

# Gaia-missionens snørklede tilblivelse

Af Erik Høg

I december 2013 opsendes en ny stor astrometrisk satellit: Gaia. Den skal ligesom den første astrometriske satellit Hipparcos, opsendt i 1989, måle stjerners positioner, bevægelser og afstande men den bliver én million gange så effektiv. Allerede mens Hipparcos observerede, fødtes idéen til en forbedret satellit. Her fortælles hvordan en række idéer til astrometri i rummet under skiftende projektnavne som "Roemer" og "GAIA", og gennem et indviklet forløb med mange fejtagelser, endte med at blive til virkelighed med Gaia-satellitten.

## Indledning

Den første astronomiske satellit til måling i *optiske bølgelængder* var Hipparcos, der blev vedtaget af European Space Agency, ESA, i 1980. Den var således en nyskabelse, og det på trods af, at den skulle udføre noget så "gammeldags" som måling af stjerners positioner, bevægelser og afstande, altså astrometri, som de fleste astronomer fandt kedsommelig i sammenligning med astrofysikken. Astrometri var hovedsagen i astronomi siden oldtiden lige indtil for et hundrede år siden, da astrofysik tog over gennem anvendelse af den gryende atomfysik.

Men Hipparcos blev så stor en succes at ESA i 2000 vedtog en ny astrometrisk satellit, GAIA, som skal opsendes i december 2013, dog med det ændrede navn Gaia. Vejen dertil begyndte i USSR i 1990, og den blev meget snørklet. Her fortælles hvordan ideerne opstod, og i 1992 førte til mit forslag kaldet Roemer, hvor principperne for et meget effektivt design blev lagt frem. Jeg deltog i hele udviklingen på nært hold i ESA.

## Optisk astronomi fra rummet

Da jeg i 1975 blev trukket ind i rumforskning, havde astronomiske målinger fra rummet altid handlet om stråling, der ikke kan trænge igennem Jordens atmosfære: Gamma, røntgen, ultraviolet og infrarød stråling og kosmisk partikelstråling. Teleskoper på Jorden kan kun måle i det optiske, altså i bølgelængder omkring en tusindedel millimeter, og astronomien var i århundreder baseret på dette. Hertil må dog føjes, at radiobølgerne fra universet, som allerede i 1930'erne var blevet opdaget med antenner på Jorden, hurtigt kom til at spille en stor rolle i astronomien.

Derfor mødte forslag om astrometriske målinger fra en satellit med en optisk detektor betydelig skepsis, da det først blev foreslået i 1964 af Pierre Lacroute, direktør for observatoriet i Strasbourg. Når det samtidig drejede sig om den "gammeldags" astrometri, var det klart, at sådanne forslag ville få det svært. Men i Frankrig arbejdede man på sagen, og dér fængede ideen.

## Miraklet Hipparcos

Ideen blev dog taget op af ESA, og jeg blev medlem af en studiegruppe, der mødtes første gang i oktober 1975. Jeg har tidligere fortalt, hvorledes erfaringen med bygning af astrometriske instrumenter ved observatoriet i Hamburg 1958-73 satte mig i stand til hurtigt at designe

en mere realistisk satellit, hvor nogle af Lacroutes ideer indgik, og som blev grundlag for udviklingen af Hipparcos. Se herom i [1] og [2], hvor Tycho eksperimentet om bord på Hipparcos satellitten også omtales.

Hipparcos missionen blev vedtaget af ESA i 1980, men det var meget vanskeligt at få beslutningen igennem. Den næsten mirakuløse proces omkring beslutningen er beskrevet i sidste afsnit af [3].

Ideen med Hipparcos var især, at måling uden for Jordens atmosfære ville kunne undgå de variationer i retningen til en stjerne, som lysets passage gennem atmosfæren giver. Denne *lufturo* er årsag til usikkerhed i astrometri med selv de nøjagtigste teleskoper på Jorden.

En anden fordel er, at man fra en satellit kan måle hele himlen, mens man fra et observatorium på fx den nordlige halvkugle kan se hele nordhimlen, men kun en del af sydhimlen. Til gengæld har man andre udfordringer med en satellit: Fx byder den ikke på en stabil basis for et teleskop, som den solide jordklode gør, og den befinder sig i fuldt sollys det meste af tiden. Så der var teknologiske udfordringer at overvinde, før man kunne erobre rummet for astrometri.

