

## CAPITOLUL 2

### SISTEME DE REFERINȚĂ ÎN ASTRONOMIE

#### 2.1. SISTEME ȘI REPERE DE REFERINȚĂ

##### 2.1.1. Terminologie

Se știe că studiul mișcărilor pozițiilor astrilor necesită definirea teoretică și construcția efectivă a sistemelor de coordonate spațio-temporale. Conform Kovalevsky și Mueller (1989), trebuie să facem distincție între concepul teoretic de sistem de referință și materializarea sa prin obiectele astronomice, desemnată de concepul de reper de referință (reper).

Pentru construcția unui sistem de referință (și, deci, și a unui reper), trebuie respectate câteva principii fundamentale. Această condiție teoretică conduce la noțiunea de sistem de referință ideal. De exemplu, un sistem de referință ceresc dinamic (numit și sistem de referință inertial), se bazează în mecanica newtoniană (legea a doua a dinamicii) pe absența, în ecuațiile de mișcare ale corpurilor cerești, ale accelerațiilor datorate rotațiilor, respectiv pe translația uniformă a reperului folosit. Odată făcută alegerea sistemului de referință ideal, trebuie aleși parametri care descriu sistemul fizic, utilizând cele mai bune date observaționale. Totuși, acești parametri conțin ușoare „arbitrarități”, din care cauză modelul poartă numele de sistem de referință convențional.

Aplicând modelul descris de sistemul de referință convențional, coordonatele unui anumit număr de puncte - obiecte astronomice sunt determinate din observații, împreună cu variația lor în raport cu timpul. Efemeridele acestor puncte definesc actualele coordonate în sistemul de referință convențional și trebuie să fie suficient de numeroase și accesibile observațiilor, astfel încât să permită determinarea coordonatelor oricărui alt punct - obiect față de acestea. Această mulțime de puncte de reper ale sistemului se numește reper de referință convențional.

Definirea detaliată a noțiunilor folosite la construcția reperelor cerești (sferă cerească, ecuator ceresc adevărat și mijlociu, ecliptică mijlocie inertială și rotațională, înclinarea eclipticii, echinocțiu dinamic adevărat și mijlociu, epocă, plan de referință și echinocțiu al unui reper) sunt definite de Touzé et al. (1994), și asupra lor nu vom insista aici.

## 2.1.2. Repere de referință absolute

### 2.1.2.1. Repere stelare. Cataloage

Un reper de referință stelar (numit și catalog de stele) reprezintă o listă de poziții stelare calculate față de un anumit sistem de referință, în general exprimate în ascensii drepte și declinații în raport cu un sistem ecuatorial la o anumită epocă (e.g. Kovalevsky, 1989). În funcție de modul de construcție, există mai multe tipuri de cataloage stelare, de care ne vom ocupa în cele ce urmează.

Cataloagele fundamentale sunt cataloage ce reprezintă un sistem de referință ceresc, constituind categoria cea mai importantă de cataloage stelare.

Unul dintre primele cataloage fundamentale este *Almagesta lui Ptolemeu* (e.g. Fricke, 1985), care conține un catalog de coordonate ecliptice a 1025 de stele bazat pe observațiile lui Hiparchos ( $\approx$  anul 150 D.Ch.), considerat între primii astrometriști ai lumii. Longitudinile și latitudinile ecliptice ale acestor stele sunt exprimate în grade și minute de arc (aproximate la 10'). Longitudinile sunt măsurate în fiecare constelație, în raport cu punctul zero al acesteia. Strălucirile fiecărei stele sunt exprimate într-o scară conținând șase magnitudini.

Conform Schmeidler (1980), după un studiu atent asupra surselor de documentare, erorile medii pentru o singură observație a coordonatelor unei stele de la Ptolemeu și pînă în zilele noastre, sunt următoarele:

Observator	Anul	Eroare medie (")
Ptolemeu	$\approx$ 100 D.Ch.	$\pm$ 500
Tycho Brahe	1600	100
Hevelius	1680	18
Bradley	1750	2
Bessel	1825	0.7
Obs. moderne	1950	$\pm$ 0.2

Tabelul 1 - Erorile medii pentru o singură observație ale diferiților autori

Seria cataloagelor fundamentale conține șapte cataloage și începe prin *Tabulae Regiomontanae* (Bessel, 1830, 36 de stele) și *FC* (Auwers, 1879, 539 de stele), continuând prin alte cinci cataloage elaborate în secolul XX: *NFK* (Peters, 1907, 925 de stele), *GC* (Boss L și B, 1937, 33342 de stele, mai puțin folosit), și seria germană *FK3* (Kopff, 1937, 1535 de stele), *FK4* (Fricke et al, 1963, 1535 de stele) și *FK5* (Fricke et al, 1989, 1535+3000 de stele). Dată fiind importanța catalogului FK5 în reducerea observațiilor actuale (inclusiv cele din capitolul șase al acestei teze), vom consacra paragraful următor acestui catalog.

**Reperul FK5** este reperul convențional adoptat de Uniunea Astronomică Internațională (UAI) în anul 1976, și utilizat în efemeride începând cu anul 1984. El este materializat prin pozițiile ecuatoriale mijlocii și mișcările proprii a 1535 de stele (alcătuind *Basic FK5* -Fricke et al, 1988, inclus și în cataloagele anterioare FK3 și FK4), îmbunătățite față de cataloagele anterioare prin determinarea corecțiilor sistematice și individuale, eliminarea erorilor în poziția echinoctiului FK4 și introducerea Sistemului Constantelor Astronomice UAI 1976 (definit în paragraful următor). La cele 1535 de stele se adaugă circa 3000 de stele mai puțin observate, alcătuind *FK5 Extension*. Circa 300 de cataloage de poziții stelare au stat la baza elaborării reperului FK5.

Precizia catalogului *Basic FK5* este estimată la  $0''.02$  în poziții și  $0''.08/\text{secol}$  în mișcări proprii (Kovalevsky, 1989). Planul fundamental de referință este planul ecuatorial mijlociu J2000 cu o precizie de ordinul a  $0''.02$ , iar echinoctiul este echinoctiul dinamic mijlociu rotațional J2000 cu o precizie de ordinul  $0''.045$  (Touzé et al, 1994).

Lungimea fizică a catalogului sub formă magnetică este de 242,530 Bytes, acesta conținând 1535 de înregistrări a câte 156 de caractere. FK5 conține 19 câmpuri de date, și anume: numărul de catalog, ascensia J2000, mișcarea proprie/secol iulian în ascensie J2000, declinația J2000, mișcarea proprie/secol în declinație J2000, ascensia B1950, mișcarea proprie/secol iulian în ascensie B1950, declinația B1950, mișcarea proprie/secol în declinație B1950, epoca medie a observațiilor individuale în ascensie, eroarea medie în ascensie, eroarea proprie în mișcarea proprie în ascensie, epoca medie în declinație, eroarea medie în declinație, eroarea proprie în mișcarea proprie în declinație, magnitudinea fotoelectrică în sistemul UBV, cod pentru variabilitate în magnitudine, clasa spectrală și identificator DM (în catalogul *Durchmusterung*).

