

Astrometri fra antikken til i dag

Af Erik Høg

Der er hidtil kun opsendt en eneste astrometrisk satellit, Hipparcos, og dens observationer fra 1989-93 betød et kvantespring med hensyn til nøjagtighed og antal af stjerner med nøjagtigt målte afstande, egenbevægelser og positioner. I 2013 vil ESA opsende en endnu større astrometrisk satellit, Gaia, som ventes at betyde et nyt kvantespring for astrometrien. Jeg vil i det følgende skildre astrometriens udvikling og dens betydning for astronomien.

Jeg beskriver først nogle træk af astronomiens udvikling med fokus på astrometriens betydning samt på de danske bidrag hertil. Dernæst skildrer jeg det videnskabelige udbytte af Hipparcos-satellitten, idet der sammenlignes med resultaterne fra astrometri målt fra Jorden, og jeg nævner lidt om det man venter af observationerne fra Gaia. I en senere artikel i Kvant vil jeg beskrive Gaia-satellitten og den tekniske udvikling, vi måtte igennem for at nå frem til et godt design.

Astronomi siden de gamle grækere

De to projekter Hipparcos og Gaia vil tilsammen forbedre den astrometriske nøjagtighed med mere end det, der blev opnået gennem de forudgående 500 år. Det giver god mening således at tale om århundreder i forbindelse med netop astrometriens udvikling, idet astronomer har målt positioner for stjerner og planeter gennem mere end 2000 år. Mange typer af instrumenter er blevet udviklet og anvendt gennem århundrederne, men jeg havde det held at leve i en periode, hvor instrumenter kunne udvikles enormt ved anvendelse af elektronisk teknik og rumteknologi. Flere gange havde jeg det held at være på det rette sted til det rette tidspunkt med de rette ideer, først egnet til en gammel type instrument på Jordens overflade og senere to gange til en ny type satellitter.

At udføre måling af positioner og at anvende dem blev altid kaldt *astronomi*. Formålet var at forstå stjerners og planeters bevægelser baseret på mekanikkens love, dvs. hastighed, acceleration, massetiltrækning, osv. som defineret af Isaac Newton i 1687 i hans berømte bog "Naturfilosofiens matematiske principper".

Ordet *astrometri* er det moderne ord for positionsmålinger, som man begyndte at bruge omkring 1900 for at skelne den fra astrofysik, den nye og hurtigt voksende gren af astronomien, hvor de fysiske teorier for varme og atomer anvendes for at forstå stjerner og hele universet som fysiske objekter.

Stjerner består af atomer, derfor må man forstå atomers egenskaber, inden man kan forstå stjerners struktur og udvikling. Begrebet atomer har man kendt siden de gamle grækere, men det var først omkring 1912, at det blev almindelig anerkendt, at atomer virkelig findes. En dyb forståelse af atomer blev mulig gennem de store fremskridt i atomfysikken, der skete i 1920'erne, hvor Niels Bohr og hans institut i København spillede en vigtig rolle i skabelsen af kvantemekanikken, den

matematiske teori, som lige siden har været basis for al atomteori.

Dansk astrometri siden Tycho Brahe

Den mest berømte danske astronom, Tycho Brahe (1546-1601), havde ingen forbindelse til Københavns universitet, som på den tid var meget konservativt. Men Tycho havde direkte forbindelse til kongen, Frederik den Anden, som gav mildt understøttede ham og lod ham bygge et observatorium på øen Hven i Øresund nordøst for København. Man skønner at kongens støtte beløb sig til én procent af statsbudgettet i tyve år, den stærkeste forskningsstøtte nogen sinde, både før og siden.

Dette observatorium var det mest moderne på den tid, og gennem de tyve år målte han 1000 stjerner og alle planeterne meget nøjagtigere end nogen tidligere havde gjort.

Boks 1: Astrometri – Positioner af stjerner

En stjernes position angives med to tal svarende til længde og bredde for et sted på Jorden. På himlen kaldes de to tal for rekt-ascension og deklination. En stjernes position ændres så lidt over mange hundrede år, at stjernebillederne for romere og grækere for to tusind år siden så ud som de gør for os i dag. Men faktisk bevæger stjernerne sig i forhold til hinanden, hvad man opdagede for tre hundrede år siden. Denne bevægelse kaldes "egenbevægelse", og den måler man med astrometri.

Ud over den retlinede egenbevægelse har en stjerne en bølgebevægelse på grund af Jordens bevægelse omkring Solen på et år. Hvis en stjerne er nær ved os, er denne såkaldte "parallaksebevægelse" større, og måling af bølgens størrelse, kaldet "parallaksen", giver derfor afstanden til stjernen.

Positionerne af Solen, Månen og planeterne ændrer sig meget hurtigere end for stjernerne, hvad enhver kan se, hvis han er opmærksom på den slags.

Den græske filosof Hipparchos (græsk: "Ἰππάρχος" Hipparkhos; ca. 190-ca. 120 f.Kr.) kaldes ofte astronomiens fader, fordi han udviklede astronomien og målte positioner for 1000 stjerner. Kendskab til disse gamle positioner er bevaret gennem de mange århundreder op til vor tid.

Satellitten Hipparcos staves uden h og navnet blev oprindeligt i 1979 foreslået som et akronym HIP-PARCOS: HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite.

