

Astrometri fra rummet – nu og i fremtiden

Erik Høg

Hipparcos

Hipparcos satellitten har målt positioner, bevægelser, afstande og lysstyrker for en million stjerner. Dette vil slå igennem på mange områder af astronomi og astrofysik på grund af den meget store nøjagtighed og det store antal stjerner. Fra Københavns Universitets Observatorium er der i 1992 fremlagt en plan for en ny satellit, ROEMER. Den ville være 100.000 gange så effektiv som Hipparcos og ville derfor give anledning til endnu større videnskabelige fremskridt. Dette studieprojekt har i kraft af de nye tekniske muligheder med billeddannende CCDer vist, at mulighederne indenfor rum-astrometrien udvikler sig hurtigt, og derfor har European Space Agency, ESA, vist stor interesse for at gennemføre nærmere undersøgelser.

Opsendelsen af Hipparcos satellitten i august 1989 huskes af nogle, fordi den var en fiasko, der blev omtalt i TV og dagspresse. Men det lykkedes at redde projektet, så vi har fået de planlagte 2,5 års gode målinger, indtil satellitten holdt op med at fungere i 1993. Satellitten blev opsendt med en tre-trins Ariane raket fra fransk Guyana og blev 'parkeret' i en langstrakt bane med sit fjerneste punkt 36000 km over jordens ækvator. To dage senere skulle den indbyggede (fjerde) raket med 450 kg fast brændstof tændes, når satellitten befandt sig i sit fjerneste punkt. Derved skulle hastigheden øges i løbet af et minut og banen blive cirkulær med jorden i centrum og en omløbstid på 24 timer. I en sådan geostationær bane kan et fast radioteleskop holde kontakt med satellitten hele tiden.

Men tændingen svigtede så satellitten måtte blive i den elliptiske bane. Herved føres den for hvert omløb igennem jordens strålingsbælter, som man ventede hurtigt ville ødelægge solpanelerne. Det skete dog ikke. Et andet problem var at der skulle tre radioteleskoper, der afløser hinanden til for at holde forbindelsen.

Mange andre problemer måtte klares af ESA, blandt andet omskrivning af programmer til de regnemaskiner, der styrer satellittens drejninger og de videnskabelige målinger – og finansiering af de højere driftsomkostninger til de tre radioteleskoper.

Astrometri og fotometri

Nøjagtige målinger af stjernernes positioner, deres bevægelser på himlen og deres afstande fra os kaldes *astrometri*, og resultaterne spiller en fundamental rolle for næsten alle grene af astronomien. Vort kendskab til afstande til stjerner inden for vor egen galakse og til selv de fjerneste galakser i Universet bygger på direkte målinger af afstande til stjerner nærmere ved solen, i princippet som ved en landmåleroperation. Vor viden om stjernernes udvikling, mælkevejssystemets dannelse og udvikling, og om vort planetsystems dynamiske forhold beror bl.a. på

astrometriske resultater.