Cataloagele instrumentale de observație reprezintă rezultatul unei anumite perioade de observații (de ordinul a 1-3 ani) realizate cu un anumit instrument (de exemplu, cerc meridian sau astrolab) într-o anumită zonă de observație (de obicei dată de declinație). Pozițiile obținute sunt în general raportate la epoca medie a observațiilor. Procedeele de transfer al datelor de la epocile de observație la epoca medie se numește reducerea observațiilor, și se efectuează potrivit standardelor definite de Sistemul Constantelor Astronomice de precesie, nutație, aberație, refracție, și de mișcări proprii (în anumite situații).

În primul referat prezentat în cadrul stagiului de doctorat, am prezentat cele nouă cataloage instrumentale realizate la București în perioada 1956-1993 folosind refractorul meridian *Gautier-Prin*  $F=2350/D=190\text{mm}$ , asupra cărora nu mai insistăm aici. La acestea se adaugă Cataloagele de Stele Duple și Strălucitoare, care conțin pozițiile a 591 de stele raportate

la epoca medie 1968,4 cu erorile medii pătratice de  $0^{\circ}.023$  în  $\alpha$  și  $0''.42$  în  $\delta$  (Liculescu et al, 1995).

Cataloagele integrate sunt alcătuite prin compilarea mai multor cataloage instrumentale realizate cu instrumente similare, reduse la aceeași epocă și comparate între ele, pentru a determina erorile sistematice instrumentale. Catalogul integrat rezultă astfel o largă porțiune a cerului. Un exemplu de catalog integrat este AGK3 (181581 de stele).

Cataloagele de compilare sunt obținute prin compilarea mai multor cataloage reduse la același sistem de referință și astfel încât fiecare stea să fie reprezentată de parametri cât mai preciși, extrași din cataloagele de compilat.

Cel mai cunoscut catalog de compilare este SAO (*Smithsonian Astrophysical Observatory Catalogue*). El conține pozițiile a 258997 stele de referință și folosește pozițiile a două cataloage fundamentale (FK3 și GC), poziții ale cataloagelor AGK2-AGK1, câteva cataloage realizate la Yale, zone selectate din catalogul astrografic *Carte du Ciel* și câteva cataloage instrumentale meridiane din emisfera sudică. Precizia pozițiilor din catalogul SAO este de  $1''.2$ , din cauză că el a fost construit în anii 1960, dar și a mișcărilor proprii puțin cunoscute.

**Catalogul PPM** (*Positions and Proper Motions*) reprezintă cel mai performant catalog de compilare în privința numărului de surse și a preciziei obținute. El a fost elaborat în două părți: PPM North (Roeser și Bastian, 1989, pentru versiunea tipărită sau Roeser și Bastian, 1991, pentru versiunea pe suport magnetic) și PPM South (Bastian et al, 1991, pentru versiunea tipărită sau Bastian et al, 1993, pentru versiunea pe suport magnetic).

Scopul principal al construcției catalogului PPM este acela de a oferi o rețea suficient de densă și de precisă, convenabilă scopurilor astrometrice actuale. Această rețea este proiectată să reprezinte cât mai bine posibil Sistemul Constantelor Astronomice UAI 1976 și reperul FK5. Cu alte cuvinte, PPM reprezintă reperul FK5 cu o densitate și la o magnitudine mult sporite, înlocuind cataloagele de compilare mai vechi AGK3 și SAO. Această înlocuire s-a efectuat pe baza a trei motive importante, și anume:

- SAO și AGK3 constituiau reprezentări ale sistemului „învechit” FK4;
- precizia pozițiilor și a mișcărilor proprii în cele două cataloage nu mai era satisfăcătoare măsurătorilor actuale;
- mișcările proprii în AGK3 și SAO erau calculate folosind doar două poziții pentru fiecare stea (ceea ce dă posibilitatea existenței erorilor grosolane).

*PPM North* conține 181731 de înregistrări de stele cu declinații în  $(-2^{\circ}.5, +90^{\circ})$ , iar *PPM South* conține 144787 de înregistrări de stele cu declinații în  $(-90^{\circ}, -2^{\circ}.5)$  (versiunea pe suport magnetic) și respectiv 197179 înregistrări (versiunea tipărită). Alegerea limitei de  $-2^{\circ}.5$  a fost făcută pentru că în această zonă nu apare nici o suprapunere, gol sau înregistrare dublă. De remarcat că dacă în cazul zonei nordice catalogul pe suport magnetic coincide cu cel tipărit, în emisfera sudică, pe de o parte identificatorul PPM diferă între cele două versiuni (de la 181732 la 378910 pentru versiunea tipărită și de la 500001 la 644747 pentru versiunea pe suport magnetic), iar pe de alta există uşoare diferențe între pozițiile stelelor în cele două versiuni.

Tabelul 2 conține caracteristicile principale ale cataloagelor PPM și SAO referitoare la epoca medie a observațiilor, numărul de poziții observate pentru fiecare stea, precizia pozițiilor obținute și a mișcărilor proprii (Roeser și Bastian, 1989, 1991, Bastian et al, 1991, 1993). În linia a doua, notația „PPM HPS” se referă la *High-Precision Subset*, definită ca o submulțime a lui *PPM North* pentru care înregistrări în alte cataloage mai exacte au fost disponibile (AGK3R sau CMC - *Carlsberg Meridian Circle*). Pentru comparație, catalogul SAO a fost împărțit în două părți corespunzătoare: *SAO South* și *SAO North*.

Catalog	Nr.stele	Nr.obs.	Epoca medie obs.		Eroare med. poziții 1990 (")		Eroare med. mișc. proprii ("/secol iulian)	
			$\alpha$	$\delta$	$\alpha$	$\delta$	$\alpha$	$\delta$
PPM North	181731	6.2	1931.5	1930.7	0.27	0.27	0.43	0.42
PPM HPS	31841	7.8	1950.3	1948.0	0.12	0.12	0.24	0.25
PPM South	144787	4.4	1966.5	1966.8	0.12	0.12	0.40	0.10
SAO North	133000	2.0	1930.0	1930.0	0.9	0.9	1.5	1.5
SAO South	144787	2.0	1930.0	1930.0	1.2	1.2	1.5	1.5

Tabelul 2 - Bugete de eroare ale cataloagelor PPM și SAO

Lungimea fizică a cataloagelor PPM North și PPM South sub formă magnetică este de 24,533,685 Bytes și respectiv 19,546,245 Bytes. Ele conțin conțin înregistrări a câte 133 de caractere și câte 19 câmpuri de date, și anume: numărul de catalog (între 1-181731 și respectiv 500001-644747), identificatorul BD (pentru declinații mai mici decât  $-30^{\circ}$  identificatorul CPD-*Cape Photographic Durchmusterung*), magnitudinea (fotografică, respectiv vizuală), clasa spectrală, ascensia J2000, declinația J2000 (dacă steaua este membră a catalogului FK5, atunci poziția sa în acest catalog este trecută), mișcarea proprie/an iulian în ascensie J2000, mișcarea proprie/an în declinație J2000, numărul de poziții individuale publicate, eroarea medie în ascensie multiplicată cu  $\cos(\delta)$ , eroarea proprie în mișcarea proprie în declinație, epoca medie în ascensie, epoca medie în declinație, identificatorul SAO, identificatorul HD (*Henry Draper*),

identificatorul AGK3 (respectiv CoD-*Cordoba Durchmusterung*) și un cod referitor la probleme speciale (stele duble, membrii HPS sau FK5 ș.a).

