Den 24 oktober 2000

Projektbeskrivelse : GAIA fotometri og astrometri

E. Høg, C. Fabricius, J. Knude
Astronomisk Observatorium ved Københavns Universitet

Resumé

I oktober 2000 har ESA vedtaget GAIA satellitprojektet med opsendelse senest 2012 – og måske allerede i 2009.

GAIA er en mission der skal udføre astrometri og fotometri på et meget stort antal stjerner, ialt ca. en milliard, nemlig alle stjerner og andre punktformede lyskilder klarere end $V = 20$ mag. Den videnskabelige værdi af missionen for udforskningen af hele vores Galakse, af de nærmeste galakser og af vort eget planetsystem er så stor at missionen er vedtaget som ESA hjørnestensmission.

GAIA gruppen ved Astronomisk Observatorium vil fokusere på centrale emner for missionen af teknisk og videnskabelig art. Emner med konsekvenser for hardware og software ombord i satellitten har første prioritet under missionens forberedelse. Stjerner og andre punktkilder er de centrale videnskabelige objekter for missionen. Vi har derfor valgt tre områder for vort arbejde i de nærmeste år til gennemførelse med vore udenlandske og danske partnere: valg af de optimale farvefiltre for fotometrien, optimering af CCD målingerne i satellitten, og dataanalyse for enkeltstjerner og multiple stjerner.

GAIA-gruppen og projektets baggrund

GAIA-missionen GAIA skal udføre astrometri og fotometri på alle stjerner og andre punktformede lyskilder klarere end $V = 20$ mag. Observationerne skal foregå ved at man detekterer stjernerne når de kommer ind i kikkertens synsfelt, og derefter måler et lille område omkring hver af de stjerner der er klarere end $V = 20$ mag med de følgende CCDer. På denne måde sikrer man sig et meget veldefineret sample af stjerner, også af helt sjældne typer af stjerner, hvilket er yderst vigtigt for den videnskabelige analyse. Den meget svage grænse på 20 mag er kritisk for at nå de ambitiøse videnskabelige mål der er sat, og det betyder så nødvendigvis at antallet af målte punktkilder når en milliard. Målingerne foretages altså uden at man på forhånd angiver hvilke stjerner der skal måles, bl.a. fordi det vil være umuligt at fremstille et sådant "input katalog".

Satellitten rummer tre kikkerter, to af dem foretager de astrometriske målinger og fotometri i brede bånd. Den tredie noget mindre kikkert anvendes til fotometri i smallere bånd og til spektroskopi, der skal give radialhastigheder af de klareste stjerner, ned til $V = 16 - 17$ mag.

Astrometri og fotometri Astrometriske observationer har til formål at måle stjerners positioner og bevægelser på himlen. Hermed kan også stjerners afstande (parallakser) bestemmes, hvis observationerne er tilstrækkeligt nøjagtige, idet en del af en stjernes bevægelse er en reflektion af Jordens årlige banebevægelse omkring Solen. Med den første astrometriske satellit nogensinde, Hipparcos, som blev opsendt af ESA i 1989, er der gjort fremskridt med hensyn til målenøjagtighed, der overgår det man har nået i de forudgående to hundrede år tilsammen. Vi venter at gøre endnu et spring af samme størrelsesorden i både kvantitet og kvalitet med GAIA satellitten. Med den forventede astrometriske nøjagtighed på 10 mikrobuesekunder vil det være muligt at måle afstande og bevægelser for stjerner i hele vor egen galakse og i nogle af vore nabogalakser. GAIA er derfor blevet vedtaget som ESA hjørnestensmission.

Fotometriske observationer tjener til bestemmelse af stjerners lysstyrker i et eller flere bånd af spektret. Astrometri og fotometri må behandles samlet, efter at lineære fotometriske detektorer er blevet indført til astrometriske målinger. Det giver fotometriske resultater i særklasse, som det især har vist sig ved observationerne fra Hipparcos satellitten, der har givet flere hundred millioner observationer af 2.5 millioner stjerner med Tycho eksperimentet på Hipparcos. Dette var utænkeligt med de tidligere enerådende fotografiske og visuelle metoder til astrometri. Den forventede fotometriske nøjagtighed for GAIA er tilstrækkelig til bestemmelse af de kritiske astrofysiske parametre for alle de målte stjerner, selv for de svageste stjerner opnås en rimelig præcision. For de klareste stjerner måles radialhastigheder med en spalteløs spektrograf i satellitten.

