

Hjørnестenen Gaia er i bane

Af Erik Høg, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Den 19. december 2013 blev Gaia anbragt i en bane 1,5 millioner km fra Jorden til astrometrisk måling af en milliard stjerner. De første målinger viser, at målsætningen for missionen vil holde, selvom der var alvorlige problemer i indkøringsfasen.

Indledning

Det astrometriske grundlag for astrofysikken blev revolutioneret gennem observationer foretaget i 1989-93 med ESAs Hipparcos-satellit. Nøjagtigheden for positioner, egenbevægelser og afstande (parallakser) overgik alt tidligere, se [1].

ESA's anden astrometriske satellit, Gaia [2], blev opsendt den 19. december 2013, og den skal observere mere end en milliard stjerner i 5-6 år til en størrelsesklasse af 20 (skrives også 20 mag). For 10 millioner stjerner vil man opnå afstande med én procents nøjagtighed og der måles lysstyrker og radialhastigheder.

Gaia – den videnskabelige opgave

Gaia er bygget efter de principper, der bestod deres prøve i Hipparcos-missionen, for at løse en fundamental opgave i moderne astronomi: At skabe et meget præcist tre-dimensionalt billede af omkring én milliard stjerner i vor egen Galakse og dens omegn. Gaia vil kortlægge stjernernes bevægelser i rummet, der sammen med deres alder og kemiske sammensætning indeholder nøglen til Galaksens dannelse og udvikling. Bevægelserne vil også være påvirket af tyngdekraften fra det mystiske *mørke stof*, hvis fordeling i Galaksen således kan udredes.

Gennem omfattende fotometrisk klassifikation vil Gaia give os de fysiske egenskaber af hver stjerne, dvs. karakterisere dens luminositet (absolut lysstyrke) samt overfladens temperatur, tyngdekraft og kemiske sammensætning. Man vil supplere med observationer fra Jordens overflade, især fra de store online-kataloger: Gaia-ESO survey, Sloan Digital Sky Survey, UKIDSS, VISTA, PanSTARRS og 2MASS.

For at kunne bestemme de fysiske egenskaber af stjernerne ved fotometri, skal der korrigeres for effekten af det interstellare stof, der påvirker stjernelyset, når det passerer. Dels svækkes lyset, dels ændres dets farve, så klassifikationen ville blive forkert uden korrektion. Korrektionens størrelse er proportional med mængden af stof, og den store mængde af målepunkter (stjerner) vil give os et pålideligt kort over den tre-dimensionale fordeling af stof i Mælkevejen. Man kan bestemme afstanden til de interstellare skyer, når man kender afstanden til millioner af stjerner, idet man på lysets rødfarvning kan se, om en stjerne ligger foran eller bagved en sky.

Udnyttelse af resultaterne

Resultaterne vil blive udnyttet inden for næsten alle

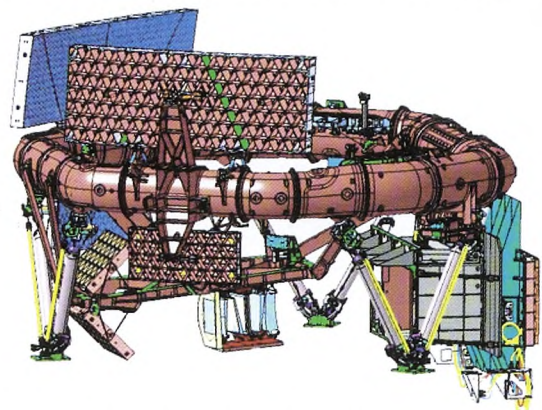
astronomiens områder: Galaksens dynamik; Referencsystemet; Kosmologi, Kvasarer, Galakser; Afstande; Interstellare skyer; Stjerners svingninger; Variable stjerner; Dobbeltstjerner; Planetsystemet og Exoplaneter.

Samlet set vil databasen med Gaia resultaterne blive en *astronomisk hjørneste*, en kilde til information, som ikke kan overgås af nogen anden rummission de næste 30-40 år. Om astrometri og astrofysik har jeg i 2011 skrevet i Kvant [3] og i 2014 i [1] og [4], om astrometriens fremtid.

Med opsendelse af Gaia i december 2013 ventes de første resultater offentliggjort i 2016 baseret på ét års observationer. De endelige resultater ventes i 2022.