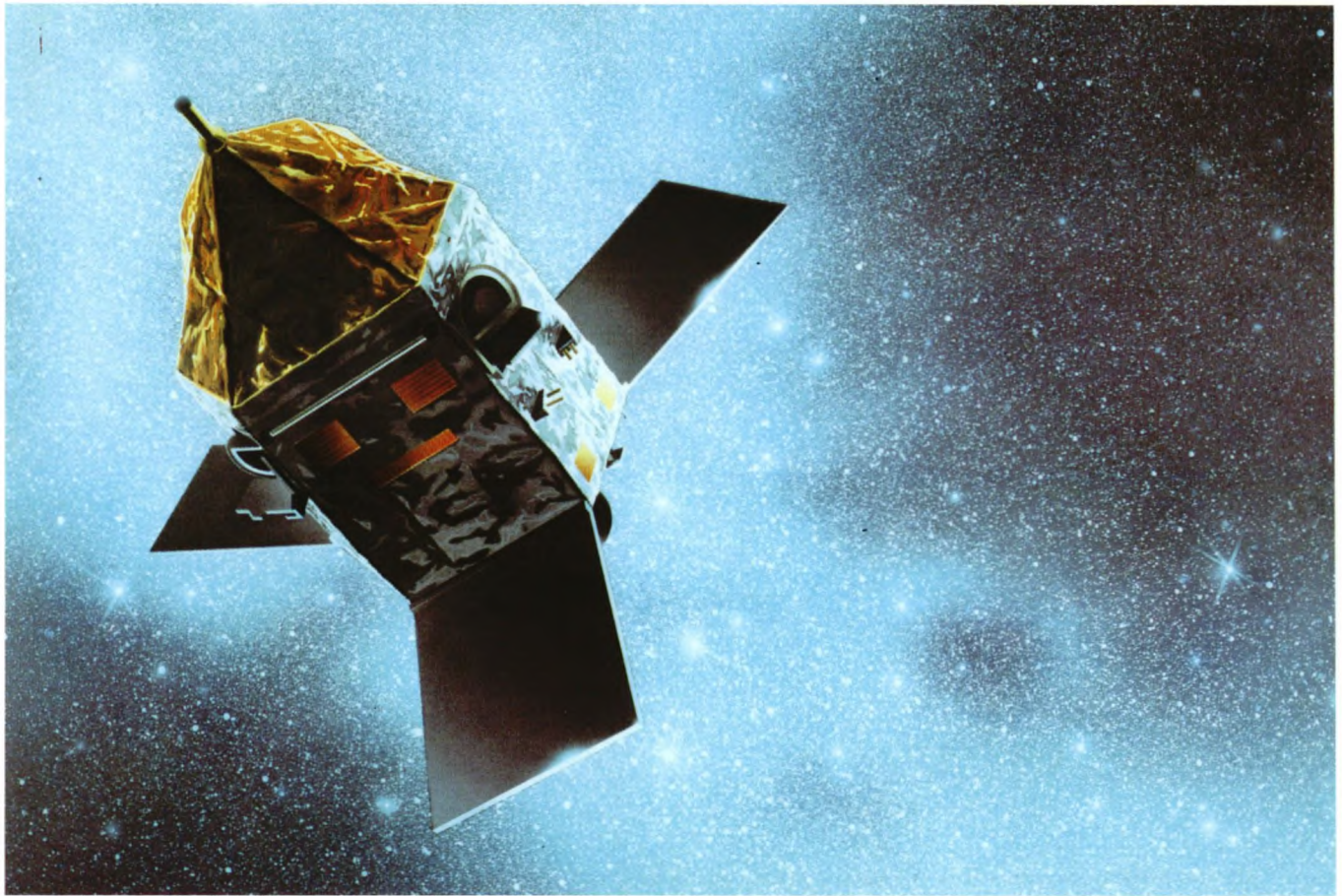
Hvis man gentager positionsmålinger over et tidsrum på nogle år som med Hipparcos satellitten, vil dataanalysen afsløre hver stjernes langsomme bevægelse på himlen, og desuden en svag årlig bølgebevægelse. Denne bølgebevægelse er en afspejling af jordens bevægelse omkring solen. Bølgens højde kaldes parallaxen, der er større jo nærmere stjernen befinder sig, idet den er omvendt proportional med stjernens afstand.

Hipparcos¹ var oprindeligt kun tænkt som en astrometrisk satellit, men det har vist sig, at hver af de hundrede astrometriske målinger for hver stjerne, samtidig giver en meget nøjagtig måling af stjernens lysstyrke. Ved analyse af disse tal vil man opdage, at mange stjerner har en variabel lysstyrke. Man vil faktisk finde flere nye variable stjerner, end man kender i forvejen, og variable stjerner er interessante for forståelsen af stjernernes udvikling. På grund af det uventet store fotometriske udbytte fra en astrometrisk satellit har vi udnyttet disse muligheder fuldt ud i det nye Roemer projekt. Det vil give drastisk forbedrede resultater, især takket være anvendelse af en ny, meget følsom type detektor: Charge Coupled Device (CCD).

Sammensætningen af stjernernes lys kan måles ved *fotometri*. Fotometriske målinger af lysstyrken i passende områder af spektret giver os kendskab til temperatur og tyngdekraft på stjernens overflade, den kemiske sammensætning af stoffet og stjernens totale udstråling. Fotometrien supplerer altså de astrometriske målinger ved at give oplysning om hver stjerne som et fysisk objekt, mens astrometrien betragter en stjerne som en punktformet lyskilde i rummet.

