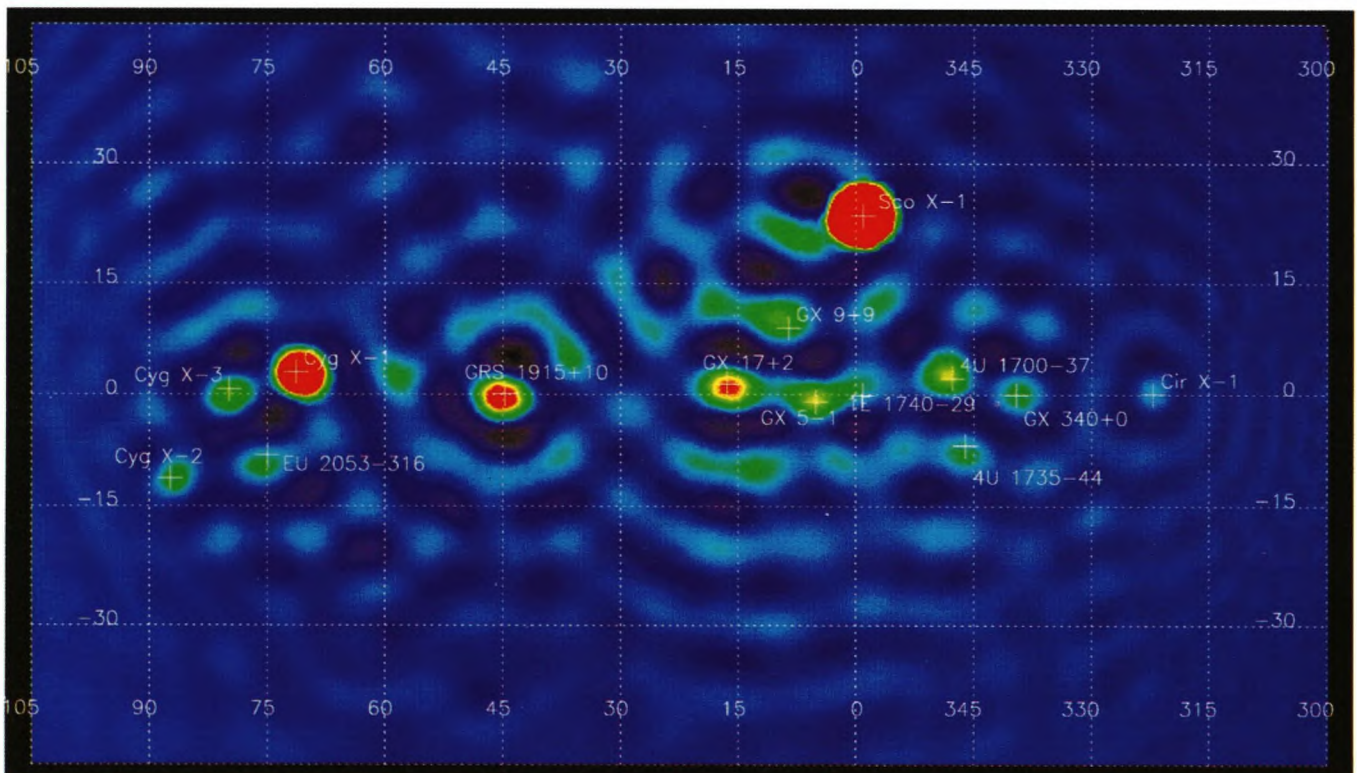
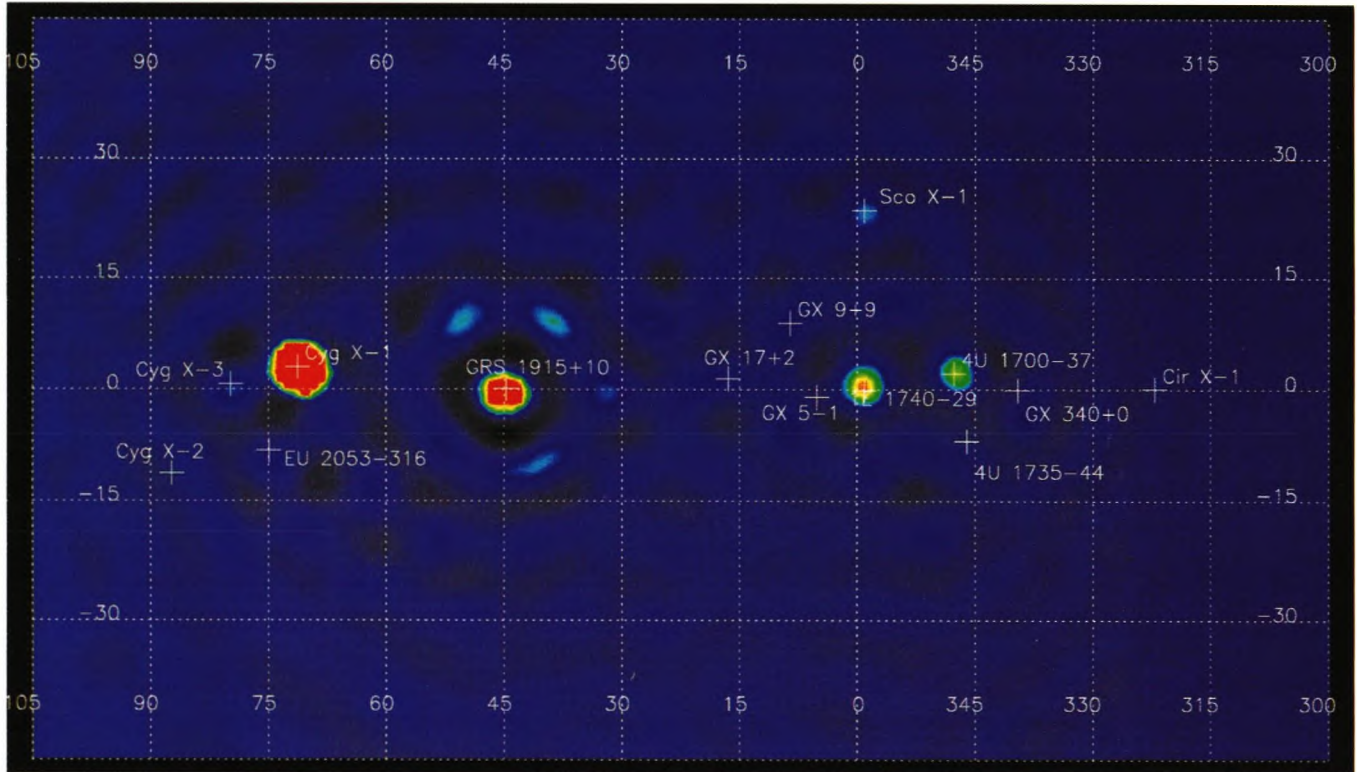




