

## CAPITOLUL 5

### ASTROMETRIA DE CÂMP MIC

Astrometria de câmp mic cuprinde tehnici care permit determinarea pozițiilor relative ale astrilor, vizibili simultan în câmpul unui instrument astronomic. Mărimea câmpului mic observat variază între câteva grade pătrate și câteva secunde de arc pătrate. Conform Kovalevsky (1990), există cinci tehnici utilizate în astrometria de câmp mic: măsurătorile micrometrice vizuale, fotografia, observațiile CCD, detecția fotometrică din focar și interferometria. În acest capitol vom expune principiile reducerii observațiilor realizate cu cele mai utilizate tehnici astrometrice de câmp mic, utilizate și la București: astrometria fotografică și cea CCD.

#### 5.1. ASTROMETRIA FOTOGRAFICĂ

Fotografia reprezintă cea mai veche tehnică astrometrică de câmp mic, fiind folosită și astăzi, în ciuda dezvoltării noilor tehnici de observație astrometrică. După cum este cunoscut, fotografia astronomică constă în expunerea unei plăci fotosensibile așezate în focarul unui instrument (refractor sau reflector).

##### 5.1.1. Transformarea „cer-placă”

D.p.d.v. matematic, putem descrie fotografia unui câmp stelar drept o transformare bijectivă a unui domeniu al sferei cerești  $S$  într-un domeniu plan al plăcii fotografice  $P$ . Aceasta este o transformare între coordonatele aparente cerești și cele măsurate de o mașină pe placa fotografică, și este cunoscută în astronomie sub denumirea de transformarea „cer-placă”.

Fie sistemul rectangular plan de axe OXY, cu originea în centrul plăcii fotografice (intersecția axei optice cu placa), axa OX tangentă la paralelul ceresc și orientată spre vest, iar OY tangentă la meridian și orientată spre sud. Dacă  $(\alpha_0, \delta_0)$  sunt coordonatele centrului optic, iar  $(X, Y)$  coordonatele unui punct în sistemul OXY, atunci formulele care determină coordonatele unui punct  $(\alpha, \delta)$  pe placă sunt (e.g. Montenbruck și Pfleger, 1991):

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_o + \arctan \frac{-X}{\cos \delta_o - Y \sin \delta_o} \\ \delta = \arcsin \frac{\sin \delta_o + Y \cos \delta_o}{\sqrt{1 + X^2 + Y^2}} \end{cases} \quad (1)$$

Formulele următoare, cunoscute sub numele de proiecție gnomonică, exprimă coordonatele standard (X,Y) ale unui punct oarecare pe placă (măsurate în unități de distanță focală), atunci când se cunosc coordonatele cerești ( $\alpha, \delta$ ) ale astrului:

$$\begin{cases} X = -\frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_o)}{\cos \delta_o \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_o) + \sin \delta_o \sin \delta} \\ Y = -\frac{\sin \delta_o \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_o) - \cos \delta_o \sin \delta}{\cos \delta_o \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_o) + \sin \delta_o \sin \delta} \end{cases} \quad (2)$$

În cazul în care nu este nevoie de foarte mare precizie în transformare, formulele următoare definesc proiecția conică :

$$\begin{cases} X = (\alpha - \alpha_o)^{rad} \cos \delta_o \\ Y = (\delta - \delta_o)^{rad} \end{cases} \quad (3)$$

Teoretic, dacă multiplicăm membrii doi ai formulelor (2) și (3) prin distanța focală  $F$  a instrumentului, atunci mărimile rezultate reprezintă coordonatele măsurate ( $x,y$ ).