Gaia-satellitten

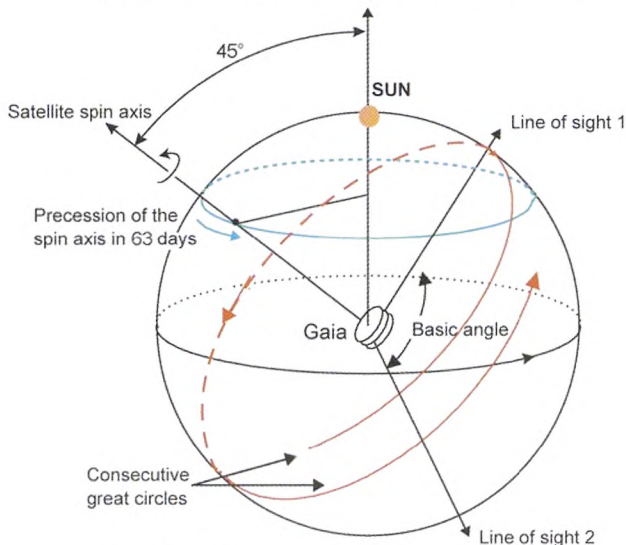
Det endelige design af Gaia blev forelagt i 2005 af det franske firma MMS, senere kaldet EADS-Astrium, og nu med navnet Airbus. Det indeholder kun to teleskoper med brændvidden 35 m, aperturer på $1,45 \times 0,50 \text{ m}^2$ og kun ét fokalplan på $0,7 \times 0,7$ grader med 106 store CCD'er, se figurerne 1, 3, 4 og 5. Den enorme brændvidde på 35 m er én af forudsætningerne for den store nøjagtighed, kun derved får man et diffraktionsbillede, der er tilpas stort i forhold til størrelsen på 10 mikrometer af de pixels, man formår at fremstille. Dette design er meget simple end det foregående, som havde tre teleskoper og fire fokalplaner, se figur 7 i [2].



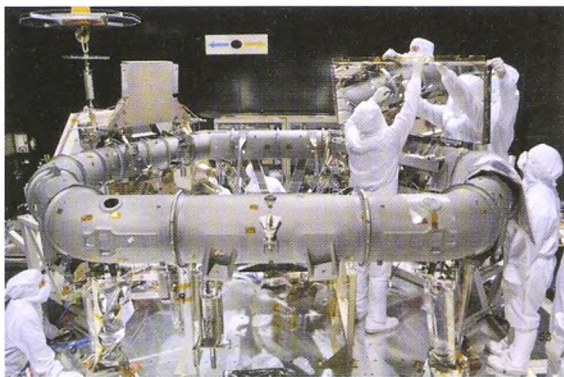
Figur 1. Gaia "payload" (nyttelast af instrumenter). De to store spejle foroven på $1,45 \times 0,50 \text{ m}^2$ sender lyset fra stjernerne fra to retninger ind på CCD'erne, der er skjult i kassen nederst til højre. Nederst i midten ses linser og prismer i spektrografen.

Det hele bæres af en stor torus og alt er fremstillet af sintret *siliciumcarbid*, SiC, der har en forsvindende termisk udvidelseskoefficient. Det er nødvendigt for stabiliteten og endda kræves en temperaturstabilitet

bedre end $30 \mu\text{K}$. Dette opnås ved at sørge for konstante termiske omgivelser for satellitten. En geostationær bane kan altså ikke bruges, fordi satellitten da ville komme ind i skyggen af Jorden af og til. Kun en bane omkring *librationspunkt* L_2 kan komme på tale. Det ligger i en afstand af 1,5 millioner km fra Jorden i retning bort fra Solen. De andre librationspunkter for Jord-Solsystemet kan ikke anvendes til dette formål.



Figur 2. Gaia drejer sig om spinaksen på 6 timer, og denne bevæger sig rundt om retningen til Solen på 63 dage, idet spinaksen hele tiden holder en vinkel på 45 grader til Solen. Derved fejer de to synsretninger langs storcirkler, vist med den røde linie. De to synsretninger ligger med en basisvinkel på 106 grader imellem, og den skal være meget konstant for at give den store nøjagtighed.