TEMA: RUMFYSIK • DANSKE RÖNTGENKIKKERTER • RÖNTGENUDBRUD

SOLSKÆLV • KRYSTALLISATION I RUMMET • ULTRA-ASTROMETRI

LØSSALGSPRIS: 35 KR

KVANT

Fysisk Tidsskrift

c/o Ørsted Laboratoriet
Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Telefax : 35 32 04 60
E-mail : kvant@nbivax.nbi.dk
Giro : 5 84 31 46

Udgives af

Dansk
Fysisk
Selskab



Selskabet for
Naturlærens
Udbredelse



Redaktion

Mads Hammerich (ansv.)
Rungsted Gymnasium
Jørgen Friis Bak
Naturvidenskabeligt fakultet, ÅU
Jørn Christiansen
Torsten Freltoft (annoncer)
NKT Research Centre
Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut, KU
Finn Berg Rasmussen
Ørsted Laboratoriet, KU
Ove Østergaard
Silkeborg Amtsgymnasium

KVANT udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 135 kr/år (i Danmark).

Annoncepriser

1/1 side	3000 kr
1/2 side	1600 kr
1/4 side	1000 kr
Farvetillæg	1800 kr

Priserne er excl. moms og gælder for reproklart materiale. Henvendelser om annoncer til Torsten Freltoft, NKT Research Centre, telefon 43 48 35 69, telefax 43 63 00 99.

Oplag: 2000

Tryk: P.J.Schmidt, Vojens
ISSN 0905-8893

Indhold:

De dansk-russiske røntgenkikkerter

Hans Ulrik Nørgaard - Nielsen 1
"XSPECT er det største videnskabelige rumprojekt, der nogensinde er gennemført i Danmark." Citat fra artiklen.

WATCH - et vidvinkel røntgenkamera.

Niels Lund og Søren Brandt 4
Røntgenhimlen er først blevet tilgængelig efter de satellitbårne instrumenter kom op. Forfatterne beskriver et dejlig simpelt instrument. Og dets resultater.

Solskælv, en kilde til viden om Solens indre

Jørgen Christensen-Dalsgård 10
Fra rummet er det muligt at observere Solen i årevis uden afbrydelser. Det er vigtigt for forfatteren, der lytter efter de svage bølger der bringer oplysninger ud fra dybe lag i Solen.

Krystallisation af calciumfosfat i vægtløshed

Hans Erik Lundager Madsen 17
For at lære mere om biologisk vigtige krystaller er der udført forsøg med krystallisation i lange perioder af vægtløshed.

Astrometri fra rummet – nu og i fremtiden

Erik Høg 25
Observationerne er afsluttede og dataanalysen godt i gang i det hidtil største og mest nøjagtige stjernemåleprojekt, Hipparcos. Høg trækker linierne frem til det nye Roemer projekt der vil kunne måle med mange tusinde gange større effektivitet.

Møde:

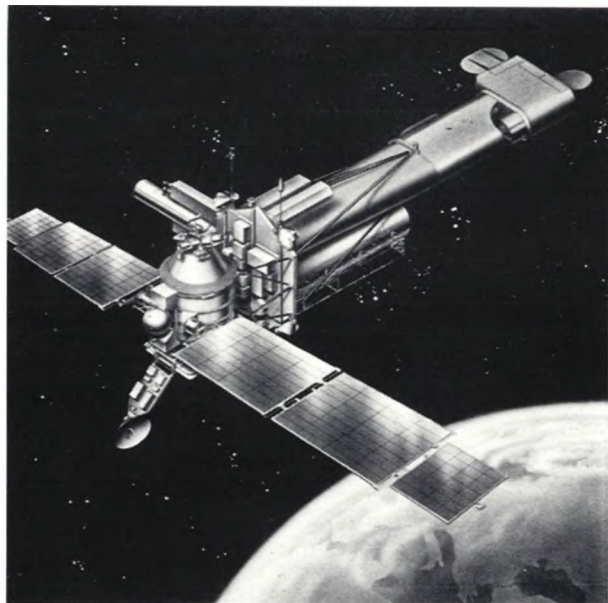
. 24
Om projektarbejde i fysikundervisningen.

Forsiden:

To himmelkort baseret på 3 måneders observationer med WATCH- instrumentet på EURECA. Det øverste billede svarer til røntgenstråling i energiintervallet 22-75 keV. Mælkevejens centrum ligger tæt ved kilden 1E 1740-29. Ca 15 røntgenkilder kan identificeres på dette kort. Nederst: Et tilsvarende himmelkort for energiintervallet 8-22 keV.

De dansk-russiske røntgenkikkerter

Hans Ulrik Nørgaard - Nielsen



Figur 1. SPECTRUM-X- Γ satellitten. De to XSPECT røntgenkikkerter ligger side om side i det lange rør. Det ene spejlmodul kan ses næsten oppe i toppen af røret. Der er 8 meter mellem spejlsystemerne og detektorerne i brændplanet. Hele satellitten vejer ca. 4 tons.