Hipparcos-Tycho missionen afsluttet i 1993

ESAs Hipparcos satellit rummede to 'eksperimenter' Hipparcos og Tycho, hvis grundlæggende design blev skabt i København i henholdsvis 1975 og 1981. Den første ide til astrometriske målinger fra en satellit er af fransk oprindelse, fra 1966. Satellitten (Fig.1) og dermed den optiske spejl-kikkert (Fig. 2) drejer sig med jævn hastighed en omgang på to timer. Stjernerne passerer herved langsomt over et stort antal spalter i kikkertens billedplan, og det modulerede lys opfanges hele tiden af specielle detektorer, hvis enkeltmålinger sendes direkte til jorden. Drejningsaksen forskydes systematisk så hele himlen måles flere gange om året. Den meget omfattende dataanalyse er fordelt på et dusin institutter i Vesteuropa, og foretages af omkring ethundrede videnskabsfolk og teknikere. Det er den største enkelte dataanalyse i astronomiens historie, idet den udføres som en helhed, hvor til syvende og sidst enhver astrometrisk måling af enhver stjerne bliver



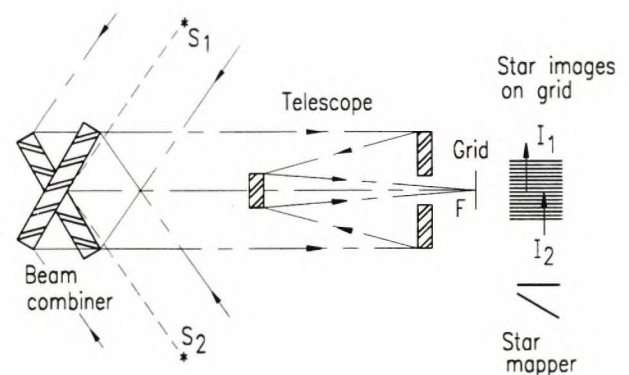
Figur 1. Hipparcos satellitten målte fra 1989 til 1993 positioner og lysstyrker for en million stjerner ved hjælp af et teleskop med to synsretninger. (Billede fra Illustreret Videnskab, Juli 1992, s. 48)

forbundet med alle andre stjerner. Ved de fleste andre astronomiske observationer kan man analysere stjernerne enkeltvis, efter at have foretaget de nødvendige kalibreringer af instrumentet, men ved Hipparcos er analysen en helhed.

Hipparcos eksperimentet har målt 120000 udvalgte stjerner med meget stor astrometrisk nøjagtighed på 0.002 buesekund. [Her opfordres læseren til at bekræfte, at med denne vinkelopløsning ville man kunne tælle ærter i en bælg — tværs over atlanten! Red.] Tycho eksperimentet har målt en million stjerner, de klareste på himlen, med noget mindre nøjagtighed, men dog større end det er muligt fra jorden. Desuden har Tycho målt stjernernes farver ved at måle lysstyrken i den blå og grønne del af spektret.

Hipparcos-Tycho missionen har på fire år opnået astrometriske og fotometriske resultater, der overgår, hvad man har opnået ved målinger med instrumenter på jorden i hele vort århundrede med hensyn til nøjagtighed for et så stort antal stjerner. Det skyldes især, at målinger fra rummet ikke forstyrres af lysets uregelmæssige brydning i atmosfæren. Det er også vigtigt, at man med en satellit kan måle hele himlen med et eneste instrument, mens man fra jorden har brug for

instrumenter både på den nordlige og sydlige halvkugle, og at tyngdekraften ikke deformerer kikkerten.



Figur 2. Principskitse for Hipparcos. Lyset fra de to stjerner, S_1 og S_2 der befinder sig i stor vinkelafstand på himlen, måles samtidigt på gitteret i brændplanen.

Roemer projektet vurderet højt af ESA

Den vellykkede Hipparcos-Tycho mission har demonstreret den astrometriske og fotometriske ydeevne af en

roterende satellit udrustet med et lille optisk teleskop; hovedspejlet i Hipparcos er kun 30 cm i diameter. Men Hipparcos blev designet for over ti år siden, før halvleder-detektorer var modne til en så krævende anvendelse i satellitter.