Tycho Brahe ville først og fremmest måle afstanden til Mars, fordi Mars har vidt forskellig afstand ifølge Kopernikus og Ptolemæus, som han derfor ville kunne skelne imellem. Hvor vigtigt dette var for Tycho har historisk forskning påvist for en snes år siden. Tycho målte derfor Mars særlig hyppigt. Han nåede dog ikke sit mål, fordi alle afstande i solsystemet var 20 gange større end han troede, men de mange målinger blev af stor betydning for Keplers arbejde med Mars.

Tycho målte i alt 1000 stjerner, men nogle få af dem udgjorde hans *referencestjerner*, som blev målt hyppigere og med forskellige instrumenter. Alle de andre stjerner og planeterne blev målt i forhold til disse meget nøjagtigere stjerner.

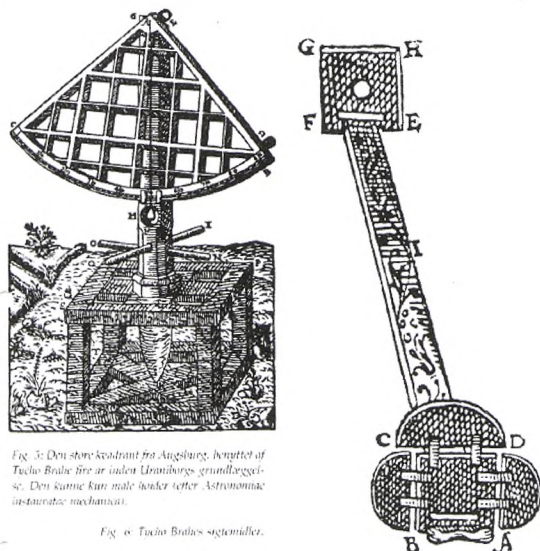
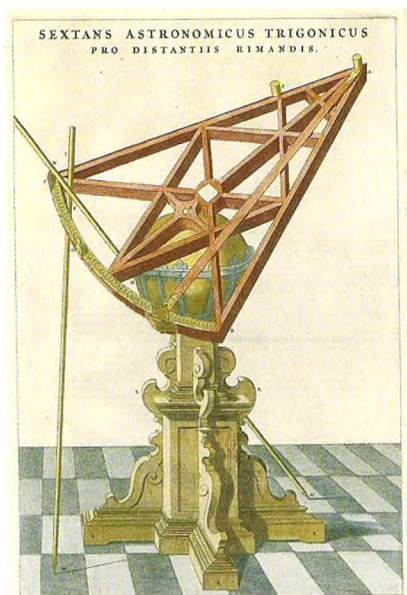


Fig. 5. Den store kvadrant fra Augsburg, benyttet af Tycho Brahe fire år inden Uraniborgs grundlæggelse. Den kunne kun måle højder. Astronomica instrumenta mechanica.

Fig. 6. Tycho Brahes sigtemidler.

Figur 1. Til venstre: Den store kvadrant fra Augsburg, benyttet af Tycho Brahe fire år inden Uraniborgs grundlæggelse. Den kunne kun måle højder. Til højre: Tycho Brahes sigtemidler.



Figur 2. Tycho Brahes sekstant fra 1580. Bemærk den fine gradinddeling og sigtelinealen med plade forneden og cylinder øverst og i det hele taget den perfekte udførelse af hele instrumentet.

Tycho forbedrede sine instrumenter på mange måder, så sigtenøjagtighed var på et bueminut efter ti års udvikling på Hven. Tychos målinger har ca. fem gange mindre fejl end opnået af hans nærmeste forgængere, Landgreven af Hessen. Han var klar over, at forbedring ikke kunne opnås ved at bygge meget større instrumenter, det havde han allerede prøvet som assistent for borgmesteren i Augsburg (se figur 1), men det store fritstående instrument blev væltet i en kraftig storm. Tycho indførte et bedre sigtemiddel, (se figur 1 og 2) men kikkert havde han jo ikke. Han indførte en nøjagtigere inddeling af delekredsen, hvor vinkelen skulle aflæses, og selve aflæsningen blev forbedret. Alt sammen selvfølgelig takket være instrumentmagere, der blev dygtigere og dygtigere, og som Tycho havde råd til at betale med de store midler, som kongen skaffede ham.

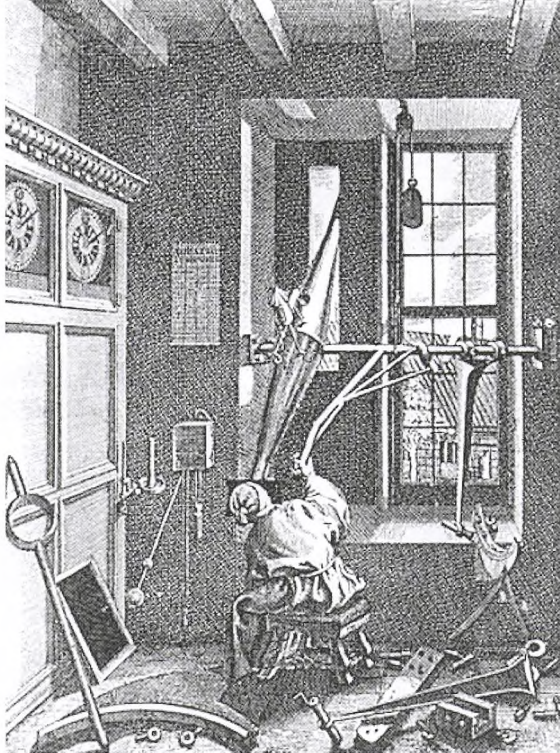
Tycho var meget berømt, mens han levede, men hans observationer kom efter hans død til at spille en uventet stor rolle i udviklingen af videnskab og teknologi. Dette skete, for det første, fordi Johannes Kepler (1571-1630) fandt lovene for planeters bevægelser ved nøje analyse af Tychos observationer. Dernæst benyttede Isaac Newton (1643-1727) denne viden til at finde de matematiske love for mekanik og for massetiltrækning.