În capitolul șase al tezei vom dezvolta câteva aplicații numerice care folosesc cataloagele de compilare SAO și PPM.

Cataloagele extensie reprezintă o completare cu stele suplimentare a unui catalog dat, prin tehnici observaționale identice sau diferite de cele ale catalogului inițial. Un exemplu de catalog extensie este GSC (*Guide Star Catalogue*), care extinde catalogul SAO până la surse de magnitudine 15 (circa 19 milioane de stele). GSC este elaborat la Institutul din Baltimore prin scanarea plăcilor fotografice Schmidt, fiind destinat orientării telescopului spațial Hubble. Catalogul asigură o precizie în poziții de 2", fără a conține mișcări proprii (Lasker et al, 1990, Russell et al, 1990, Jenkner et al, 1990).

Alte două cataloage astrometrice recente sunt HIPPARCOS (realizat pe baza observațiilor satelitului astrometric cu același nume), conținând circa 120000 de stele până la magnitudine 13, cu eroarea medie de 0".002 în poziții și 0".002/an în mișcări proprii, și TYCHO, care constituie o extensie a lui HIPPARCOS la 400000 de stele și care asigură o precizie în poziții de 0".02 (Kovalevsky, 1990).

Un proiect foarte ambițios este realizarea catalogului astro-fotometric ROEMER, care a fost propus relativ recent (Hog, 1993). Preconizat a se desfășura pe un interval de cinci ani, programul va extinde catalogul TYCHO până la magnitudine  $V=18$  (400 de milioane de stele), și va fi alcătuit pe baza observațiilor realizate de un satelit care folosește un mozaic de detectori CCD în planul focal a două telescoape cu diametre de 0.29m. Precizia pozițiilor și a paralaxelor se estimează la 0.1 marcsec la  $V=12$  și 0.05 marcsec/an pentru mișcările proprii. Rezultate fotometrice în UBVRi vor permite atingerea unei precizii de 0.003m la  $V=12$  și 0.06m la  $V=18$ .

#### 2.1.2.2. Repere extragalactice

Ideea de a folosi surse extragalactice pentru materializarea reperelor cerești este destul de veche, fiind discutată de Herschel și Laplace acum două secole (e.g. Ma, 1989). Norii lui Magellan au fost cunoscuți încă din secolul XI de către arabi, permițând filosofilor din secolul XVIII (precum Kant) să speculeze existența acestora ca sisteme stelare similare Galaxiei noastre.

Primul catalog de surse optice nestelare a fost publicat de Messier, în anul 1784, și conținea 102 de nebuloase (obiecte cu imagini diferite de cele stelare, prin faptul că nu puteau fi rezolvate ca niște surse punctiforme, dimensiunile lor fiind mai degrabă eliptice). Primului

catalog i-a urmat GC (*General Catalogue*), publicat de Herschel, în 1864 (cu 5079 de surse), și NGC (*New General Catalogue*), publicat de Dreyer în 1888.

În anul 1931, Jansky a detectat primele semnale radio extraterestre în lungimi de undă decimetrice, iar prima hartă radio (la 1.87m) a Galaxiei noastre a fost realizată de către Reber, opt ani mai târziu. În 1960, pozițiile radiosurselor puternice erau în general cunoscute cu o precizie de 10", multe dintre acestea fiind identificate prin diverse tipuri de galaxii. Primul candidat în acest sens a fost 3C 48 (cu o dimensiune radio mai mică de 1"), care a fost identificat cu o stea de magnitudinea 16. Imediat, alte surse radio au putut fi identificate prin surse optice. Observarea ocultației quasarului 3C 273 de către Lună, în 1962, a dovedit separarea radiosursei în două componente, una stelară optică de magnitudinea 13, și alta asemănătoare unei extensii-jet.

Există două caracteristici importante pentru care quasarii și radiosursele similare acestora pot defini un sistem de referință extragalactic, și anume: dimensiunea redusă a nucleului (<1mas) și distanța mare față de acestea (majoritatea >1000Mpc), care anulează practic mișcările proprii (<20  $\mu$ as/an în  $\alpha$  și <50 $\mu$ as/an în  $\delta$ ). Din păcate, există și două dezavantaje în folosirea acestor cataloage în astrometrie, și anume densitatea restrânsă și strălucirea optică redusă.

Măsurătorile radio se efectuează cu două tipuri de instrumente, interferometrul cu elemente conectate (CEI) și interferometrul cu bază foarte mare (VLBI). Primul constă dintr-o pereche de antene, echipate cu câte un dispozitiv de achiziție care acoperă aceeași bandă de frecvențe și observă aceeași sursă suficient de depărtată, astfel încât radiația incidentă să poată fi considerată plană (Ma, 1989, Kovalevsky, 1990). Din cauza rotației terestre, semnalele primite vor avea deplasări Doppler diferite la cele două antene, acestea având viteze diferite relative la sursă. Semnalul final obținut prin compunerea celor două semnale va avea o formă sinusoidală, de frecvență egală cu pulsația celor două frecvențe. Observând cel puțin trei surse pe zi (din 5 sau mai multe poziții), se pot estima pozițiile surselor. Interferometrul VLBI diferă în mod fundamental de CEI prin faptul că cele două elemente operează în mod independent, fiind instalate pe antene așezate la mii de kilometri distanță (chiar pe continente diferite). În loc de a corela semnalele primite în timp real folosind o legătură directă, acestea sunt filtrate și înregistrate, fiind analizate ulterior.

Independența originii ascensiilor drepte ale reperelor extragalactice de mișcarea Pământului (ca în cazul reperelor stelare) constituie un avantaj important al reperelor radio. Metoda cea mai obișnuită de alegere a originii ascensiilor reperelor extragalactice este atribuirea valorii zero unei surse alese arbitrar. Totuși, aceste surse pot fi nepunctiforme, din

această cauză s-au imaginat alte metode de alegere a originii, de exemplu definind punctul zero de media ascensiilor câtorva surse măsurate pe cale optică.