Satellitten blev kaldt *Hipparcos* efter den græske astronom Hipparchos, men navnene skrives med henholdsvis -cos og -chos.

Hipparcos observationerne fra 1989-93 overgik alle forventninger, både med hensyn til nøjagtighed og antal af målte stjerner. Dette er nærmere beskrevet i [2] sammen med de astronomiske anvendelser.

## Ny begyndelse i Rusland

### Første skridt i 1990

Omkring Hipparcos var vi fuldt optaget af at gøre regneprogrammerne til data-reduktionen klar, da vi modtog de første observationer fra satellitten i slutningen af 1989. Ingen af os havde overhovedet tænkt på en efterfølger. Men ved en konference i Leningrad i USSR (senere Sankt Petersborg i Rusland) i oktober 1989 præsenterede både vore amerikanske og russiske kolleger planer om astrometriske satellitter. Det var dog noget, jeg knap lagde mærke til, da mine tanker var helt optaget af Hipparcos og Tycho.

Konferencen startede en udvikling for mig, som jeg har beskrevet udførligt i [4], hvorfra det følgende er uddraget, og hvor flere figurer og referencer findes. Udviklingen havde lange forløb med arbejde på noget, der

senere blev helt forladt, især ideerne om interferometri.

Det amerikanske projekt *POINTS* skulle bestå af interferometre til måling af vinkelen mellem to stjerner med meget høj nøjagtighed og således efterhånden dække himlen med et net af nogle tusind stjerner. Ideen blev ført videre hos NASA under navnet *SIM*, men blev helt opgivet i 2010.

Russerne havde hele tre satellit-projekter på tegnebordet som efterfølgere for Hipparcos. Det var hensigten, de skulle opsendes inden 1997 og opnå mindst samme nøjagtighed som Hipparcos for positioner af de samme 120.000 stjerner. Man ville så kunne beregne hver af disse stjerners bevægelse ud fra de to positioner med 10 års mellemrum med en hidtil uset nøjagtighed. Det ville betyde et spring i vor forståelse af Mælkevejen – men ingen af projekterne blev til virkelighed, bl.a. på grund af Sovjetunionens sammenbrud i 1991.

Imidlertid bragte disse russiske ideer mig ind på tanken om en efterfølger til Hipparcos. Det skete, da jeg i 1990 igen besøgte USSR efter invitation fra Pulkovo-observatoriet ved Leningrad for at holde foredrag om Hipparcos, som russerne var meget optaget af. De sendte mig på en rejse ledsaget af Mark Chubey, leder af gruppen omkring *AIST* satellitten (figur 1). Vi besøgte det store rumcenter ved Moskva og et observatorium i Kaukasus, en filial af Pulkovo.

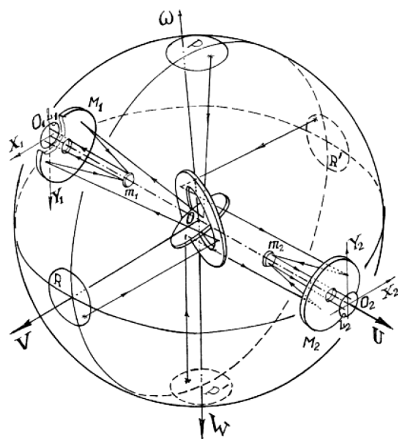


Fig. 3. AIST schematic

**Figur 1.** Den russiske astrometriske satellit, AIST, fra 1989 skulle skanne hele himlen med to teleskoper, i stil med Hipparcos, men den blev aldrig realiseret.

På rejsen var der god lejlighed til samtaler, hvor jeg prøvede at sætte mig ind i de russiske planer, især AIST, fordi det var en *skannende* satellit, dvs en satellit, der drejer sig hele tiden, mens den måler. Den skulle altså måle hele himlen på næsten samme måde som Hipparcos allerede var i gang med. Men efter en dags tid med forgæves forsøg på at forstå hvordan AIST overhovedet skulle fungere, opdagede jeg, at jeg var mere optaget af selv at designe en forbedret Hipparcos!