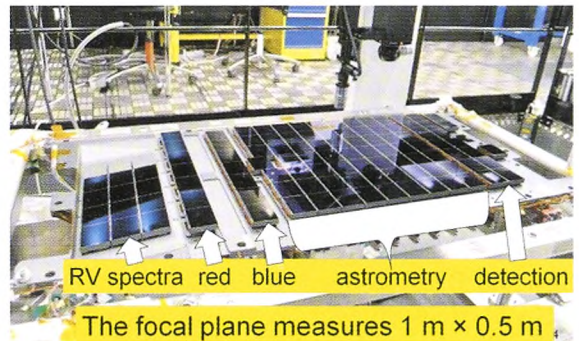


Figur 3. Denne torus af siliciumcarbide er meget stabil, og har næsten ingen termisk udvidelse, hvorved en konstant basisvinkel skulle sikres. Torus bærer hele payload med alle spejle, spektrografer og CCD'er.

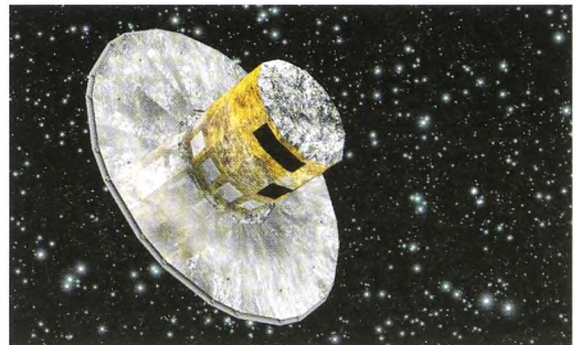
Torus og hele payload sidder oven på service-modulet i et hus som vist i figur 5. Hele systemet fra 2005 er mindre end det fra 1998, hvor de store spejle var $1,7 \times 0,7 \text{ m}^2$. Begge dele gav en stor besparelse i vægt som var nødvendig, da opsendelsen skulle ske med den billigere Soyuz-raket og ikke med den meget større Ariane.

Formindskelsen gav en meget nødvendig økonomisk besparelse, men også et tab i astrometrisk ydeevne. Man kunne nu vente en nøjagtighed på 24 mikrobuesekunder ved 15. størrelsesklasse mod tidligere 10 mikrobuesekunder. Det var selvfølgelig ærgerligt, men Gaia ville

stadig måle alle stjerner – mere end én milliard – til 20. størrelsesklasse. Nøjagtigheden ved 20. størrelsesklasse ville være meget bedre end Hipparcos, der nåede 1000 mikrobuesekunder ved en størrelsesklasse på ca. 9,5.



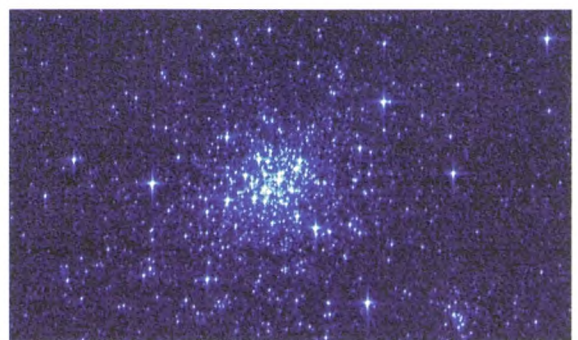
Figur 4. Fokalplanet med 106 store CCD'er. Stjernerne kommer ind fra højre, detekteres og bliver derefter målt under passagen af de forskellige CCD'er, først ni gange astrometrisk, derefter måles et kort spektrum i blå og et i rødt. Helt til venstre måles stjernerne til sidst ved høj opløsning af spektret i lyset omkring den røde Ca-triplet for at få stjernens radialhastighed og lysstyrken i spektret.



Figur 5. Gaia-satellitten skal udføre astrometri, fotometri og spektroskopi af 1000 millioner stjerner på fem år. Den store skærm har solceller på den side der vender mod Solen, og den forhindrer, at lys fra Solen, Månen eller Jorden nogensinde rammer huset med optikken, hvorved det ville blive opvarmet.

Billede fra Gaia

Det første billede fra Gaia fik vi den 6. februar 2014, og det var meget fint, se figur 6. Dette og det følgende billede (figur 7) er opnået med en enkelt CCD, altså ca. 3 sekunders observation. I de endelige resultater fra Gaia bliver de mange enkeltoptagelser lagt oven på hinanden.