Kikkertens opfindelse i 1608 fik straks stor betydning for astronomien, idet Galileo Galilei allerede anvendte den i 1609 og fandt Jupiters måner, bjerge på Månen, pletter på Solen osv. Men anvendelsen af kikkerten til astrometri gik meget langsommere. Som sigtemiddel kunne den ikke konkurrere med de af Tycho Brahe indførte. Der skulle først opfindes trådkors af spindelvæv til centrering af stjernen og mikrometre til at flytte trådene nøjagtigt til måling af stjernerne i synsfeltet, og det tog et par generationer. John Flamsteed var den første Royal Astronomer fra 1675 og observerede i Greenwich med en kvadrant forsynet med kikkert. Han opnåede fem gange mindre fejl end Tycho Brahe i et katalog med 3000 stjerner. En stor udvikling fortsatte i udlandet, se [1], hvad jeg kun kan nævne punktvis, da denne artikel fokuserer på dansk astrometri.



Figur 3. Rundetårn i København for 100 år siden. Det blev fuldført i 1642.

Ved Københavns Universitet kunne astronomiske observationer i princippet begynde i 1642 efter bygningen af det monumentale Rundetårn (figur 3), som resultat af en stor indsats fra professor Longomontanus (1562-1647), der havde været Tycho Brahe's assistent på Hven og i Prag. Virkelige observationer begyndte imidlertid først senere i århundredet, da Ole Rømer (1644-1710) overtog.

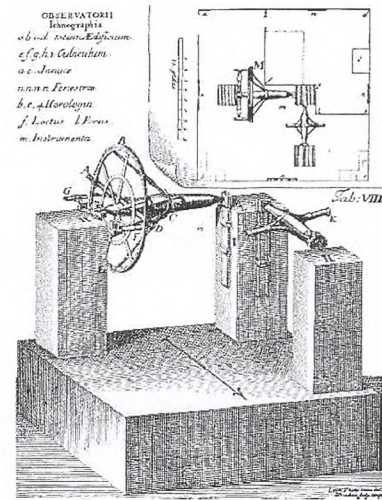


Figur 4. Ole Rømers passageinstrument fra 1691 som var opstillet i hans hus i Store Kannikestræde, mellem Universitetet og Rundetårn. Observatøren ser stjernen bevæge sig gennem kikkertens synsfelt på grund af Jordens rotation. Han registrerer tidspunktet ved hjælp af urene til venstre og får således den ene koordinat af stjernens position, rektascensionen. Dette instrument var det første af sin art og blev meget anvendt i de følgende århundreder, idet det efterhånden blev udviklet til stadig højere teknisk fuldkommenhed.

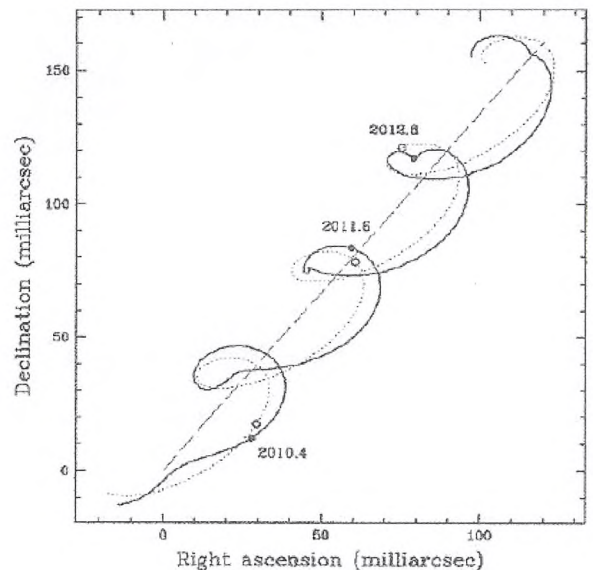
Ole Rømer opholdt sig i Paris i årene 1672 til 1681. Han blev medlem af Academie des sciences, og boede i det netop opførte monumentale nye observatorium, der stadig findes, og nu anvendes til kontorer. Efter omhyggelige studier af omløbstiderne af den inderste Jupitermåne, Io, gjorde han den opdagelse, der gjorde ham verdensberømt. Han drog den slutning, at lyset har en endelig hastighed. Dette var i modstrid med den opfattelse, som mange videnskabsfolk havde haft siden oldtiden, at lyset udbreder sig øjeblikkeligt, altså med uendelig hastighed. I Frankrig viste Rømer sin praktiske sans på mange måder, f. eks. ved at konstruere pumper til vandforsyningen til Solkongens paladser, og som matematiklærer for kronprinsen konstruerede han maskiner, der viste planeternes bevægelse.