SPECTRUM-Röntgen-Gamma

SPECTRUM-Röntgen-Gamma (SRG) satellitten er den første i en ny serie af videnskabelige satellitter, som Det Russiske Videnskabernes Akademi er i gang med at virkeliggøre. Hovedformålet med SRG er at studere røntgen- og gammastråling fra kosmiske kilder. SRG indeholder en lang række instrumenter, som dækker hele det elektromagnetiske spektrum fra ultraviolet til gammastråling. Fig. 1 viser satellitten som den forventes at se ud, efter opsendelsen i slutningen af 1995.

De største instrumenter på SRG er to røntgenteleskoper hvortil Dansk Rumforskningsinstitut (DRI) leverer spejlsystemerne, fire detektorer, og desuden et kryspektrrometer af en ny konstruktion placeret foran det ene af teleskoperne. DRIs andel af dette russisk-danske teleskopsystem kalder vi XSPECT.

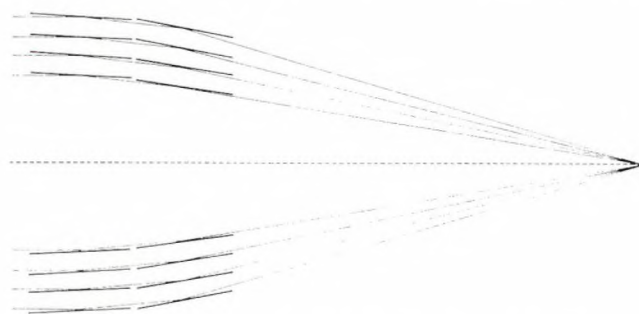
SRG skal sendes op i en meget elliptisk bane, den korteste afstand fra Jorden bliver kun ca. 500 km, mens den længste afstand bliver ca. 200.000 km, dvs halvejs til Månen. Omløbstiden bliver 4 døgn, heraf vil satellitten være uden for Jordens strålingsbælter i ca. 3,5 døgn. (Kun tiden udenfor strålingsbælterne er anvendelig til observationer).

Røntgenkikkerter

Røntgenstråling kan kun spejles når strålingen ram-

mer den spejlende overflade under en meget lille vinkel ($\sim 0.5^\circ$). Derfor ligner røntgenteleskoper ikke sædvanlige optiske teleskoper. Fig. 2. For at få god fokusering over et rimeligt billedfelt kræves der to reflektioner, den første spejlende overflade skal have form som en omdrejningsparaboloide og den anden som en -hyperboloide. Spejlene skal poleres med særlig stor præcision netop fordi røntgenstråling har meget kortere bølgelængde end optisk lys.

Den meget lille strejfningsvinkel for røntgenstrålingen betyder at et klassisk røntgenteleskop er meget ineffektivt. Efter at have poleret flere kvadratmeter glasoverflade står man med et teleskop med et effektivt areal så stort som en kagetallerken! Og især til detaljerede spektroskopiske undersøgelser har man brug for masser af fotoner, altså en stor effektiv kikkertåbning.



Figur 2. Principskitse for et røntgenteleskop. Strålingen strejfer spejlene under en meget lille vinkel og fokuspunktet ligger efter spejlsystemet. To spejlinger før fokus er nødvendigt for at sikre god billeddannelse over et felt af endelig størrelse.

På DRI har vi derfor valgt at gå en anden vej. I stedet for at bruge meget præcise spejlende overflader slebet i glas bruger vi et stort antal spejle af kegleform fremstillet i aluminiumsfolie (0,4 mm tyk). Afvigelsen mellem de simple kegler og de mere ideale parabel- og hyperbelformer er ikke større end at vi kan opnå en fokusering indenfor et par bueminutter med foliespejlene. På grund af foliernes ringe tykkelse og lave pris kan vi udfylde den tilgængelige åbning fuldstændigt med spejle. XSPECT spejlmodulerne indeholder hver 2×150 foliespejle. Vi bruger naturligvis de mest perfekte aluminiumfolier, vi har kunnet finde på markedet, og for yderligere at forbedre spejkvaliteten dyplakerer vi folierne og pådamper til slut et tyndt guldlag. Røntgenstråling reflekteres bedst af materialer med høj vægtfylde. Fig. 3 viser et af XSPECT spejlmodulerne. De yderste spejle har en diameter på 60 cm.

Med denne konstruktionsteknik er det derfor lykkedes at fremstille teleskoper, som, i henseende

til størrelsen af det effektive areal, er fuldt på højde med eller endda overgår hvad NASA og ESA stiller imod for deres næste store røntgenmissioner. Hvad billedkvaliteten angår vil XSPECT ikke kunne konkurrere, og derfor er forskningsprogrammet for XSPECT også specielt rettet mod spektroskopi.



Figur 3. Et af XSPECT spejlmodulerne. (diametren af spejlsystemet er 60 cm). De tynde aluminiumsspejle er placeret så tæt som muligt, dog uden at skygge for hinanden. Som det ses bliver spejlene fastholdt i radielt placerede egre.

Detektorerne i XSPECT er såkaldte proportionaltællere. Røntgenfotonerne kommer gennem et meget tyndt vindue og ioniserer tællergassen som består af Xenon og lidt methan. Ved hjælp af et kraftigt elektrisk felt bliver elektronerne accelereret og bliver dermed selv i stand til at ionisere Xenon gassen. I traditionelle proportionaltællere dannes det elektriske felt omkring udspændte metaltråde, mens det i XSPECT-detektorerne dannes omkring nogle meget tynde ledningsbaner i et trykt kredsløb på en glasplade. Denne nye metode er videreudviklet på DRI, baseret på et design oprindeligt beregnet til detektion af neutroner. Den ny konstruktion har vist sig at give en meget mere stabil billeddannelse, og bedre energiopløsning end opnåeligt med de konventionelle trådetektorer. Hvert teleskop blive forsynet med to af disse detektorer, den ene optimeret for detektion af lavenergetiske fotoner, den anden for billeddannelse over et stort felt (ca. 1 kvadratgrad).