GAIA-gruppen Kernen i denne er E. Høg, C. Fabricius og J. Knude, og gruppens medlemmer har bidraget afgørende til udviklingen. Fotontælling til astrometri blev foreslået af Høg i 1960, hvorved den ovennævnte lineære detektering blev introduceret. Teknikken blev anvendt ved meridiankredse flere steder. Høg har været en af hovedaktørerne i Hipparcos/Tycho missionen siden 1975, og i GAIA projektet. Han har siden 1990 arbejdet med tanken om en efterfølger for Hipparcos, og foreslog i 1992 et nyt design med anvendelse af CCD teknik i en astrometrisk og fotometrisk satellit. Et forslag i 1993 til en satellit, ROEMER, blev meget vel modtaget af ESA, og gav anledning til de studier der førte til GAIA projektet i hvilket der planlægges flerfarve fotometri for en milliard stjerner, sammen med astrometri, og for en stor del bestemmes også radialhastigheder.

Gruppen foreslog i 1995 et optisk design af en astrometrisk mission der anvender interferometri med dispergerede interferensstriber. Dette forslag blev taget op af tyske kolleger der foreslog en lille mission, DIVA, indenfor det nationale tyske rumforskningsprogram. DIVA er nu (d. 22. september) blevet anbefalet til opsendelse i 2004, men den endelige godkendelse mangler.

Hele gruppen har deltaget i arbejdet med GAIA missionens forberedelse, især på de fotometriske områder. Vi har skrevet henved 80 tekniske og videnskabelige rapporter i samarbejde med kolleger fra bl.a. Barcelona, Lund, Paris, Turku, Vilnius og Padua. Høg er medlem af ESAs Science Advisory Group (SAG) der siden 1997 har stået for det design af missionen der har ført til ESAs vedtagelse.

Gruppen har forudsætninger for fortsat at være ledende i udviklingen af GAIA missionen, på basis af vore erfaringer fra Hipparcos/Tycho arbejdet og fra jordbaseret fotometri, og igennem vort omfattende netværk af udenlandske partnere. Høg har f.eks. i dette år holdt foredrag og/eller ledet workshops om GAIA i Paris (to gange), Vilnius, Düsseldorf, Wien, Padua og Asiago. Lignende arrangementer forberedes i København (to gange), Lissabon, Oslo, Strasbourg og igen i Vilnius.

Vi har nært samarbejde om GAIA især med astronomer i Barcelona, Garching, Lund, Paris, Schenectady (New York), Turku og Vilnius. Danske fysikere der studerer Mælkevejssystemet, eksterne planetsystemer og vort eget solsystem har accepteret at være tilknyttet projektet som konsulenter. Det drejer sig om forskere tilknyttet:

Astronomisk Observatorium, NBIfAFG, København: J. Andersen, J.V. Clausen, O.H. Einicke, U. Gråe Jørgensen;

Dansk Rumforskningsinstitut, København: N. Lund;

Geofysisk Afdeling, NBIfAFG, København: D. Dahl-Jensen;

Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus: P.E. Nissen;

Teoretisk Astrofysik Center, Aarhus: H. Kjeldsen;

Teoretisk Astrofysik Center, København: J. Sommer-Larsen.

Projektets gennemførelse

Vi vil fokusere på centrale emner for missionen af teknisk og videnskabelig art. Emner med konsekvenser for hardware og software ombord i satellitten bør have første prioritet under missionens forberedelse. Stjerner og andre punktkilder er de centrale videnskabelige objekter for missionen og fortjener højeste prioritet. Vi har derfor valgt tre områder for vort arbejde til gennemførelse med vore udenlandske og danske partnere:

- valg af de optimale farvefiltre til fotometrien,
- optimering af CCD målingerne i satellitten, og
- dataanalyse for enkeltstjerner og multiple stjerner.

Vi har tidligere også arbejdet med andre emner, f.eks. detektering af stjerner og galakser, afbildning og fotometri af galakser, detektering af supernovaer; detektering af mikrolensning; detektering og måling af NEOer (Near Earth Objects); fotometri af den diffuse himmelbaggrund; spektrofotometri med lav og med høj opløsning (se liste over nogle af vore rapporter: http://www.astro.ku.dk/~erik/gaia/75.2.list.33-78) . Vi vil stadig bidrage til en del af disse emner, og gerne i samarbejde med andre.

Det må understreges at GAIA har meget bred betydning for astrofysikken, f.eks. opnås ud over de ovennævnte ting : nøjagtig fotometri og astrometri for stjerner i nabogalakser, for 500 000 kvasarer og for cirka en million (nye) objekter i vort eget solsystem. Cirka 30 000 planeter udenfor vort eget planetsystem og ca. 50 000 brune dværge vil blive detekteret, og 10 millioner dobbeltstjerner bliver detekteret og deres enkeltkomponenter målt.

