la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

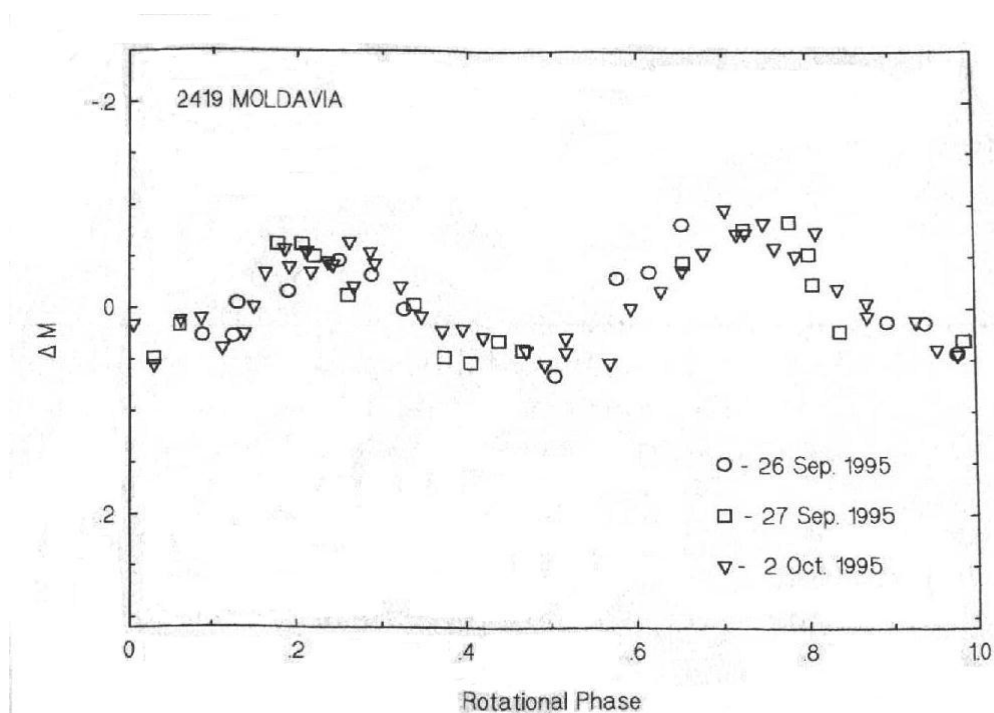


Figura 28. Curba de lumina compusa a asteroidului 2419 Moldavia, care a fost obtinuta prin prelucrarea observatiilor facute la Observatorul din Haute Provence. Faza rotational zero corespunde datei de 2 octombrie 1995, 0,205 h T.U.

2921 Sophocles este un asteroid de talie mica - diametrul lui este estimat la 8,36 km. Acesta a fost observat în noptile de 1 si 2 octombrie 1995 la Observatorul din Haute-Provence. Reducerea datelor conduce la obtinerea unei curbe de lumina compuse, cu o perioada de rotatie de $4,778 \pm 0,005$ ore, putin asimetrica, si cu amplitudine de 0,16 magnitudini (Figura 29).

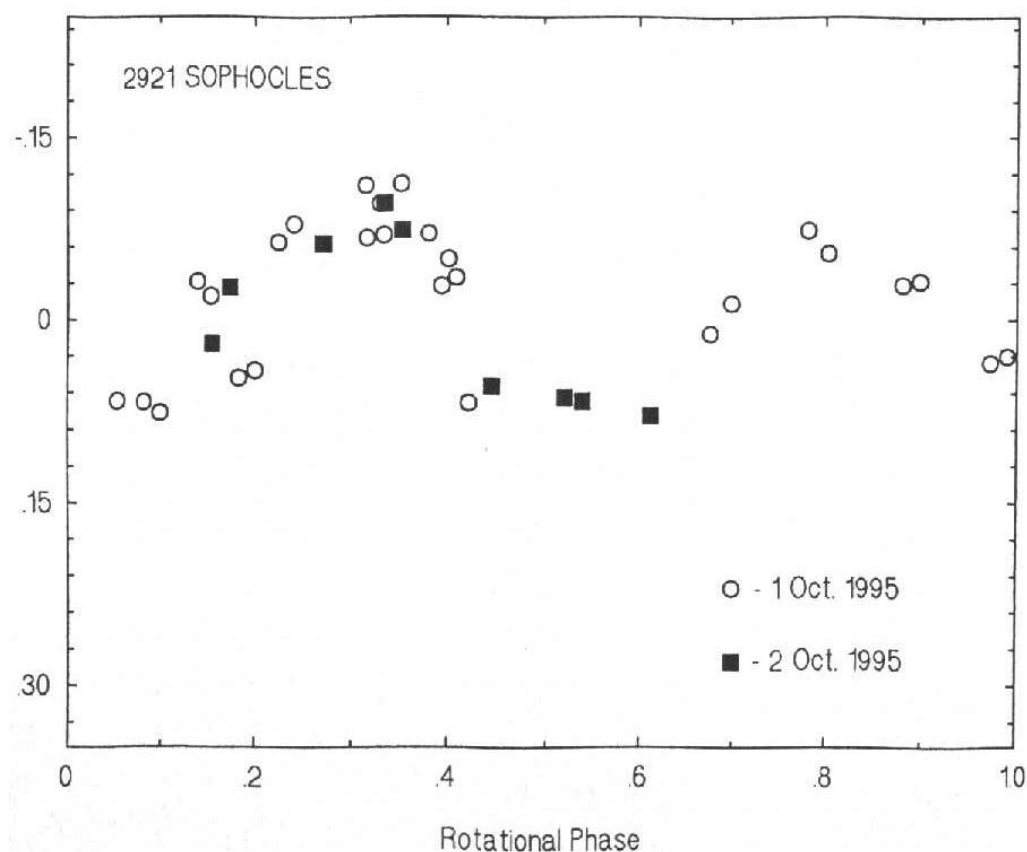


Figura 29. Curba de lumina compusa a asteroidului 2921 Sophocles, care a fost obtinuta în urma observatiilor facute la Observatorul din Haute Provence. Faza rotatională zero corespunde momentului 1 octombrie 1995, 0,279 T.U.

3247 DiMartino are estimat diametrul la 17,7 km. El a fost observat timp de trei nopți în 28, 29 și 30 septembrie 1995 la Observatorul din Haute-Provence. Din reducerea observatiilor s-a obtinut o curba de lumina compusa cu o perioada de $5,445 \pm 0,006$ ore și cu o amplitudine de 0,51 magnitudini (Figura 30).

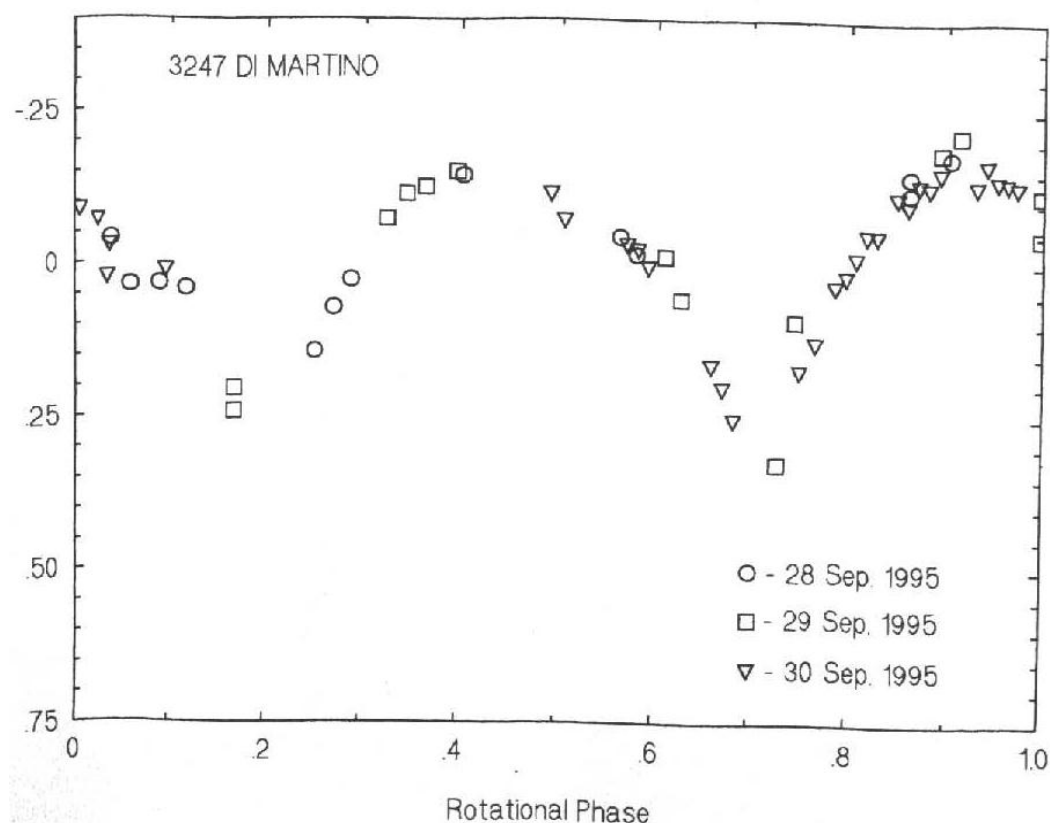


Figura 30. Curba de lumina compusa a asteroidului 3247 DiMartino, care a fost obtinuta la Observatorul din Haute Provence. Faza rotatională zero corespunde momentului 28 septembrie 1995, 2,239 h T.U.

3623 Chaplin este un asteroid cu diametrul estimat la 13,9 km. S-au efectuat observatii ale acestui obiect în 1 si 2 octombrie 1995 la Observatorul din Haute-Provence. Din reducerea datelor a rezultat o curba de lumina compusa cu o amplitudine de 0,97 magnitudini (Figura 31). Perioada de rotatie proprie a fost estimata la $8,361 \pm 0,005$ ore.

3776 Vartiovuori a fost observat în Chile în noptile de 11 si 12 iulie 1996. Curba de lumina compusa este prezentata în Figura 32. Perioada de rotatie proprie a fost estimata la $7,7 \pm 0,1$ ore. Amplitudinea curbei de lumina este de $0,12 \pm 0,02$ magnitudini.

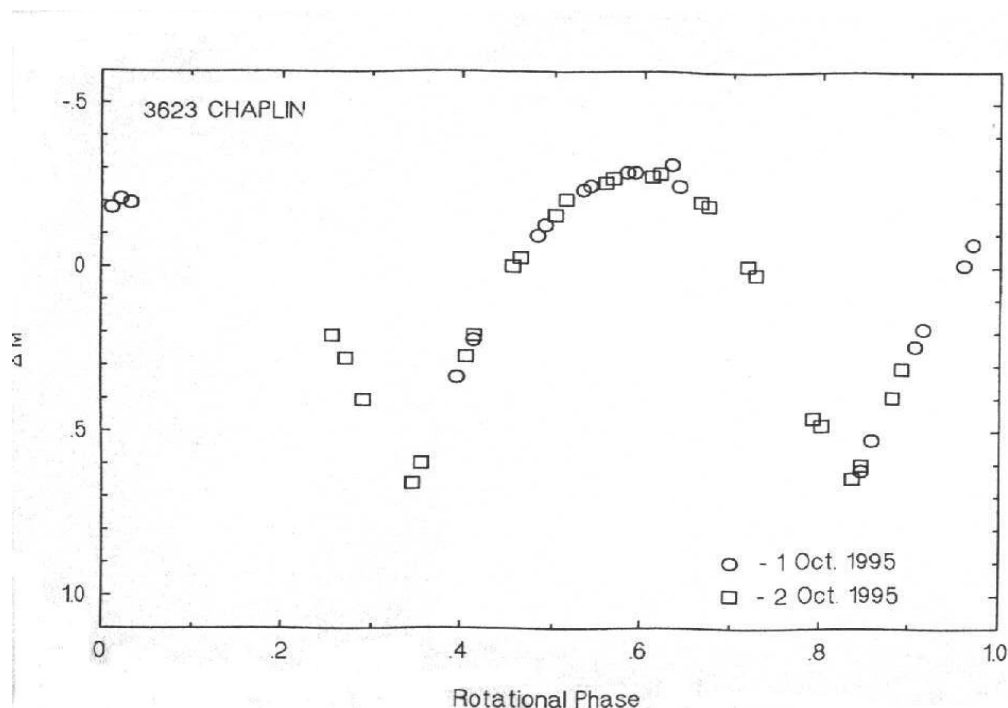


Figura 31. Curba de lumina compusa a asteroidului 3623 Chaplin, care a fost obtinuta în urma observatiilor facute la Observatorul din Haute Provence. Faza rotatională zero corespunde momentului 1 octombrie 1995, 0,185 h T.U.