Det blev indledningen til flere, gensidige besøg i Rusland og i København, hvor vi hver gang forelagde nye og stadig bedre ideer. Ved et internationalt symposium i Moskva i juni 1991 præsenterede Chubey og jeg en Hipparcos-2, der ville være ti gange bedre end Hipparcos gennem anvendelse af flere fotoelektriske

detektorer af samme slags som i Hipparcos, altså fotomultiplikator og image dissektor, der hver kun målte én stjerne ad gangen.



**Figur 2.** Det russiske hold omkring AIST besøgte København i 1991 og betragter her min Hipparcos model. En af dem, Valeri Makarov, blev derefter syv år hos mig og arbejdede på Tycho-1 og Tycho-2 katalogerne sammen med Claus Fabricius.

Vi skrev en artikel til symposiets proceedings, som dog aldrig udkom, bl.a. på grund af den politiske situation. Statskuppet mod Michael Gorbachov fandt faktisk sted i de dage af august 1991, da de tre russiske partnere mødte os i København, se figur 2.

Lennart Lindegren fra Lunds observatorium deltog meget aktivt i vore møder. I kraft af sit matematiske talent har Lennart været en uundværlig partner for mig gennem alle årene, siden jeg fik ham inddraget i Hipparcos-projektet i 1976.

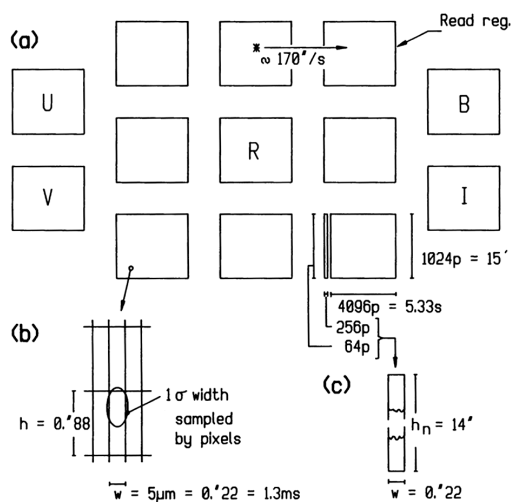
Jeg gav altid en kort beretning om arbejdet med russerne ved det påfølgende møde i *Hipparcos Science Team*, dog uden at det vakte nogen synderlig interesse. Vores fremragende leder gennem alle årene 1981-2006 var Michael Perryman, han gav mig hver gang kun tøvende de ti minutter, jeg bad om. Hvorfor han var så tøvende, forstod jeg først mange år senere, da han sagde, at det jo dengang var hans opgave at få taget observationerne med Hipparcos og få dem reduceret til et stort katalog, men *ikke* at designe en ny mission! Klart.

Jeg hørte i marts 2013 fra Claus Fabricius, der arbejder på Gaia i Barcelona, at *Gaia Science Team* var lige så tøvende med at tænke på en efterfølger til Gaia. Her havde ESA imidlertid taget initiativet og pressede på, for at der angives et mål om en opsendelse i 2028 eller 2034, der var dog ikke blevet bedt om et bestemt design. Lennart Lindegren skal for nogle år siden have sagt, at Erik Høg nok dukker op med designet til en ny mission, en bemærkning der blev opfattet som både humoristisk og som “et kompliment til dit ihærdige arbejde mange år efter pensionsalderen”, skrev Fabricius. Det er faktisk sket, idet jeg i maj fik ideen til et forslag, som jeg sendte til ESA om, at en modificeret Gaia, der bør kaldes Roemer, bliver opsendt om tyve år, Høg [5].

### Roemer

Sidst i 1991 begyndte jeg at tænke på andre detektorer end de fotoelektriske, som vi brugte i Hipparcos. Her

var CCD'er den oplagte mulighed, fordi de ville kunne måle på mange stjerner samtidig og de havde ti gange bedre udnyttelse af fotonerne. Dog var der problemer med CCD'er, i de år var der tvivl om deres stabilitet, og CCD'er var ret små. I dag har ganske store CCD'er (Charge Coupled Device) afløst fotografisk film i alle kameraer.



**Figur 3.** Fokalplanet i Roemer satellitten med CCD'er som foreslået af forfatteren i 1992. Stjernerne bevæger sig fra venstre mod højre gennem feltet, imens lyset frigør ladninger, der føres videre elektronisk og lyset således integreres under passage af hver CCD. Der udføres astrometri med 8 CCD'er og fotometri i farverne UBVRI med 5 CCD'er. (Høg 1993).