### 5.1.2. Reducerea observațiilor fotografice

Două probleme tehnice produc diferențe între coordonatele standard și cele măsurate: necentralitatea plăcii fotografice pe axul optic al instrumentului și orientarea variabilă a plăcii pe paralelul ceresc. Din această cauză, aserțiunea teoretică exprimată mai sus nu este adevărată în practică, excepție făcând o rotație și o translație a celor două sisteme de coordonate. Următoarele formule stabilesc relațiile între aceste sisteme:

$$\begin{cases} X = a \cdot x + b \cdot y + c \\ Y = d \cdot x + e \cdot y + f \end{cases} \quad (4)$$

unde cantitățile  $a, b, c, d, e, f$  sunt șase constante, numite constantele plăcii, și care depind de geometria sistemului optic. Determinarea acestor constante se face prin expunerea unui câmp stelar care conține cel puțin trei stele de coordonate  $(\alpha, \delta)_i$  cunoscute: se determină din ecuațiile (2) coordonatele standard  $(X, Y)_i$ , și se măsoară coordonatele  $(x, y)_i$  ale acestor stele; cele șase ecuații formate cu aceste coordonate din (4) vor conduce la determinarea constantelor plăcii. În practică, o determinare mai exactă a constantelor plăcii se face măbind numărul stelelor cunoscute și rezolvând sistemul de șase necunoscute prin metoda celor mai mici pătrate.

Reducerea observației fotografice constă în determinarea coordonatelor ecuatoriale ( $\alpha, \delta$ ) ale unui obiect de pe placă. Ea include următoarele etape: determinarea constantelor plăcii, măsurarea coordonatelor ( $x, y$ ) ale obiectului și cele ale unor stele cunoscute (numite stele de reper), transformarea coordonatelor măsurate în coordonate standard (cu formulele (4)), și transformarea coordonatelor standard în coordonate cerești (folosind (1)). În practică, determinarea constantelor plăcii și reducerea pozițiilor ( $\alpha, \delta$ ) se face unitar, folosind 5-10 stele.

### 5.1.3. Baze de date

Catalogul stelar GSC realizat la *Space Telescope Science Institute* în 1990, destinat ghidării telescopului spațial Hubble (par.2.1.2.1), a fost alcătuit prin măsurarea automată a plăcilor fotografice obținute în perioada 1982-1984 la *Observatoarele Palomar* și *Siding Spring* (în emisfera nordică și respectiv sudică) cu două telescoape Schmidt cu  $D=1.2\text{m}$  (e.g. Lasker et al, 1990). După cum am menționat deja, GSC conține circa 19 milioane de obiecte stelare și constituie una dintre cele mai bogate baze de date obținute prin observații fotografice.

În următoarele două paragrafe vom prezenta două baze de date dezvoltate din observații fotografice efectuate la București și Sofia.

#### 5.1.3.1. Arhiva de plăci de câmp larg (WFPA), București

În perioada 1930-1990, la Observatorul Astronomic din București au fost expuse 10571 de plăci fotografice (Vass et al, 1994), folosind refractorul Prin Mertz ( $F/D=600/38\text{cm}$ ) și camera Zeiss Canon ( $F/D=80/16\text{cm}$ ). În cazul primului instrument (cu care s-au efectuat 93% din observații), mărimea câmpului pe placă ( $24 \times 24\text{ cm}$ ) este de  $2^\circ.3 \times 2^\circ.3$  ( $1\text{mm}=34''$ ), iar în cazul celui de-al doilea  $7^\circ.4 \times 10^\circ.3$  ( $1\text{mm}=4'$ ).

În funcție de subiectele fotografiate, 78% reprezintă mici planetele, 9% stele fundamentale, câte 4% comete și nebuloase (Vass, 1994). Cele mai multe plăci au folosit timp de expunere între 5-10min (66%), 10-20min (31%), 20-30min (9%), deși s-au utilizat expuneri și peste 60min (în 6% din cazuri). Astăzi, din cauza luminii artificiale a orașului, un timp de expunere de peste 30min nu mai poate fi folosit, din cauza voalării emulsiei. Din studiul citat mai rezultă pentru București și perioadele anuale cele mai favorabile, și respectiv defavorabile observațiilor: iulie-octombrie și decembrie-februarie.

#### 5.1.3.2. Baza de date de plăci cu câmp larg (WFPDB), Sofia

WFPDB este pregătită de Institutul Astronomic din Sofia în colaborare cu Grupul de Lucru asupra Imaginilor de Câmp Larg al Comisiei 9 UAI (fondat în 1991). Lista arhivelor se

bazează pe informații primite de la peste 200 de institute și observatoare astronomice din toată lumea (IAU, 1995). Suma totală a plăcilor conținute în arhive în observatoare este de 1858800, WFPDB conținând plăci cu un câmp  $<1^\circ$ .