Måleprincipper for Hipparcos

Hipparcos opnår stor målenøjagtighed ved måling af både store og små vinkler, fordi det optiske system indeholder vinkelstandarde af tre meget forskellige størrelser. Desuden er det vigtigt, at disse standarder løbende kalibreres ud fra de samme målinger af stjerner, som anvendes til beregningen af kataloget. Hipparcos er altså selvkalibrerende; ingen måletid anvendes alene til kalibrering.

De tre vinkelstandarde er: (1) basisvinklen mellem de to synsretninger med stjernerne S1 og S2 i Fig. 2, (2) de parallelle spalter dækkende en kvadratgrad af brændplanen, hvor de to billeder af stjernerne befinder sig ved I1 og I2, og (3) den modulerede lyskurve af hver stjerne som funktion af tiden. Denne lyskurve måles for en stjerne ad gangen af en Image Dissector Tube, hvis lysfølsomme katodeplet dirigeres rundt mellem op til ti programstjerner, der befinder sig samtidig i feltet. Satellittens vinkelhastighed bestemmes ud fra stjernemålingerne, til anvendelse i analysen af lyskurverne.

Dobbelt-spejlet, 'beam combiner', består af to halvdele, der er sammenklæbet, så 'basisvinklen' mellem de to synsretninger holder sig meget konstant. Den kalibreres ud fra 12 timers målinger.

Den i Fig. 2 viste 'star mapper' består i princippet af to spalter og en foto-multiplikator-celle, der måler alt lyset fra hele spaltealet ved fotontælling. Når en stjerne med kendt position har passeret de to spalter, vil de to tidspunkter for passagerne være tilstrækkeligt til at beregne sigteretningen for synsfeltet. Således bestemmes satellittens orientering som funktion af tiden.

Star mapperen danner grundlag for Tycho eksperimentet, idet lyset deles i farverne blå og grøn (B og V), der måles af hver sin fotocelle. Alle disse fotontællinger er blevet reduceret og har givet gode bestemmelser af positioner og lysstyrker i de to farver for en million stjerner.

Erkendelsen af at moderne CCDer kunne anvendes i et sådant projekt, med en enorm gevinst i kvalitet og kvantitet, førte i 1992 forfatteren til at foreslå et koncept for en mission kaldet ROEMER. Navnet står for Ole Rømer (1644-1710) og det er acronym for Rotating Optical Observatory for Extreme Measuring Efficiency and Rigour. Kikkerten i Roemer forslaget har stadig kun cirka 30 cm åbning af spejlet, men brændvidden må være meget længere end de 1.4 meter i Hipparcos. Omkring 5 meter

kræves for at opløsningsevnen skal svare til de mindste billedelementer (pixel) der kan fremstilles på CCDer, og det vil sige cirka 0.006 mm bredde, se Fig. 3.

En version af Roemer er blevet foreslået ESA af en gruppe af astronomer, de fleste med tilknytning til Hipparcos-Tycho missionen. Den videnskabelige bedømmelse hos ESA var meget positiv, idet Roemer blev nr. 1 blandt en snes forslag inden for astronomi og astrofysik til en mission af mellemstørrelse (M3). Den endelige beslutning i ESAs Space Science Advisory Committee (SSAC) anbefalede midlertid ikke Roemer i forbindelse med M3, idet Hipparcos resultaterne bør have tid til at gøre deres virkning inden en ny astrometrisk mission startes. Men SSAC foreslog at ideen tages op i forbindelse med ESAs langsigtede planlægning.

100000 gange mere effektiv end Hipparcos

Roemer er meget mere end en gentagelse af Hipparcos-Tycho. Anvendelsen af mange CCDer direkte i billedplanen giver et målesystem, der er langt mere effektivt end Hipparcos. Alt i alt kan der opnås en 100.000 gange større effektivitet med hensyn til udnyttelse af fotonerne. Tilføjelsen af farve-filtre til måling i mange områder af spektret, fra det nære ultra-violet til det nære-infrarøde, øger den astrofysiske værdi af Roemer missionen enormt.