Da han var tilbage i København fra 1681 blev han professor i astronomi og direktør for Rundetårn. Desuden blev han dommer i Højesteret, politimester

i København, sørgede for vandforsyningen i byen og for at der kom gadebelysning – men det er en anden historie. Han indså snart, at Rundetårn var for ustabil til at nøjagtige observationer af stjerners positioner kunne udføres fra dets top på grund af rystelser fra de tunge hestevogne i Købmagergade nedenfor. Han byggede derfor et observatorium i sit hus i Store Kannikestræde, idet han opstillede verdens første passageinstrument (figur 4) i 1691. I 1704 opstillede han den første meridiankreds (figur 5) i en meget beskedne bygning nær Vridsløsemagle, langt uden for København – hvilken kontrast til det pompøse Rundetårn.



Figur 5. Ole Rømers meridiankreds fra 1704. Kikkerten ved AD er fastgjort på delekredsen. Til højre ses et lille passageinstrument, der kunne anvendes til observation af stjerner, når de passerede øst-vest retningen.



Figur 6. Bane på himlen af en stjerne, som har afstanden 50 parsec (=165 lysår), med en egenbevægelse på 0,05 buesekunder pr. år og som ledsages af en planet med en masse på 15 gange Jupiters. Banens ekscentricitet er 0,2 og halvaksen er 0,6 gange afstanden mellem Jorden og Solen. Den lige linje med brudt streg viser systemets bevægelse set fra Solen. Den prikkede linie viser virkningen af parallaksen. Den fuldt optrukne linie viser stjernens bevægelse som følge af planetens tiltrækning, dog forstørret 30 gange for tydelighedens skyld. Tallene angiver tiden ved årstal.

Boks 2: Relativ og absolut astrometri

Nogle stjerner har en nabostjerne tæt ved, og de bevæger sig i baner om et fælles tyngdepunkt. De kaldes fysiske dobbeltstjerner i modsætning til de optiske dobbeltstjerner, hvor de to stjerner kun tilfældigt ses tæt ved hinanden, men i virkeligheden befinder sig i vidt forskellige afstande fra os. Det kræver nøjagtige observationer gennem adskillige år for at skelne egenbevægelsen, den parallaktiske bevægelse og somme tider banebevægelsen for en stjerne. At udføre alt dette er en opgave for astrometri. Se figur 6 af en stjernes bane på himlen.

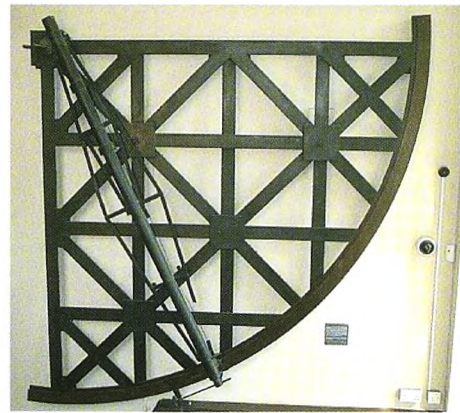
En dobbeltstjernes komponenter kan måles i forhold til hinanden inden for synsfeltet af en særlig egnet kikkert. Det sker efter optagelse på en fotografisk plade eller en CCD, eller med et mikrometer, der er egnet til at måle små vinkler. Måling af små vinkler på himlen kaldes *relativ astrometri* for at skelne fra *absolut* eller *fundamental astrometri*, hvor det drejer sig om at måle store vinkler i et koordinatsystem, der dækker hele himlen. Relativ astrometri ved hjælp af titusinder af fotografiske plader fra hele det 20. århundrede har leveret kataloger med over en milliard stjerner, og målinger af dobbeltstjerner gennem to hundrede år har givet baner til beregning af stjerners masse. Denne artikel er begrænset til absolut astrometri, men det må betones at Hipparcos var unik ved at måle små og store vinkler med samme høje nøjagtighed.

I virkeligheden giver den måling, der beskrives i boks 3, kun stjernens position i forhold til den drejende Jord. Målingen skal omsættes til et koordinatsystem, der ikke drejer sig i forhold til universet af stjerner og galakser, og denne vanskelige opgave har optaget astrometrien gennem alle tider. Vår tids løsning af opgaven hedder ICRS, der står for International Celestial Reference System, som er defineret ved positionerne for 212 punktførmede objekter uden for vores galakse, mest meget fjerne kvasarer, der både er radiokilder og optisk lysende. Hipparcos katalogets 120.000 stjerner har meget nøjagtige positioner og egenbevægelser i ICRS og definerer systemet i praksis. I daglig astronomisk praksis anvendes det knap så nøjagtige Tycho-2 katalog, da det indeholder 2,5 millioner stjerner.

