

**UNIVERSITATEA „BABEȘ-BOLYAI” CLUJ-NAPOCA
FACULTATEA DE MATEMATICĂ ȘI INFORMATICĂ**

TEZĂ DE DOCTORAT

**STUDIUL UNOR FENOMENE DINAMICE
DIN SISTEMUL SOLAR**

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof. Univ. Dr. Árpád PÁL

DOCTORAND:

Ovidiu VĂDUVESCU

CLUJ-NAPOCA

-1997-

CUPRINS

INTRODUCERE	pag. 5
1. PROBLEME ALE DINAMICII CORPURILOR DIN SISTEMUL SOLAR	pag. 10
1.1. TRATAREA CLASICĂ A DINAMICII CORPURILOR DIN SISTEMUL SOLAR	pag. 10
1.1.1. Problema celor două corpuri	
1.1.1.1. Mișcarea relativă	
1.1.1.2. Integralele prime	
1.1.1.3. Elementele orbitale	
1.1.1.4. Soluția generală a problemei	
1.1.2. Problema celor n corpuri	
1.1.2.1. Problema celor trei corpuri	
1.1.2.2. Problema restrânsă a celor trei corpuri	
1.1.2.3. Ecuațiile Euler-Lagrange	
1.1.2.4. Ecuațiile de mișcare în problema celor n corpuri	
1.1.2.5. Integralele prime ale ecuațiilor în problema celor n corpuri	
1.1.3. Stabilitatea Sistemului Solar	
1.1.3.1. Introducere	
1.1.3.2. Concepte de stabilitate	
1.1.3.3. Teorema lui Spuru Haret	
1.1.3.4. Abordare numerică a problemei stabilității	
1.2. METODE DE INTEGRARE NUMERICĂ A ECUAȚIILOR DE MIȘCARE	pag. 26
1.2.1. Metoda lui Cowell	
1.2.2. Metoda lui Encke	
1.2.3. Metode Runge-Kutta	
1.2.4. Alte metode de integrare	
1.3. PROBLEMA INVERSĂ - METODE DE DETERMINARE A ORBITELOR	pag. 31
1.3.1. Introducere	
1.3.2. Metoda lui Gauss	
1.3.2.1. Probleme preliminare	
1.3.2.2. Algoritm de calcul	
1.3.3. Metoda lui Laplace	
1.3.3.1. Probleme preliminare	
1.3.3.2. Algoritm de calcul	
2. SISTEME DE REFERINȚĂ ÎN ASTRONOMIE	pag. 40
2.1. SISTEME ȘI REPERE DE REFERINȚĂ	pag. 40
2.1.1. Terminologie	
2.1.2. Repere de referință absolute	
2.1.2.1. Repere stelare. Cataloage	
2.1.2.2. Repere extragalactice	
2.1.3. Repere de referință dinamice	
2.1.3.1. Reperul DE 200/LE 200	
2.1.3.2. Reperul ELP 2000/VSOP 82	
2.1.3.3. Repere bazate pe mișcarea micilor planete	
2.1.4. Sisteme de referință relativiste	
2.1.4.1. Poziția aparentă a unui corp într-un BRS	
2.1.4.2. Poziția aparentă a unui corp într-un GRS	
2.1.4.3. Poziția aparentă a unui corp într-un TRS	
2.2. SISTEMUL CONSTANTELOR ASTRONOMICE UAI	pag. 53
2.2.1. Scurt istoric	
2.2.2. Sistemul constantelor astronomice UAI 1976	
2.2.2.1. Unități de măsură	
2.2.2.2. Constante astronomice	