Tabelul 3 listează principalele cataloage de radiosurse extragalactice realizate prin observații cu cele două tipuri de instrumente și caracteristicile lor (Ma, 1989).

Autorul	Instrument	Lungimea bazei (Km)	Număr de surse	Precizie poziții (mas)
Wade	CEI	35	36	20-40
Kaplan	CEI	35	16	10
Morabito	Mark II (VLBI)	8000-11000	836	300
Perley	VLA	<27	700	20-100
Fanselow	Mark II	8000-11000	117	1-5
Ma 1986	Mark III (VLBI)	800-6000	85	0.3-13
Robertson	Mark III	800-6000	26	0.5
Ma 1988	Mark III	800-11000	101	0.2-9
Sovers	Mark II	8000-11000	128	0.5-7

Tabelul 3 - Cataloage radio J2000 (Ma, 1989)

Racordarea reperelor de referință extragalactice la cele stelare se face prin determinarea coordonatelor relative ale surselor care materializează aceste repere. O metodă de reducere a mișcărilor proprii ale stelelor la pozițiile extragalactice a fost publicată la Pulkovo (Deici, 1980). La Observatorul din București, Departamentul Ecuatorial al Secției de Astronomie Fundamentală efectuează observații fotografice în cadrul programului internațional CONFOR de racordare a reperelor extragalactice la cele stelare.

### 2.1.3. Repere de referință dinamice

În contrast cu predecesoarele lor bazate pe observațiile optice, efemeridele moderne ale planetelor interioare și Lunii sunt determinate aproape în întregime prin observații radar ale suprafețelor planetare, observații radio de pe navele spațiale și observații laser pe reflectorii lunari plasați pe aceste corpuri. Efemeridele moderne sunt produse prin integrarea numerică a ecuațiilor de mișcare și reprezintă, prin urmare, o funcție de trei factori: ecuațiile de mișcare, programul de integrare numerică și setul de condiții inițiale și de constante ale sistemului (de exemplu, masele planetare) (Williams și Standish, 1989). Reperele de referință dinamice se definesc în funcție de aceste efemeride, ignorând orice condiții de mișcare inerțială uniformă (ca în cazul reperelor absolute). Prin precizia determinărilor actuale ale distanțelor în Sistemul Solar, ele îmbunătățesc pozițiile cu cel puțin un ordin de mărime față de metodele optice anterior folosite pentru definirea reperelor cerești. Dat fiind acest fapt, în cele două subcapitole ce urmează vom prezenta reperele DE 200/LE 200 și ELP 2000/VSOP 82, obținute prin integrarea ecuațiilor de mișcare ale planetelor și Lunii.

### 2.1.3.1. Reperul DE 200/LE 200

Efemeridele lunar-planetare DE 200/LE 200 au fost elaborate la *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), în anul 1982, și constituie baza de calcul a efemeridelor conținute în *The Astronomical Almanac* începând cu anul 1984. Epoca de referință a celor două efemeride este J2000. Planul de referință DE 200/LE 200 poate fi considerat același cu planul ecuatorial mijlociu J2000, echinocțiul fiind același cu echinocțiul dinamic mijlociu rotațional J2000 (intersecția ecuatorului cu ecliptica), cu o precizie de  $0''.001$ . Aceste alegeri fac ca reperul DE 200/LE 200 să fie foarte apropiat de reperul FK5 (Standish Jr, 1982, Williams și Standish, 1989).

Exportul în formă fizică al efemeridelor DE 200/LE 200 se poate face folosind un pachet de programe elaborat în FORTRAN 77 la JPL (Standish Jr, 1990). El furnizează fișiere cu acces direct ce conțin poziții și viteze ale unui punct „țintă” în raport cu un punct „centru”. Aceste puncte pot fi alese drept una dintre cele nouă planete, Soarele, Luna, baricentrul Pământ-Lună, sau baricentrul Sistemului Solar.

### 2.1.3.2. Reperul ELP 2000/ VSOP 82

ELP 2000 reprezintă o teorie semi-analitică de mișcare a Lunii elaborată în anul 1983 la Biroul de Longitudini (Touzé și Chapront, 1983) și utilizată la publicarea efemeridelor lunare din *Connaissance des Temps* începând cu anul 1984. Teoria conține toate efectele sensibile care acționează asupra mișcării Lunii: problema fundamentală, perturbațiile lunar-terestre (incluzând librația), perturbațiile planetare (conținând variațiile seculare ale elementelor solare și mișcarea eclipticii), perturbațiile relativiste și efectele mareice.

VSOP 82 reprezintă o teorie a mișcărilor planetare construită prin considerarea perturbațiilor până la ordinul al treilea al masei (Bretagnon, 1982). Ea conține perturbații ale Lunii asupra baricentrului Pământ-Lună și perturbații relativiste exprimate în coordonate izotrope standard. Considerând perturbațiile planetelor exterioare până la ordinul șase, teoria de mișcare a planetelor Jupiter, Saturn, Uranus și Neptun este ameliorată printr-o metodă iterativă.

Fie  $x_i = x_i^{(0)} + \Delta^{(1)}x_i + \Delta^{(2)}x_i$  unul din cele 12 elemente ale planetei considerate și ale celei perturbate, unde  $x_0$  reprezintă soluția kepleriană,  $\Delta^{(1)}x_i$  perturbația de ordinul întâi în raport cu masele,  $\Delta^{(2)}x_i$  perturbația de ordinul doi. Dacă notăm prin  $\sigma$  un element orbital oarecare, atunci, perturbațiile de ordinul al treilea se obțin prin integrarea ecuațiilor lui Euler-Lagrange, dezvoltate în raport cu masele:

$$\frac{d\sigma}{dt} = f_{\sigma}(x_i) = f\sigma(x_i^0) + \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Delta^{(1)} x_i + \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Delta^{(2)} x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} \left( \frac{\partial^2 f_{\sigma}}{\partial x_i \partial x_j} \right) \Delta^{(1)} x_i \Delta^{(1)} x_j \quad (1)$$

Integrarea primului termen din membrul drept al expresiei (1) furnizează perturbațiile de ordinul întâi,  $\Delta^{(1)} x_i$ , integrarea termenului doi dă perturbațiile de ordinul doi,  $\Delta^{(2)} x_i$ , iar integrarea restului expresiei pe cele de ordinul trei,  $\Delta^{(3)} x_i$ .

Diferența între longitudinile planetare date de teoriile DE 200 și VSOP 82, integrată în intervalul 1891-2000, are valori cuprinse inferioare lui 0".01 pentru Mercur, Venus, Pământ, Marte, Uranus și de până la 0".2 pentru Jupiter, Saturn și Neptun.