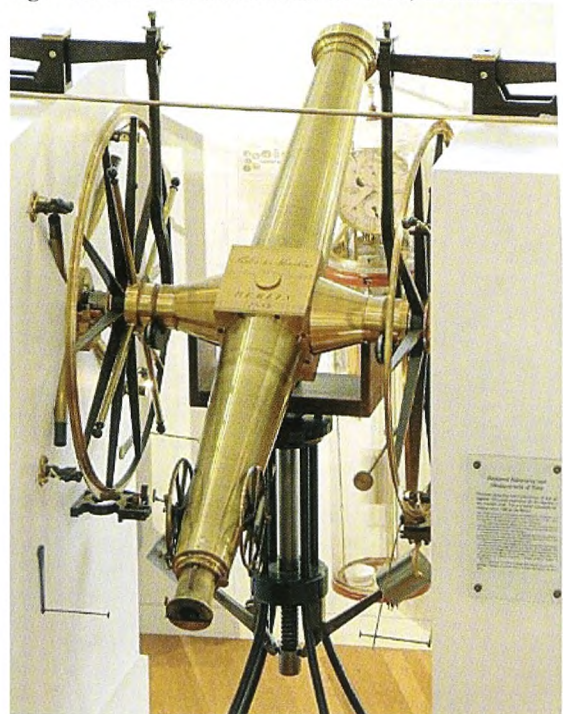
Rømer ville konstruere et stjernekatalog fra nøjagtige observationer for at påvise den parallaktiske bølgebevægelse, man måtte forvente for de nærmeste stjerner som følge af Jordens bevægelse om Solen på et år (se figur 6 af en stjernes bane på himlen). Denne bevægelse fulgte af Kopernikus' teori af 1543 for solsystemet, men afstanden til stjernerne er så umådelig stor, at dette bevis for det heliocentriske systems rigtighed først lykkedes i 1838, da meget større og nøjagtigere instrumenter var blevet udviklet.

De fleste af Rømers observationer gik tabt ved den store brand i København i 1728, men observationer fra tre nætter i 1706 blev bevaret, fordi Rømer havde sørget for at opbevare afskrifter flere forskellige steder af netop disse tre nætter, som han må have anset for særligt værdifulde. De kom til at spille en vigtig rolle i forbindelse med observationer udført halvtreds år senere, da det viste sig, at nogle af stjernerne havde bevæget sig

i mellemtiden. Disse og andre egenbevægelser brugte William Herschel i 1783 til at vise, at Solen bevæger sig i forhold til stjernerne, og endog at Solens bevægelse går i retning af stjernebilledet Hercules.



Figur 7. John Birds murkvadrant fra 1773, Greenwich.



Figur 8. Denne prægtige meridiankreds blev opstillet på observatoriet i København i 1861, og er nu udstillet i Aarhus. Instrumentet kom til at spille en afgørende rolle hen imod Hipparcos, da Bengt Strömngren anvendte det i 1925, som jeg har beskrevet udførligt i den foregående artikel i Kvant. Billede fra Steno Museet.

Ole Rømers første meridiankreds gav gode astrometriske resultater, men alligevel blev der ikke bygget meridiankredse i de følgende år, fordi de gamle typer af astrometriske instrumenter, især kvadranten, blev forbedret og gav gode resultater. John Birds murkvadrant (figur 7) fra 1773 var sin tids bedste. Fremstilling af en meridiankreds krævede en meget nøjagtig mekanisk bearbejdning af dens dele og en nøjagtig inddeling af delekredsen, som teknikken først kunne præstere efter 1800. Men så gik udviklingen hurtigt, og i det 19. århundrede blev en meridiankreds hovedinstrument i de fleste astronomiske observatorier, også i København, se figur 8.

Boks 3: Astrometri med meridiankredse

En meridiankreds er et optisk instrument til nøjagtig måling af stjerners positioner. Stjernerne observeres én efter én, medens de passerer meridianen, dvs. nord-syd retningen på himlen. Kikkerten på en meridiankreds er fastgjort vinkelret på en akse, hvis ender bæres af to meget stabile piller, en i øst og en i vest (se figur 5 og 8). Ved drejning om akse kan kikkerten peges mod det punkt på meridianen, hvor stjernen ventes at passere. Tidspunktet for passagen observeres, og kikkertens retning registreres meget nøjagtigt ved aflæsning af delekrederen, som udgøres af en ring med nøjagtige streger, der aflæses med mikroskoper, som man ser på billedet af en meridiankreds, figur 5 og 8.

Disse to målinger giver stjernens retning eller position, dvs. de to koordinater *rektascension* og *deklination*. Dette er en forenklet beskrivelse af en observation med en meridiankreds. Meridiankredsen var i to århundreder det bedste instrument til måling af store vinkler, altså til absolut astrometri.

Udvikling af teknikken for meridiankredse for at opnå den bedste nøjagtighed har optaget astronomer og ingeniører i de 300 år siden instrumentet blev opfundet af Ole Rømer omkring 1700.

Meridiankredsen var det nøjagtigste instrument til fundamentale astrometriske observationer indtil Hipparcos-satellitten blev opsendt i 1989. Da satellitten observerede meget nøjagtigere og mange flere stjerner, blev meridiankredsen faktisk forældet. Efter Hipparcos og Tycho-2 katalogernes fremkomst blev meridiankredse kun brugt til relativ astrometri i forhold til stjernerne heri. Men til det formål var meridiankredse begrænset ved kun at kunne observere nær meridianen, i modsætning til andre astronomiske teleskoper, der kan rettes mod ethvert område af himlen.

Ledet af Leif Helmer blev meridiankredsen i Brorfelde automatiseret og i 1983 overført til La Palma, hvor den blev drevet i samarbejde med England og Spanien i hen ved tyve år. Denne "automatiske Carlsberg meridiankreds" er kulminationen af denne instrumenttype, både mens den leverede absolut astrometri indtil 1998, og senere da den med en CCD-detektor udførte astrometri af millioner af stjerner relativt til Hipparcos-kataloget.