3. PARAMETRII FIZICI ȘI ORBITALI AI ASTEROIZILOR	pag. 59
3.1. 6678 DE ASTEROIZI CATALOGAȚI	pag. 59
3.2. PARAMETRII FIZICI AI ASTEROIZILOR	
3.2.1. Magnitudine	
3.2.1.1. Magnitudine aparentă	
3.2.1.2. Magnitudine absolută	
3.2.1.3. Magnitudine medie la opoziție	
3.2.1.4. Magnitudine redusă	
3.2.2. Albedo	
3.2.3. Diametru	
3.2.4. Masă	
3.2.4.1. Predicția apropierilor mutuale	
3.2.4.2. Determinarea maselor din perturbații gravitaționale	
3.3. PARAMETRII ORBITALI AI ASTEROIZILOR	pag. 67
3.3.1. Elemente proprii și familii de orbite	
3.3.2. Metode de clasificare	
3.4. BAZE DE DATE	pag. 69
3.4.1. ASTEROIDS II	
3.4.2. IRAS Minor Planet Survey	
3.4.3. Parametrii statistici ai populației de asteroizi	
3.4.4. Aplicații pe baze de date	
4. TEHNICA OBSERVAȚIILOR CCD	pag. 78
4.1. PRINCIPII FUNCȚIONALE ȘI PERFORMANȚE	pag. 78
4.1.1. Descrierea generală a dispozitivului	
4.1.2. Principiul transferului de sarcină	
4.1.3. Performanțele dispozitivelor CCD	
4.2. ACHIZIȚIA IMAGINILOR CCD	pag. 80
4.2.1. Timp de integrare și timp de lectură	
4.2.2. „Ferestre” de lucru	
4.2.3. Modul „binning”	
4.3. PREPROCESAREA IMAGINILOR CCD	pag. 81
4.3.1. Hartă termică	
4.3.2. Imagine iluminată uniform	
4.3.3. Corecții de hartă termică și flat-field	
4.4. REPREZENTAREA MATEMATICĂ A UNUI PROFIL STELAR	pag. 86
4.5. PROCESAREA IMAGINILOR CCD	pag. 87
4.5.1. Vizualizarea imaginilor	
4.5.2. Transformări aritmetice	
4.5.3. Transformări geometrice	
4.5.4. Filtre de imagine	
4.5.5. Filtre de contur	
4.5.6. Izofote	
5. ASTROMETRIA DE CÂMP MIC	pag. 92
5.1. ASTROMETRIA FOTOGRAFICĂ	pag. 92
5.1.1. Transformarea „cer - placă”	
5.1.2. Reducerea observațiilor fotografice	
5.1.3. Baze de date	
5.1.3.1. Arhiva de plăci de câmp larg (WFPA), București	
5.1.3.2. Baza de date de plăci cu câmp larg (WFPDB), Sofia	