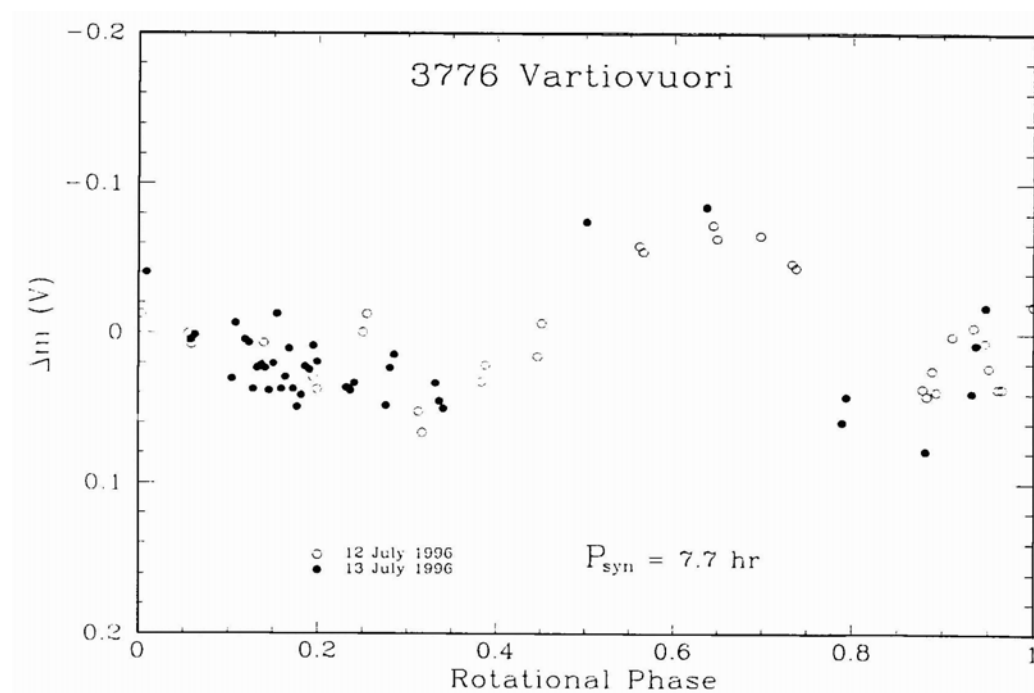


Figura 32. Curba de lumina compusa a asteroidului 3776 Vartiovuori, care a fost obtinuta prin prelucrarea observatiilor facute la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

3986 Rozhkovskij are estimat diametrul la 10,5 km. El a fost observat în 26 și 27 septembrie 1995 la Observatorul din Haute-Provence. Perioada de rotație proprie a fost estimată la $4,26 \pm 0,03$ ore. Datele de observație sunt de o mai slabă calitate,

noptile nefiind fotometrice în totalitate. Amplitudinea curbei de lumina este $0,26 \pm 0,05$ magnitudini (Figura 33).

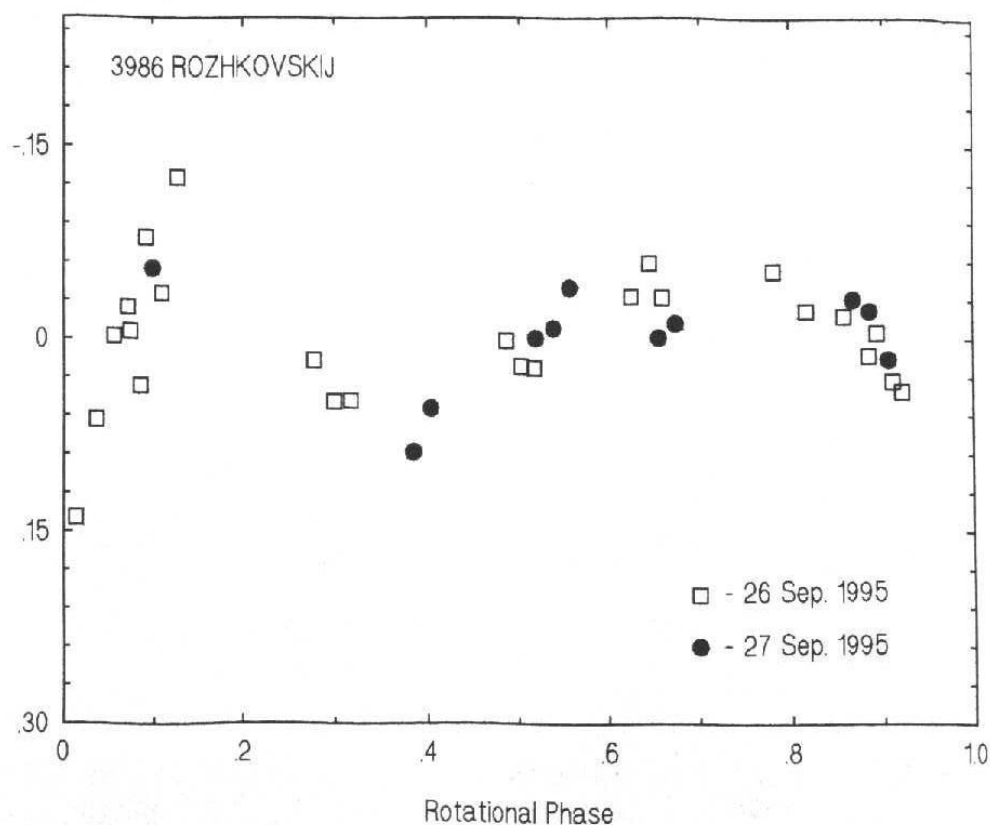


Figura 33. Curba de lumina compusa obtinuta pentru asteoidul 3986 Rozhkovskij în urma observatiilor efectuate la Observatorul din Haute Provence. Faza rotatională zero corespunde momentului 26 septembrie 1995, 19,743 h T.U.

5046 1981DQ a fost observat în noptile de 28, 29 și 30 septembrie 1995 la Observatorul din Haute-Provence. Diametrul estimat este 11,5 km. Perioada de rotație dedusă este $6,050 \pm 0,003$ ore. Amplitudinea curbei compuse are valoarea $0,21 \pm 0,03$ magnitudini. Curba de lumina compusa este prezentată în Figura 34.

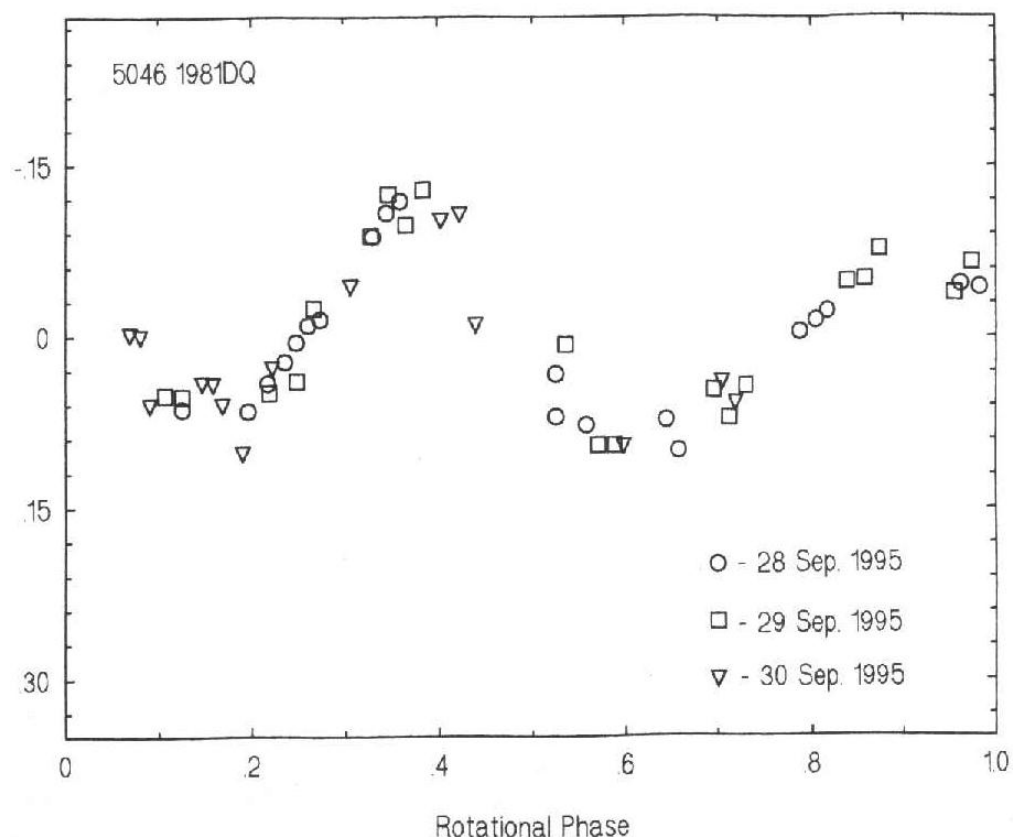


Figura 34. Curba de lumina compusa a asteroidului 5046 1981DQ obtinuta la Observatorul din Haute Provence. Faza zero corespunde momentului 27 septembrie 1995, 23,611 h T.U.

VII.3. Observatii de asteroizii cu perioada lunga

Rezolvarea curbei de lumina compuse (si implicit determinarea perioadei de rotatie proprii) nu este un lucru trivial într-o campanie de observatii. In literatura de specialitate putem gasi rezultate parțiale, în care chiar daca nu se poate prezenta curba de lumina compusa si spinul asteroidului, informatia prezentata este suficienta pentru a putea estima o limita inferioara a valorii perioadei de rotatie.

In campaniile de observatii efectuate, asteroizii de lunga perioada au fost alesi din literatura dintre asteroizii suspectati de a avea o perioada de rotatie proprie mai mare de 10 ore. In total s-au observat sase astfel de asteroizi. Dintre acestia doi asteroizi au perioade de rotatie proprii mari.

424 Gratia a fost observat timp de patru nopti la Observatorul European din Emisfera Australa în noptile de 9, 20, 22 si 23 iulie 1996. Curba de lumina compusa este prezentata în Figura 35. Peroada de rotatie proprie a fost estimata la $19,47 \pm 0,01$ ore. Amplitudinea curbei de lumina este $0,32 \pm 0,02$ magnitudini.

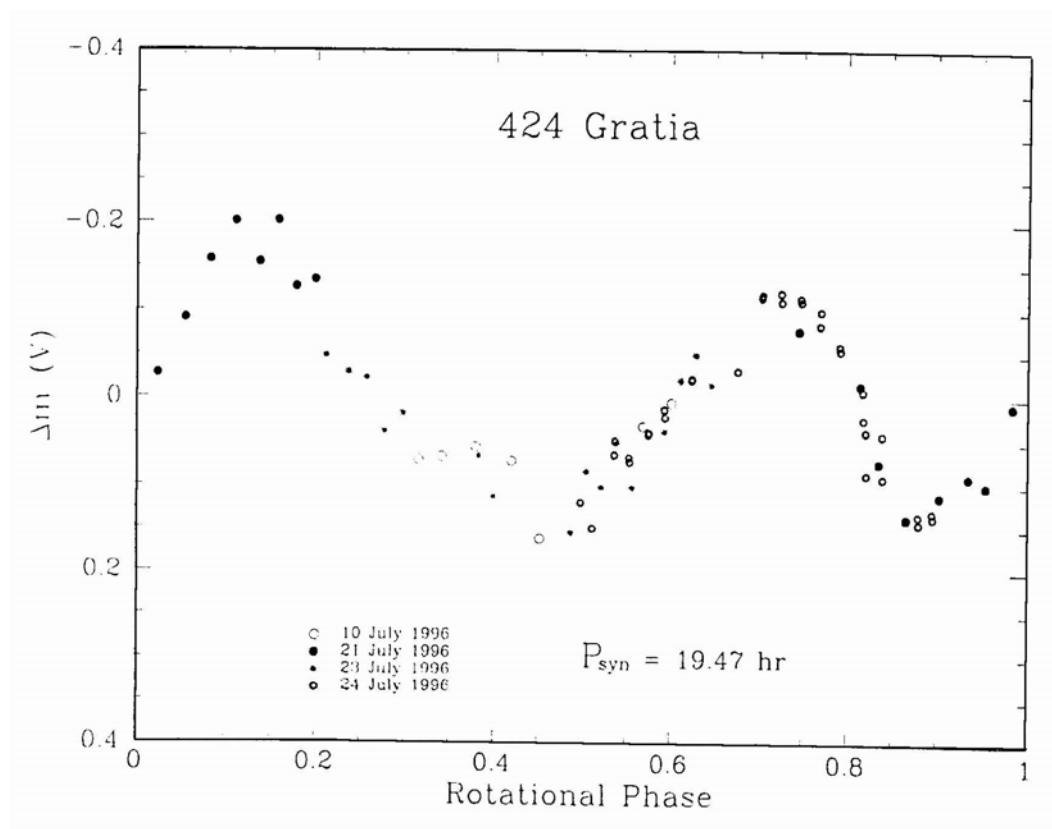


Figura 35. Curba de lumina compusa a asteroidului 424 Gratia, care a fost obtinuta prin prelucrarea observatiilor facute la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

446 Aeternitas a fost observat la Observatorul European din Emisfera Australa în nopțile de 7, 8 și 9 iulie 1996. În Figura 36 se prezintă curba de lumina compusa a acestui asteroid. Perioada de rotație proprie a fost estimată la $15,85 \pm 0,01$ ore. Amplitudinea curbei de lumina este mai mare de 0,33 magnitudini.