Figur 6. Det første billede fra Gaia i februar 2014, kugleho-ben NGC 1818 i Den store Magellanske Sky. Feltet dækker $212'' \times 212''$. De svageste stjerner er 20. størrelsesklasse.

Fotometri kræves

Missionen kræver, at satellitten måler alle stjerners lysstyrker i flere farver, hvilket der er to grunde til. For det første skal man kende en stjernes farve for at kunne beregne position, egenbevægelse og parallakse helt nøjagtigt. Det skyldes, at selv et spejlteleskop vil have farvefejl, også selvom det er fremstillet optisk perfekt. Dét at teleskopet har en endelig åbning betyder, at diffraktionsbilledets størrelse og form ændres med stjernens farve og med stjernens position i feltet pga. lysets forskellige bølgelængder i relation til åbningens størrelse. Det giver en lille astrometrisk fejl i den målte position, der kan korrigeres, hvis man kender stjernens egen farve. Dertil kommer fejl fra små ufuldkommenheder ved fremstillingen. Ved den nøjagtighed, der ligger i Gaia-observationerne, skal man endda kende stjernens farve, ved hver enkelt af de ca. 70 gange en stjerne måles, i løbet af de fem år missionen varer. Det skyldes, at mange stjerner er variable og derfor kan have forskellige farver i løbet af missionen.

For det andet kræves fotometri til at karakterisere stjernen. Uden dette er en videnskabelig anvendelse af de astrometriske data umulig, f.eks. til studium af bevægelserne i Mælkevejen. Ganske vist kan man måle alle stjernerne fotometrisk fra Jorden, men der er ikke garanti for at det ville blive gjort rettidigt. Fotometrien vil i sig selv have enorm betydning for studiet af variable stjerner, idet alle stjerner ned til 20. størrelsesklasse vil blive målt mange gange.

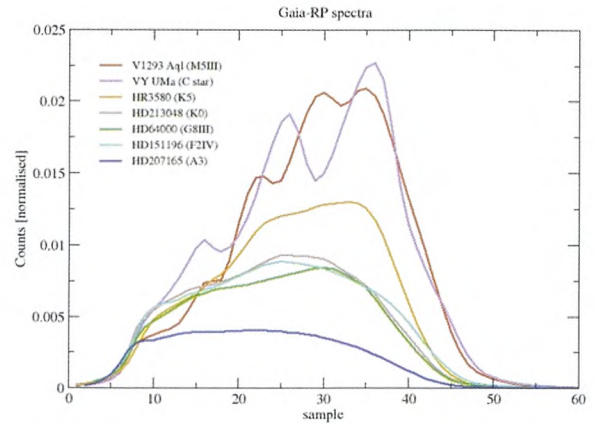
I alle årene indtil 2005 antog vi, at fotometri skulle udføres med farvefiltre anbragt foran nogle af CCD'erne. Vi fandt frem til de optimale filtre i brede og smallere bånd. Arbejdet blev udført af en stor gruppe, hvor *Jens Knude* var med i København, idet han havde stor erfaring med fotometri. Båndene skulle give de fysiske egenskaber for hver stjerne. Med de korte spektre som vist i figur 7 kan man opnå stort set det samme.

Spektre i stedet for filtre

I 2005 fik vi oplyst, at MMS ikke ville anvende farvefiltre til fotometri som hidtil planlagt, men levere spektre med lav opløsning. Vi skulle vurdere, om det videnskabelige formål så kunne opfyldes. Dette forslag måtte nogle få af os arbejde med i dybeste hemmelighed, fordi det ville give MMS en stor fordel i konkurrencen om den endelige kontrakt. Forslaget bestod i, at man da kunne nøjes med de to store astrometriske teleskoper og helt undvære ARVI-teleskopet. Man kunne forene de fire fokalplaner til et eneste med alle CCD'er for astrometri, fotometri og spektrometri.

Desværre betød ændringen en indskrænkning i mulighederne for at studere dobbeltstjerner med Gaia. Det var heller ikke Gaias hovedmål, men det havde været en enestående chance for fotometri med høj vinkelopløsning, hvad der kun kan gøres fra rummet.