Først designede jeg sammen med Lennart Lindegren en satellit, hvor CCD'er blev anvendt bag et *modulationsgitter* som i Hipparcos. Når man lod stjerner passere hen over et sådant meget nøjagtig og stabilt gitter, ville stabilitetsproblemet være løst. Vi opdagede, at instrumentet ville blive 1000 gange så effektivt som Hipparcos. Denne faktor var beregnet ud fra antallet af stjerner og den statistiske vægt af den enkelte måling af stjernens position.

Det gav jo blod på tanden, så nu vovede jeg springet til at måle stjernerne direkte med CCD'er anbragt i teleskopets brændplan. Det viste sig at være 100.000 gange så effektivt som Hipparcos med samme størrelse kikkert! Den satellit kaldte jeg *Roemer*<sup>1</sup>. Ole Rømer fortjener en satellit, fordi han fornyede astrometriske instrumenter med opfindelse af passageinstrumentet og meridiankredsen for 300 år siden. Det må erindres, at Tycho Brahe ikke kendte kikkerten, der blev opfundet efter hans tid, og som Ole Rømer forstod at udnytte til astrometri.

Disse to projekter med anvendelse af CCD'er præsenterede jeg på en astrometrisk konference i Shanghai i september 1992, og især Roemer forslaget vakte interesse. Nu gik udviklingen hurtigt, pludselig var der nemlig i kredsen om Hipparcos stor interesse for en ny satellit.

<sup>1</sup> Dette forslag om en astrometrisk satellit med navnet Roemer må ikke forveksles med det senere forslag omkring år 2000 fra astronomer i Aarhus om en dansk satellit med navnet *Rømer* til et andet astronomisk formål, et projekt der dog desværre måtte opgives efter nogle år.

ESA indkaldte forslag til en mellemstor mission kaldet *M3*. Vi mødtes i marts 1993, se figur 4, og indsendte et forslag om Roemer.



**Figur 4.** Roemer holdet ved et møde i marts 1993 i København: J. Kovalevsky, L. Lindegren, J.-L. Halbwachs, V.V. Makarov, E. Høg, F. van Leeuwen, J. Knude. Ikke til stede: U. Bastian, G. Gilmore, A.E.H. Labeyrie, J.W. Pel, H. Schrijver, R. Stabell, P. Thejll.

Dette forslag blev godt modtaget, idet det blev bedømt som det bedste videnskabelige forslag af *ESAs Astronomy Working Group*. Alligevel blev det ikke vedtaget, men man foreslog, at det skulle være en *hjørnestensmission*, altså en større mission, hvis det var muligt at opnå ti gange så god nøjagtighed, altså 10-20 mikrobuesekunder i stedet for det vi tilbød med Roemer.

Det syntes vi i første omgang var noget urimeligt, og måske så astrofysikerne dette skaktræk som en måde at skaffe sig af med en konkurrent, i hvert fald i første omgang. Men det betød jo også, at vi fik bedre tid til gøre Hipparcos og Tycho katalogerne færdige, og det skulle vise sig, at vi kunne præstere den forlangte ti gange bedre nøjagtighed med CCD'erne.

I vort forslag om Roemer nævnte vi muligheden for at anvende en interferometrisk teknik, og det skulle blive det helt store emne for satellit astrometri i de følgende år – indtil vi i januar 1998 måtte indse, at det var en fejltagelse, en blindgyde!

## Interferometri var sagen

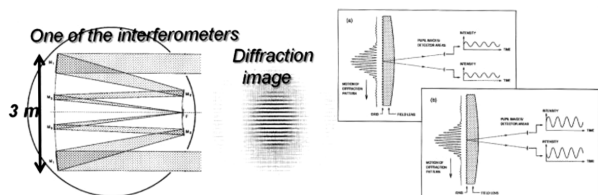
### En stor Roemer og GAIA

ESA inviterede snart efter til at indsende forslag om hjørnestensmissioner. Vi sendte et forslag med et følgebrev af 12. oktober 1993 underskrevet af Lennart Lindegren om "studium af en stor Roemer mission og en GAIA mission som to muligheder (options) uden at foretrække den ene for den anden." Der blev vedlagt en beskrivelse af GAIA konceptet, udarbejdet især af Lindegren og Perryman, hvor GAIA var acronym for "Global Astrometry by Interferometry for Astrophysics." Systemet fremgår af figur 5.