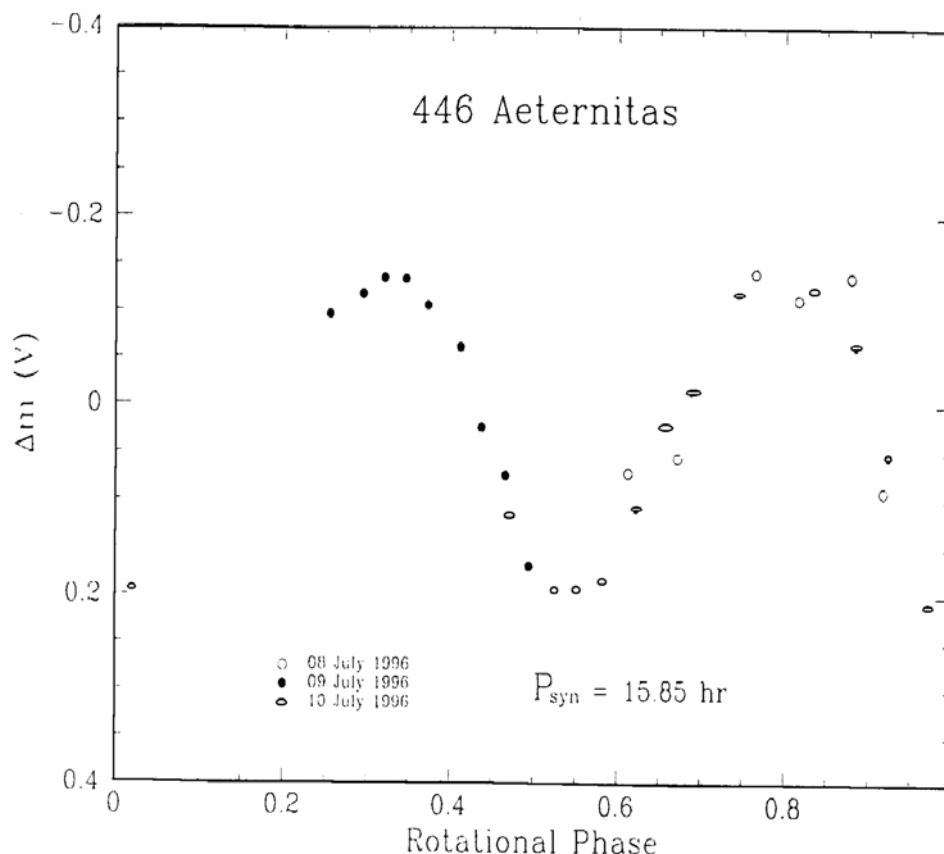


Figure 36. Curba de lumina compusa a asteroidului 446 Aeternitas, care a fost obtinuta prin prelucrarea observatiilor facute la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

VII.4. Asteroizi candidati pentru misiunea ROSETTA

Misiunea spatiala ROSETTA este un proiect al Agentiei Spatiale Europene, referitor la studierea Sistemului Solar. Conceputa pentru a fi lansata la începutul mileniului III, misiunea ROSETTA este cea mai importanta misiune pentru planetologie de la sfârșitul acestui secol.

Cu un buget impresionant de peste 500 milioane dolari, ROSETTA este catalogata de strategii în misiuni spatiale ai Agentiei Spatiale Europene drept una dintre primele trei « pietre unghiulare » ale programului stiintific al agentiei.

Numele misiunii a fost împrumutat de la piatra ROSETTA ale carei inscriptii (în trei limbi) a permis lui Champolion sa descifreze scrierea hieroglifica.

ROSETTA este o misiune ambitioasa, care își propune observarea si prelevarea de materiale din nucleul unei comete, analizarea lor si transmiterea datelor, si analizarea a doi asteroizi la survolul sondei spatiale.

Dupa cum se poate constata, conotatiile scopurilor stiintifice ale misiunii sunt strict cosmogonice, de observare a unor corpuri (comete si asteroizi) despre care se crede ca s-au format în momentul acretiei norului de materie din care s-a format Sistemul Solar actual, si care nu au evoluat (sau au evoluat foarte putin) din momentul formarii lor.

Lansarea misiunii spatiale ROSETTA este conditionata de o configuratie favorabila de observare a nucleului cometar, dat fiind faptul ca apropierea cometelor

de Soare nu este un fenomen ce se petrece cu o frecvență mare. În funcție de cometele favorabile investigației, s-au desemnat mai multe ferestre de lansare.

Pentru fiecare din ferestrele de lansare s-au ales mai mulți asteroizi aflați într-o configurație geometrică favorabilă survolului. Dintre acești candidați urmează să se decida care dintre asteroizi vor fi aleși.

Alegerea asteroizilor ținte pentru ROSETTA este decisă de scopul propus: studiul asteroizilor care aparent au evoluat cel mai puțin din momentul formării lor. Aceasta vizează asteroizii de tipul **D** sau **C**. Pentru aceasta s-au inițiat diverse campanii de observații și studii statistice și modelarea matematică, cu scopul declarat de a culege cât mai multe date despre candidați și a se face o bună alegere printre candidați.

În decursul campaniilor de observație au fost observați șase asteroizi posibili candidați pentru a fi observați de misiunea ROSETTA: 1071 Brita, 1992 Galvarino, 2446 Lunacharsky, 2703 Rodari, 4258 Ryazanov și 5224 Abbe.

1992 Galvarino a fost observat în decursul a patru nopți: 26, 27, 28 și 29 septembrie 1995. Diametrul lui estimat este de 10,5 km iar curba de lumina compusă are o perioadă de $7,004 \pm 0,003$ ore. Amplitudinea curbei de lumina este 0,59 magnitudini (Figura 37).

2446 Lunacharsky a fost observat la Observatorul European din Emisfera Australă în nopțile de 11 și 12 iulie 1996. În Figura 38 este prezentată curba de lumina compusă. Perioada de rotație proprie este estimată la $3,613 \pm 0,004$ ore. Amplitudinea curbei de lumina este $0,41 \pm 0,02$ magnitudini.

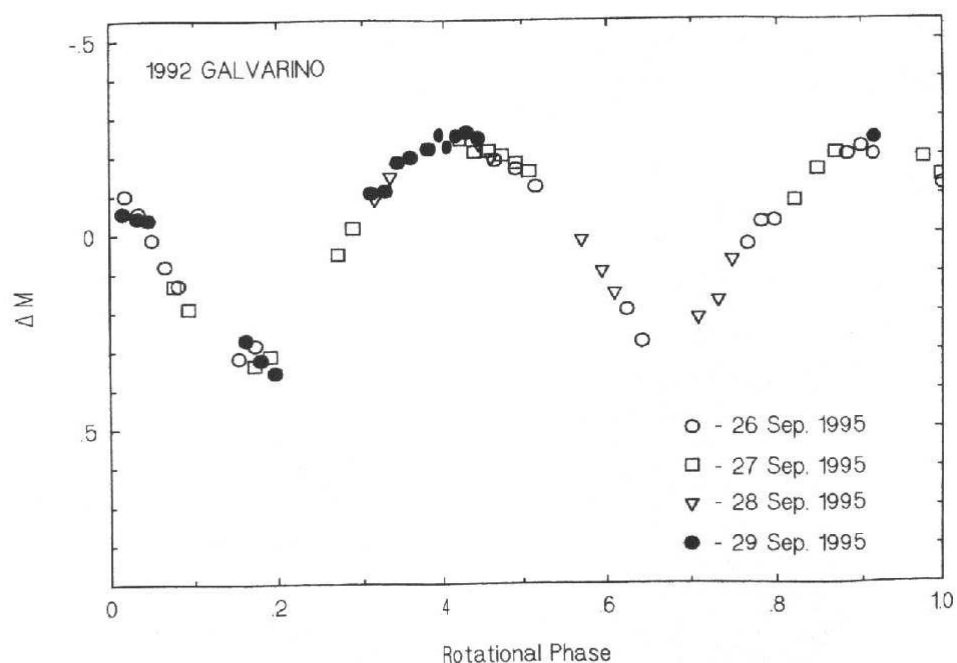


Figura 37. Curba de lumina compusă a asteroidului 1992 Galvarino obținută în urma observațiilor efectuate la Observatorul din Haute Provence. Faza rotativă zero corespunde momentului 26 septembrie 1995, 3,012h T.U.

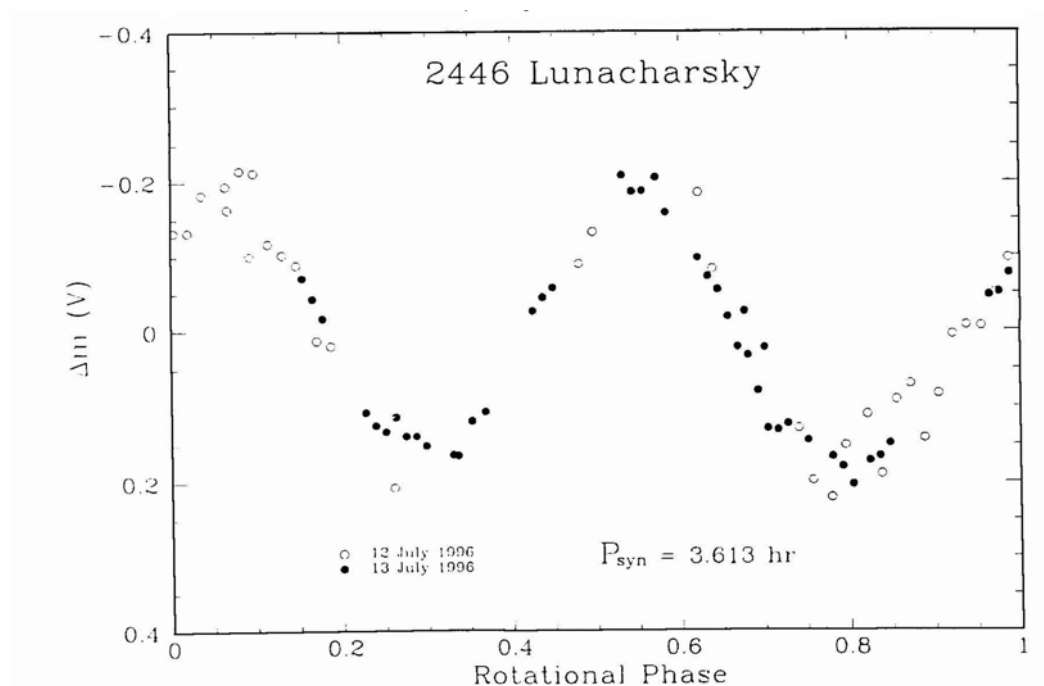


Figure 38. Curba de lumina compusa a asteroidului 2446 Lunacharsky, care a fost obtinuta prin prelucrarea observatiilor facute la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

VII.5. Asteroizi nerezolvati

Dintre cei 21 asteroizi alesi spre a fi observati, pentru 6 dintre acestia curba de lumina compusa nu a putut fi determinata din diverse motive. Pentru o parte a asteroizilor nerezolvati datele de observatie sunt insuficiente pentru a putea da o valoare aproximativa pentru perioada de rotatie proprie si a construi o curba de lumina compusa (chiar si provizorie). In cazul asteroidului 1071 Brita, analiza curbelor de lumina individuale este grea, deoarece variatia de stralucire a asteroidului de la o noapte de observatie la urmatoarea sunt diferite (Figurile 39 si 40).