Exportul sub formă fizică al soluției furnizată de teoria VSOP 87 se poate face folosind un pachet de programe scrise sub mediul Turbo Pascal (Bretagnon, 1994). Programul calculează efemeride aparente geocentrice la 0<sup>h</sup>TDT ale planetelor, Soarelui și baricentrului Pământ-Lună, cu o precizie de 0".000001 în paralaxă, 0".0001 în ascensie și 0".001 în declinație.

Touzé et al. (1994) dau relațiile de transformare ale coordonatelor exprimate în reperele DE200-FK5, VSOP 82-FK5 și VSOP 82-DE200.

### 2.1.3.3. Repere bazate pe mișcarea micilor planete

În afară de reperele „absolute” introduse în prima parte a acestui capitol (care s-au dovedit a fi relative în raport cu diversitatea și complexitatea mișcărilor în Univers), alături de reperele dinamice definite de teoriile de mișcare lunar-planetare, se pot defini repere bazate pe teorii de mișcare (analitice sau numerice) ale micilor planete. În compararea acestor teorii cu observațiile, spre deosebire de planetele mari, asteroizii prezintă avantajul aparentei punctiforme, ceea ce îmbunătățește precizia măsurătorilor astrometrice.

După cum se cunoaște, Gauss a fost primul astronom care a elaborat prima teorie de mișcare a unui asteroid, (1) Ceres, descoperit în 1801 de Piazzi și „pierdut” pentru o perioadă din cauza îmbolnăvirii descoperitorului și a vremii nefavorabile. La mijlocul secolului trecut, P.H. Hansen a construit una dintre primele teorii analitice de mișcare a asteroizilor, aplicabilă pentru orbite cu orice valori ale elementelor  $e$  și  $i$ . Alte teorii analitice de mișcare a asteroizilor au fost construite prin metoda medierii de M. Iarov-Iarovoii pentru (1) Ceres și de Árpád Pál pentru (5) Astraea (Pál, 1959, 1963). În această metodă sunt folosite așa-numitele integrale empirice deduse pe baza unei serii lungi de observații de poziție, cu ajutorul cărora problema celor trei corpuri „Soare-Jupiter-asteroid” devine integrabilă prin cuadraturi.

Institutul de Astronomie Teoretică (ITA) al Academiei Ruse de Științe a dezvoltat, folosind observații din întreaga lume, cele mai precise teorii numerice de mișcare ale micilor planete. Alături de *Astronomiceskii Ejegodnik*, colectivul ITA editează două publicații de referință pentru dinamica asteroizilor. Una dintre acestea este *Efemerid Malih Planet* (Batrakov, 1996), a cărei ediție 1997 conține elementele orbitale (ecliptica și echinocțiul J2000) ale 6678 de mici planete numerotate, parametrii curbelor de lumină, datele opozițiilor și efemeride la aceste date. A doua publicație este *Daily ephemerides of selected minor planets* (Batrakov et al, 1996), care conține efemeride pentru 15 mici planete (cu o precizie de 0".001 în  $\alpha$  și 0".01 în  $\delta$ ), selectate pentru a fi observate în vederea determinării posibilelor erori de orientare și sistematice ale reperelor absolute stelare. În capitolul șase al acestei teze vom calcula diferențe „O-C” ale pozițiilor micilor planete folosind publicația citată.

În cadrul Adunării Generale UAI (Argentina, 1991), Comisia 20 (Poziții și Mișcări ale micilor planete, comete și sateliți) a aprobat programul de observații astrometrice a 15 planete mici selectate (SMP), propus de ITA (Batrakov et al, 1996). Scopul acestui program este de a obține poziții foarte exacte ale celor 15 planete mici, care vor fi folosite pe de o parte la determinarea erorilor de orientare și a celor sistematice ale catalogului stelar fotografic de referință, iar pe de alta la îmbunătățirea orbitelor asteroizilor, raportate la sistemul FK5. Potrivit acestei metode, pozițiile planetelor mici vor fi determinate în vecinătatea punctelor de intersecție (CP, *crossing-points*) ale traiectoriilor aparente pe sfera cerească (chiar dacă la momente diferite de timp), folosind aceleași grupuri de stele de reper. Simulările numerice efectuate la ITA au demonstrat că erorile de orientare și cele sistematice ale cataloagelor de reper pot fi puse în evidență dacă pozițiile planetelor pot fi determinate cu o precizie de 0".1 (care se va dovedi posibil de atins, conform capitolului șase al tezei, folosind observațiile CCD sau cele fotografice).

Câteva pachete de programe sunt utile în efectuarea și prelucrarea observațiilor astrometrice de asteroizi și gestionarea bazelor de date aferente. Între acestea, enumerăm *Ephem* v.1.0 (Tholen, 1992) și *Aster* v.1.5 (Rocher, 1994).

#### 2.1.4. Sisteme de referință relativiste

Un sistem de referință este definit de Teoria Generală a Relativității prin construcția unei metrici care introduce, alături de cele trei coordonate ale spațiului eulerian  $R^3$ , timpul:

$$ds^2 = -(dx^0)^2 + dx^i dx^i \quad (2)$$

cu convențiile lui Einstein de sumare, unde  $x^0=ct$  este coordonata temporală,  $x^i$  coordonatele spațiale ( $i=1,2,3$ ), iar  $c$  viteza luminii, o constantă de definiție (par. 2.2.2.2).

Cea mai cunoscută metodă de a defini sisteme de referință relativiste în astronomie este aceea de a construi repere de referință proprii fiecărui observator (e.g. Brumberg și Kopejkin, 1989). Soluțiile ecuațiilor lui Einstein pot fi astfel exprimate în Sistemul Solar în diferite sisteme relativiste, conform ierarhiei care urmează (Touzé et al, 1994):

- sistemul baricentric (BRS), cu centrul în baricentrul Sistemului Solar;
- sistemul heliocentric (HRS), cu centrul în Soare;
- sistemul local Pământ-Lună (LRS), cu centrul în baricentrul Pământ-Lună;
- sistemul geocentric (GRS), cu centrul în centrul de masă al Pământului;
- sistemul topocentric (TRS), cu centrul într-un punct al suprafeței terestre.

În paragrafele care urmează vom introduce expresiile vectorului unitar care definește direcția aparentă sursă-observator în trei sisteme de referință relativiste: BRS GRS și TRS.

#### 2.1.4.1. Poziția aparentă a unui corp într-un BRS

Un foton emis de receptorul M la un moment  $t'$  este recepționat de observatorul O la un moment  $t=t'+\tau$ . Fie A un corp al Sistemului Solar de masă  $m_A$ . Să notăm prin  $\mathbf{x}_O(\theta)$  și  $\mathbf{x}_A(\theta)$  vectorii de poziție ai lui O, respectiv A (de componente coordonatele spațiale baricentrice la momentul  $\theta$ ), și fie:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{x}_M(t') - \mathbf{x}_O(t) \\ \mathbf{r}_A &= \mathbf{x}_O(t) - \mathbf{x}_A(t) \\ \mathbf{r}_A' &= \mathbf{x}_M(t') - \mathbf{x}_A(t') \end{aligned} \quad (3)$$

Conform Brumberg (1991) (Touzé et al, 1994),  $\tau$  este dat de formula:

$$c\tau = |\mathbf{R}| + 2 \sum_A \frac{Gm_A}{c^2} \ln \frac{|\mathbf{r}_A| + |\mathbf{r}_A'| + |\mathbf{R}|}{|\mathbf{r}_A| + |\mathbf{r}_A'| - |\mathbf{R}|}, \quad (4)$$

unde  $c$  este viteza luminii, iar  $G$  constanta de gravitație.