Missionen er beskrevet i ESA-SCI(2000)4 GAIA Study Report på 381 sider og et Executive Summary på 75 sider. GAIA homepage er http://astro.estec.esa.nl/GAIA .

Valg af de optimale farvefiltre De fotometriske målinger sker gennem farvefiltre, der udskiller ialt ca. 15 brede og smallere (intermediære) bånd af spektret mellem 300 og 900 nm. Det endelige valg af disse bånd må tage hensyn til de mange astrofysiske opgaver der skal løses, idet filterfotometrien giver de nødvendige oplysninger om stjernens astrofysiske natur. For de fleste stjerner vil ingen andre astrofysiske oplysninger være til rådighed for anvendelsen af de astrometriske resultater.

Der er nu foreslået tre ret forskellige systemer af farvefiltre til GAIA, dog alle med omtrent det samme antal af 15 bånd. Valget af system og videre optimalisering forudsætter både teoretiske analyser og observationer af stjerner gennem farvefiltre og med spektrograf. De teoretiske analyser anvender energifordelingen i de forskellige stjernetyper taget fra kendte modeller for stjerners atmosfærer, i nogle tilfælde suppleret med energifordelinger målt i nye spektre. Et sæt af realistiske farvefiltre må fremstilles og afprøves ved direkte observationer.

De teoretiske analyser er startet i Vilnius. Man simulerer observationer af forskellige typer stjerner med de foreslåede sæt af filtre. Disse observationer behandles af et program der foretager en automatisk klassifikation. Derefter er det muligt at vurdere den teoretiske kvalitet af de aktuelle filtre.

Det vil være nødvendigt at fremstille et sæt af filtre der ligger så nær som muligt ved de filtre der skal bruges i GAIA, baseret på de teoretiske undersøgelser. En afprøvning på den danske 1.5 m kikkert i Chile og på det nordiske 2.5 m teleskop på La Palma forudses, og observationer med et foreløbigt sæt af farvefiltre er startet. Dette er beskrevet i et afsnit nedenfor.

Optimering af CCD målingerne Målingerne med satellittens CCDer, der er beskrevet ovenfor, skal foretages så man har den optimale information i de data der transmitteres til Jorden. Det nuværende forslag i GAIA Study Report er udviklet i talrige rapporter fra vores gruppe, og der foreligger ikke alternative forslag. Det er vigtigt at dette skema bliver yderligere optimaliseret idet der tages hensyn til det videnskabelige udbytte og til den begrænsede båndbredde for telemetri fra satellitten der befinder sig i en afstand af 1.5 millioner km fra Jorden. En kvantitativ optimalisering kan udføres ved hjælp af simulerede målinger af enkeltstjerner og multiple stjerner, og af realistiske stjernefelter.

Dataanalyse for enkeltstjerner og multiple stjerner Et grundlæggende skema for den fotometriske dataanalyse er beskrevet i GAIA Study Report. Det baserer sig på de analysemetoder som vi anvendte ved den Tycho dataanalyse der resulterede i Tycho-2 kataloget. Vi er således i den bedste position til at bidrage afgørende til den nye udvikling.

Astrometri vil være en vigtig del af vort arbejde for så vidt angår *relativ astrometri* af dobbelte og multiple stjerner ved hjælp af data fra CCDerne i de såkaldte sky mappere i satellittens tre kikkerter. De *globale* astrometriske data (positioner, egenbevægelser og parallakser) og satellittens orientering i rummet vil være givet med de simulerede observationer. Ved den relative astrometriske analyse i en lille omegn på få buesekunder omkring enhver af de primært detekterede en milliard stjerner vil vi kunne detektere betydeligt svagere stjerner end $V = 20$ mag. Denne analyse vil være analog til den vi udførte med udvidelsen fra Tycho-1 til Tycho-2. Man kan således ved den fotometriske analyse gå ud fra at positioner for eventuelle andre forstyrrende stjerner nær ved den centrale stjerne er kendt.

I den endelige dataanalyse skal den relative og globale astrometri integreres til en enhed, men i første omgang kan vi nøjes med at udvikle den relative astrometri sammen med fotometrien. Hertil skal anvendes egne simulationer for enkeltstjerner og multiple stjerner, og desuden simulationer af hele stjernefelter som vi kan få leveret af vore partnere i Barcelona og Paris.