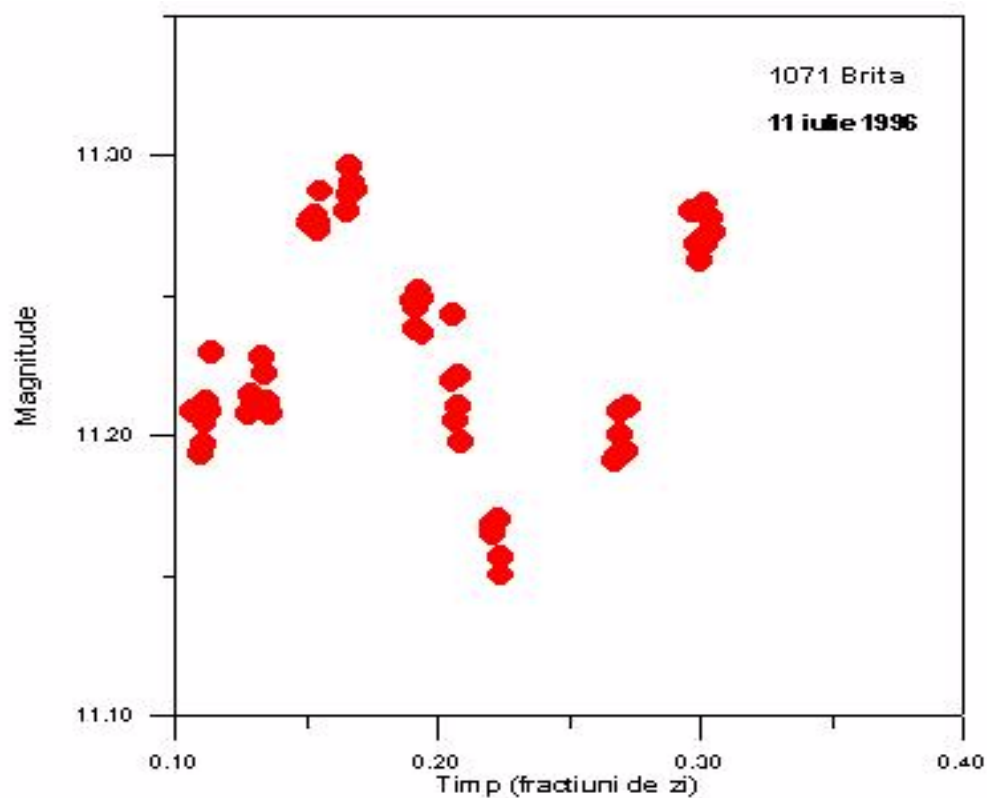


Figure 39. Curba de lumina a asteroidului 1071 Brita obtinuta în noaptea de 10/11 iulie 1997 la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

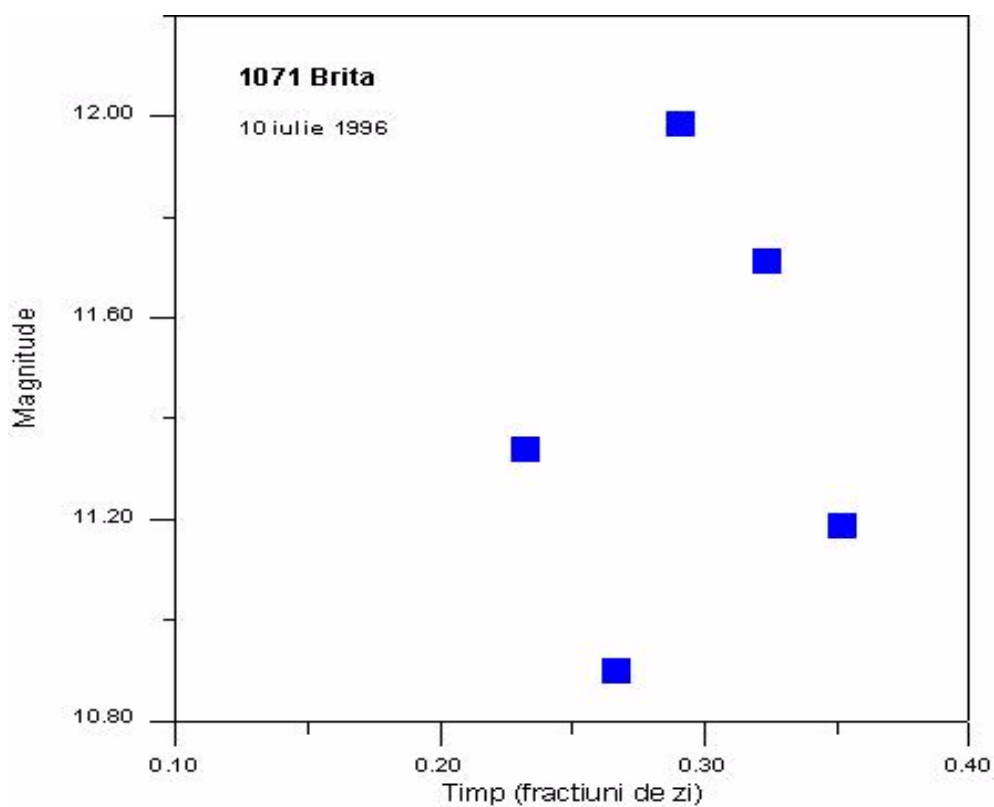


Figure 40. Curba de lumina a asteroidului 1071 Brita obtinuta în noaptea de 9/10 iulie 1997 la Observatorul European din Emisfera Sudica, La Silla-Chile.

Pentru rezolvarea curbelor de lumina si aflarea perioadelor de rotatie proprie, cei 6 asteroizi trebuie reobservati de-a lungul unor noi campanii de observatie.

VII.6. Concluzii

Rzultatele campaniilor de observatie sunt urmatoarele :

A. In decursul celor trei campanii de observatie au fost observati 21 asteroizi. Dinre acestia, 19 sunt cu diametrul estimat inferior valorii de 50 km.

In total s-au efectuat 32 nopti de observatie si s-au înregistrat 55 curbe de lumina individuale (Tabelul 1).

B. Pentru prima data în literatura se rezolva curbele de lumina ale acestor asteroizi si se calculeaza perioada de rotatie proprie. Perioadele de rotatie proprii ale acestor asteroizi au o plaja foarte larga, cuprinsa între 2,5 ore si 24 ore (Tabelul 2).

C. In timpul campaniilor de observatie au fost observati 6 din posibillii candidati la survolul misiunii spatiale ROSETTA. Studiul de la sol prin toate mijloacele este esential în alegerea candidatilor la survol. Pentru doi din asteroizi s-a putut calcula perioada de rotatie proprie. Chiar daca nici unul din cei 6 asteroizi observati nu vor fi alesi prentu a fi survolat, rezultatele obtinute din investigarea lor sunt valoroase în studiul de ansamblu a populatiei asteroidale ;

D. Campaniile de observatie au reusit sa confirme situatia a doi dintre asteroizii presupusi a avea perioada de rotatie lunga, si a infirmat estimarile anterioare a doi alti asteroizi referitoare la perioadele lor de rotatie lungi.

E. Pentru 15 dintre asteroizii observati a putut fi calculata perioada de rotatie proprie. Aceasta reprezina aproximativ 6% din numarul total de asteroizi de mic diametru (diametru inferior valorii de 50 km).

F. Pentru 6 din asteroizii selectati în campaniile de observatie nu a putut fi calculata perioada de rotatie, acestia necesitând campanii de observatie suplimentare.

Tabelul 3. Parametrii fizici ai asteroizilor observati. Peroada de rotatie si amplitudinea curbei de lumina compuse au fost obtinute din observatii. Diametrul estimat al asteroizilor este obtinut prin prelucrarea datelor IRAS (Tedesco et al. 1992)

Asteroid	Perioada (hr)	Amplitudine (mag)	Diametru (km)
424 Gratia	$19,47 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,02$	90,5
440 Theodora	$4,828 \pm 0,004$	$0,43 \pm 0,03$	19,2
446 Aeternitas	$15,85 \pm 0,01$	$\pm 0,33$	43,0
727 Nipponia	$4,6 \pm 0,1$	$0,14 \pm 0,02$	37,5
888 Parysatis	$5,49 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,02$	44,8
1992 Galvarino	$7,004 \pm 0,003$	$\geq 0,59$	10,50
2209 Tianjin	$9,47 \pm 0,01$	$0,42 \pm 0,02$	19,2
2419 Moldavia	$2,412 \pm 0,003$	$0,14 \pm 0,03$	7,28
2446 Lunacharschi	$3,613 \pm 0,004$	$0,41 \pm 0,02$	10,1
2921 Sophocles	$4,778 \pm 0,005$	$0,16 \pm 0,04$	8,35
3247 DiMartino	$5,445 \pm 0,006$	$0,51 \pm 0,05$	17,70
3623 Chaplin	$8,361 \pm 0,005$	$0,97 \pm 0,02$	13,80
3776 Vartiovuori	$7,7 \pm 0,1$	$0,12 \pm 0,2$	34,9
3986 Rozhkovskij	$4,26 \pm 0,03$	$0,26 \pm 0,05$	10,50
5046 1981 DQ	$6,050 \pm 0,003$	$0,21 \pm 0,03$	11,50

CAPITOLUL VIII

IMAGINE GLOBALA A POPULATIEI DE ASTEROIZI

VIII.1. Analiza statistica a perioadelor de rotatie

Cu exceptia asteroizilor posibili candidati la survolul misiunii spatiale ROSETTA, ratiunea alegerii de asteroizilor observati printre cei cu diametrul estimat inferior valorii de 50 km a fost dictat de diversitatea statistica observata la aceasta populatie.

Fulchignoni et al. (1995) publica rezultatele unui studiu statistic efectuat pentru perioadele de rotatie proprii a 516 asteroizi. Rezultatele acestui studiu duc la concluzia ca exista o corelatie între dimensiunile asteroizilor si perioadele de rotatie proprie, astfel :

- cei 319 asteroizi de dimensiuni mari - diametrul estimat depaseste 50 km - au o distributie a perioadelor de rotatie de tip Maxwell, cu maximul centrat pe perioada medie de 8,8 ore (Figura 41);

- distributia perioadelor de rotatie a celor 266 asteroizii de talie mica poate fi obtinuta ca o combinatie liniara de trei functii Maxwell (Figura 42);

În cadrul asteroizilor de talie mica cele trei sub-populatii se prezinta astfel:

- i) un grup de asteroizi P1 reprezentând 66 % din totalul asteroizilor de talie mica, cu o perioada de rotatie proprie medie de 8,7 ore, foarte apropiata de perioada medie a asteroizilor de talie mare;

- ii) grupul P2 reprezentând 25% dintre asteroizii de talie mica, ce se caracterizeaza printr-o rotatie medie de 4,1 ore;

- iii) grupul P3, reprezentând aproximativ 11 % dintre asteroizii de talie mica, ce se rotesc foarte lent în jurul axei proprii de rotatie (perioada medie 24,7 ore).

Prin recombinarea celor trei distributii Maxwell se va regasi distributia experimentală.

Între asteroizii observati si prezentati de aceasta lucrare, asteroizii 1992 Galvarino, 2209 Tianjin, 3623 Chaplin si 3776 Vartiovuori cel mai probabil apartin grupului P1, asteroizii 727 Nipponia, 2419 Moldavia, 2446 Lunacharschi, 2921 Sophocles, 3986 Rozhkovskij apartin grupului P2 iar asteroizii 424 Gratia si 446 Aeternitas apartin grupului P3.