Vectorul unitar  $\mathbf{p}$  din  $\mathbb{R}^3$ , care exprimă direcția aparentă a lui M față de O într-un BRS, este:

$$\begin{cases} \mathbf{p} = \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|} - \frac{2}{c^2 |\mathbf{R}|} \sum_A \frac{Gm_A}{|\mathbf{r}_A|} \mathbf{Y}_A \\ \mathbf{Y}_A = \frac{\mathbf{R} \times (\mathbf{r}_A' \times \mathbf{r}_A)}{|\mathbf{r}_A'| |\mathbf{r}_A| + \mathbf{r}_A' \cdot \mathbf{r}_A} \end{cases}, \quad (5)$$

unde în locul sumei apare de obicei termenul datorat Soarelui.

Potrivit Kaplan (1981), formula pentru deflexia gravitațională a luminii în câmp solar este:

$$\theta = 0'' .00407 \left( \frac{1 + \cos D}{\sin D} + \frac{1}{4} \sin(2D) \right), \quad (6)$$

unde

$$\begin{cases} \cos D = \sin \delta \sin \delta_{\odot} + \cos \delta \cos \delta_{\odot} \cos(\alpha - \alpha_{\odot}) \\ \sin D = \sqrt{1 - \cos 2D} \\ \sin(2D) = 2 \sin D \cos D \end{cases} \quad (7)$$

cu  $D$  separarea unghiulară geocentrică a sursei față de Soare,  $\theta$  unghiul aparent de deflexie (deflexia aparentă fiind îndreptată în afara Soarelui),  $(\alpha, \delta)$  coordonatele ecuatoriale ale sursei, iar  $(\alpha_{\odot}, \delta_{\odot})$  coordonatele Soarelui.

Corecțiile  $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$  de adunat la  $(\alpha, \delta)$  pentru a obține coordonatele aparente ale sursei, sunt:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \mu \sec \delta \cos \delta_{\odot} \sin(\alpha - \alpha_{\odot}) \\ \Delta\delta = \mu [\sin \delta \cos \delta_{\odot} \cos(\alpha - \alpha_{\odot}) - \sin \delta_{\odot} \cos \delta] \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{\theta}{\sin D} = 0'' .00407 \left( \frac{1}{1 - \cos D} + \frac{1}{2} \cos D \right)$$

#### 2.1.4.2. Poziția aparentă a unui corp într-un GRS

Utilizând ecuațiile date de Brumberg, se obține pentru vectorul unitar din  $R^3$  care dă poziția aparentă a unui corp  $M$  văzut de un observator  $O$  într-un GRS, expresia (Touzé et al, 1994):

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{p} - \frac{1}{c} \mathbf{p} \times (\mathbf{p} \times \mathbf{v}_E) + \frac{1}{c^2} \left[ (\mathbf{p} \cdot \mathbf{v}_E) \mathbf{p} \times (\mathbf{p} \times \mathbf{v}_E) - \frac{1}{2} \mathbf{v}_E \times (\mathbf{p} \times \mathbf{v}_E) + \mathbf{p} \times \mathbf{F} + (\mathbf{a}_E \cdot \mathbf{p})(\mathbf{x}_O - \mathbf{x}_E) - (\mathbf{p} \cdot (\mathbf{x}_O - \mathbf{x}_E)) \mathbf{a}_E \right] \quad (9)$$

unde  $\mathbf{p}$  este vectorul unitar care exprimă poziția aparentă a lui  $M$  într-un BRS,  $\mathbf{v}_E$  și  $\mathbf{a}_E$  sunt viteza și respectiv accelerația geocentrului într-un BRS, iar  $\mathbf{F}$  conține efectul de precesie și nutație geodezică.

#### 2.1.4.3. Poziția aparentă a unui corp într-un TRS

Utilizând expresiile date de Brumberg, se obține expresia vectorului unitar ce furnizează poziția aparentă a unui corp  $M$  față de un observator  $O$  într-un sistem de referință topocentric (Touzé et al, 1994):

$$\tilde{\mathbf{p}} = \hat{\mathbf{p}} - \frac{1}{c} \hat{\mathbf{p}} \times (\hat{\mathbf{p}} \times \mathbf{v}_O) + \frac{1}{c^2} \left[ (\hat{\mathbf{p}} \cdot \mathbf{v}_O) \hat{\mathbf{p}} \times (\hat{\mathbf{p}} \times \mathbf{v}_O) - \frac{1}{2} \mathbf{v}_O \times (\hat{\mathbf{p}} \times \mathbf{v}_O) + \hat{\mathbf{p}} \times \Phi \right] \quad (10)$$

unde  $\hat{\mathbf{p}}$  este vectorul unitar care exprimă poziția aparentă a lui  $M$  într-un GRS,  $\mathbf{v}_O$  reprezintă vectorul vitează al lui  $O$ , iar  $\Phi$  este vectorul precesie topocentrică.

## 2.2. SISTEMUL CONSTANTELOR ASTRONOMICE UAI

### 2.2.1. Scurt istoric

Un prim sistem de constante astronomice a fost adoptat în anul 1896 și este datorat lui Newcomb (e.g. Danjon, 1959; Mihăilă, 1983). Dar prima încercare de a elabora un sistem coerent de constante astronomice îi aparține lui de Sitter, care a avut ideea de a împărți constantele în constante primare și constante derivate. Sistemul lui Newcomb a fost folosit pînă în 1968, când a intrat în vigoare sistemul adoptat în 1964. La rîndul lui, acest sistem a fost înlocuit din 1984 cu un nou sistem adoptat de UAI în anul 1976.

Înființată la Bruxelles în iulie 1919, **Uniunea Astronomică Internațională (UAI)** se bucură de privilegiul de a reprezenta cel mai înalt for științific în domeniu pe plan mondial. Organizația numără 40 de comisii constitutive (Inf. Bul. UAI nr.77, 1996). Scopurile propuse de UAI, definite de Statutul Convenției de la Bruxelles (Trans. UAI vol I, 1922), sunt:

- să faciliteze relațiile între astronomii diverselor state, acolo unde cooperarea internațională este necesară;
- să promoveze studiul astronomiei în toate ramurile sale.