5.2. ASTROMETRIA CCD	pag. 95
5.2.1. Reducerea observației CCD	
5.2.2. Orientarea receptorului față de planul fundamental	
5.2.2.1. Determinarea orientării folosind stele PPM	
5.2.2.2. Determinarea orientării folosind roiurile stelare	
5.2.2.3. Posibile erori în determinarea orientării	
5.2.3. Existența stelelor de reper în câmpul camerei CCD	
5.2.3.1. Studiu statistic asupra principalelor cataloage	
5.2.3.2. Programe pentru planificarea observațiilor	
6. REZULTATE	pag. 102
6.1. PREGĂTIREA OBSERVAȚIILOR	pag. 102
6.1.1. Catalogul PPM pentru determinarea orientării	
6.1.2. Programe pentru realizarea hărților cerești	
6.1.3. Programe pentru calculul de efemeridă	
6.1.4. Configurațiile sistemelor de sateliți planetari	
6.1.5. Predicția apropiierilor strânse și a ocultațiilor	
6.1.6. Determinarea ecuației personale în cazul observațiilor vizuale	
6.2. REDUCEREA OBSERVAȚIILOR	pag. 108
6.2.1. Determinarea orientării camerei	
6.2.2. Determinarea pozițiilor astronomice absolute	
6.2.2.1. Poziții aparente și astrometrice	
6.2.2.2. Poziții topocentrice și geocentrice	
6.2.2.3. Influența refracției în reducerea pozițiilor absolute	
6.2.3. Determinarea orbitei preliminare	
6.2.4. Reducerea apropiierilor strânse și a ocultațiilor	
6.2.4.1. Metoda pozițiilor relative	
6.2.4.2. Metoda pozițiilor absolute	
6.2.4.3. Racordarea cu alte observații	
6.2.5. Reducerea ocultațiilor lunare	
6.3. ASTROMETRIA SATELIȚILOR PLANETARI	pag. 113
6.3.1. Astrometria sistemelor de sateliți planetari	
6.3.2. Fenomene mutuale în sistemele de sateliți planetari	
6.3.3. Participare în cadrul campaniei internaționale PHESAT 95	
6.4. ASTROMETRIA CORPURILOR MICI	pag. 116
6.4.1. Observații CCD de mici planete	
6.4.2. Observații de comete	
6.5. OBSERVAȚII CCD ALE OCULTAȚIILOR LUNARE	pag. 120
6.5.1. Geometria unei ocultații	
6.5.2. Probleme ale observației CCD	
6.5.3. Probleme de procesare și măsurare a imaginilor	
6.5.4. Observații CCD de ocultații lunare	
6.6. DIMENSIUNI ALE ASTEROIZILOR DEDUSE DIN OCULTAȚII	pag. 126
6.6.1. Ocultații și apropieri strânse	
6.6.2. Frecvența ocultațiilor	
6.6.3. Predicția fenomenelor	
6.6.3.1. Studii de cataloage stelare	
6.6.3.2. Studii fotografice	
6.6.4. Participare în cadrul rețelei europene de observație EAON	
6.6.5. Aplicații în cazul apropiierilor strânse	
6.6.5.1. Rezultate observaționale obținute la București	
6.6.5.2. Racordarea cu alte observații	
BIBLIOGRAFIE	pag. 137

Introducere

Începând cu 1 ianuarie 1801, de la descoperirea de către Giuseppe Piazzi a primului asteroid, (1) Ceres, au fost observate circa 30000 de mici planete (Barucci, 1996), dintre care aproape 7000 au fost catalogate (Batrakov, 1996). Avem informații asupra orbitelor a 855 de comete, cuprinse în ediția din 1993 a catalogului de Orbite Cometare (Marsden et al, 1994). Numărul acestora continuă să crească, datorită inițierii de programe de cercetare în cooperare internațională, și a utilizării unor tehnici noi de observație. Numărul sateliților cunoscuți ai planetelor din Sistemul Solar se ridică astăzi la 60 (Stavinschi et al, 1996), planetele gigant alcătuind veritabile sisteme cu mai mult de 15 corpuri.

Parametrii orbitali și fizici ai acestor corpuri din Sistemul Solar sunt determinați - în limita posibilităților - pe baza a numeroase și variate tehnici, din observații de la sol și din spațiul cosmic. Cu 10 ani în urmă, sonda spațială Giotto a „vizitat” cometa Halley, iar acum câțiva ani sonda spațială Galileo l-a descoperit pe Dactyl, primul satelit cunoscut al unei mici planete (Chapman, 1994). Numeroase misiuni spațiale au „survolat” la foarte mică distanță majoritatea planetelor și sistemele lor de inele și sateliți, iar două dintre aceste nave au părăsit deja Sistemul Solar.

Catalogarea și studiul acestui număr impresionant de obiecte sunt motivate în primul rând de utilizarea elementelor orbitale și a datelor fizice pentru confirmarea sau infirmarea ipotezelor cosmogonice referitoare la geneza și evoluția Sistemului Solar. Pentru a afla cum a apărut „centura” de asteroizi sau sistemele de sateliți și inele ale planetelor, cum va evolua din punct de vedere dinamic Sistemul Solar, trebuie să cunoaștem cât mai exact parametrii corpurilor care-l populează.