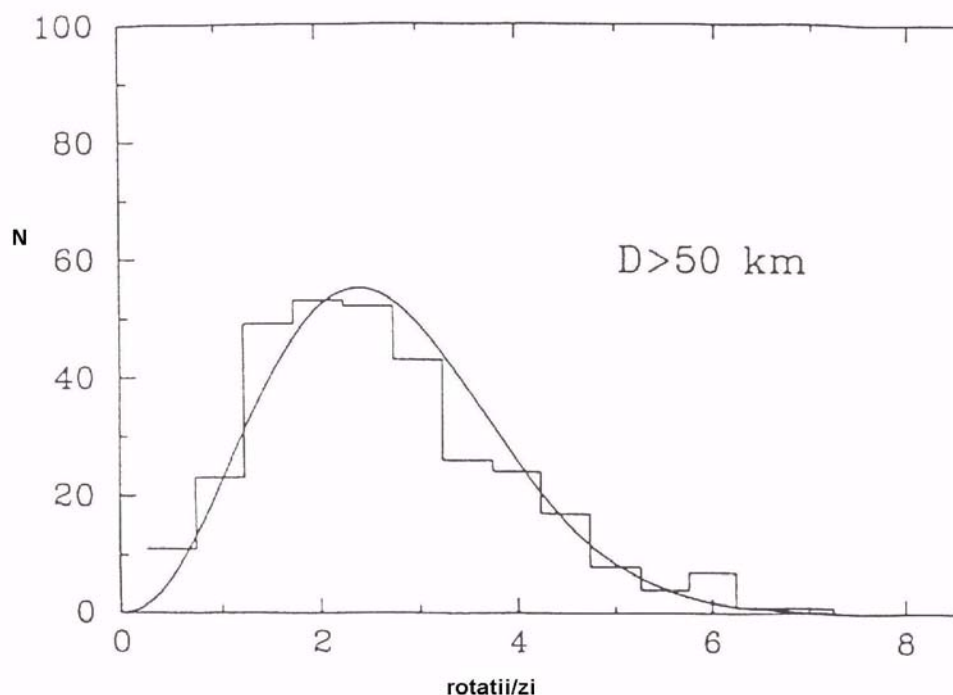


Figura 41. Histograma cu distributia perioadelor de rotatie a asteroizilor cu diametru peste 50 km, peste care se suprapune relativ bine, o distributie Maxwell centrata pe 8,8 ore.

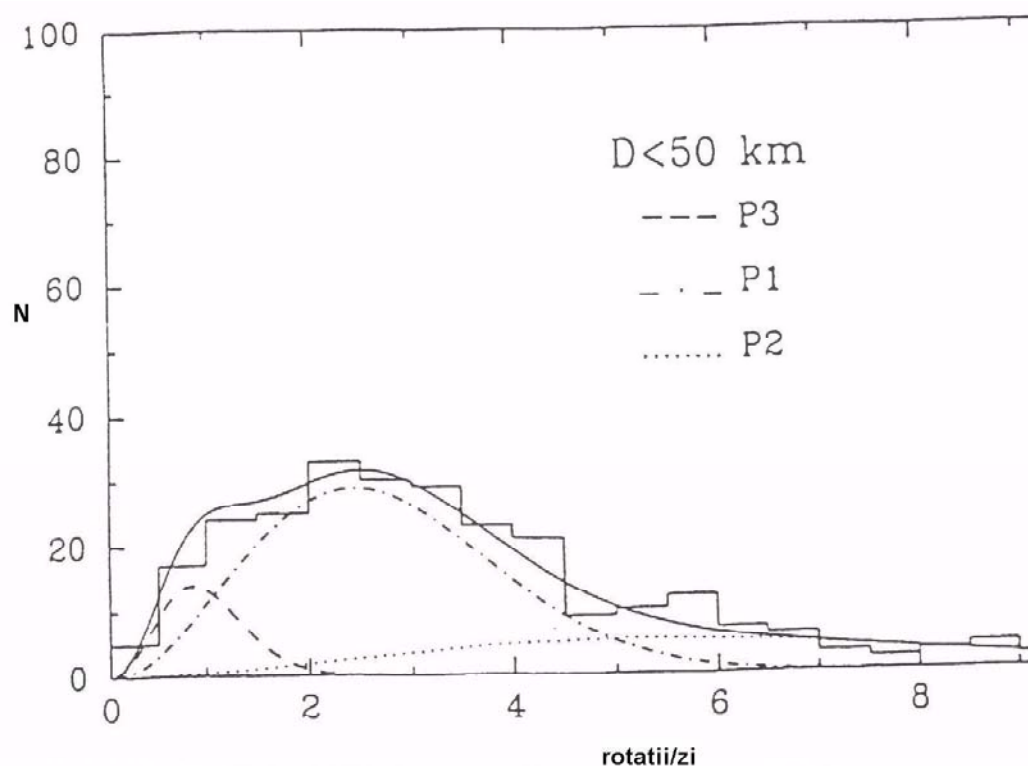


Figura 42. Histograma experimentală a distribuției asteroizilor cu diametru mai mic de 50 km. Această distribuție poate fi definită ca o combinație liniară de trei distribuții Maxwell centrate pe perioadele de rotație propriie de 4,1, 8,7 și 24,7 ore.

Prin prisma rezultatelor analizei statistice a perioadelor de rotatie proprii, aceste sub-populatii de asteroizi pot fi interpretate astfel (Fulchignoni et al. 1995) :

A. cea mai mare parte a asteroizilor de talie mica (subpopulatia P_1) au evoluat (din punct de vedere al perioadei de rotatie) asemanator asteroizilor de mari dimensiuni. O posibila explicatie a acestui rezultat ar fi ca asteroizii de mari dimensiuni ca si cei din subpopulatia P_1 pastreaza perioadele de rotatie din faza de inceput, a formarii lor prin acretia nebuloasei primordiale, precursora actualului Sistem Solar;

B. Grupurile de asteroizi P_2 si P_3 au fost influentate de aceleasi procese de ciocniri din timpul acretiei.

Asteroizii cu perioada de rotatie lunga pot fi considerati ca fiind fragmente ale asteroizi (planetesimale) de mari dimensiuni, care în urma ciocnirilor mutuale s-au fragmentat si au dat nastere la asteroizi de dimensiuni mai mici, însa încetinitii în rotatia lor proprie.

A doua posibila explicatie a aparitiei subpopulatiei de asteroizi lenti poate fi gasita în mecanismele (incomplet înțelese), de pierdere de moment unghiular (Angeli, 1996), sau în efectele de tip mareic (Zappala et al. 1980).

Subpopulatia asteroizilor cu perioada de rotatie proprie mica poate fi de asemenea interpretata ca fiind rezultatul ciocnirilor distructive între asteroizi, în care unele fragmente câstiga în moment unghiular în detrimentul altor fragmente.

Noile perioade de rotatie prezentate de aceasta teza reprezinta un plus de aproximativ 6% noi corpuri în esantionul asteroizilor de dimensiuni mici. Dupa cum putem constata din Figura 43, distribuirea acestor perioade de rotatie este uniform repartizata peste distributia experimentală existenta.

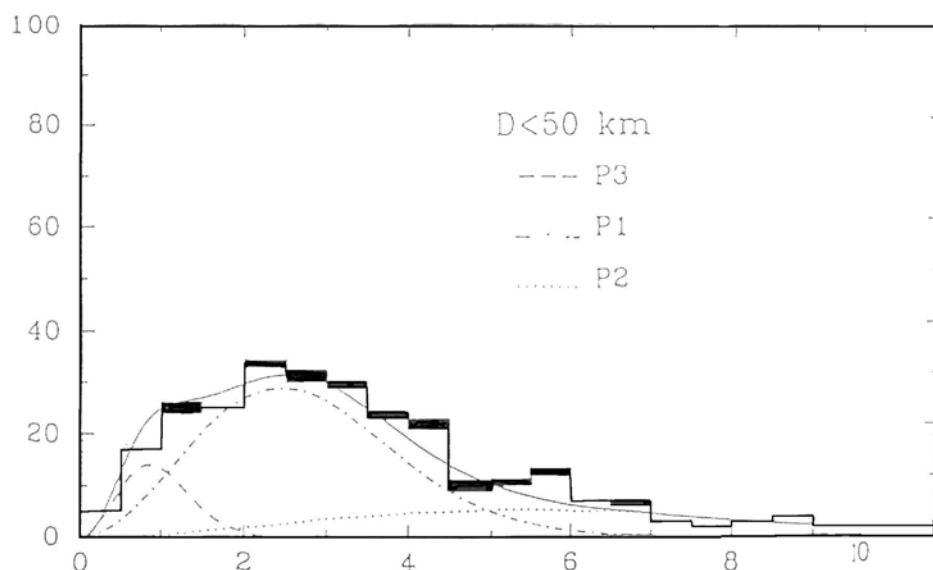


Figura 43. Distributia asteroizilor de talie mica peste care am suprapus rezultatele observatiilor din aceasta lucrare. Dupa cum se poate constata, perioadele care s-au ajutat la distributia experimentală existenta (marcate prin dreptunghiuri negre) se distribuie relativ uniform pe vechea distributie.

Analiza statistică a perioadelor de rotație proprie (spinului) ale asteroizilor ocupa un rol major în interpretarea dinamică a acestei populații de obiecte. Există o unanimitate printre cercetători în a afirma că centura principală de asteroizi reprezintă

o populație de corpuri « relaxată » din punct de vedere dinamic. Aceasta înseamnă că procesele de evoluție (cum ar fi ciocnirile mutuale între corpuri, captura de corpuri în regiunile cu rezonanțe, ...) sunt foarte rare și că această populație se află într-o stare de « echilibru ». Ipoteza poate fi verificată experimental prin histogramele rotațiilor proprii obținute pentru asteroizi de dimensiuni mici (ex Figurile 42 și 43). Când putem modela distribuția experimentală cu o sumă de distribuții maxwelliene (corespunzătoare mai multor maxime în distribuție, ceea ce echivalează cu mai multe subpopulații de corpuri), atunci argumentele sunt în favoarea acestei ipoteze.

Lucrurile sunt departe de a fi clarificate. Comparativ cu planetele mari, populația de asteroizi din centura principală are o « grosime » semnificativă (cei mai mulți asteroizi au înclinarea orbitei în intervalul $0-30^{\circ}$), care ar trebui explicată prin diverse mecanisme. Acest aspect nu este încă definitiv elucidat, dând argumente unei alte ipoteze, conform căreia populația de corpuri din centura de asteroizi este în continuă evoluție și este încă departe de a-și fi atins starea de « relaxare ». S-au propus diverse mecanisme (printre ele evidențiind mecanismul de confinare gravitațională produs de câmpurile gravitaționale ale corpurilor masive ale Sistemului Solar) pentru a susține această ipoteză.

Datele publicate în această lucrare completează cunoștințele despre spinul asteroizilor din centura principală, însă aportul lor nu transează în problematică : « Sunt asteroizii o populație dinamic relaxată ? ».

VIII.2. Clase taxonomice ; interpretare evolutivă a claselor taxonomice

Fără a avea intenția de a considera epuizat subiectul sau a-l supraaprecia, trebuie să precizăm caracterul punctual al studiilor fotometrice, în contextul cunoașterii globale a populației asteroidale. Fotometria reprezintă un puternic instrument de analiză de la sol a asteroizilor. Este evident că rezultatele obținute trebuie coroborate cu alte date obținute din diverse alte studii ale asteroizilor : cu rezultatele obținute prin polarimetrie, din ecouri radar, interferometrie de pete, studii de laborator asupra materialelor meteoritice, studii de laborator asupra influenței formei asteroizilor în aspectul curbelor lor de lumină, modelări dinamice a structurii actualei populații de asteroizi, modelări mineralogice și de evoluție mineralogică ale structurilor interne ale asteroizilor.

Localizarea asteroizilor în regiunea de tranziție între planetele telurice (solide) și planetele gigante (gazoase), pune numeroase semne de întrebare. Opinia celor mai mulți cercetători este că perturbatiile gravitaționale produse de o protoplanetă-Jupiter, formată cu puțin înaintea celorlalte planete au împiedicat formarea unui corp masiv în regiunea actualei centuri asteroidale. Asteroizii au avut probabil o evoluție prin ciocniri mutuale, foarte importantă de la formare și până acum, în timp ce modificările geologice, termice, orbitale au fost de mai mică importanță. Spre deosebire de ciocnirile constructive, de acumulare a materiei, ce au dus la formarea planetelor, în centura asteroidală de la un anumit moment aceste ciocniri au devenit distructive și au dus la fragmentarea corpurilor masive existente. Studiul asteroizilor poate da o imagine asupra condițiilor din Sistemul Solar timpuriu.