Începând cu mai 1922 (Roma), programate să se desfășoare odată la trei ani, au avut loc 22 de Adunări Generale IAU, a căror periodicitate a fost perturbată doar în perioada războiului.

România a aderat la UAI între primele 19 membre, în anul 1922, alăturîndu-se în prezent (1997) celor 60 de state care constituie Uniunea în structura Consiliului Internațional al Uniunilor Științifice (ICSU).

Prima reuniune UAI consacrată revizuirii sistemului de constante Newcomb a avut loc la Paris, în anul 1950. I-a urmat simpozionul 21 UAI *The System of Astronomical Constants* organizat în anul 1963 la Paris de UAI împreună cu COSPAR (*Committee on Space Research*). Aceste două manifestări au constituit punctul de plecare pentru instituirea Sistemului de Constante UAI 1964. Pentru pregătirea noului sistem de constante astronomice, în anul 1970 s-a desfășurat la Heidelberg o nouă reuniune internațională (Colocviul UAI nr. 9). Adunarea Generală ținută la Grenoble în anul 1976 a adoptat Sistemul Constantelor Astronomice UAI 1976, valabil și recomandat cercetărilor actuale (cu unele modificări efectuate la congresele UAI ulterioare).

Vom prezenta în continuare Sistemul Constantelor Astronomice adoptat de UAI în anul 1976 și intrat în vigoare la 1 ianuarie 1984. Menționăm că toate aplicațiile din capitolul șase al acestei teze vor folosi valorile numerice furnizate de acest sistem de constante astronomice (Pál, Stavinschi, 1996, în *Amuarul Astronomic 1997*).

## 2.2.2. Sistemul Constantelor Astronomice UAI 1976

Wilkins (1965) atrage atenția că în construcția unui sistem de constante astronomice trebuie îndeplinite două obiective, și anume: definirea relațiilor între constante (stabilirea de interdependențe matematice), și adoptarea de valori particulare pentru fiecare constantă, care să concorde cu observațiile. Autorul propune stabilirea a trei tipuri de constante, clasificare păstrată de UAI în 1964 și 1976. În cele ce urmează, vom enumera clasificarea 1976, împreună cu notațiile corespunzătoare convenite, conform Seidelmann (1977), Kaplan (1981) și *The Astronomical Almanac* (1993).

### 2.2.2.1. Unități de măsură

- Unitățile metrul (m), kilogramul (kg), secunda (s) sunt unitățile de lungime, masă și timp din Sistemul Internațional de Unități de Măsură (SI), asupra cărora vom reveni imediat.
- Unitatea astronomică (UA), masa Soarelui (S) și ziua solară mijlocie (D) sunt unități de lungime, masă și timp în Sistemul Astronomic de Unități de Măsură (SA).
  - ◆ Unitatea astronomică de timp este intervalul de o zi solară mijlocie (D) de 86400 secunde. Un interval de 36525 zile este un secol Julian.
  - ◆ Unitatea astronomică de masă este masa Soarelui ( $S = 1.9891 \cdot 10^{30}$  kg).
  - ◆ Unitatea astronomică de lungime (UA sau A) este lungimea pentru care constanta gravitațională Gauss ( $k$ ) ia valoarea 0.01720209895, ținând seama de unitățile de măsură de lungime, masă și timp din SI. Dimensiunea lui  $k^2$  coincide cu aceea a constantei de gravitație (G), adică este  $L^3M^{-1}T^{-2}$ . Pentru UA (A) este folosit și termenul de „distanță unitate”, definită ca lungimea razei unei orbite circulare pe care s-ar mișca un corp de masă neglijabilă în câmpul gravitațional al Soarelui cu perioada  $P=2\pi/k=365.2568983263$  zile mijlocii.

Notă: Unitatea astronomică de lungime se bazează pe semiaxa mare a orbitei neperturbate kepleriene descrisă de centrul de masă al sistemului Pământ-Lună în raport cu Soarele, după cum urmează:

Din legea a treia a lui Kepler scrisă pentru sistemul Soare-(Pământ+Lună) avem:

$$n^2 a^3 = k^2 (m_{\odot} + m),$$

unde  $n$  este viteza unghiulară medie a centrului de masă, adică „mișcarea medie”:

$$n = \frac{2\pi}{P}$$

cu  $P$  - perioada mișcării,  $a$  - semiaxa mare a orbitei,  $m_{\odot}$  - masa Soarelui iar  $m$  - masa sistemului Pământ-Lună. Considerând  $a=1$  și  $m_{\odot}=1$ , rezultă pentru  $k$  valoarea:

$$k = \frac{2\pi}{P\sqrt{1+m}}$$

În lucrarea fundamentală *Theoria motus* (1809), Gauss a considerat

$P = 365.2563835$  zile (anul sideral),

$m = 1/354710$  mase solare

și a obținut

$$k = 0.017202098950.$$

În memoria marelui matematician și astronom,  $k$  se numește constanta lui Gauss, și reprezintă o constantă astronomică a cărei valoare se păstrează chiar dacă se aduc precizări celorlalte constante de care  $k$  este legată după legea a treia a lui Kepler. Constanta lui Gauss este considerată constantă de definiție, în funcție de care se definesc alte constante astronomice. O consecință a acestui fapt o constituie chiar variația semiaxei mari a orbitei sistemului Pământ-Lună descrisă în jurul Soarelui, a cărei valoare bazată pe datele acceptate astăzi este cu puțin mai mare decât unitatea astronomică ( $A=1.000000031$ UA).

Sistemul Constantelor Astronomice UAI 1976 cuprinde trei tipuri de constante astronomice: constante de definiție, constante derivate și alte constante necesare calculului de efemeride.

#### 2.2.2.2. Constante astronomice

##### (I) Constante de definiție

Sunt definite de valori arbitrar fixate, astfel încât să stabilească o unitate de măsură.

##### (I.1) Constanta gravitațională a lui Gauss

$$k = 0.01720209895$$

##### (I.2) Viteza luminii

$$c = 299792458 \text{ m/s}$$

În (I.2), simbolurile  $m$  și  $s$ , împreună cu simbolul  $kg$  folosit în secțiunea următoare se referă la Sistemul Internațional de Unități (SI), pe care îl vom defini conform (Marchidan și Ispășoiu, 1989) ca fiind cele stabilite în cadrul Conferinței Generale de Măsuri și Greutăți (CGPM) :

Metrul ( $m$ ) este lungimea drumului parcurs de lumină în vid în timp de  $1/299792458$  dintr-o secundă (CGPM, 1983).

Notă: Din acest moment, constanta  $c$  a trecut în categoria constantelor de definiție (începând cu 1 ianuarie 1984).

Kilogramul ( $kg$ ) este unitate de masă și este egal cu masa prototipului internațional confecționat din platină iridiată și păstrat la Biroul Internațional de Măsuri și Greutăți din anul 1889 (CGPM, 1901).