O altă motivație a acestor cercetări se referă la problema stabilității Sistemului Solar, și în special la posibilitatea unor coliziuni între planete, asteroizi sau comete. Programe automate de observații dezvoltate în ultimii șapte ani (Scotti, 1994, Harris, 1994) cercetează spațiul cosmic, pentru a inventaria obiectele cu orbite „periculoase” pentru planeta noastră. Studii recente evaluează dimensiunile unui obiect periculos la minimum 100m, calculând posibilitatea unei coliziuni catastrofice globale la 500000 de ani, iar cea a unui fenomen similar evenimentului Tungus (meteorit ipotetic căzut în 1908 în Taigaua Siberiană) la 300 de ani ... (Morrison, 1992). Astăzi, ciocnirea cometei Shoemaker-Levy 9 cu planeta Jupiter, observată în anul 1994 de astronomii de pe tot globul și din spațiul cosmic, constituie un argument important pentru veridicitatea predicțiilor noastre științifice.

Deși cercetarea spațială poate aduce probe de importanță covârșitoare în raport cu observațiile de la sol, distanțele uriașe care ne despart în Sistemul Solar și numărul extrem de mare al corpurilor care îl populează fac imposibilă survolarea unui număr semnificativ dintre acestea. În consecință, parametri fizici ai acestor corpuri sunt determinați în general în mod indirect, prin observații de la distanță (de la sol sau de pe stațiile spațiale).

Tehnicile moderne de observare a corpurilor mici (radio, infraroșu, interferometria de pete, CCD - *Charged Couple Device*, dispozitiv cu transfer de sarcină) permit o abordare eficientă a problemelor complexe legate de determinarea parametrilor fizici ai acestor corpuri, datorită randamentului mult ridicat față de metodele clasice. Randamentul crescut al acestor tehnici face acum posibilă observarea eficientă a unor fenomene astronomice cu dinamică rapidă, în care sunt implicate corpurile mici din Sistemul Solar.

Fenomenele astronomice cu dinamică rapidă reprezintă fenomenele a căror observație oferă circumstanțe potrivite pentru determinarea cu mare precizie a unor parametri fizici și orbitali ai micilor corpuri din Sistemul Solar. Lucrarea de față este dedicată în primul rând predicției, observării și reducerii fenomenelor astronomice cu dinamică rapidă în care sunt implicate planetele mici, cometele și sateliții planetari. Exemple de astfel de fenomene sunt: apropierile aparente ale asteroizilor și cometelor de stele de catalog - oferind informații foarte exacte din punct de vedere astrometric și dinamic asupra acestor corpuri; ocultările stelelor de către mici planete sau comete - din care rezultă informații exacte asupra diametrelor acestor corpuri; ocultările lunare; și fenomenele mutuale în sistemele de sateliți planetari - din care rezultă parametri geometrici ai configurațiilor și pozițiile precise ale sateliților (Petrescu, 1939; Aksnes, 1974).

Dispozitivul CCD reprezintă tehnica principală de observație utilizată în acest studiu. În unele cazuri s-au folosit pentru comparație și observații fotografice, sau chiar vizuale. Observațiile noastre au fost efectuate la Observatorul din București al Institutului Astronomic al Academiei Române, în perioada 1995-1997.

Capitolul întâi al lucrării, Probleme ale dinamicii corpurilor din Sistemul Solar, face o scurtă trecere în revistă a stadiului actual al cercetării dinamicii corpurilor din Sistemul Solar, enunțând principalele rezultate clasice și moderne. Capitolul este structurat în trei subcapitole.

Primul subcapitol prezintă tratarea clasică a mișcării corpurilor din Sistemul Solar, acordând o atenție specială problemei stabilității orbitelor. Al doilea subcapitol tratează sub aspect numeric problema directă a mecanicii cerești, iar al treilea trece în revistă câteva metode de rezolvare a problemei inverse (determinarea orbitelor prin metodele Laplace și Gauss), în relație cu precizia și randamentul noilor tehnici de observare.