Et officielt svar på vort forslag modtog vi først godt tre år senere, men vore tanker førte os straks videre, samtidig med at vi passede data-reduktionerne for Hipparcos og Tycho.

Mine tanker gik først i retning af en "stor Roemer", for det var jo indlysende, at man bare ved større åbning af teleskoperne kunne opnå den ønskede større

nøjagtighed. Derfor foreslog jeg ved et symposium i Haag i august 1994 *Roemer+* med spejle på 70 cm diameter (se [4]). Her havde man brug for sensorer med picometer nøjagtighed til at måle afstande mellem de optiske og mekaniske komponenter. Det var aldrig prøvet før, men det havde man også brug for ved GAIA forslaget, så det skulle ikke være nogen særlig hindring. Ved samme lejlighed forelagde Lindegren og Perryman sidste udgave af GAIA konceptet.



**Figur 5.** GAIA systemet blev forelagt i oktober 1993 af Lindegren et al. Et Fizeau-interferometer (t.v.) bringer to strålebundter fra stjernen til interferens, så billedet af stjernen deles i striber som vist i midten. Disse striber skal måles med et modulationsgitter som vist t.h. Tre sådanne Fizeau-interferometre skal pege på den samme storkirke for at skanne himlen i stil med Hipparcos, se figur 6.

Jeg måtte konstatere, at *Roemer+* ikke vakte nogen interesse. Det var klart, at vinden bar i retning af interferometri, og den retning fulgte jeg så også.

I en periode var jeg medlem af et amerikansk team, hvis forslag hed *FAME*, der også byggede på interferometri. Denne forbindelse førte til, at jeg tidligt fik en optisk tegning af *FAME*. Dog kunne jeg ikke forstå systemet, men så slog lynet ned i mig: et *Gregory-teleskop* måtte være løsningen. Et Gregory teleskop består af et stort og et lille hulspejl, der vender mod hinanden. Et prisme anbragt i det første fokus kan danne spektre af alle stjerner, hvorved man kan udføre både astrometri og spektro-fotometri.

Det blev kaldt *GAIA95*, som jeg udarbejdede med mine to medarbejdere på Tycho data-reduktionen, Claus Fabricius og Valeri Makarov. *GAIA95* med et spejl på 150 cm diameter kunne give en nøjagtighed på 10 mikrobusekunder ved 14. størrelsesklasse.

Mit medlemskab af *FAME* opgav jeg hurtigt, fordi Perryman med rette argumenterede, at vi skulle designe en astrometrisk satellit for ESA, og *ikke* blive et *center for design af astrometriske satellitter*. Men vi bevarede kontakten til *FAME*-gruppen.

### DIVA i Tyskland 1996-2004

Snart efter at rapporten om *GAIA95* var sendt ud, fik jeg en opringning fra min kollega og medarbejder gennem mange år, Ulrich Bastian i Heidelberg. Han spurgte, om jeg kunne holde på en hemmelighed et par måneder, og det lovede jeg. Han sagde så, at jeg kunne se frem til opsendelsen af en satellit efter *GAIA95* design inden min 70 års fødselsdag, dvs før 17. juni 2002.

Bastian og hans tyske kolleger arbejdede på et projekt, der blev kaldt *DIVA*. Teleskopet var ti gange mindre end *GAIA95* og have altså en åbning på 15 cm. Det blev studeret og udviklet af tysk industri, og jeg

var en kort tid medlem af *DIVA* holdet. Senere skete udviklingen i samarbejde med amerikanerne, men blev dog endelig opgivet i 2004, da finansieringen fra NASA svigtede. Tyske astronomer besluttede så helt at gå ind i ESAs projekt – en meget lykkelig og vigtig beslutning for europæisk astrometri. På det tidspunkt var ESAs projekt meget langt fremme.

### Hjørnestensstudie besluttet af ESA

I 1997 besluttede ESA, at *interferometri fra rummet* skulle studeres som hjørnesten. Den første kandidat til et sådant studium var vort forslag om astrometri, altså *GAIA*. ESAs anden kandidat var en infrarød mission med interferometri, der snart fik navnet *Darwin*. Studier af *Darwin* blev helt standset i 2007.