Men vi havde gjort det rette under de givne vilkår, og glædede os over den elegante løsning med spektre, der ganske vist rummede problemer for fotometrien, fordi spektrene var meget korte.

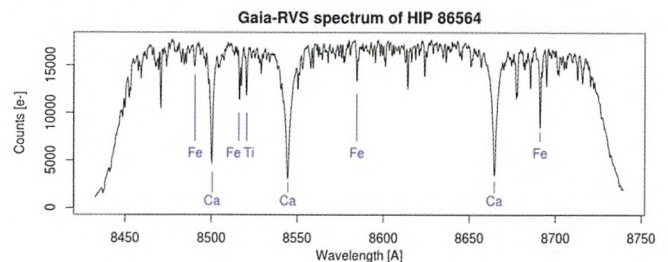


Figur 7. Gaia-fotometri med korte spektre for syv stjerner i bølgelængderne 650-1000 nm. Fotometri med korte spektre i bølgelængderne 330-680 nm måles også for alle stjerner.

Spektrometri

I figur 6 i [2] ses et teleskop, *ARVI*, til måling af radialhastigheder ved hjælp af spektrometri med høj opløsning af et lille område omkring den kraftige calcium triplet ved 860 nm. Det blev foreslået allerede i 1995 af *Fabio Favata* og *Michael Perryman*, fordi sådanne målinger ganske vist kan foretages fra Jorden, men erfaringerne fra Hipparcos viste, at det kan tage sin tid. Derfor bør de foretages af Gaia, for at man skal få alle tre komponenter af rumhastighederne til rådighed samtidig til studium af Mælkevejens dynamik. Figur 8 viser et spektrum optaget med Gaia.

I det endelige design forsvandt *ARVI* teleskopet, idet lyset fra de store spejle bliver ført gennem en spektrograf, når stjernerne passerer den sidste del af brændplanet. Spektrografen ses i figur 1 og CCD'erne til spektrene i figur 4.



Figur 8. Gaia-spektrum omkring Ca-tripletten ved 860 nm. Et spektrum med samme opløsning af denne stjerne, optaget fra Jorden, viser nøjagtigt de samme enkeltheder.

Problemer efter opsendelsen

Opsendelsen af Gaia gik efter planen, og vi ved nu, at satellitten vil give fine resultater, men der viste sig en række problemer, da man begyndte indkøringen, så rutineobservationer begyndte først den 25. juli.

To problemer skal nævnes. Det ene problem var en stærk "outgassing", dvs. at der kom vanddamp ud af materialerne. Outgassing er et kendt fænomen i vakuum, men det var stærkere end forventet. Dampen satte sig som is på spejlene, så refleksionsevnen gik ned, og på indersiden af det hus der rummer instrumenterne, hvor det gav spredt lys. Isen på spejlene kunne man fjerne ved opvarming, men det var ikke forudset på

andre dele. Det har dog kun virkning på målingen af de svageste stjerner, fejlen ved 20. størrelsesklasse ventes at blive 500 mikrobuesekunder for parallakser. Henved 10 millioner stjerner vil få en afstand målt med én procents nøjagtighed eller bedre. Hipparcos gav 700 stjerner med denne nøjagtighed, og før Hipparcos kendtes kun Solens afstand så nøjagtigt.

Fejlen på fotometri for stjerner af 20 mag vil blive ca. 0,07 mag for den blå og den røde størrelsesklasse, der betegnes *BP* og *RP*, og fejlen afhænger af stjernens farve. For spektrometri når man 15 mag og radialhastigheder for 150 millioner stjerner ventes.

Man sørger altid for at vælge materialer med ringe outgassing til en payload. Det har man også gjort ved Gaia, så man mener, at dampen er kommet ind gennem små åbninger fra service modulet, hvor man ikke har været så kritisk med valg af materialerne.

Det andet problem var en variation af basisvinklen i takt med satellittens omdrejning, og denne vinkel skulle netop være meget konstant for at give nøjagtig astrometri. Men takket være et indbygget apparat til måling af vinklen ser det ud til, at problemet er løst, når man i databehandlingen tager hensyn til disse målinger.