Udviklingen i udlandet er kun omtalt punktvis, da fokus her er på dansk astrometri, hvis vigtige bidrag ligger i det 20. århundrede. Efter Rømer begyndte dansk udvikling af astrometrisk teknik i 1925, da Bengt Strömngren udførte eksperimenter med fotoelektrisk registrering af stjernepassager. Bengt Strömngren var også ansvarlig for, at en ny meridiankreds blev opstillet på observatoriet ved Brorfelde, 50 km vest for København. Her lå det sidste observatorium i verden, der opstillede en ny meridiankreds som observatoriets hovedinstrument.

Fra Brorfelde over Hamburg til Hipparcos

Meridiankredsen ved Brorfelde blev opstillet i 1953, og jeg fik allerede året efter som student til opgave at undersøge dets stabilitet, hvilket skete ved fotografiske optagelser af en *polarissima*, en stjerne så tæt ved himlens nordpol, at den holdt sig inden for den lille

fotografiske plade gennem hele natten. Senere udmåling af pladen i et måleinstrument i København gav de ønskede resultater, meridiankredsen var stabil indenfor måleusikkerheden. Det var i sandhed ikke en opgave, der krævede stor dybsindighed, hvad en studenteropgave vel ellers skal give mulighed for, men sådan var tiderne dengang, og arbejdet var jo vigtigt for at retfærdiggøre den store investering, som Carlsbergfonden havde betalt.

Og dog var der en, der havde betænkelighed ved at give mig den opgave. Det var min vejleder dr. phil. Peter Naur, der i et brev til observatoriets ledelse, som jeg langt senere har fået fat i, spørger om denne opgave ikke ville være egnet til at afskrække en student fra astronomien? Jeg vadede somme tider op til instrumentet på bakken iført store gummistøvler, der blev hængende i sej, dyb mudder. Det var inden husene blev bygget, så der var ingen andre bygninger på stedet end netop den med meridiankredsen. Afskrækket blev jeg ikke, men det blev Peter Naur, efter at han havde boet og arbejdet derude i et par år, hvor jeg var hans medarbejder fra 1957. Han fik orlov til Regnecentralen og forlod astronomien helt (se min første artikel).

Min overgang fra Brorfelde til satellitten Hipparcos skete via et ophold ved observatoriet i Bergedorf ved Hamburg fra 1958-73. Der fandt jeg i 1960 på en teknisk bedre metode end Strömngrens fra 1925 til at realisere fotoelektrisk astrometri, en metode med tælling af fotonerne. Metoden blev udviklet til Hamburgs meridiankreds, som i 1967 blev sendt til Perth i Australien, hvor der i fem år blev observeret 25.000 stjerner af ti observatører, der arbejdede på skift ved instrumentet i hold på to personer. Observationerne blev hullet på strimler, som observatører snart efter behandlede med Algol programmer i den medbragte GIER regnemaskine, der var købt hos Regnecentralen i Danmark.

Denne succes med fotoelektrisk astrometri var min forudsætning, da jeg gik ind i udviklingen af en satellit for ESA i 1975. Min første artikel skildrer udviklingen af Hipparcos og de store beregninger.

Udnyttelsen fra 1983 af den automatiserede meridiankreds fra Brorfelde på en bjergtop på øen La Palma er omtalt i boks 3.

Resultaterne fra Hipparcos

Den videnskabelige udnyttelse af resultaterne fra Hipparcos har været meget omfattende med over 2000 publikationer allerede i de første ti år efter offentliggørelsen i 1997. En bog af Michael Perryman fra 2009 [2] på 670 sider gennemgår alt dette.

Anvendelsen af positioner og egenbevægelser i Hipparcos og Tycho-2 katalogerne til definition af det internationale referencesystem er beskrevet i boks 2. Jeg vil nedenfor fokusere på anvendelsen af parallakser, altså afstande til stjernerne til astrofysiske formål.

Egenbevægelser og afstande til stjerner kan anvendes til undersøgelse af Galaksens struktur og udvikling, hvad jeg vil komme ind på i den følgende artikel, hvor jeg medtager de forventede resultater fra Gaia.

Gaias nøjagtighed og antallet af stjerner betyder at hele Galaksen og nogle nabogalakser kan nås, mens Hipparcos "kun" rækker ud til få procent af Galaksens udstrækning.

Fotometrien fra Hipparcos har haft stor betydning for undersøgelse af stjerners variabilitet, idet de ca. 100 målinger af hver stjerne gennem tre år gav en meget nøjagtig måling af lysstyrken i et bredt spektralbånd i tilgift til astrometrien. Med Tycho måltes i to spektralbånd så et farveindeks kunne bestemmes. Faktisk udgjorde disse fotometriske databaser af hidtil uset omfang og nøjagtighed en ekstra bonus, som vi ikke havde tænkt på, inden missionen blev vedtaget i 1980.