## 5.2. ASTROMETRIA CCD

Caracteristica receptorului CCD de a înregistra informația pe elemente discrete de imagine, racordată la avantajul prelucrării și măsurării imaginii într-un mod asistat de un calculator, fac din dispozitivul cu transfer de sarcină o unealtă accesibilă și performantă în astrometrie.

### 5.2.1. Reducerea observației CCD

Reducerea astrometrică a observației este prezentată de Vass et al. (1996c) și constă în (pre)procesarea imaginilor și măsurarea lor automată. Principiul preprocesării a fost prezentat în par.4.3. Măsurarea surselor pe imaginile preprocesate (stele, mici planete, sateliți, nuclee cometare) se face automat, folosind instrucțiunea CENTRO a lui ASTROL, care calculează centrul intensității luminoase a profilului sursei (aproximat printr-o distribuție gaussiană), furnizând într-un fișier următoarele rezultate: abscisa și ordonatele sursei (măsurate cu CENTRO), fluxul, eroarea de măsurătoare a abscisei, a ordonatei, a fluxului, *seeing*-ul pe cele două axe (lărgimea gaussienei la semînălțimea ei), diferența O-C în determinarea gaussienei și raportul semnal/zgomot. Măsurarea mai multor imagini (achiziționate în serie) se face automat, folosind un pachet de programe dezvoltate pentru interpretorul ASTROL (Vass et al, 1996c). Ea se bazează pe detectarea automată a surselor, folosind principiul variației mici a poziției surselor în câmpul CCD-ului, de la o imagine la alta.

Reducerea pozițiilor măsurate  $(x,y)$  în sistemul camerei CCD la coordonatele cerești  $(\alpha,\delta)$  este aproape identică cu transformarea „cer-placă” (formulele (1)), cu o singură deosebire: determinarea constantelor  $a,b,c,d,e,f$  care determină orientarea. Această problemă o vom analiza în paragraful următor.

### 5.2.2. Orientarea receptorului față de planul fundamental

Din cauza densității foarte reduse a stelelor de catalog în câmpul de  $4' \times 2'.6$  al camerei CCD (par.5.2.3), este puțin probabil ca pe aceeași imagine cu obiectul de măsurat să existe

două repere cunoscute. Metoda clasică de determinare a celor șase constante este folosirea roiurilor stelare, care prezintă avantajul cunoașterii pozițiilor stelare și a densității acestora în câmpul camerei. O altă metodă constă în achiziția imaginilor în care apar cel puțin două stele de catalog aflate într-un câmp în apropierea obiectului de măsurat. Această metodă a fost dezvoltată de autor la reducerea observațiilor efectuate la IAAR, și vom demonstra în par.5.2.2.2. că ea este suficient de exactă în comparație cu metoda clasică.

#### 5.2.2.1. Determinarea orientării folosind stele PPM

Să considerăm, pentru simplitate, cazul prezenței în câmp a două stele cunoscute, de coordonate  $(\alpha_0, \delta_0)$  și  $(\alpha, \delta)$ . Dacă presupunem centralitatea receptorului pe axa optică a instrumentului, transformarea coordonatelor măsurate în coordonate standard va fi o simplă rotație. Pe de altă parte, din cauza câmpului foarte mic, intersecția axului optic cu matricea CCD poate fi considerată aceeași cu una dintre stelele se reper,  $(\alpha_0, \delta_0)$ . Cu aceste supoziții, determinarea coordonatelor standard se face cu formulele (2), iar constantele  $(a, b)$  ale sistemului pot fi calculate ca soluții ale transformării:

$$\begin{cases} X = a \cdot x + b \cdot y \\ Y = -b \cdot x + a \cdot y \end{cases} \quad (5)$$

cu  $a = k \cos \theta$ ,  $b = k \sin \theta$ , unde  $k$  este o constantă ce depinde de distanța focală și de câmpul camerei, iar  $\theta$  este unghiul de orientare al camerei față de paralelul ceresc.