Bragg-spektrometret består af en plade med et areal på ca. 0.5 m^2 dækket med krystaller. Spektrometret er anbragt foran det ene af teleskoperne. Krystallerne er udvalgt således at de kan fungere som ekstremt smalbandede filtre i fire udvalgte energiområder. Ved at vippe spektrometerpladen frem og tilbage kan man få afsøge et lille spek-

tralbånd med meget stor opløsningsevne. Energibåndene er valgt så de svarer til karakteristiske spektrallinier for nogle hyppigt forekommende grundstoffer, ilt, svovl, jern m.fl. Målingerne med dette spektrometer vil give meget detaljerede oplysninger om temperaturer og ioniseringsstande i kosmiske røntgenkilder.

Hvilken astrofysik kan der laves med XSPECT?

XSPECT-teleskoperne er væsentligt større end tidligere røntgenkikkerter. Derfor vil XSPECT kunne finde anvendelse indenfor alle områder af røntgenastronomien. Men som nævnt ovenfor vil hovedinteressen samle sig om de nye muligheder for detaljeret spektroskopi.

Her skal omtales nogle af de vigtigste områder i DRIs observationsprogram for XSPECT:

'Mørkt stof' i galaksehobe: Allerede i begyndelsen af 30'erne blev det bemærket, at over 90 % af stoffet i Universet tilsyneladende ikke eksisterer som 'lysende stof' – altså stjerner eller gas- og støvtåger. Selv ikke gennem alle de nye bånd af elektromagnetisk stråling vi idag udnytter, finder vi signaler fra dette 'mørke stof'. Man har stadigvæk ingen forståelse af hvad dette stof består af, hvordan det er fordelt, hvordan det er dannet osv. Ud fra røntgenobservationer har man længe vidst, at der mellem galakserne i galaksehobe findes en varm (50 - 100 millioner grader) men meget tynd gas. For mange af de undersøgte hobe tyder målingerne på, at denne gas er i hydrostatisk ligevægt med det samlede tyngdefelt i hoben. Dette betyder, at man, ved at bestemme gassens fordeling og temperatur, kan bestemme, hvordan den totale masse (af både det lysende og ikke lysende stof) fordeles sig. Denne metode har været forsøgt gennemført for nogle enkelte hobe, men resultaterne har været usikre. Med XSPECT kan vi gennemføre denne analyse med stor nøjagtighed for en lang række hobe, og dermed få nye vigtige informationer om fordelingen af mørkt stof. Dette kan måske afsløre noget om dette stofs natur.

Aktive galaksekerner: Nogle af de mest energirige processer i Universet foregår i aktive galaksekerner (AGN). Mange AGN'er udsender meget mere energi end der tilsammen udsendes af alle de mange milliarder af stjerner i resten af galaksen. De fleste astronomer føler sig overbevist om, at grunden til energiudsendelsen skyldes, at stof falder ned mod et sort hul, med en masse på op mod 1000 millioner solmasser. Jo nærmere stoffet kommer det sorte hul, des mere energirig stråling vil blive udsendt. Dvs hvis man vil studere området lige omkring det sorte hul, så skal man observere i røntgen- eller gamma-området. I dag er vi henvist til at diskutere de fysiske forhold omkring AGN og sorte huller på basis af et middelspektrum af 8 AGN'er, de enkelte spektre er simpelthen for støjfyldte. Med XSPECT vil vi være i stand til at få rene spektre for enkelte AGN'er ca. 100 gange svagere end de 8, der indgår i det omtalte middelspektrum. Vi kan så på meget sikrere grund undersøge geometrien og de fysikken tæt på de massive sorte huller.

Den diffuse røntgenbaggrundsstråling: Allerede med

de første raketter, udstyret med røntgendetektorer, fandt man, at hovedparten af den røntgenstråling, vi modtager her omkring Jorden, er diffus, dvs. der kommer lige meget fra alle retninger. Der er stadigvæk ingen, der med sikkerhed ved, hvad der udsender denne stråling. Meget tyder dog på, at strålingen stammer fra en masse kilder, som er så svage og ligger så tæt, at man ikke indtil nu har været i stand til at udskille dem fra hinanden. Imidlertid er ikke nogen af de kendte klasser af røntgenkilder (aktive galakser, galaksehobe, stjerner osv.), der har det samme energispektrum som baggrundsstrålingen. Dvs. hvis baggrundsstrålingen alligevel kommer fra en af de kendte klasser af røntgenkilder, så må disse kilders spektrum have ændret sig i tiden (jo svagere kilder, jo længere væk er de og dermed stammer strålingen fra dem også fra længere tilbage i tiden). Med XSPECT vil vi være i stand til at bestemme detaljerede spektre af selv de svageste kilder, vi kender idag. Vi kan derfor håbe, at XSPECT vil give os løsningen på dette klassiske problem inden for røntgenastronomien.

XSPECT observationsprogrammet

XSPECT er det største videnskabelige rumprojekt, der nogensinde er gennemført i Danmark. Til gengæld for DRI's

bidrag til projektet vil vi få ca. 20% af observationstiden. Interessen for at deltage i XSPECT observationsprogrammet er allerede stor. I 1991 afholdt DRI en workshop om de videnskabelige muligheder med XSPECT. Heri deltog 63 astronomer fra 14 lande, herunder 22 fra Danmark. Den internationale interesse for projektet kan også aflæses af, at NASA har indgået en samarbejdsaftale med DRI, ifølge hvilken NASA opstiller et antal avancerede arbejdsstationer på DRI til gengæld for at DRI giver udvalgte amerikanske astronomer adgang til XSPECT data. Samarbejde med flere grupper i de nordiske lande er også allerede etableret.



Hans Ulrik Nørgaard - Nielsen har en PhD grad i astronomi fra Københavns Universitet. Han har siden 1987 arbejdet på Dansk Rumforskningsinstitut (DRI).

COMPONENTS
SELECT CAPABILITY:
VACUUM GENERATORS
FLANGES IN 316 LN
VG MICROTECH
VG QUADRUPOLES

The Seal of Approval from UHV Science

316 LN Stainless Steel Flanges for the Ultimate in Sealing Performance

Not only does 316LN have a much lower magnetic permeability and lower outgassing rates when compared to 304, but this exceptional grade of material is also much more resistant to the knife edge 'roll-over' that can occur when UHV joints are repeatedly made and broken.