Stjerners afstande og aldersparadokset

Fra oldtiden overtog man i middelalderen den opfattelse af kosmos, som Claudius Ptolemæus (ca. 100-170) havde beskrevet. Jorden var i centrum af verden og hele himlen med Måne, Sol, planeter og stjerner drejede sig om Jordkloden på 24 timer. Solen havde en afstand, der var 20 gange mindre end den sande. Stjernerne sad på en kugleskal med centrum i Jorden og en radius, som han beregnede til 20.000 jordradier svarende til 0,000014 lysår, næsten det samme som den sande afstand til Solen. Det var faktisk resultat en beregning baseret på målinger af planeternes bevægelser, men Ptolemæus kom til et helt forkert resultat, fordi hans

beregning var baseret på helt forkerte teorier.

Denne opfattelse af kosmos og afstanden til Solen og stjernerne havde også Tycho Brahe, selvom Kopernikus havde fremsat en helt anden teori for kosmos allerede inden Tycho blev født.

Det var Kepler, der efter 1600 først blev klar over at afstandene var forkerte, men det tog ca. hundrede år, før man havde en nogenlunde rigtig afstand til Solen, og lige indtil 1838 før de første afstande til stjerner faktisk blev målt med den astrometriske parallaksemetode.

Også derefter gjorde man kun langsomme fremskridt. Omkring 1900 havde man målt parallakser for omkring 200 stjerner, men nøjagtigheden var ikke god. Da Ejnar Hertzsprung i 1905 påviser, at der findes kæmper og dværge blandt stjerner, benytter han afstande baseret på stjerners egenbevægelser, idet parallakserne var alt for unøjagtige.

Udviklingen gik derefter meget hurtigere, idet man målte parallakser på fotografiske optagelser med store linseteleskoper med lang brændvidde. Det sidste samlende katalog med resultat af hundrede års arbejde med mange teleskoper, mest i USA, blev offentliggjort af W. van Altena i 1995, og indeholdt 8112 stjerner. Af disse var 940 stjerner angivet med en nøjagtighed på bedre end 10 %. Tabellen viser, at denne nøjagtighed opnås for 20 til 30 gange så mange stjerner i de to Hipparcos kataloger. Gaia vil give yderligere 1000 gange så mange stjerner med bedre end både 1 og 10 % nøjagtighed.

Maksimal standard fejl på afstanden	Jenkins	Van Altena	Hipparcos	Hipparcos-2	Gaia Forudsagt i 2011
Årstal for publication	1950	1995	1997	2007	2021
1 %	1	1	168	719	11 millioner
10 %	500	940	20870	30580	150 millioner
Luminositeter, M_V (mag)		+17 til -1	+14 til -4	+14 til -4	+20 til -8

Tabel 1. Antal af stjerner med en vis maksimal fejl på afstanden, givet i procent af afstanden. Den ene stjerne der angives med bedre end 1 % nøjagtighed i 1950 og 1995 er Solen. Gaia giver over tusind gange så mange stjerner som Hipparcos. Tallene for 1997, 2007 og 2021 er fra Jos de Bruijne i juli 2011, baseret på Luri, Babusiaux & Lindegren for Gaia.

Imidlertid viste det sig ved sammenligning med de meget mere nøjagtige resultater fra Hipparcos, der blev offentliggjort i 1997, at de jordbaserede afstande gennemsnitlig var 10 % for små. Det fik vidtrækkende konsekvenser, for det betød, at alle afstande i Universet blev 10 % større, eftersom alle disse afstande var baseret på fotometri, som var kalibreret med stjerner, for hvilke man havde anvendt de astrometriske parallakser. Derved blev stjernernes overflader i virkelighed 20 % større, hvilket betød at de udstrålede mere, så deres energiforråd kun rakte til 20 % kortere tid. Stjernerne blev således 20 % yngre! Før Hipparcos havde man skønnet helt op til 18 mia. år for de ældste.

Ikke nok med det, for de 10 % større afstande gjaldt jo også de galakser, med hvilke man havde målt universets ekspansion. Derved blev hele universets ekspansionsalder 10 % større og den blev omkring midten af 1990'erne skønnet til mellem 10 og 20 mia. år. Herved fik man endelig løst det såkaldte *aldersparadoks*, som man faktisk havde kæmpet med, siden Edwin Hubble i

1929 havde angivet en ekspansionsalder på 2 mia. år ud fra galaksernes radialhastigheder og afstande.

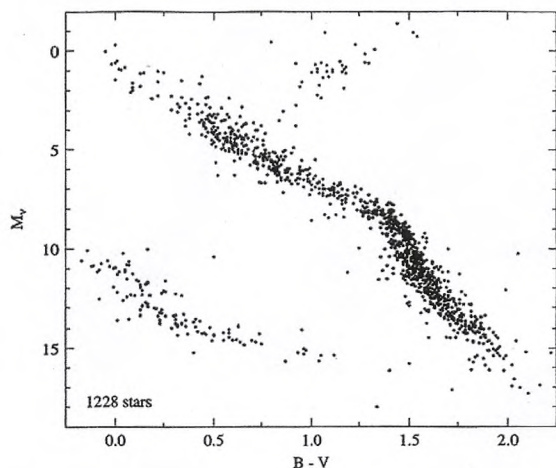
Den alder gjaldt stadig i 1950, og da vidste man, ud fra måling af radioaktivitet, at Jorden og nogle meteoritter var ældre. Omkring samme tid var man nået til at kende stjernernes struktur og energiindhold så godt, at man kunne beregne deres alder, og da fandt man at de ældste stjerner var meget ældre end universet. Dette aldersparadoks blev løst gradvis, idet man efterhånden fandt systematiske fejl i galaksernes afstande, men den endelige opløsning af paradokset skete altså, da afstandene fra Hipparcos kom frem.