În par. 6.1.1 vom prezenta un algoritm de selecție din catalogul PPM a dubletelor cu  $\delta > 30^\circ$  și separații  $< 5'$ . Rezultatul arată că există 23654 de asemenea perechi. Evident, cazul în care în câmpul camerei CCD apar trei stele de catalog, este favorabil unei determinări mai exacte a orientării, prin rezolvarea celor șase ecuații (4). Tot în par. 6.1.1 vom demonstra că această posibilitate este destul de frecventă.

#### 5.2.2.2. Determinarea orientării folosind roiurile stelare

Metoda clasică de determinare a orientării camerei față de planul fundamental ecuatorial este achiziția a câteva imagini ale unui roi globular cu stele cunoscute.

La IAAR, pentru reducerea imaginilor obținute în campania PHESAT95 (par.6.3.3), s-a folosit roiul M15. Deși dispuneam de poziții ale stelelor roiului publicate (e.g. Le Campion et al, 1992), identificarea acestor stele cu cele de pe imagini a fost dificilă, din cauza lipsei magnitudinilor în lucrarea citată.

Metoda de identificare a fost comunicată de Vass et al. (1996a), și o expunem pe scurt în continuare. În prima etapă am determinat orientarea camerei folosind două stele PPM (par.5.2.2.1), în a doua etapă am „legat” roiul printr-un mozaic de patru imagini de cea mai

apropiată stea PPM (140217), determinând astfel, din aproape în aproape, coordonate aproximative ale câtorva stele din roi (peste 20).

Determinarea orientării pe roi se face în mod automat, măsurând poziții pentru circa 20 de stele și verificând rezultatul prin comparație cu pozițiile altor 5-7 stele de control. Stelele care stabilesc orientarea se găsesc automat, punând condiția ca abaterea medie pătratică pentru cele 20 de stele să fie inferioară lui  $3\sigma$ . În sfârșit, cu aceste stele rezultate se determină constantele  $a, b, c, d, e, f$ .

### 5.2.2.3. Posibile erori în determinarea orientării

Pentru a studia dacă există variații ale orientării camerei în funcție de poziția instrumentului (datorate imperfecțiunii de punere în pol a instrumentului), am efectuat două teste, determinând coeficienții orientării prin metoda expusă în par. 5.2.2.2, folosind două stele PPM.

Primul test a urmărit determinarea posibilelor variații ale coeficienților care exprimă rotația în funcție de unghiul orar. Pentru aceasta, s-au achiziționat mai multe zeci de imagini ale aceluiași cuplu (PPM144319 - PPM144320) în vecinătatea meridianului, în decursul a șapte ore. Unghiul de rotație calculat cu datele rezultate din fiecare expunere este reprezentat în funcție de fracțiunea de zi pe figura 1. Deși acest unghi arată o variație maximă de  $0^{\circ}.3$ , graficul nu indică vreo variație sistematică (care ar fi trădat necoincidența axei de rotație a instrumentului cu axa lumii).

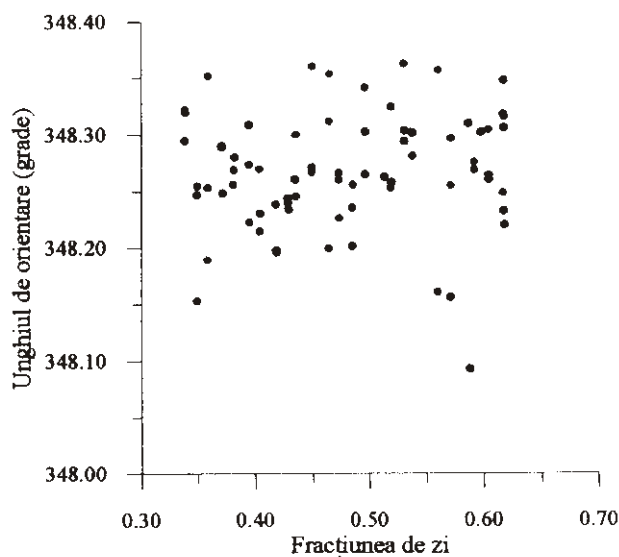


Figura 1 - Reprezentarea unghiului de orientare a camerei în funcție de unghiul orar nu indică o variație uniformă