Capitolul al doilea, *Sisteme de referință în astronomie*, prezintă problemele legate de stabilirea și utilizarea sistemelor de coordonate spațio-temporale, propunând distincția între noțiunea teoretică de sistem de referință și materializarea sa astronomică în reper de referință. Sistemul constantelor astronomice ocupă un rol important în definirea sistemelor de referință, dictat pe de o parte de viabilitatea modelului matematic prezentat (dinamica Sistemului Solar), iar pe de alta de toleranța rezultatelor la precizia observațiilor actuale.

Primul subcapitol prezintă clasificarea reperelor de referință utilizate în astronomie, în funcție de alegerea reperului, în trei categorii: absolute (stelare sau extragalactice), dinamice (definite de teorii moderne de mișcare ale planetelor sau asteroizilor), și relativiste. Am acordat aici o atenție specială reperelor stelare de referință, și în principal catalogului fundamental FK5 (*Fundamental Katalog* - a 5-a ediție) și a celui de compilare PPM (*Positions and Proper Motions*, Poziții și Mișcări Proprii), utilizate în mod curent în restul lucrării.

Al doilea subcapitol prezintă sistemul constantelor astronomice definit de Uniunea Astronomică Internațională (UAI) în 1976 și intrat în vigoare în 1984 (cu valori precizate la fiecare Adunare Generală UAI după 1976). Problemele teoretice și practice legate de definirea sistemului constantelor astronomice au implicații în cea mai mare parte a capitolelor următoare din teză.

Capitolul trei al tezei, *Parametrii fizici și orbitali ai micilor planete*, conține trei subcapitole. În primul sunt definiți parametrii fizici ai corpurilor mici din Sistemul Solar (magnitudine, albedo, diametru și masă), iar în al doilea cei orbitali (elementele geometrice ale unei orbite medii, neperturbată și perturbată gravitațional de planetele mari). Ultimul subcapitol prezintă două baze de date ce conțin parametrii orbitali și fizici ai micilor planete, dezvoltând o aplicație de clasificare multidimensională pe aceste baze de date, care pune pe de o parte în evidență principalele familii de orbite (determinate în primul rând de rezonanțele cu planeta Jupiter), iar pe de alta unele noi posibile asocieri ale orbitelor, care ar putea fi determinate de relații încă necunoscute între elementele orbitale ale membrilor.

Capitolul patru, *Tehnica observațiilor CCD*, este dedicat tehnicilor de achiziție, preprocesare și măsurare a diferitelor categorii de imagini obținute cu camera CCD, instalată în focarul instrumentului, în locul clasicei plăci fotografice. Problemele care apar în acest stadiu al cercetării astronomice fac necesară elaborarea și aplicarea consecventă de metodologii adecvate fiecărei categorii de observație.

Primul subcapitol trece în revistă principiile funcționale și performanțele dispozitivului CCD, fără a insista asupra detaliilor tehnice ale problemei, dar evidențiind problemele de natură fizică a căror existență afectează imaginile și fac necesare operațiile preliminare reducerii (cunoscute sub denumirea de „preprocesare”).

Următoarele patru subcapitole prezintă metodele de achiziție, preprocesare și măsurare a imaginilor de diferite tipuri, precum și câteva metode de procesare (cunoscute sub denumirea de „image processing”) necesare în anumite situații.

Capitolul cinci, *Astrometria de câmp mic*, prezintă aspectele teoretice care apar la reducerea observațiilor astrometrice efectuate prin instrumente de câmp mic. Cele două subcapitole se referă la două tehnici de observație: cea fotografică și cea CCD. Deși principiul matematic al reducerii observațiilor este același, în cele două cazuri apar probleme distincte, datorate în primul rând densității relativ reduse a stelelor de reper pe sfera cerească. Câteva din contribuțiile personale ale tezei, prezentate în cadrul acestui capitol, se referă la studiul orientării camerei CCD prin mai multe metode, la realizarea unui catalog de orientare pentru câmpuri mici și la dezvoltarea unor programe de planificare pentru observațiile CCD de fenomene astronomice cu dinamică rapidă.