Vacuum Generators stock a complete range of 316 LN Conflat® compatible flanges which are available in both fixed and rotatable configurations. This range of flanges is also complemented by a full range of OFHC Copper and Viton® gaskets.

VACUUM GENERATORS

FISONS

Instruments

*Fisons Instruments Nordic AB
Box 1176
S-171 23 SOLNA
Sweden
Tel : +46 08 730 02 95
Fax : +46 08 730 42 42*

WATCH - et vidvinkel røntgenkamera.

Niels Lund og Søren Brandt
Dansk Rumforskningsinstitut.

På Dansk Rumforskningsinstitut i Lyngby er der udviklet et kompakt vidvinkel kamera, WATCH, til astronomiske observationer i røntgen området. WATCH står for "Wide Angle Telescope for Cosmic Hard X-rays", og har til formål at observere variable røntgenstjerner indenfor et stort felt på himlen.

Den foranderlige røntgenhimmel

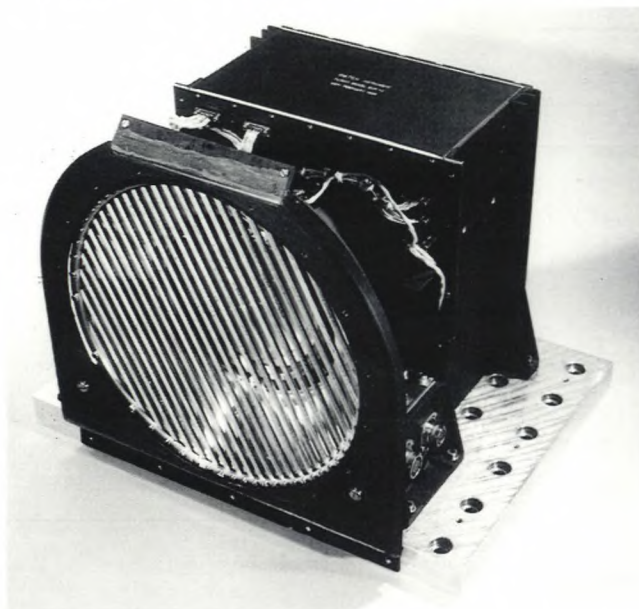
Stjernehimlen i røntgenstråling er meget forskellig fra den synlige stjernehimmel. De stjerner, som lyser stærkest i almindeligt lys er ganske uanselige i røntgenstråling, og omvendt: de typiske, stærke røntgenstjerner er næsten ikke til at få øje på i en normal kikkert. Den nærmeste stjerne, Solen, er normalt helt usynlig for et instrument som WATCH, men den kan dog en gang i mellem blusse op også i røntgenområdet, og - for nogle minutter - komme til at dominere røntgenhimlen, ligesom den dominerer den synlige himmel.

Det er karakteristisk for røntgenstjerner at de varierer voldsomt i lysstyrke indenfor kort tid. Det skyldes, at røntgenstråling kun udsendes fra stof som er meget varmere end gasserne i en almindelig stjerneatmosfære. På en stjerne som Solen, opstår sådanne varme områder lokalt i forbindelse med eksplosive begivenheder, "flares", men det opvarmede stof afkøles hurtigt, og røntgenstrålingen dør ud.

Eksistensen af egentlige røntgenstjerner kom som en fuldstændig overraskelse for den etablerede astronomi. Røntgenstjerner er en umulighed hvis man tager sit udgangspunkt i konventionelle stjernemodeller. Energifrigørelsen i stjernerne sker hovedsagelig ved fusion af lette atomkerner til tungere kerner. Fusion forudsætter både høj stoftæthed og høj temperatur. Disse forhold kan kun realiseres under stationære betingelser i centrum af en stor gasboble - en stjerne. Hvis denne gasboble skal være i hydrodynamisk ligevægt kan overfladetemperaturen ikke stige meget over 100 000 K. Ved sådanne temperaturer udsendes kortbølget ultraviolet stråling, men ikke røntgenstråling. Ergo - røntgenstjerner findes ikke!

Da vi så alligevel i begyndelsen af tresserne blev præsenteret for disse "umuligheder", blev vi tvunget til genvurdere forudsætningerne for ræsonnementet ovenfor. Løsningen kom gennem erkendelsen af at "kompakte" objekter, neutronstjerner og sorte huller, ikke kun var kuriositeter, opfundet af højtflyvende teoretikere, men normale, endda hyppigt forekommende, medlemmer af stjernernes talrige familie. Medvirkende til den almindelige accept af specielt neutronstjernernes realitet var opdagelsen af radiopulsarerne i 1968. Men selv i dag opfatter mange astronomer

sorte huller som ikke helt stuerene - den sædvanlige sprogbrug er stadig: "dette objekt er en troværdig sort hul kandidat", ikke: "dette objekt er et sort hul".



Figur 1. WATCH instrumentet vejer 11 kg og forbruger 12 W effekt. Det cirkulære gitter har en diameter på 25 cm og roterer under hele flyvningen med en omdrejning per sekund. Detektoren bag gitteret registrerer et lys- og skyggemønster hvis tidsforløb éntydigt angiver hvor røntgenkilderne befinder sig inden for synsfeltet.

Hvorfor er kompakte objekter så vigtige for forståelsen af røntgenstjernerne? Fordi energiudstrålingen per fladeenhed, ved de temperaturer som er nødvendige for termisk udstråling i røntgenområdet, er uhyrligt høj. Termisk udstråling vokser med 4. potens af temperaturen, så hvis man forestiller sig en stjerne af Solens størrelse med en temperatur på 10 000 000 K, i stedet for de faktiske ca 6000 K, ville udstrålingen langt overstige den totale udstråling fra alle andre stjerner i vores Galakse. Kun et meget lille objekt kan vedligeholde en overfladetemperatur på nogle millioner grader, og det endda kun, hvis objektet kan trække på energiressourcer der er fuldt sammenlignelige med hvad vi finder hos normale stjerner.