I marts 1997 modtog vi et brev fra ESA med indbydelse til at blive medlem af studiegruppen og læste, at man primært valgte *space interferometry* som hjørnesten. En *stor Roemer*, som vi udtrykkelig også havde foreslået i 1993, nævnes slet ikke. Jeg tvivler på, at astrometri var blevet valgt, hvis vi alene havde foreslået en stor *Roemer* uden interferometri. Nogle vidste, at beslutningstagere i ESA havde et stærkt ønske om udvikling af interferometrisk teknik for rummet. Det skulle imidlertid vise sig at være forkert, eller i hvert fald for tidligt, for det lykkedes hverken i ESA eller NASA, hvad der fremgår af det følgende og af ovenanførte om NASAs projekt *SIM*.

Faktisk var vi i studiegruppen lidt bange for, hvad ESA ville sige, da vi i 1998 helt forlod interferometri. Vi tænkte dog, at ESA måtte ønske videnskaben og ikke et bestemt design. Vi beholdt i hvert fald navnet *GAIA* med store bogstaver i mange år, hvor det store "I" jo som nævnt ovenfor stod for Interferometri, skønt der ikke mere var nogen som helst interferometri i satellitten. Først ca. 2004 gik vi over til at skrive *Gaia*. Men dette navn er også uheldigt, fordi det kan lede tanken hen på Lovelocks ideer om hel-Jorden, som vores satellit virkelig intet har med at gøre.

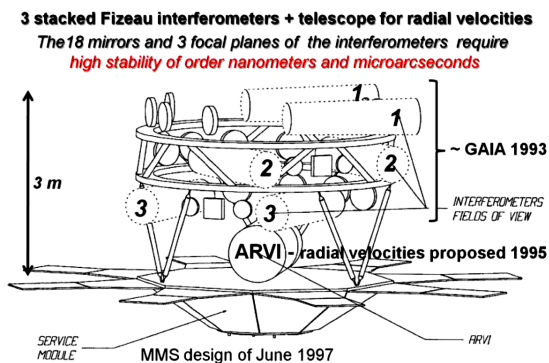
I de følgende otte år havde to industrikonsortier en række kontrakter med ESA på at studere vores satellit, et konsortium *MMS* (*Matra Marconi Space*) med hovedkvarter i Toulouse og *Alenia* med hovedsæde i Torino.

*Alenia* forfulgte hele tiden et koncept med interferometri, og det var vigtigt, at dette skete, fordi ESA jo havde udvalgt interferometri fra rummet til hjørnestensstudie. Der blev således lavet et omhyggeligt studium af, om interferometri faktisk egnede sig til vort formål, og svaret var et klart *nej*.

Det var dog hele tiden klart for mig og de fleste andre, at *MMS*, eller *EADS Astrium*, som firmaet nu hedder, havde det bedste produkt.

Industriens medvirken betød straks store ændringer i design. Allerede i juni 1997 så vi det første udkast fra *MMS*. Det indeholdt tre interferometre ganske som foreslået i 1993. Det fremgår af figur 6, at mange optiske og mekaniske komponenter skulle holdes på plads med en uhyre nøjagtighed, der aldrig før var prøvet.





**Figur 6.** Dette design af GAIA blev forelagt i det første udspil i juni 1997 fra industrien, MMS (Matra Marconi Space). Systemet blev dog hurtigt forkastet af industrien og i januar 1998 også af os i ESA til fordel for et andet system med direkte måling af stjernerne på CCD'erne. Hermed var interferometrien helt ude af spillet – men navnet GAIA beholdt vi af strategiske grunde, skønt det store "I" stod for Interferometri!

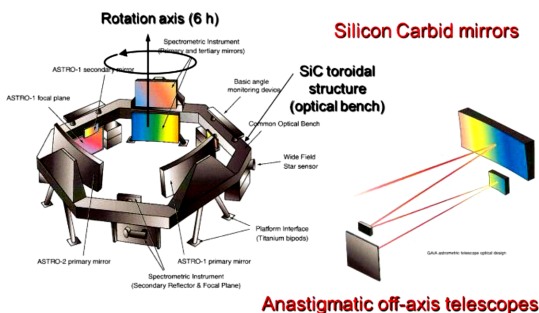
Et andet problem var, at de to teleskoper i hvert interferometer havde ret små åbninger i forhold til, hvad der kunne være plads til i satellitten, eller rettere plads til i raketten. Man fik altså mindre lys ind og tabte derved i astrometrisk nøjagtighed.