Mange andre tekniske forbedringer i forhold til Hipparcos beror på erfaringer med denne første astrometriske satellit. Roemer skal være mere rotations-symmetrisk end Hipparcos for at mindske uønskede drejninger af satellitten på grund af sollysets tryk. Gyroskoper må ikke anvendes under selve målingerne, da de giver for store mekaniske forstyrrelser i satellittens drejning. Solpanelerne skal monteres på selve satellitten for at give en større mekanisk stivhed. Hipparcos har bevist, at satellittens drejning kan kontrolleres nøjagtigt af dyser, der udstøder en lille mængde kold gas (nitrogen) med cirka en halv times mellemrum. Og også vigtigt: det dobbelt-spejl foran kikkerten, der definerer de to synsretninger, har vist sig at være så stabilt, at det er godt nok også for en Roemer satellits større krav. Det kunne først bevises ved anvendelse i den vægtløse tilstand i Hipparcos satellitten.

Det bør her nævnes, at forfatteren for nylig har udarbejdet planer for et nyt optisk system uden et stabilt dobbeltspejl. I stedet anvendes i Roemer+, som satellitten foreløbig kaldes, to separate teleskoper, og vinklerne mellem spejlene måles hele tiden med picometer (10^{-12} m) nøjagtighed med specielle Michelson interferometre. Det muliggør anvendelse af kikkerte med større åbning, idet man ikke kan fremstille et Hipparcos dobbeltspejl med væsentlig større diameter end 30 cm. Med f.eks. 70 cm diameter vil målefejlene reduceres til en sjettedel af det man kan nå med Roemer, som beskrevet ovenfor. Det vil sige, at man når 0.01 millibuesekund ved 11te størrelsesklasse, altså 200 gange mindre fejl end Hipparcos, således at man kan måle parallakser for stjerner i en afstand af 10000 parsec. Med andre ord: direkte afstande vil kunne måles i en stor del af Galaksen, mens

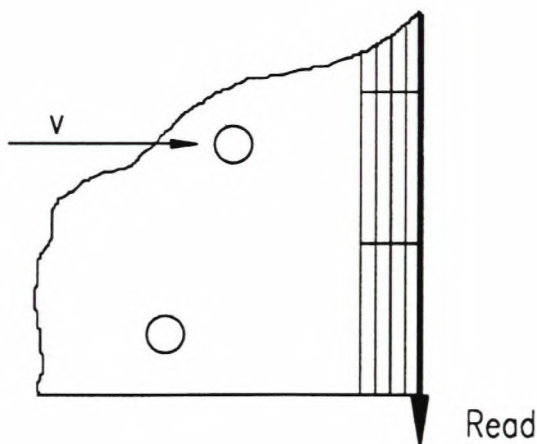
parallakser hidtil har været begrænset til stjerner i solens nærmeste omegn.

Måleprincip for Roemer

Måleprincipperne for Roemer ligner meget principperne for Hipparcos. Den største forskel består i at erstatte modulationsgitteret, hvor kun een stjerne måles ad gangen, med en to-dimensional (billeddannende) CCD detektor, hvor alle stjerner måles samtidig, og det sker endda med en kvanteeffektivitet, der er ti gange større end i Hipparcos.

Fig. 3 viser et hjørne af den CCD, som er tiltænkt Roemer satellitten. Det særlige ved denne CCD er, at den består af lange billedelementer og at ladningerne flyttes i samme tempo, v , som stjernebilledet på CCD'en. Herved bevares et ladningsbillede af stjernerne, der er lige så skarpt i måleretningen (her vandret) som det optiske billede, og som derfor giver størst mulig målenøjagtighed per foton. Ladningsbilledet er udtværet over pixelhøjden, men i den retning kræves ikke nogen stor målenøjagtighed. Fordelen ved de lange pixels er deres større areal, som betyder, at de kan holde en større ladning, hvorved man kan måle stjerner af vidt forskellig lysstyrke med en næsten lineær detektor.

Imellem hver forskydning af ladningerne går der et tidsrum på cirka et millisekund. I dette tidsrum kan alle ladninger, der er nået ud til højre kant, udlæses gennem en forstærker ved Read. Således opnås ved denne målemetode, kaldet 'drift-scan', en konstant integrationstid på nogle sekunder for alle stjerner, svarende til den tid det tager stjernen at passere hen over CCD'en.