I det følgende skal vi omtale nogle af de modeller for røntgenstjerner som er resultatet af de sidste 30 års forskning indenfor røntgenastronomien.

Røntgenstjerner, som er i stand til at udsende stærk røntgenstråling over længere tid, har næsten altid vist sig at være dobbeltstjernesystemer (binære systemer) hvor en normal stjerne kredser om et meget kompakt objekt, f.eks.

en neutronstjerne eller et sort hul. Observerer vi systemet i synligt lys ser vi blot en normal stjerne, som går i bane omkring et massivt objekt. Dette er normalt usynligt med almindelige kikkerter. Røntgenstrålingen kommer ofte fra en glødende skive af gas, der cirkulerer omkring det kompakte objekt. En sådan skive udviser kraftig differentiell rotation; de inderste dele roterer langt hurtigere end de yderste (Keplers 3. lov). Den indre friktion i skiven kan, specielt meget nær det kompakte objekt, opvarme gassen til en temperatur på mange millioner grader, og den frigivne energi bliver så udstrålet i røntgenområdet. Skiven får stadig tilført nyt stof fra den normale stjerne, og stoffet i skiven falder gradvis ind mod det kompakte objekt og opsuges. Det er således fra tyngdefelterne omkring de kompakte objekter at de binære røntgenstjerner henter deres energi. Den glødende gasskive ses kun dårligt i synligt lys fordi den er meget lille, kun få hundrede km i diameter.

Om neutronstjerner og sorte huller.

En "standard" neutronstjerne har en radius på cirka 10 km og en masse lidt større end solens. Den gravitationelle bindingsenergi for atomer på overfladen af en neutronstjerne er ca 10% af atomets hvilemasse. Det er altså den energimængde der frigøres når atomerne regner ned på stjernens overflade. Til sammenligning kan det bemærkes, at den kerneenergi der frigøres ved fusion af heliumkerner til kul og ilt er under 1% af hvilemassen.

I modsætning til neutronstjernen har et sort hul ikke nogen fast overflade, men dets fysiske udstrækning karakteriseres af den såkaldte Schwarzschild-radius, som er proportional med hullets masse. Området indenfor Schwarzschild-radius kan ikke kommunikere med omverdenen, dvs her går "grænsen" for det sorte hul. Et sort hul på 5 solmasser har en Schwarzschild-radius på 15 km. Når stof opsluges af et sort hul frigives en endnu større brøkdel af hvilemassen end tilfældet er for neutronstjerner.

Hvis det kompakte objekt i det binære system er en neutronstjerne med et magnetfelt af størrelsen 10^8 Tesla, vil dette felt kunne forhindre opsamlingsskiven i at nå helt ned til neutronstjernens overflade. I en vis afstand fra overfladen vil de magnetiske kræfter være stærke nok til at tvinge det indfaldende ioniserede stof til at følge feltlinierne, således at stoffet herfra ledes ned mod neutronstjernens magnetiske poler. Det bliver i så fald ved polkalotterne, snarere end ved skivens inderkant at hovedparten af den potentielle energi omsættes til varme. Et sådan system udviser ofte karakteristiske pulsationer i røntgensignalet, disse skyldes at de glødende polkalotter periodisk roterer om på bagsiden af neutronstjernen.

Fra binære røntgenstjerner ser vi ofte hurtige og voldsomme udsving i lysstyrken; mængden af stof der

overføres fra den normale stjerne kan variere, der kan opstå hvirvler i det cirkulerende stof og der optræder ikke sjældent formørkelser, hvor det kompakte objekt med sin lysende gasskive forsvinder om bagved den normale stjerne. Svingningerne i røntgenstjernernes lysstyrke kan således give mange oplysninger om forholdene omkring neutronstjerner og sorte huller.

Helt ekstreme variationer i lysstyrken udvises af kilderne til de såkaldte kosmiske gammaglimt. (Se Holger Pedersens artikel herom i KVANT 1994 no 1) Det har været et hovedformål med WATCH projektet at foretage hurtige positionsbestemmelser af kosmiske gammaglimt for at muliggøre eftersøgning af optiske modparter til kilderne kort tid efter at gammaglimtet er observeret.

WATCH – detektoren

WATCH detektoren er vist på figur 1. WATCH er følsom for røntgenkvanter med energier mellem 9 og 150 keV. I dette energibånd er det ikke muligt at benytte linser eller spejle som vi kender det fra almindelige optiske kikkerter. Den eneste type kamera, der er anvendelig her, er en form for hulkamera eller skyggekamera. WATCH opbygger et billede af himlen ved hjælp af et roterende gitter. Synsfeltet har en åbning på 130° og dækker således ca en fjerdedel af hele himlen. Indenfor synsfeltet kan vi ved hjælp af det lys-og-skygge mønster, "modulationsmønster", der fremkaldes af det roterende gitter, bestemme positionen af klare røntgenstjerner med en nøjagtighed på ca $1/3^\circ$. Gitteret roterer med én omdrejning per sekund, så selv meget kortlevende røntgenudbrud, f.eks. fra gammaglimt, kan stedbestemmes.

Tællehastigheden for et WATCH instrument er typisk ca 500 røntgenkvanter per sekund. Størstedelen af kvanterne stammer fra den diffuse baggrund af røntgenstråling i rummet. Signalet fra kilderne udgør normalt kun nogle få procent af baggrunden. Dette ændrer sig fuldstændigt under et gammaglimt, her kan tællehastigheden fra en enkelt kilde stige til mange tusind per sekund.

WATCH instrumenter har været fløjet på to satellitter. Den første var den russiske satellit, GRANAT, den anden var ESA-satellitten, EURECA. GRANAT blev opsendt i 1989 med fire WATCH instrumenter om bord, satellitten fungerer stadig, omend reserveparterne af styregas næsten er opbrugt. EURECA er en "genbrugssatellit", beregnet til flere flyvninger med udskiftelig instrumentlast. Den første EURECA mission varede 11 måneder fra juli 1992 til juni 1993. EURECA bliver opsendt og bjerget igen med den amerikanske rumfærge.