Nu til afrunding: universet er 13,7, altså knap 14 milliarder år gammelt siden Big Bang, og de ældste stjerner er kun lidt yngre, det har nu holdt sig i en halv snes år og det kan vi godt stole på.

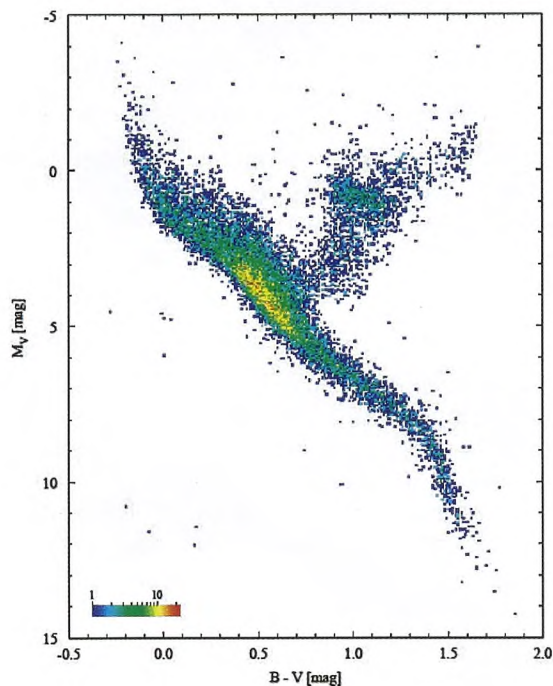
HR diagrammet

Til denne enkle forklaring på løsningen af aldersparadokset må føjes, at hele den videnskabelige proces førte

til udvikling af meget bedre teorier for stjernernes struktur og udvikling, muliggjort af de nøjagtige afstande og dermed luminositeter for stjernerne.



Figur 9. HR diagram for de 1228 stjerner i det jordbaserede katalog fra 1995 med UBV-fotometri og med fejl i afstande på mindre end 15 %.



Figur 10. Hertzsprung-Russell diagram (M_V , $B - V$) for de 16.631 enkeltstjerner i Hipparcos kataloget med bedre end 10 % nøjagtighed på afstanden og farveindeks $B - V$ nøjagtigere end 0,025 mag. Farven angiver antal stjerner i en celle på 0,01 mag i $B - V$ og 0,05 mag i V -magnituden (M_V).

Ved sådanne undersøgelser spiller HR diagrammet (Hertzsprung-Russell) en stor rolle. I dette diagram afbildes stjernens luminositet (= absolutte lysstyrke) som funktion af temperaturen på stjernens overflade.

Teoretiske beregninger på en stjerne med given masse og kemisk sammensætning fører til at stjernen kan anbringes et bestemt sted i diagrammet, som så gerne skulle stemme med observation af virkelige stjerner. "Kemisk sammensætning" angiver hyppigheden af H, He og de tungere grundstoffer (der i astronomien under ét kaldes "metaller"). I praksis (figur 9 og 10) er på den vandrette akse afbildet et farveindeks, som direkte kan observeres og som er et mål for overfladetemperaturen.

Man har gerne forlangt en nøjagtighed på 10-15 % på afstanden for at anvende en stjerne i HR diagrammet. Men med Hipparcos har man fået mange stjerner med 1 % nøjagtighed og med Gaia får man over tusind gange så mange, som det fremgår af tabellen. Det vil betyde enormt for udviklingen af nøjagtige modeller for stjerner af alle typer. Tabellen viser udviklingen af vort kendskab til afstande siden 1950.

Fra Hipparcos til Roemer og Gaia

I 1990 indledte jeg et samarbejde med russiske kolleger, og snart efter også med Lennart Lindegren, om design af en ny satellit, der skulle være meget bedre end Hipparcos. Det førte til mit forslag i 1992 [3] af Roemer, en astrometrisk satellit med anvendelse af CCD detektorer, og det blev til en ny ESA mission med navnet Gaia [4], som forventes opsendt i 2013. Denne udvikling vil jeg komme ind på i en tredje artikel i Kvant.

Litteratur

- [1] E. Høg 2008, 400 Years of Astrometry: From Tycho Brahe to Hipparcos. Indeholdt i [3].
- [2] M. Perryman 2009, Astronomical Applications of Astrometry – Ten Years of Exploitation of the Hipparcos Satellite Data. Cambridge University Press, 670 pages.
- [3] E. Høg om astrometriens historie: www.astro.ku.dk/~erik/History.pdf
- [4] Gaia: ESAs oversigt: www.esa.int/science/gaia, projekts egne sider: www.rssd.esa.int/GAIA.



Erik Høg, dr. scient i astronomi. Har arbejdet ved Hamborg Observatoriet 1958-73 og ved Københavns Universitet 1953-58 og 1973-2002, hvor han gik på pension. Hans videnskabelige arbejde har været koncentreret indenfor maling af positioner, bevægelser og afstande af stjerner med højest mulig præcision. Han har bl.a. bidraget med design af to astrometriske satellitter: Hipparcos og Roemer/Gaia.