În ultimele decenii s-au făcut progrese notabile în cunoașterea și evoluția Sistemului Solar. Putem vorbi despre progrese semnificative în stabilirea condițiilor (densitatea nebuloasei primordiale, echilibrele de forțe, ...) în care ar fi trebuit să crească planetoizii din Sistemul Solar timpuriu. În acest proces, creșterea rapidă a dimensiunilor câtorva corpuri mari a dominat zonele de acrecție. Creșterea rapidă a

lui Jupiter și Saturn, precum și rezonanțele impuse de existența lor, ar fi putut produce viteze relative suficient de mari în centura asteroidală pentru a împiedica acretia materiei într-un singur corp. Mecanisme suplimentare, cum ar fi perturbarea marilor planetoizi de către Jupiter și modificarea orbitelor lor spre zona dintre Marte și Jupiter (actuala centura principală) a dus la micșorarea masei din zona centurii, prin transferarea unei părți din copuri pe orbite instabile, cu expulzarea ulterioară de corpuri din această regiune. Aceasta ar explica lipsa de materie, în pofida numărului relativ mare de corpuri existente în centura asteroidală. Concomitent s-a produs o marire a vitezelor relative ale asteroizilor din centura principală, la valorile medii actuale de 5 km/s.

Estimările privind creșterea prin mecanisme specifice a vitezelor relative în centura asteroidală la valorile actuale duc la concluzia că masa totală a centurii asteroidale ar fi trebuit să descrească de 3 - 5 ori față de masa inițială (Davis et al. 1989).

O altă idee demnă de luat în considerare este cea privind asteroizii masivi pe care-i putem vedea actualmente în centura principală. Conform acelei ipoteze, ei au suferit ciocniri distructive, însă energia cinetică a fragmentelor rezultate a fost mică, ele continuând să fie împreună prin autogravitație (aglomerări de tip « *rubble-piles* ») (Bell et al. 1989). Astfel, în locul unui corp masiv, putem vorbi despre aglomerări de mici corpuri, care sunt împreună doar printr-un slab câmp gravitațional.

Temperatura în Sistemul Solar timpuriu a fost parametrul determinant în evoluția mineralogică a asteroizilor. Din studiile privind culorile asteroizilor și din studiile comparative cu meteoritii, se pot trage concluzii importante privind structura, geologia și mineralogia asteroizilor. În funcție de mărimea temperaturii, putem vorbi despre corpuri asteroidale diferențiate, metamorfice și corpuri nediferențiate. În cazul asteroizilor, dacă se analizează distribuția claselor taxonomice în funcție de distanța heliocentrică, se observă că fiecare clasă este reprezentativă la o anumită distanță față de Soare (Figura 44).

În condițiile în care considerăm că evoluția asteroizilor prin ciocniri mutuale a alterat doar într-o mică măsură distribuția heliocentrică a acestor clase, constatăm că gradientul de temperatură în Sistemul Solar timpuriu a permis diferențierea doar pentru anumiți asteroizi. Temperatura a fost suficient de mare pentru ca, în anumite condiții de presiune, în interiorul asteroizilor materialele să se organizeze într-un nucleu alcătuit din materiale grele (metale), o manta și o crustă. Bell et al. (1989) propune gruparea asteroizilor a căror clase taxonomice sunt cunoscute în trei superclase: asteroizi primitivi (nediferențiați), metamorfici (parțial diferențiați) și diferențiați.

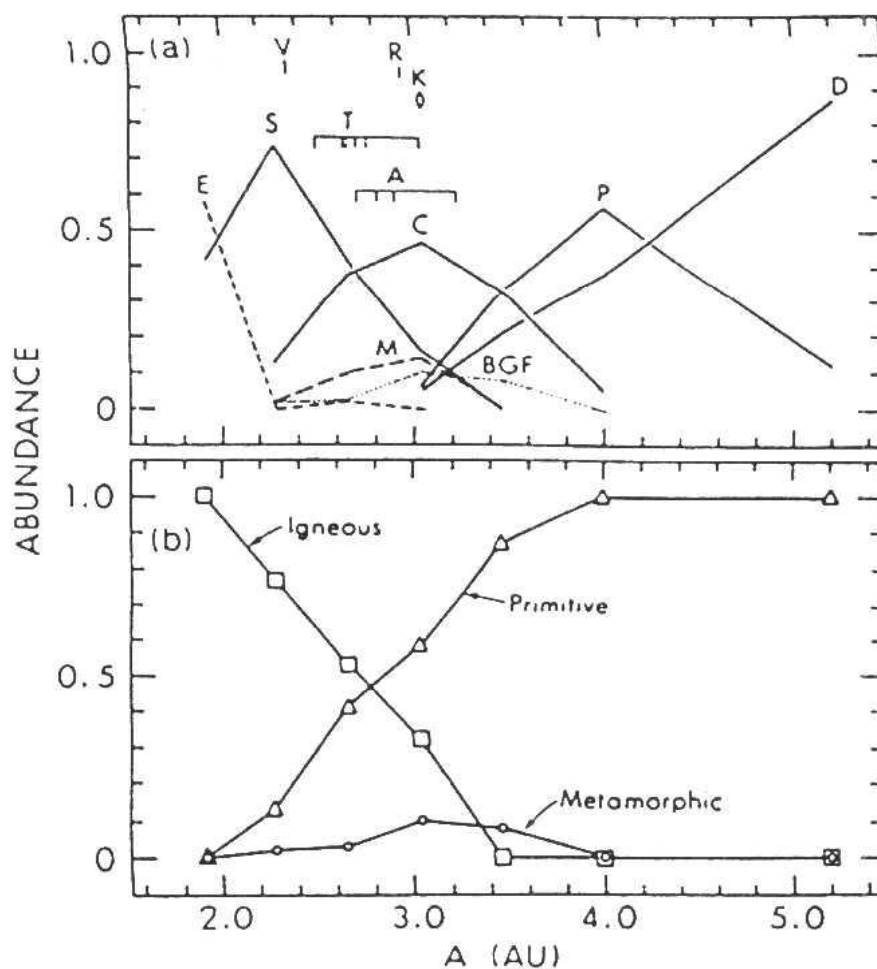


Figura 44. Schema distributiei claselor taxonomice în functie de distanta heliocentrica. Se poate remarca distributia gaussiana a fiecărei clase centrata la o anumita distanta heliocentrica. Aceasta a permis gruparea lor în trei superclase (Bell et al., 1989) : corpuri primitive, metamorfice si diferite.

O concluzie similara este propusa de Barucci et al.(1987). Reestimarea albedoului IRAS din anul 1992, a facut necesara reluarea studiilor statistice (Bîrlan et al. ICARUS, 1996), facute asupra esantionului utilizat de Barucci et al. în anul 1987, refacerea sistemului taxonomic si retrasarea directiilor de evolutie schitate prin clasificarea obtinuta. Intr-o diagrama triunghiulara a reflectantelor spectrale si a albedoului, clasele taxonomice distincte se observa anumite trasee evolutive (Figura 45). Sagetile sunt orientate în sensul descresterii distantei heliocentrice. Din clasa taxonomica **D**, considerata ca fiind cea alcatuita din asteroizi nediferentiati, cu materiale primitive se disting patru tendinte de evolutie :

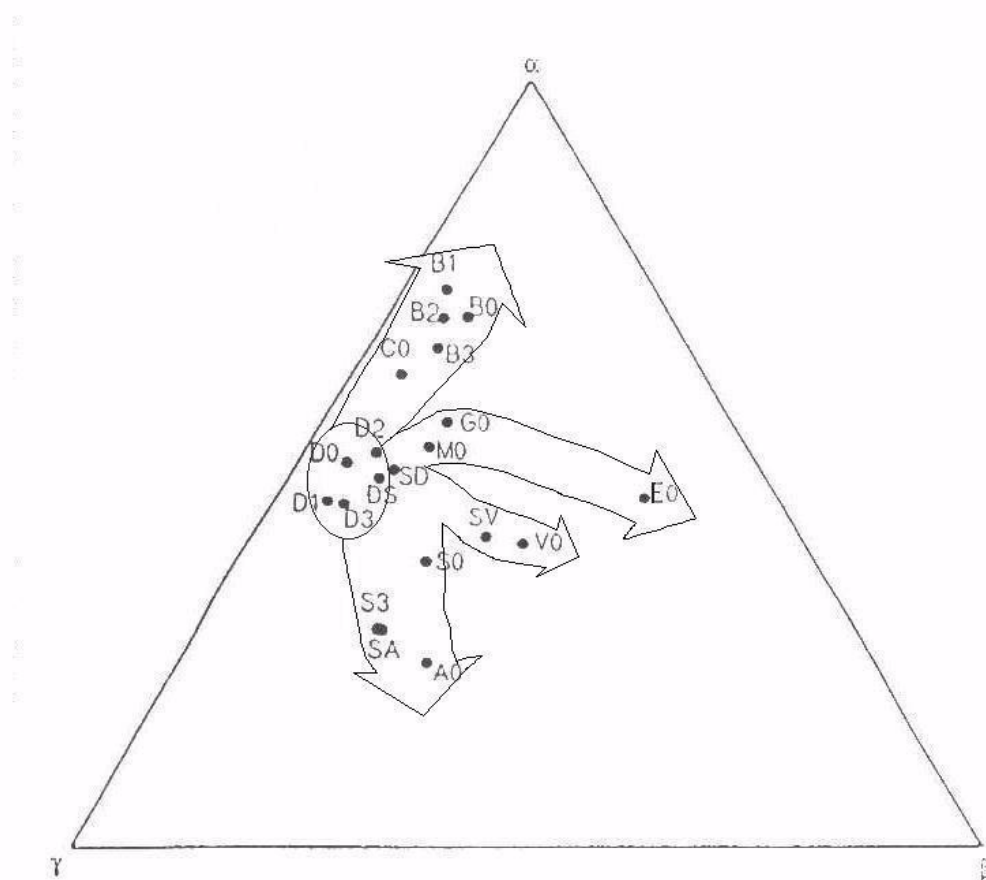


Figura 45. Diagrama triunghiulara în care variabilele sunt grupate astfel ca pentru fiecare punct $(R_s+R_u+R_v)/3 + \text{albedo} + (R_w+R_x+R_p+R_z)/4 = 1$. Limitele α , β , γ au fost alese astfel :

	$(R_s+R_u+R_b)/3$	albedo	$(R_w+R_x+R_p+R_z)/4$
α	0.60	0.00	0.40
β	0.25	0.35	0.40
γ	0.25	0.00	0.75

- A. un traseu evolutiv de la asteroizii de tip **D** spre asteroizii de tip **B**, incuzându-se pe traseu clasa taxonomica a asteroizilor de tip **C**. În termeni de evoluție mineralogica, aceasta evoluție a asteroizilor pare a fi una în care concentrația de substanțe volatile joacă un rol major. În acest caz, evoluția este de la un tip de asteroizi bogati în substanțe volatile - am numit asteroizii de tip **D** - spre asteroizii care probabil s-au format la o temperatură mai ridicată și în consecință sunt mai puțin bogati în substanțe volatile (asteroizii de tip **B**) ;
- B. un al doilea traseu evolutiv ce pleacă de la asteroizii **D**, primitivi, spre asteroizii de tip **E** și care conține pe traseu asteroizii de tip **G** și **M**. Acest traseu poate fi interpretat ca o evoluție progresivă, de la concentrația specifică nebuloasei primordiale (informație conținută în asteroizii de tip **D**) spre asteroizii bogati în enstatit acondritic (asteroizii de tip **E**). Acest traseu evolutiv trece printr-o etapă de compusi bogati în carbon, amestecuri minerale de tipul celor conținute în asteroizii

- de tip **C** (am numit asteroizii de tip **G**), si un proces de reducere a siliciului din minerale (de catre metale) similar cu cel din enstatitul ordinar (asteroizii de tip **M**). Asteroizii de tip **E** par a fi compusi din silicati, formati dupa ce corpurile alcatuite din enstatit condritic s-au diferentiat (cazul asteroizilor de tip **M**) (Chapman, 1987).
- C. al treilea traseu evolutiv este acela spre asteroizii de tip **V** si pare a reflecta cresterea diferentierii în populatia asteroidala. Acest traseu trece printr-o subclasa a asteroizilor de tip **S** spre asteroizii de tip **V** care aparent contin cel mai mare procent de piroxen/olivina¹⁸ dintre asteroizii cunoscuti.
- D. cel de-al patrulea traseu evolutiv leaga asteroizii de tip **D** de asteroizii de tip **A**, pe un traseu care contine cea mai mare parte a asteroizilor de tip **S**. Asteroizii de tip **S** sunt asimilati unor corpuri alcatuite din amestecuri de olivina, piroxen si metal în diverse concentratii. Interpretarea lor mineralogica în literatura de specialitate este foarte diversa, de la corpuri pietroase-metalice (Gaffey, 1989) pâna la asimilarea lor corpurilor ce contin condrite ordinare (Chapman, 1997). Asteroizii de tip **A** au un spectru ce prezinta o puternica crestere în regiunea IR a spectrului, marcat de o puternica absorbtie a olivinei la 10000Å, si cu o absenta totala din spectru a unor trasaturi care sa ateste prezenta piroxenului. In termeni de mineralogie a corpurilor diferite, aceasta pare a fi mantaua unor corpuri diferite, care în urma ciocnirilor mutuale au pierdut total crusta avuta.