Set i bagklogskabens klare lys, synes disse problemer så indlysende, at vi selv burde have taget dem alvorligt, men det var industriens arbejde, der gjorde udslaget.

## Interferometri forkastes

Begge problemer blev løst, da ESA og GAIA studiegruppen i januar 1998 gik med på MMSs forslag om helt at forlade interferometrien. Man vendte faktisk tilbage til en stor Roemer, uden dog at dette nogensinde blev nævnt dengang, heller ikke af mig, skønt jeg havde foreslået den store Roemer+ i 1994.

### Telescopes and payload of GAIA = 2<sup>nd</sup> large Roemer MMS design of mid 1998: 4 focal planes, 3 telescopes



**Figur 7.** GAIA design i juni 1998. Interferometri er helt opgivet og det er blevet til en stor Roemer, men navnet GAIA beholdes. Der er tre teleskoper, to til astrometri og et til fotometri og spektroskopi, i alt 4 fokalplaner.

I det nye design, se figur 7, var der to store teleskoper til astrometri og et tredje til spektrometri og fotometri. Men heller ikke dette design var den endelige løsning, som MMS først nåede frem til at foreslå i 2005.

## Opsendelse og resultater

Studierne førte til, at MMS i 2005 vandt den endelige kontrakt om bygning af Gaia, der nu er klar til opsendelse i december 2013. Herom skal den følgende artikel i Kvant handle, og til den tid vil der forhåbentlig kunne berettes om de allerførste målinger.

Gaia vil være en million gange så effektiv som Hipparcos, fordi Gaia måler med detektorer, der udnytter lyset ti gange bedre end dem, der sad i Hipparcos, og fordi Gaia måler tusindvis af stjerner samtidig, mens Hipparcos kun målte én stjerne ad gangen, og desuden fordi spejlene i Gaia er meget større.

Meget spændende er det jo, om det hele virker, som det skal. Er billederne skarpe? Er spektrene gode? Kan CCD'erne tåle det stadige bombardement af protoner fra den kosmiske stråling?

Kan beregningerne følge trop med de enorme datamængder? Der vil hele tiden komme en million bits per sekund fra satellitten, og mere end 400 mennesker i 20 europæiske lande arbejder med de meget komplicerede beregninger, der skal foretages i 6 centre for processe- ring.

De første resultater ventes offentliggjort i 2015 baseret på godt ét års observationer. Flere foreløbige resultater skal følge, og de endelige resultater ventes i 2021 efter fem års observationer. Missionen kan evt. forlænges med 1-2 år.

Resultaterne vil i de næste årtier blive udnyttet indenfor næsten alle astronomiens områder, såsom: Galaksens dynamik; Reference-systemet; Kosmologi, kvasarer, galakser; Afstande i universet; Interstellare skyer; Aldersparadokset; Stjerner svingninger; Variable stjerner; Dobbeltstjerner; Planetsystemet; Exoplaneter, hvilket vil blive uddybet i en kommende artikel i Kvant.

## Litteratur

- [1] E. Høg (2010), En landmåler i himlen. Kvant nr. 3, oktober 2010.
- [2] E. Høg (2011), Astrometri fra antikken til i dag. Kvant nr. 3, oktober 2011.
- [3] E. Høg (2013), Astrometry 1960-80: From Hamburg to Hipparcos. <https://dl.dropbox.com/u/49240691/AG2012AK0.pdf>
- [4] E. Høg (2011), Astrometry history: Roemer and Gaia. <http://arxiv.org/abs/1105.0879>
- [5] E. Høg (2013), What should follow Gaia? <https://dl.dropbox.com/u/49240691/GaiaFollow.pdf>
- [6] Læs mere om Hipparcos, Tycho-2 og Gaia: <http://www.rssd.esa.int/Hipparcos> <http://www.astro.ku.dk/~erik/Tycho-2/> <http://www.rssd.esa.int/Gaia> (teknisk information) <http://gaia.esa.int> (nyheder).



Erik Høg er dr. scient., emeritus, Niels Bohr Institutet. Medlem af Gaia science team 1990-2007 og formand for arbejdsgruppen for fotometri.