Al doilea test a urmărit determinarea posibilelor variații ale coeficienților rotației în funcție de înălțimea deasupra orizontului. Pentru aceasta, s-au achiziționat 19 seturi de imagini care conțineau cupluri de două stele PPM la diferite declinații, în vecinătatea meridianului. Pentru a reduce erorile de măsurare ale fiecărui cuplu, fiecare set conținea câte 8-9 imagini ale cuplului respectiv. Rezultatele sunt conținute în figura 2. Deși pe figură se observă o variație maximă a unghiului de orientare de  $1^{\circ}.1$ , în ansamblu, rezultatul nu pare să indice vreo variație a orientării camerei în funcție de înălțime.

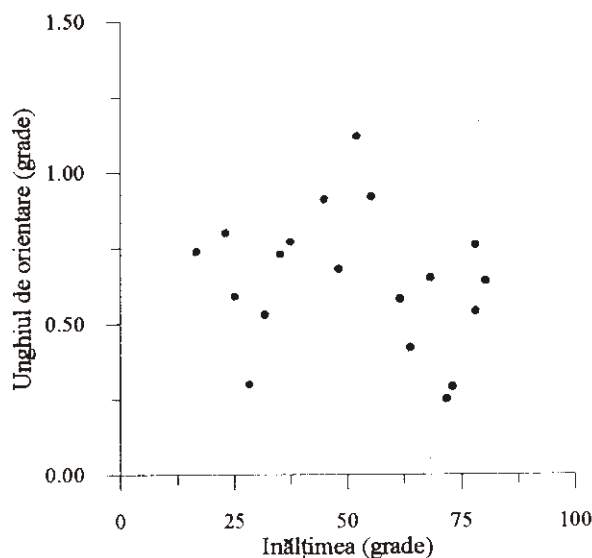


Figura 2 - Reprezentarea unghiului de orientare a camerei în funcție de înălțime nu indică o variație uniformă

În cazul instrumentului ecuatorial folosit, cele două rezultate arată că nu există erori de determinare a orientării datorate imperfecțiunilor de punere în pol. Totuși, variația maximă de  $1^{\circ}.1$  în cel de-al doilea test este foarte mare, și trebuie căutate alte dovezi pentru explicarea ei. Deoarece erorile de catalog ale stelelor PPM folosite au valori inferioare lui  $0^{\prime}.1$ , cazul cel mai nefavorabil furnizează pentru un cuplu de stele în câmpul camerei CCD o variație maximă a unghiului de orientare sub  $0^{\circ}.1$ , valoare insuficientă pentru a explica cifra de  $1^{\circ}.1$  de mai sus. Nici considerarea efectului refracției în reducerea observației nu introduce variații așa de mari în câmpul mic al camerei. Mai mult, măsurarea automată a surselor pe imagini (par. 5.2.1) se face cu erori sub  $0^{\prime}.1$ , ceea ce conduce în cazul cel mai defavorabil o eroare de  $0^{\circ}.1$ . Din această cauză, prin îndepărtarea acestor fenomene ca posibilitate de a introduce erori în determinarea orientării prin metoda din par. 5.2.2.2, singura posibilitate rămâne instabilitatea sistemului optic (datorat problemelor mecanice), care ar putea face să varieze poziția axului

optic al instrumentului. Tot în acest sens vine și argumentul că diferența maximă de  $0^{\circ}.3$  obținută din primul test, folosind imagini ale aceluiași cuplu în intervalul a șapte ore (deci modificând poziția instrumentului doar prin mișcarea de antrenare automată în ascensie), este mai mică decât valoarea de  $1^{\circ}.1$  obținută din al doilea test (când am deplasat instrumentul pentru fiecare cuplu).

### 5.2.3. Existența stelelor de reper în câmpul camerei CCD

Avantajul tehnicii măsurătorilor automate a imaginilor și cel al sensibilității receptorului CCD față de placa fotografică sunt compensate de lipsa stelelor de reper în câmpul mic al matricii CCD. Din această cauză, fenomenele cu dinamică rapidă de apropiere aparentă a corpurilor din Sistemul Solar de stelele de catalog constituie oportunități importante în obținerea de informații astrometrice.