¹⁸ Olivina si piroxenul sunt doi dintre silicati caracteristici corpurilor diferite, continuti in crusta asteroidului.

CONCLUZII

Asteroizii sunt corpuri ale Sistemului Solar care au pastrat « înghetata » imaginea Sistemului Solar din momentul formării lui. Studiul asteroizilor este important atât din punct de vedere strict cosmogonic (originea și evoluția întregului Sistem Solar), dar și punctual (cu scopul de a cunoaște cât mai bine această categorie de corpuri). Asistăm astfel în ultimele decenii la diverse abordări în studiul asteroizilor. Asteroizii pot deveni sursele de materii prime pentru preconizatele industrii spațiale ce se vor dezvolta pe stațiile orbitale (dacă se va dovedi mult mai convenabilă captura unui asteroid ce trece prin apropierea Pamântului decât aducerea materialelor pe orbita de pe Pamânt.). De asemenea, asteroizii care intersectează orbita Pamântului pot fi capturați de câmpul gravitațional al acestuia; efectele unei ciocniri cu un asteroid pot fi resimțite la scară planetară, cu punerea în pericol a întregii civilizații terestre. Aceste două domenii de studiu, recent abordate, dovedesc faptul că tot mai mulți cercetători privesc cu interes spre populația de asteroizi.

Scopul acestei teze l-a constituit studiul fotometric al unui esanțion de asteroizi de mică talie din centura principală de asteroizi. În peste 200 de ore de observație s-au studiat 21 asteroizi. Observațiile și analizele de date efectuate, duc la următoarele concluzii și constatări:

- 1. În total au putut fi observați 21 asteroizi pe parcursul a peste 30 nopți de observație**; tehnicile de observație au fost fotometria cu camera CCD și (într-o măsură mai mică) fotometria fotoelectrică;
- 2. Prin observarea celor 21 asteroizi s-a putut dezvolta o tehnică adecvată de observare a asteroizilor utilizându-se camera CCD.** Această tehnică permite reorientarea în timp util a modului de supraveghere și înregistrare a imaginilor (capitolul VI.1.4). Printr-o analiză sumară (cu ajutorul unui pachet de programe de tratare a imaginilor) a imaginilor brute, comportamentul relativ nerelevant al acestor date permite focalizarea atenției pe candidații observați pentru care măsurătorile nu permit deducerea unei perioade grosiere de rotație.
- 3. Pentru 15 din asteroizii observați a putut fi calculată perioada de rotație proprie (spinul) și concomitent determinată curba de lumină compusă. Este pentru prima dată în literatura când se publică aceste date ale asteroizilor din esanționul selectat** (Birlan et al., 1996; Birlan, 1996; Florczak et al., 1997). Pentru calculul perioadei de rotație s-a utilizat un algoritm pe baza calculului de transformata Fourier, propus de A. Harris și D. Lupishko (1989), transpus în Fortran 77 pentru PC.
- 4. Cea mai mare parte a acestor asteroizi au fost observați utilizându-se ca detector o camera CCD.** Camera CCD este un detector performant, care oferă multiple avantaje în comparație cu fotometria clasică în care se utilizează un fotometru (capitolul VI). **Acest tip de detector a permis îmbunătățirea calității măsurătorilor cu aproximativ un ordin de mărime.** Autorul prezentei lucrări face parte din echipa de la Institutul Astronomic al Academiei Române care începând cu anul 1995 au testat și

utilizat pentru prima data în România (în observații astronomice) un detector CCD. Chiar dacă pe plan mondial acest tip de detector este utilizat cu succes de peste șapte ani, adaptarea instrumentelor din Institutul Astronomic la noua tehnică și însușirea tehnicii de observație cu CCD, constituie achiziții indiscutabile (și obligatorii) pentru astronomia românească.

5. Din cei 21 asteroizi observați, șase au fost aleși dintre asteroizii așezați favorabil pentru survolul sondei spațiale ROSETTA. **Pentru doi dintre acestia a putut fi calculată perioada de rotație proprie și determinată curba de lumina compusă.** Aceste rezultate fac parte din rezultatele științifice incluse în programul științific de pregătire la sol a misiunii spațiale ROSETTA și coordonat de Agenția Spațială Europeană ;
6. **Acest studiu fotometric a permis optimizarea mecanismului de identificare a asteroidului în câmpul instrumentului, prin crearea unui pachet de programe care permite trasarea orbitei aparente a asteroidului în câmpul de stele vizualizat prin obiectivul telescopului** (Vaduvescu & Birlan, 1996). Pachetul de programe se numește CELESTIAL MAPS și a fost dezvoltat pentru trasarea hărților astronomice de căutare a asteroidului și adiacent pentru astrometrie. Utilitatea acestui pachet de programe se poate extinde și la alte obiecte, aparținând sistemului solar (de exemplu comete, sateliți, planete) sau obiecte exterioare sistemului solar (câmpuri de stele, roiuri de stele, obiecte nonstelare) ;
7. **Doi din asteroizii observați prezintă perioade de rotație mai mari decât 16 ore.** Mișcarea de rotație a asteroizilor cu perioadă de rotație lungă este în general și complexă, date fiind condițiile în care momentul lor cinetic s-a modificat în urma ciocnirilor distructive (Fulchignoni et al., 1995, capitolul VIII.1.). Deși sunt dificil de observați, « bias »-ul introdus de selecția pe care o face observatorul trebuie atent înlăturat, în sensul că asteroizii presupuși a avea o rotație complexă (și care nu au fost rezolvați după una sau două campanii de observație) nu trebuie să fie evitați de la noi observații.
8. **Pentru 6 din asteroizii observați rezultatele sunt încă parțiale și momentan nerelevante ;** de aceea îmi propun continuarea observării acestora pentru aflarea perioadei <perioadelor de rotație proprie. În acest scop îmi vor fi necesare mai multe perioade de observație a asteroizilor, în condiții geometrice favorabile (adică la opoziție) ;
9. **Perioadele de rotație proprie calculate măresc cu 6% baza de date existentă pentru asteroizii de diametru inferior valorii de 50 km.** Asteroizii de diametru mic joacă un rol esențial în transarea polemicii coform căreia asteroizii reprezintă (sau nu) o populație dinamic-relaxată (capitolul VIII.1). Pornind de la perioadele de rotație proprii (respectiv vitezele unghiulare) putem trasa evoluția pe care aceste corpuri (de talie mică) au avut-o în urma ciocnirilor la care au fost supuse. Fiecare ciocnire, atunci când nu duce la ruperea corpurilor (eveniment catastrofic), conduce la modificarea aleatoare a momentului cinetic al obiectelor : în general, asteroizii de mică dimensiune sunt mai degrabă accelerați, în timp ce asteroizii de mari dimensiuni, cu un moment de inerție mare, sunt încetiniți.
10. **Perioadele de rotație calculate au fost suprapuse peste distribuția experimentală a asteroizilor de mică dimensiune (din literatură). S-a putut constata astfel că ele se distribuie uniform pe o plajă întinsă de perioade de rotație (Figura 43).** Aceasta conduce la ideea preliminară că

cele 6% noi date incluse în esantion confirma concluziile deja impuse în literatura (Fulchignoni et al. 1995) conform carora populatia de asteroizi de dimensiuni reduse poate fi reprezentata ca o suma de trei subpopulatii distincte : o subpopulatie ce pastreaza momentul cinetic initial, o subpopulatie ce a câstigat moment cinetic în urma ciocnirilor mutuale ; a treia subpopulatie ce a pierdut din momentul cinetic initial si acum se rotesc foarte lent. Increderea în aceasta concluzie este întarita si de faptul ca asteroizii din esantionul observat a fost alesi aleator, fara criterii care ar putea orienta « a priori » rezultatele. Astfel, o parte din asteroizi au fost alesi dintre cei nerezolvati de campanii anterioare ale altor observatori. Pentru 2 din acestia s-a putut constata perioade de rotatie proprii lungi, în timp ce alti doi au perioade de rotatie relativ scurte (sub 6h). Pentru ceilalti asteroizi ai esantionului, alegerea dintre asteroizii de talie mica a fost complet aleatoare. Asteroizii candidati la survolul misiunii ROSETTA, continuti în esantion, nu au avut nici un alt criteriu de alegere.

11. **Ciocnirile mutuale distructive din centura principala de asteroizi, constituie o ipoteza de lucru plauzibila în explicarea diversitatii morfologice a asteroizilor (capitolul VIII.2.).** Chiar daca temperatura joaca un rol important în momentul formarii asteroizilor, « eroziunea » produsa ca urmare a ciocnirilor mutuale distructive din cadrul centurii principale de asteroizi poate explica întrepatrunderea diverselor clase taxonomice pe anumite intervale de distanta heliocentrica (Birlan et al. 1996).

Pe masura aprofundarii cunostintelor despre populatia asteroidala oamenii de stiinta vor cavea o imagine mai completa a sistemului solar, etapa necesara în procesul « cuceririi » de noi lumi.



Bibliografie

1. Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V. - *Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction*, Science, 208, 1095-1108, 1980 ;
2. Angeli-Bourget C. - *Determination des proprietes rotationnelles d'asteroides: des indices pour interpreter leur histoire evolutive*, These de doctorat, Paris, 1995;
3. Barucci M.A. - *Etude de la Physique, la dynamique et la chimie des petits corps du systeme solaire* .Habilitation a diriger des recherches ès Science Physiques, Universite Paris VII, 1993 ;
4. Barucci M.A., Casacchia R., Fulchignoni M., Burchi R., Di Paoloantonio A., Giuliani C., Milano L., Scaltriti F., Zappala V. - *Laboratory simulation of photometric lightcurves of asteroids* The Moon and the Planets 27, 387-395, 1982;
5. Barucci M.A., Capria M.T., Coradini A., Fulchignoni M., *Classification of asteroids using G-mode analysis*, Icarus 72, 304-324, 1987;
6. Barucci M.A., Capria M.T., Fulchignoni M., Harris A.W. - *On the shape and albedo variaion of asteroids: results from Fourier analysis of synthetic and observed lightcurves* Icarus 78, 311-322, 1989;
7. Barucci M.A., Fulchignoni M. - *Constraints on the origin of the solar system by the asteroid population* Annales Geophysicae 8, vol 9, 571-578, 1990;
8. Barucci M.A., Cellino A., De Sanctis C., Fulchignoni M., Lumme K., Zappala V., Magnusson P. - *Ground-based Gaspra modelling: comparison with the first Galileo image* Astron. & Astrophys. 266, 385-394, 1992;
9. Barucci M.A., Di Martino M., Dotto E., Fulchignoni M., Rotundi A. - *Rotational properties of small asteroids: photoelectric observations of 16 asteroids* Icarus 109, 267-273, 1994;
10. Barucci M.A., **Birlan M.** - *Photométrie CCD : application aux astéroïdes* C.R. Quatrièmes rencontres des Carcassonne sur les techniques de detection optique en astronomie, Carcassonne, Mai 1996 ;
11. **Birlan M.** - *On the physical and dynamical properties of asteroids* Rom. Astron. J. vol 3. n. 2, 123-126, 1993;
12. **Birlan M.**, Bocsa G. - *Observations of minor planets in 1991-1994 at the Bucharest Astronomical Observatory* Rom. Astron. J. vol 5, n. 2, 185-191, 1995;
13. **Birlan M.**, Barucci M.A., Fulchignoni M. - *G-mode analysis of the reflection spectra of 84 asteroids*, Astron. & Asptroph. 305, 984-988, 1996;
14. **Birlan M.**, Barucci M.A., Angeli C., Doressoundiram A., De Sanctis M.C. - *Rotational properties of minor planets: CCD observations of nine small asteroids* vol 44, n. 6, 1996;
15. **Birlan M.**, Fulchignoni M., Barucci M.A. - *Effects of IRAS albedo correction on the G-mode asteroid taxonomy* Icarus, 124, 352-354 ;