Secunda (s) este durata a 9192631770 perioade ale radiației care corespunde tranziției între cele două nivele de energie hiperfine ale stării fundamentale a atomului de cesiu 133 (CGPM, 1967).

Notă: Secunda atomică este definită în așa fel încât durata ei să coincidă cu durata secunde efemeridelor, adică să fie egală cu fracțiunea 1/31556925.9747 din durata anului tropic la epoca 1900, ianuarie 0<sup>z</sup>12<sup>h</sup> TE.

Pentru pregătirea efemeridelor și acordarea lor cu toate datele de observații disponibile, a fost necesară modificarea unor constante și mase planetare din Sistemul UAI 1976. În cele ce urmează, valorile modificate ale constantelor sunt indicate în paranteza dreaptă.

## (II) Constante primare

Reprezintă cantități determinate cât mai exact prin metode observaționale.

### (II.3) „Timpul-lumină” corespunzător unității de distanță

$$\tau_A = 499.004782 \text{ s} = 8^m 19^s .004782 \quad [499.0047837\dots]$$

### (II.4) Raza ecuatorială a Pământului

$$a_e = 6378140 \text{ m} \quad [6378137 \text{ m}]$$

### (II.5) „Factorul-formă” dinamic pentru Pământ

$$J_2 = 0.00108263$$

### (II.6) Constanta gravitațională „geocentrică”

$$GE = 3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2 \quad [3.98600448 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2]$$

### (II.7) Constanta de gravitație

$$G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$$

### (II.8) Raportul dintre masa Lunii și masa Pământului

$$\mu = 0.01230002$$

### (II.9) Precesia generală în longitudine, pe secol Julian, la epoca standard J2000

$$p = 5029''.0966$$

### (II.10) Oblicitatea eclipticii la epoca standard J2000

$$\varepsilon = 23^\circ 26' 21''.448 \quad [23^\circ 26' 21''.4119]$$

## (III) Constante derivate

Valorile lor sunt calculate din relațiile teoretice care le leagă de celelalte tipuri de constante.

### (III.11) Constanta nutației la epoca standard J2000

$$N = 9''.2044$$

### (III.12) „Distanța unitate” (UA= c $\tau_A$ )

$$UA = 1.49597870 \cdot 10^{11} \text{ m} \quad [1.4959787066 \cdot 10^{11} \text{ m}]$$

(III.13) Paralaxa solară

$$p_{\odot} = 8''.794148$$

(III.14) Constanta aberației la epoca standard J2000

$$\kappa = 20''.49552$$

(III.15) Factorul de turtire pentru Pământ

$$f = 0.00335281 = 1/298.257$$

(III.16) Constanta gravitațională „heliocentrică”

$$GS = 1.32712438 \cdot 10^{20} \text{ m}^3/\text{s}^2 \quad [1.32712438 \cdot 10^{20} \text{ m}^3/\text{s}^2]$$

(III.17) Raportul dintre masa Soarelui și masa Pământului

$$\frac{GS}{GE} = \frac{S}{E} = 332946.0 \quad [332946.038]$$

(III.18) Raportul dintre masa Soarelui și cea a sistemului Pământ-Lună

$$\frac{S/E}{1 + \mu} = 328900.5 \quad [328900.55]$$

(III.19) Masa Soarelui

$$\frac{GS}{G} = S = 1.9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

(III.20) Sistemul maselor planetare

Mercur 6023600	Jupiter 1047.355 [1047.350]
Venus 408523.5	Saturn 3498.5 [3498.0]
Pământ+Lună 328900.5	Uranus 22869 [22960]
Marte 3098710	Neptun 19314
Pluto 3000000 [130000000]	

Tabelul 4- Raportul dintre masa Soarelui și masele planetelor

(IV) Alte cantități necesare calculului de efemeride

Se recomandă ca valorile date în următoarea listă să fie folosite în calculul de efemeride :

(IV.21) Masele planetelor mici

Planeta mică	Masa în mase solare
(1) Ceres	$5.9 \cdot 10^{-10}$
(2) Pallas	$1.1 \cdot 10^{-10}$
(4) Vesta	$1.2 \cdot 10^{-10}$

Tabelul 5 - Masele planetelor mici

(IV.22) Masele sateliților

Planetă	Satelit	Satelit/Planetă
Jupiter	Io	$4.70 \cdot 10^{-5}$
	Europa	$2.56 \cdot 10^{-5}$
	Ganymede	$7.84 \cdot 10^{-5}$
	Callisto	$5.6 \cdot 10^{-5}$
Saturn	Titan	$2.41 \cdot 10^{-4}$
Neptun	Triton	$2 \cdot 10^{-3}$

Tabelul 6 - Masele sateliților planetari

(IV.23) Razele ecuatoriale ale planetelor (km)

Mercur 2439	Jupiter 71398	Pluto 2500
Venus 6052	Saturn 60000	
Pământ 6378.140	Uranus 25400	Lună 1738
Marte 3397	Neptun 24300	Soare 696000

Tabelul 7 - Razele ecuatoriale planetare (valorile sunt exprimate în unități  $10^3$  m)

(IV.24) Câmpul gravitațional al planetelor

Planetă	$J_2$	$J_3$	$J_4$
Pământ	+0.00108263	$-0.254 \cdot 10^{-5}$	$-0.161 \cdot 10^{-5}$
Marte	+0.001964	$+0.36 \cdot 10^{-4}$	
Jupiter	+0.01475		$-0.58 \cdot 10^{-3}$
Saturn	+0.01645		$-0.10 \cdot 10^{-2}$
Uranus	+0.012		
Neptun	+0.004		

(Marte:  $C_{22} = -0.000055$ ,  $S_{22} = +0.000031$ ,  $S_{31} = +0.000026$ )

Tabelul 8 - Câmpul gravitațional al planetelor

În tabelul 8,  $J_2$ ,  $J_3$  și  $J_4$  reprezintă coeficienții armonicele zonale în dezvoltarea potențialului gravitațional al planetei, după funcții sferice (polinoame Legendre).

(IV.25) Câmpul gravitațional al Lunii

$\gamma = (B-A)/C = 0.0002278$		$CMR^2 = 0.392$
$\beta = (C-A)/B = 0.0006313$		$I = 1^\circ 32' 32''.7$
$C_{20} = -0.0002027$	$C_{30} = -0.000006$	$C_{32} = +0.0000048$
$C_{22} = +0.0000223$	$C_{31} = +0.000029$	$S_{32} = +0.0000017$
$S_{31} = +0.000004$	$C_{33} = +0.0000018$	$S_{33} = -0.000001$

Tabelul 9 - Câmpul gravitațional al Lunii

În tabelul 9, constantele  $A, B, C$  reprezintă elementele principale de inerție (centrale) ale Lunii,  $R$  - raza,  $M$  - masa, iar  $I$  este înclinarea orbitei Lunii pe ecliptică.