#### 5.2.3.1. Studiu statistic asupra principalelor cataloage

Unele dezvoltări mai recente ale tehnologiei de fabricație produc matrici CCD de  $2048 \times 2048$  pixeli, capabile să asigure câmpuri de până la  $20'$  (Uppgren et al, 1995), sau chiar  $30'$  (Scotti, 1994). Unele firme japoneze produc dispozitive mozaic de  $7000 \times 4000$  pixeli, care pot „vedea” câmpuri de peste un grad pătrat (Kashikawa et al, 1995). Totuși, pentru majoritatea receptoarelor, densitatea stelelor de catalog pe câmpul camerei CCD rămâne scăzută. Tabelul 1 exprimă densitatea principalelor cataloage stelare, presupunând o distribuție uniformă a stelelor pe sfera cerească (Văduvescu și Vass, 1995). Densitatea corespunzătoare câmpului camerei utilizată de noi ( $10.4016''^2$ ) apare în ultima coloană.

Catalog	Număr de stele	Precizia (")	Densit. $*/''^2$	Densit. $*/10.4''^2$
Hipparcos	100000	0.002	2.4	0.007
AGK3	183000	0.28	4.4	0.013
SAO	260000	2.0	6.3	0.018
PPM	320000	0.27	8.5	0.025
Tycho	400000	0.02	9.7	0.028
GSC	15000000	1.7	363	1.049

Tabelul 1 - Densitatea stelelor în principalele cataloage stelare

Din tabel se observă că, dacă în cele  $5.29''^2$  ale plăcii fotografice există în medie circa 45 de stele PPM, câmpul camerei CCD dispune de o repartiție foarte slabă (în medie 0.025 stele PPM). Din această cauză, astrometria corpurilor mici din Sistemul Solar este mai dificilă.



O soluție posibilă este folosirea catalogului GSC, care asigură o bună densitate (în medie o stea în câmp), dar a cărui precizie este mai scăzută pentru a face astrometrie cu o singură stea. O altă soluție este folosirea unei stele de reper din câmpul camerei și reducerea acesteia la sistemul PPM (în mod fotografic, sau folosind un mozaic de imagini până la cea mai apropiată stea de catalog). A treia posibilitate constă în determinarea momentelor favorabile conjuncțiilor și apropierilor (<5') dintre micile corpuri și stelele de catalog.

#### 5.2.3.2. Programe pentru planificarea observațiilor

În scopul de a valorifica cea de-a treia soluție propusă în par. 5.2.3.1, apare noțiunea de planificare a observațiilor, care stabilește momentele când corpurile mici, în mișcarea lor aparentă printre stele, se situează în apropierea stelelor de catalog. Presupunând cunoscută efemerida unui corp, există cel puțin două metode de planificare a observațiilor, pe care le vom prezenta în continuare.

Începând cu anul 1992, am dezvoltat un pachet de programe în mediul Turbo Pascal 6.0, care realizează hărți cerești, folosind câteva tipuri de proiecție și trei cataloage astrometrice (Văduvescu și Bîrlan, 1996). Pachetul, numit CELESTIAL MAPS, a fost gândit pentru planificarea și reducerea observațiilor astrometrice, fiind realizat în patru versiuni.

Una dintre funcțiile cu care CELESTIAL MAPS este înzestrat permite posibilitatea de a reprezenta în mod grafic o anumită zonă cerească, utilizând catalogul PPM și un fișier ce conține o efemeridă oarecare. Această funcție poate fi folosită pentru planificarea observațiilor în vecinătatea apropiierilor și conjuncțiilor dintre stelele de catalog și corpurile mici ale Sistemului Solar.