Figur 3. Et hjørne af en enkelt CCD i Roemer. Billedet af de to stjerner bevæger sig fra venstre mod højre på grund af satellittens drejning.

Praktisk betydning

Hipparcos-Tycho katalogerne vil få direkte praktisk anvendelse for de fleste astronomer. Katalogerne indeholder et tæt net af nøjagtige positioner på hele himlen, der kan tjene som referencepunkter ved indstilling af kikkerter, ved måling af andre stjerner inden for et mindre område af himlen, og ved styring af satellitter og rumsonder.

Foreløbige talværdier fra Hipparcos og Tycho er allerede anvendt til specielle formål. Således hjalp disse data NASA til at navigere Galileo rumsonden særligt nær til asteroiderne Gaspra og Ida i 1991 og 1993 for at optage billeder. Også ved beregning af sammenstødet mellem komet Shoemaker-Levy 9 og Jupiter i juli 1994 anvendte man Hipparcos positioner.

CCD-detektorer

En CCD-detektor er et stort og forfinet stykke integreret elektronik. Den lysfølsomme del er et stort net af fotodioder, billedelementerne, pixels. Disse er forbundet med et netværk af transistorer, udført i MOS-teknik. En måling begyndes i den ene side af kredsen med at der lægges en spænding over hver diode i spærreretningen. Derved overføres en lille ladning på diodekapaciteten. Når lyset nu rammer billedelementet opstår en fotostrøm som vil aflade kapaciteten. Den manglende ladning på diodekapaciteten er altså et mål for antallet af fotoner der har ramt billedelementet.

For at få fat i disse ladninger bruges transistor-netværket på en anden måde, der har givet kredsen navn. CCD står for Charge Coupled Device. Alle ladninger på hele kredsen kan via transistor-netværket flyttes en søjle til siden. Når der fortsættes på denne måde ender enhver ladning tilsidst i søjlen i den anden side hvorfra ladningerne skiftes, en af gangen, ned til en forstærker for at blive registreret.

Hipparcos og Tycho katalogerne vil give mulighed for en udnyttelse af gamle fotografiske optagelser af hele himlen fra omkring 1900, et af de største internationale projekter i astronomiens historie. De udmålte stjernepositioner blev udsendt i det såkaldte Astrografiske Katalog på over et hundred bind. Men man har aldrig rigtigt kunnet udnytte disse positioner, fordi der ikke fandtes noget samtidigt referencekatalog. Det problem vil Hipparcos kataloget løse, idet stjernernes positioner og bevægelser hermed er målt så nøjagtigt, at man kan ekstrapolere tilbage til de positioner Hipparcos stjernerne havde på det tidspunkt omkring år 1900, da den enkelte plade blev optaget. Det vil tilade en ny reduktion af pladerne, så man får gode positioner for *alle* stjerner på *alle* pladerne, heriblandt den ene million Tycho stjerner. Ved hjælp af de nye positioner

fra Tycho missionen kan man beregne bevægelser for disse stjerner, hvorved man får et meget nøjagtigt 'Tycho Reference Catalogue', som det skal kaldes, næsten lige så nøjagtigt som Hipparcos kataloget, men med ti gange så mange stjerner.

De endelige Hipparcos og Tycho kataloger vil blive udsendt i 1997 på CD-ROM og vil blive anvendt i form af databaser, alene på grund af deres størrelse. Roemer kataloget vil udgøre et meget tættere og nøjagtigere referencenet for astrometri og fotometri og det vil omfatte meget svagere stjerner end Hipparcos-Tycho.

Referencer:

- 1) Hipparcos satellitten er f. eks. beskrevet i ESA Bulletin no. 75 august 1993, s. 7-16, og i Illustreret Vi-

denskab, Nr. 7, 1992, hvorfra Fig. 1 er lånt.



Erik Høg er cand. scient. fra 1956, dr. scient., docent ved Københavns Universitet, ansat ved Astronomisk Observatorium. Han er tilknyttet ESA's astrometriske satellit Hipparcos.