De fotometriske observationer De fotometriske målinger er påbegyndt i $uvbyPZS$ systemet der udgør en delmængde af 3G systemet foreslået til GAIA. De fire problemer vi er begyndt at studere er:

• Metalliciteten, [Fe/H], bestemmes udfra $uvbyPZS$ fotometri for F – G5 stjerner med kendt metalvariation, fra solens værdi til et indhold der er 3.5 størrelsesordner mindre. Metalindholdet er allerede tidligere bestemt ved $uvby\beta$ observationer. [Fe/H] reproduceres godt i intervallet fra 0.0 til –2.5 medens den sidste dekade mellem –2.5 og –3.5 endnu ikke er reproduceret tilfredsstillende. Den kemiske test udstrækkes til observationer i LMC og SMC, der begge har en anden kemisk sammensætning end Galaksen.

• Absorptionsmålinger i den Sydlige Kulsæk. Værdien af $uvbyPZS$ systemet tænkes evalueret ved at sammenligne med ekstinktionsdata opnået med $uvby\beta$ systemet. Fordelen ved $uvbyPZS$ systemet er at meget senere (koldere) stjernetyper kan anvendes end tilfældet er for $uvby\beta$ systemet således at en mere detaljeret kortlægning af det interstellare stof opnås.

• Det sidste observationsprogram vi har påbegyndt er *in situ* kalibreringen af absorptionsloven, dvs en bestemmelse af lokale afvigelser fra standardloven. Med det store antal stjerner per arealenhed observeret med GAIA får man alle stjernetyper repræsenteret selv i små arealer. Derfor kan undersøgelser af farveindekser for passende arealer afsløre afvigelser fra standardloven.

• Endvidere har vi foretaget en undersøgelse af $uvbyPZS$ systemets evne til at bestemme den interstellare absorption og absolutte magnitude for de Hipparcos stjerner, der har $uvbyPZS$ fotometri, ved den såkaldte Q-metode. Resultatet er opmuntrende; men der foreligger endnu ikke kalibreringer der tager hensyn til et varierende metalindhold.

I sin nuværende form bliver $uvbyPZS$ systemet ikke valgt til GAIA, bl.a. fordi vi endnu ikke ved hvorledes forekomsten af α-elementer (f.eks. forholdet [O/H]) kan bestemmes.

Udviklingen af det fotometriske system og den empiriske test tænkes at være baggrunden for et ph.d. projekt. Det vil udvikle sig i følgende trin:

◇ Teoretisk/numerisk afklaring af placering af systemets bånd vil foregå i samarbejde med Vilnius. Der er bl.a. følgende problemer. Bredde og placering af u-båndet, har betydning for bestemmelse af stjernens tyngdeacceleration/luminositet. Der skal tages hensyn til forekomsten af metaltræk der kun forekommer i nogle stjernetyper. Spørgsmålet om forekomsten af α-elementer har betydning for forståelsen af Mælkevejens kemiske udvikling og influerer på beregningen af stjernens alder. Spørgsmålet om hvorvidt nogle af de intermediære bånd kan erstattes af de brede bånd, der i forvejen er inkluderet, har indflydelse på udledningen af forholdet mellem [Fe/H] og α-elementer samt på bestemmelsen af den interstellare absorption. Et meget væsentligt problem er luminositetsklassifikationen og metalbestemmelsen for udviklede kolde stjerner. Kan den krævede nøjagtighed opnås ?

◇ Når det optimale filtersystem er fastlagt fremstilles et filtersæt og den empiriske test kan begynde med observationer, fortrinsvis på det danske 1.5m teleskop på La Silla, ESO Chile. Dette teleskop er at foretrække pga det store felt, idet et stort antal stjerner er vigtigt for bestemmelsen af den lokale absorptionslov.

Tidsplan for arbejdet i København

Planlagte GAIA workshops:
- November 2000 i København
- Marts 2001 i København
- Maj 2001 i Vilnius

Fra januar 2001:
- Evaluering og valg af filtre der skal afprøves
- Bestilling af filtre

Fra september 2001:
- Observationer i Galaksen og de magellanske skyer
- Udvikling af software til relativ astrometri og fotometri begynder

2002:
- Optimering af CCD målinger i GAIA vha softwaren
- Observationer i Galaksen og de magellanske skyer

2003:
- Videnskabelig evaluering af filtersystemer vha observationerne
- Anvendelse af observationer på studium af Galaksen og de magellanske skyer

2004:
- Endeligt valg af filtre til GAIA