Capitolul principal al lucrării, *Rezultate*, cuprinde, în cele șase subcapitole, contribuțiile proprii ale autorului la predicția, observarea și studierea teoretică a unor fenomene astronomice cu dinamică rapidă.

Primele două subcapitole prezintă programele de calcul realizate de autor și folosite la predicția fenomenelor, pregătirea observațiilor și respectiv reducerea acestora. Primul subcapitol prezintă programe pentru întocmirea unui catalog de stele PPM, utilizat la stabilirea orientării camerelor CCD. Alte programe rezolvă problema efemeridelor și a orbitelor preliminare, realizează hărți ale zonelor de observat și scheme ale configurațiilor sistemelor de sateliți planetari, calculează apropieri și ocultații ale stelelor PPM de către corpuri din Sistemul Solar, determină ecuația personală în cazul observațiilor vizuale de ocultații și cronometrează observația. Al doilea subcapitol prezintă programele necesare la determinarea orientării camerei, la reducerea observațiilor CCD, a apropiierilor și a ocultațiilor de către asteroizi, și a celor lunare. Softurile sunt implementate pe calculatoare IBM PC (*Personal Computer*) și sunt dezvoltate în mediile de programare Turbo Pascal, FORTRAN și Turbo C++.

Subcapitolul trei se ocupă de reducerea observațiilor sistemelor de sateliți planetari, prezentând câteva contribuții personale în cadrul campaniei internaționale de observații PHESAT'95, la care Institutul Astronomic al Academiei Române (IAAR) a participat.

Subcapitolul patru prezintă rezultate referitoare la observații de mici planete și comete și la reducerea acestora. Tehnica CCD conferă observațiilor un caracter dinamic, determinat de reducerea mai multor poziții într-un interval foarte scurt de timp. Aceasta permite stabilirea dependențelor coordonatelor de timp, ceea ce are aplicații imediate în determinarea unei orbite preliminare. Precizia pozițiilor obținute din observații CCD este testată pe exemple de observații de mici planete și comete.

Subcapitolele cinci și șase abordează teoretic și practic câteva fenomene de apropieri strânse și ocultații de către asteroizi sau Lună, fenomene astronomice cu dinamică rapidă care oferă informații importante asupra dimensiunilor corpurilor implicate. Încă din anul 1978 s-a bănuțit, pentru prima oară, caracterul binar al unui asteroid, din analiza unei ocultații. Studii ulterioare asupra altor ocultații de asteroizi au arătat aceleași rezultate, care astăzi se constituie ca o evidență asupra existenței sateliților micilor planete. Câteva fenomene de ocultații lunare și apropieri strânse observate la București constituie suportul aplicativ al abordării teoretice, iar unul dintre aceste fenomene oferă deja o supoziție asupra caracterului binar al unui asteroid.

În încheiere, doresc să aduc un cuvânt de mulțumire *d-lui Prof. dr. Árpád Pál*, pentru ajutorul acordat în timpul stagiului de doctorat și în special pentru îndrumările cu privire la structura, elaborarea și redactarea acestei teze. Fără îndrumarea sa științifică competentă și fără o susținere morală în problemele de organizare și cercetare, această lucrare nu ar fi fost posibilă. De asemenea, pentru identificarea și depășirea unor probleme apărute în teorie, la observații sau la reducerea și interpretarea acestora, *dr. Vasile Mioc*, *dr. Tiberiu Oproiu*, și în mod deosebit *dr. Gheorghe Vass* au constituit sfetnici apropiați, atât în perioada stagiului, cât și în cea de redactare a tezei. Colegilor *Fănel Donea*, *Mirel Bîrlan* și *Gabriel Ștefănescu* le mulțumesc pentru sprijinul bibliografic și observațional. Nu în ultimul rând, fără suportul și înțelegerea conducerii *Institutului Astronomic al Academiei Române*, din punct de vedere observațional și logistic, această lucrare nu ar fi fost posibilă în condițiile în care a fost realizată.