Mængden af data vi kan transmittere fra WATCH er ganske lav, kun ca 40 bits per sekund fra hver af de fire instrumenterne på den russiske GRANAT satellit og 100 bits per sekund fra det enlige instrument på EURECA satellitten. Det er derfor nødvendigt at foretage en omfattende databehandling og -kompression i instrumenterne. Den følgende beskrivelse illustrerer datafangsten på EURECA. Under rolige forhold transmitteres billeder af himlen (modulationsmønstre) i tre energibånd

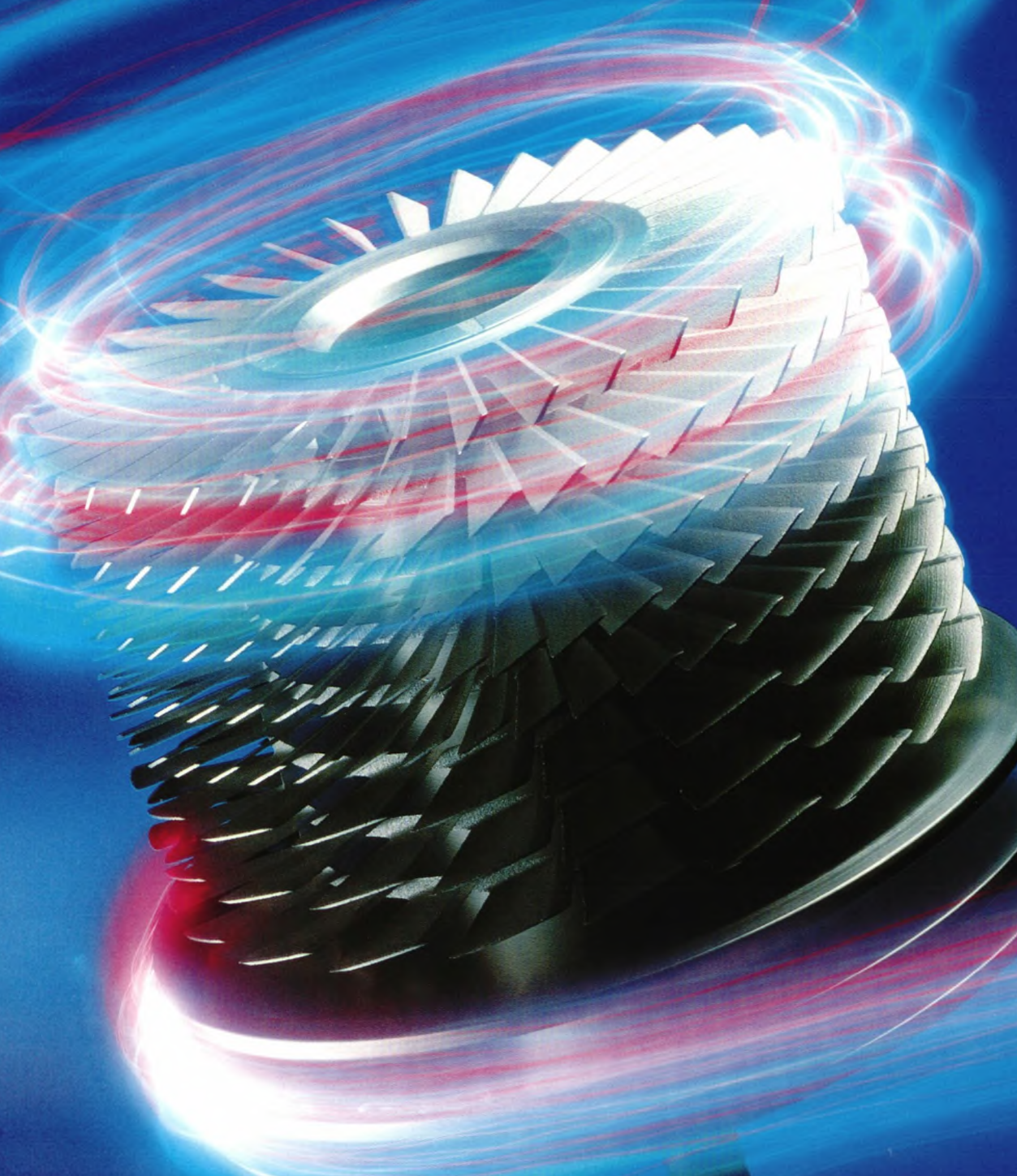
Varian
Absolut
Central
Utrættelig
Uovervindelig
Mega



Producent af
UHV og HV pumper
Megget bredt udvalg af UHV og HV fittings
Præcisions vacuum måleinstrumenter
En seriøs samarbejds partner
Rekvirer brochure hos:

AAGE CHRISTENSEN A/S
SKELMOSEVEJ 10
2500 VALBY

TELEFON 36 44 24 44
TELEFAX 36 44 20 24



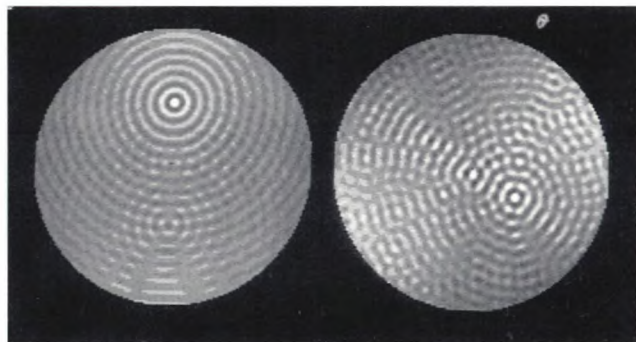
varian 

hvert minut. Desuden transmitteres tællehastigheden, også i tre energibånd, med en tidsopløsning på nogle sekunder. Når der registreres et gammaglimt opsamles data med bedre tidsopløsning i en hukommelse, disse data transmitteres så i et roligt tempo når glimtet er overstået.