Sampling og transmission af data

Gennem alle årene med udvikling af satellitten tog jeg mig meget af *sampling*, dvs. at definere det *vindue* på CCD'erne omkring hver stjerne for hvilket data skal sendes til Jorden. Hvilke stjerner, der skal observeres bliver bestemt ved en beregning på satellitten ud fra observation med den første CCD i feltet. Det ville være umuligt at transmittere data fra alle pixels, derfor var det vigtigt at afgøre hvilke pixels, der er nødvendige af hensyn til astrometri, fotometri og spektrometri, og således kunne transmissionsraten reduceres med en faktor henved ét tusind. Raten for Gaia er maksimalt 4-8 Megabits per sekund (Mbps) i de tidsrum der er forbindelse til en station på Jorden, gennemsnitlig 8 timer i døgnet. Typisk gennemsnitlig datarate er 1 Mbps. Data lagres om bord med op til 800 Gbits.

Følgende datamængder er modtaget per 17. maj: 25 Terabits, heri 20 milliarder billeder i astrometri, 4,2 milliarder i fotometri og 1,4 milliarder spektre.

De første overvejelser om sampling findes i Roemerforslaget i 1992 og med alle de forandringer af design, der skete i de femten år, var det en konstant opgave, der måtte løses i diskussion med partnerne. Der kom 64 tekniske rapporter alene om sampling, detektering og afbildning med forfattere fra København.

Beregninger til dataanalysen

Målingerne af én milliard stjerner med omkring 70 passager af feltet i løbet af 5 år skal analyseres.

Opgaven løses af et stort konsortium *Gaia Data Processing and Analysis Consortium*, DPAC med deltagelse fra alle ESA-lande og det tog fart i 2006 efter at satellittens endelige udformning lå fast. DPAC består af mere end 400 videnskabsfolk og softwareteknikere fra 20 lande, idet beregningerne er koncentreret på seks store centre. Leder af DPAC var først *Francois Mignard*, Nice, der i oktober 2012 blev afløst af *Anthony Brown*,

Leiden.

Der er altså kun ét Gaia konsortium, mens der var fire for Hipparcos: to konsortier for Hipparcos data, et for Tycho data, og et for opstilling af *Hipparcos Input Catalogue* med 120.000 udvalgte stjerner.

Satellit, opsendelse og observationer finansieres af ESAs videnskabelige budget med 700 millioner euro, hovedsageligt til industrien. Beregningerne finansieres direkte af ESAs lande med 200-300 millioner til de forskningsgrupper der deltager. Samlet set bliver det til knap én euro per stjerne da der observeres en milliard stjerner, dette ifølge oplysning fra *Timo Prusti*, leder af Gaia Science Team.

Der er ingen massiv dansk deltagelse, som der var med dansk ledelse ved både Hipparcos og Tycho. Prioriteterne er ændret, men danske astrofysikere ser frem til at udnytte resultaterne.

Realiseringen af Gaia

Gaia-missionen er ét af de største og mest kostbare projekter i astrometriens lange historie, og nogle træk fra projektets realisering gennem en snørklet tilblivelse siden 1992 blev fortalt i [2].

I 2005 skulle to industrikonsortier udarbejde endelige forslag for missionen, altså en kontrakt på mange millioner euro for bygning og opsendelse af satellitten samt bearbejdning af observationerne i satellitten inden de sendes ned til Jorden. Hidtil havde konsortierne kun modtaget håndører, idet hovedsagen for dem var at vinde den endelige kontrakt, og det blev MMS. Efter opsendelse og indkøring overgår ansvaret til ESA og konsortiet modtager sidste rate, hvis alt fungerer rigtigt.

Litteratur

- [1] E. Høg (2014), The Astrometric Foundation of Astrophysics. Abstract to the Conference Book 2014 of the Danish Astronomical Society. <http://arxiv.org/abs/1408.2122>
- [2] E. Høg (2013), Gaia-missionens snørklede tilblivelse. Kvant nr. 4, december 2013.
- [3] E. Høg (2011), Astrometri fra antikken til i dag. Kvant nr. 3, oktober 2011.
- [4] E. Høg (2014), Absolute astrometry in the next 50 years. Draft report with updates especially on the solar system. <http://arxiv.org/abs/1408.2190>
- [5] Læs mere om Hipparcos og Gaia: <http://www.rssd.esa.int/Hipparcos>
<http://www.cosmos.esa.int/web/gaia>
<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.