16. **Birlan M.** - *CCD photometry of the asteroid 2419 Moldavia* Rom. Astron. J., vol 6, n.1, 1996 ;
17. Bobrovnikoff N.T.- *The spectrum of minor planets* Lick Obs. Bull. XIV, 18-27, 1929;
18. Budding E. - *An Introduction to Astronomical Photometry* Cambridge Univ. Press, 1993 ;
19. Burns R.G. - *Mineralogical application of crystal field theory* New York, Cambridge Univ. Press, 1970;
20. Chapman C.R., Morrison D., Zellner B. - *Surface properties of asteroids : A synthesis of polarimetry, radiometry and spectrophotometry* Icarus, 25, 104-130, 1975 ;
21. Chapman C.R. - *Implications of the inferred compositions of asteroids for their collisional evolution* Mem. Soc. Astron. Italiana 57, 103-114; 1986;
22. Colas F., Serrau M. - *ASTROL 3.0 - Programme de traitement d'images astronomiques* 1991;
23. Coradini A., Fulchignoni M., Fanucci O., Gavrishin A.I. - *ãA FORTRAN V program for a new classification technique: ãThe G-mode central methodã* Comp. & Geosci. 3, 85-105, 1977;
24. Cunningham C.J. - *Introduction to asteroids* Willmann-Bell Inc. Virginia, 1988;
25. Davis D.R., Chapman C.R., Greenberg R., Harris A.W. - *Collisional evolution of asteroids:populations, rotations and velocities* in ASTEROIDS, ed Tom Gehrels, Univ.of Arizona Press, Tucson, 528-557, 1979;
26. Dotto E. - *Determinazione delle proprieta fisiche degli asteroidi; calibrazione dei metodi di inversione delle osservazioni da Terra sulla base di dati da sonde interplanetare* Tesi di Dottorato, Universita di Padova, 1993-1994;
27. Dotto E., Barucci M.A., Fulchignoni M. - *Ground-based Ida model: comparison with the first Galileo image* Planetary & Space Science 43, 683-694, 1995;
28. Ferraz-Melo S. - *Kirkwood gaps and resonant gaps* in Asteroids, Comets, Meteors 1993, Eds. A. Milani, M. Di Martino, A. Cellino , Kewler Academic Publishers London, 175-188, 1993;
29. Florczak M., Dotto E., Barucci M.A., **Birlan M.**, Erikson A., Fulchignoni M., Nathues A., Perret L., Thebault P. - *Rotational properties of main belt asteroids : photoelectric and CCD observations of 15 objects* Planetary & Space Science (acceptat spre publicare) ;
30. Fulchignoni M., Barucci M.A. - *Numerical algorithms modeling asteroids* B.A.A.S., 20, 866, 1988;
31. Fulchignoni M., Barucci M.A., Di Martino M., Dotto E. - *On the evolution of the asteroid spin*, Astron. & Astroph. 299, 929-932, 1995;
32. Gaffey M.J. - *Spectral reflectance characteristics of the meteorite classes* J. Geoph. Res. 81, 905-920, 1976;

33. Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P. - *Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy* in ASTEROIDS II, eds. R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews, Univ. of Arizona Press, 97-127, 1989;
34. Gehrels T. - *Minor planets I. The rotation of Vesta* Astron. J. 72, 929-938, 1967;
35. Greenberg R. - *Planetesimal to planets* in FORMATION of PLANETARY SYSTEMS, Ed. Andre Brahic, Centres National d'Etudes Spatiales-France, 1982 ;
36. Groeneveld I., Kuiper G.P. - *Photometric studies of asteroids* Astrophys. J. 120, 529-546, 1954;
37. Harris A.W. - *Asteroid lightcurves studies* in Asteroids, Comets, Meteors II, 35-44, 1986;
38. Harris A.W., Lupishko D.F. - *Photometric lightcurve observations and reduction techniques* in ASTEROIDS II, eds. R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews, Univ. of Arizona Press, 39-53, 1989;
39. Harris A.W., Young J.W., Bowell E., Martin L.J., Millis R.L., Poutanen M., Scaltriti F., Zappala V., Schober H.J., Zeigler H.W. - *Photometric observations of asteroids 3, 24, 60, 261 and 863* Icarus 77, 171-186, 1989;
40. Howell S.B., Mitchell K.J., Warnock A. - *Statistical error analysis in CCD time-resolved photometry with applications to variable stars and quasars*, Astronomical J. 95, 247-256;
41. Hoyle F. - *The Cosmogony of the Solar System*, University College Cardiff Press, 1978 ;
42. Iova I. - *Elemente de optica aplicata*, Editura Stiintifica si Enciclopedica, 1977 ;
43. Kargel J.S. - *Metalliferous asteroids as potential sources of precious metals* Journal of Geoph. Res., vol 99 n. E10, 21129-21141, 1994 ;
44. Kowal C.T. - *Chiron* in ASTEROIDS I, ed. T. Gehrels Univ. of Arizona Press, 436-439, 1979;
45. Kowal C.T. - *Asteroids their nature and utilization* Ellis Horwood Ltd. 1988 ;
46. Lagerkvist C.I., Barucci M.A. - *Asteroids: distributions, morphologies, origins and evolution* Surveys in Geophysics, 13, 165-208, 1992;
47. Lagerkvist C.I., Barucci M.A., Capria M.T., Dahlgren M., Fulchignoni M., Magnusson P. - *Asteroid Photometric Catalogue* second update, Uppsala University, 1991;
48. Lazzarin M. - *Studio spettrofotometrico dei corpi primitivi del sistema solare* Tesi di Dottorato, Universita di Padova, 1994;
49. Landolt A.U. - *UBVRI photometric standard stars around the celestial equator* Astron. J., 88, 439-460, 1983;
50. Landsberg G.S. - *Optica* , Editura tehnica, Bucuresti, 1958 ;
51. Lena P. - *Methodes physiques de l'observation* Editions du CNRS, 1989 ;

52. Lebofski L.A., Spencer J.R. - *Radiometry and thermal modeling of asteroids* in ASTEROIDS II, eds. R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews, Univ. of Arizona Press, 128-147, 1989;
53. Meech K.J., Belton M.J.S. - *The atmosphere of 2060 Chiron* Astron. J. 100, 1323-1338, 1990;
54. Ostro S.J. - *Radar observations of asteroids* in ASTEROIDS II, eds. R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews, Univ. of Arizona Press, 192-212, 1989;
55. Ostro S.J., Rosema K.D., Hudson R.S., Jurgens R.F., Giorgini J.D., Winkler R., Yeomans D.K., Choate D., Rose R., Slade M.A., Howard S.D., Mitchell D.L.- *Extreme elongation of asteroid 1620 Geographos from radar images* Nature, 375, 474, 1995;
56. Roth G.D. - *The System of Minor Planets*, Faber & Faber Ltd., London, 1962;
57. Russel H.N. - *On the light-variations of asteroids and satellites* Astrophysical J., 24, 1-18, 1906;
58. Russel H.N. - *On the albedo of the planets and their satellites* .Astrophysical J. XLII, n. 3, 173-195, 1916;
59. Taylor R.C. - *Pole orientation of asteroids* in ASTEROIDS I, Ed. T. Gehrels Univ. of Arizona Press, Tucson, 480-493, 1979;
60. Taylor R.C., Tedesco E.F. - *Pole orientation of asteroid 44 Nysa via photometric astrometry, including a discussion of the method's application and its limitations* Icarus, 54, 13-22, 1983;
61. Tedesco E.F., Matson D.L., Veeder G.J. - *Classification of IRAS asteroids* in ASTEROIDS II, eds. R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews, Univ. of Arizona Press, 290-297, 1989;
62. Tedesco E.F., Williams J.G., Matson D.L., Veeder G.J., Gradie J.C., Lebofsky L.A. - *A three-parameter asteroid taxonomy* Astron. J., 97, 580-606, 1989;
63. Tedesco E.F. - *The IRAS Minor Planet Survey* Phillips Laboratory Technical Report No. PL-TR-92-2049, Hanscom Air Force Base, MA, 1992;
64. Tholen D.J., Barucci A.M. - *Asteroid taxonomy* in ASTEROIDS II, eds. R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews, Univ. of Arizona Press, 298-315, 1989;
65. Tholen D.J. - *Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry*, Ph.D thesis, Univ. of Arizona, 1984;
66. Vaduvescu O., **Birlan M.** - *Software package for preparing and processing an astronomical observations* Rom. Astron. J ., vol 6, n.1, 1996 ;
67. Xu S., Binzel R.P., Burbine T.H., Bus S.J. - *Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey : Initial Results* Icarus, 115, 1-35, 1994 ;
68. Wetherill G.W., Chapman C.R. - *Asteroids and meteorites* in METEORITE AND THE EARLY SOLAR SYSTEM, Eds. J.F. Kerridge, M.S. Matthews, Univ. of Arizona Press, 1988 ;

69. Zappala V., Knezevic Z. - *Rotation axes of asteroids: results for 14 objects* Icarus 59, 436-455, 1984;
70. Zellner B., Gradie J. - *Minor planets and related objects. XX. Polarimetric evidence for the albedos and compositions of 94 asteroids* Astron. J. 81, 262-280, 1976 ;
71. Zellner B. - *Asteroid taxonomy and the distribution of the compositional types* in ASTEROIDS, Ed. T. Gehrels, Univ. of Arizona Press, Tucson, 783-806, 1979;
72. Zellner B., Tholen D.J., Tedesco E.F., *The Eight Color Asteroid Survey: Results for 598 minor planets* Icarus 61, 355-416, 1985

ANEXA LUCRARI

ARTICOLE IN REVISTE CU REFERENTI

Mirel BIRLAN, Maria Antonietta BARUCCI, Claudia ANGELI, Alain DORESSOUNDIRAM, Maria Cristina DeSANCTIS - *'Rotational properties of asteroids: CCD observations of nine small asteroids'* in **Planetary & Space Science** vol. **44**, n. **6**, 555-558, 1996;

Mirel BIRLAN - *'CCD photometry of the asteroid 2419 Moldavia'*, in **Romanian Astronomical Journal** vol. **6**, n. **1**, 31-34, 1996;

Mirel BIRLAN, Maria Antonietta BARUCCI, Marcello FULCHIGNONI - *'G-mode analysis of reflection spectra for 84 asteroids'* in **Astronomy & Astrophysics** vol **305** n. **2**, 984-988, 1996;

Mirel BIRLAN, Marcello FULCHIGNONI, Maria Antonietta BARUCCI - *'Effects of IRAS albedo corrections on Barucci's asteroid taxonomy'*, en **ICARUS**, **124**, 352-354, 1996;

Mirel BIRLAN - *'On the physical and dynamics properties of asteroids'*, in **Romanian Astronomical Journal** vol. **3**, n. **2**, 123-126, 1993;

Mirel BIRLAN, Gheorghe BOCSA - *'Observations of minor planets in 1990-1994 at the Bucharest Astronomical Observatory'*, in **Romanian Astronomical Journal**, vol. **5**, n. **2**, 185-191, 1995;

Ovidiu VADUVESCU, Mirel BIRLAN - *'Software package for preparing and processing of an astronomical observation'*, in **Romanian Astronomical Journal** vol. **6**, n. **1**, 97-99, 1996;

Gheorghe VASS, Gheorghe BOCSA, Victor IONESCU, Ana ALEXIU, Mirel BIRLAN - *'Wide field plate archive data base in Bucharest'*, in **Romanian Astronomical Journal** vol. **4**, n. **2**, 179-181, 1994;

Marcos FLORCZAK, Elisabetta DOTTO, Maria Antonietta BARUCCI, Mirel BIRLAN, Anders ERIKSON, Marcello FULCHIGNONI, A. NATHUES, Laure PERRET, Philippe THEBAULT - *'Rotational properties of main belt asteroids: Photoelectric and CCD observations of 15 objects'* in **Planetary & Space Science** vol 45, n. 11, 1997 ;

ARTICOLE PUBLICATE LA CONFERINTE

Maria Antonietta BARUCCI, Mirel BIRLAN - *Photométrie CCD: application aux astéroïdes* trimis spre publicare la **Quatrième rencontres des Carcassonne sur les techniques de detection optique en astronomie**, Carcassonne, Mai, 1996