O astfel de aplicație a fost dezvoltată în anul 1996, în cadrul observațiilor astrometrice asupra cometei C/1996 B2 (Hyakutake) (Văduvescu et al, 1997). Figura 3 prezintă o hartă realizată de CELESTIAL MAPS în care apar două poziții aparente ale cometei, furnizate de efemeridă (Marsden, 1996), la două date consecutive (23.8 și 24.0 martie). O simplă interpolare grafică liniară furnizează momentele corespunzătoare apropiierilor minime ale cometei de două stele care apar pe hartă: PPM 34602 - 0<sup>h</sup> (24 martie) și PPM 34601 - 0<sup>h</sup>34<sup>m</sup> TLR. În noaptea de 24/25 martie 1996, când cometa se afla la periheliu, la doar 0.1 UA de Pământ, cinci asemenea apropieri <4' au fost prevăzute, din care patru au furnizat rezultate astrometrice precise (par. 6.4.3).

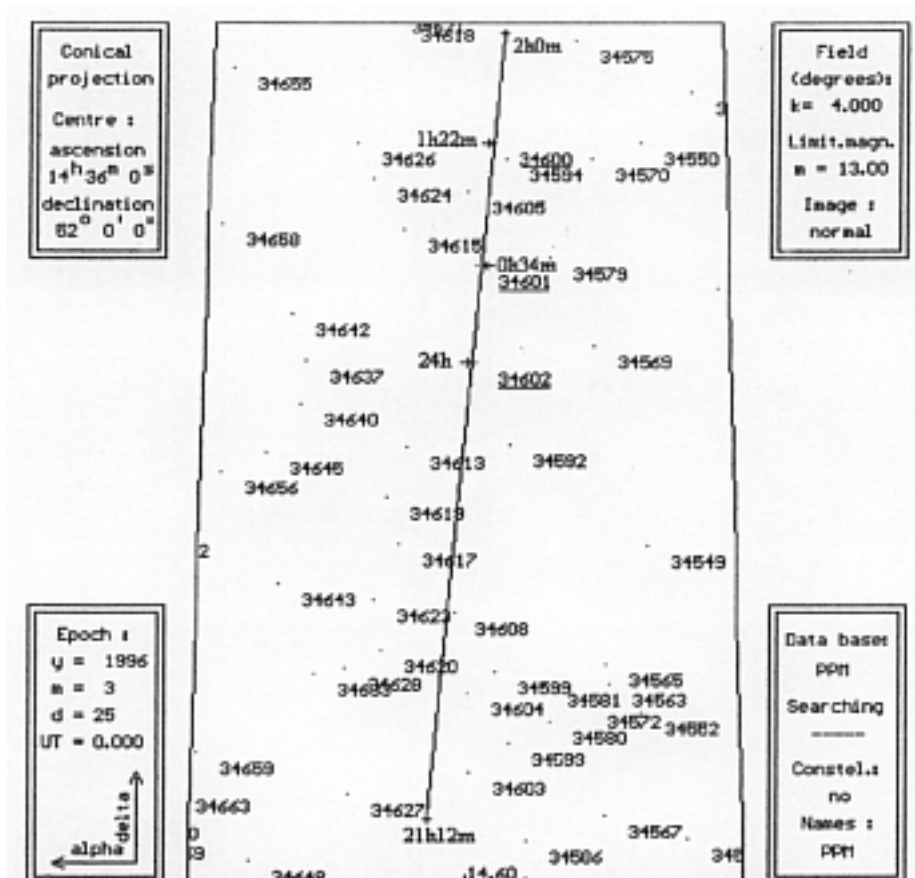


Figura 3 - Planificarea observațiilor astrometrice asupra cometei Hyakutake, observată la 24/25 martie 1996 la București. Linia verticală reprezintă traseul aparent al cometei între 21h12min (24 mar) - 2h0min (25 mar). Interpolarea liniară indică apropieri ale cometei de trei stele PPM: 34602 (24h0min), 34601 (0h34min), 34600 (1h22min) - orele în TLR

Un alt program de planificare a observațiilor a fost dezvoltat recent în mediul Turbo C++ (Văduvescu, 1997). În par. 6.1.5 vom descrie acest program, comparând rezultatele găsite în câteva aplicații cu cele ale altor autori. Folosind acest soft, am publicat o listă a predicțiilor de apropieri aparente ale cometei C/1995 O1 (Hale-Bopp) de stele de catalog PPM.