Når satellitten passerer de bæltet af intens partikelstråling, der er fanget i Jordens magnetfelt, stiger tællertallet voldsomt, og vi må afbryde målingerne indtil tællertallet igen er faldet til et mere normalt niveau.

Data fra GRANAT satellitten blev modtaget på en jordstation på Krim, herfra blev de hentet til Moskva og København med kurer. For at kunne foretage en hurtig dataanalyse var den nødvendigt selv at være til stede på jordstationen, kurerforbindelsen til København kunne til tider være meget langsom.

I sammenligning hermed var dataforsendelsen fra EURECA ekstremt effektiv. Alle data fra EURECA sendtes først til ESA's kontrolcenter i Darmstadt i Tyskland, herfra kunne vi efter ca en halv time hente dem via de internationale datanetværk. Hver dag blev de nye data analyseret for at kontrollere aktiviteten af de kendte røntgenkilder og for at se om nye kilder var dukket op.



Figur 2. To billeder af himlen baseret på ca 8 timers observation med WATCH-GRANAT. Billedet til venstre viser en meget stærk røntgenkilde, Sco X-1, i stjernebilledet Skorpionen. De koncentriske cirkler omkring kildens position er en karakteristisk ulempe ved denne type af skyggekamera. På grund af dette ringmønster er det ikke muligt, umiddelbart, at afgøre om der overhovedet er andre kilder i billedet. På billedet til højre er signalet fra Sco X-1 blevet subtraheret, og nu kommer en ny kilde frem: Cyg X-1, i stjernebilledet Svanen. Denne proces kan gentages nogle få gange mere før stjernen i restbilledet bliver for stærk.

Figur 2 viser et billede af himlen som WATCH registrerer det. Det ses at signalet fra en enkelt stærk kilde forårsager forstyrrelser over hele billedfeltet. Det er prisen for det meget simple detektorprincip, uden en egentlig billeddannende detektor. Vi opbygger et billede dækkende en fjerdedel af himlen på basis af et modulationsmønster med blot 256 målepunkter. Det må naturligvis gå galt! Fordelen er, at vi er i stand til hurtigt

at lokalisere den stærkeste punktkilde indenfor synsfeltet med en nøjagtighed på under en grad ud fra en minimal datamængde. Vi kan godt studere mere end én kilde ud fra et givet mønster. Analysen foretages så som en stadig gentaget proces: først findes positionen og styrken af den kraftigste kilde, så subtraheres det tilsvarende signal fra det samlede mønster, og restmønsteret analyseres igen for at se om der er flere kilder. På denne måde er det ofte muligt at identificere fire-fem kilder i et mønster.

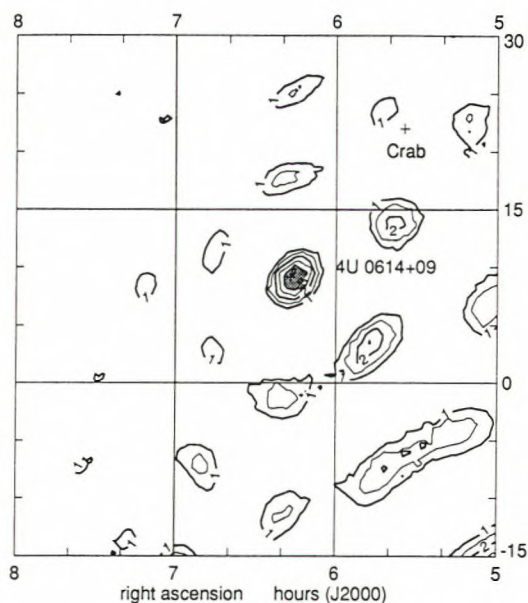
De svagere kilder træder først klart frem efter længere tids observation. For at studere disse kilder må vi derfor addere data fra mange dage, og her må vi naturligvis tage hensyn til at satellitten drejer sig i rummet, således at stjernerne flytter sig indenfor vores synsfelt.

Resultater

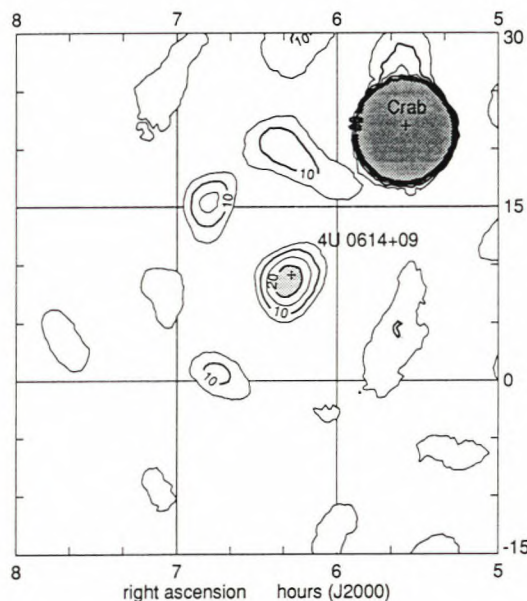
I det følgende vil vi hovedsageligt omtale resultater opnået med WATCH instrumentet på EURECA. I de første måneder efter opsendelsen var WATCH rettet mod de centrale områder i vores Mælkevej. Dette var et lykkeligt tilfælde, for EURECA's orientering i rummet er dikteret af andre forhold end vore observationsønsker, specielt nødvendigheden af at få sollys på solpanelerne. Mælkevejens centrum er meget interessant for os, fordi der her findes særligt mange røntgenstjerner, både stabile og tidsvariable.

På Kvants forside er gengivet to himmelkort omfattende de centrale dele af vores Mælkevej. Kortene er opbygget på basis af data fra EURECA-WATCH fra perioden august til oktober 1992. Det øverste kort viser røntgenhimlen ved lave energier: 8-15 keV. Det nederste kort svarer til højere energier: 15-150 keV. Bemærk hvordan flertallet af røntgenkilderne samler sig omkring Mælkevejens plan. Bemærk også hvor forskellige kilderne er i henseende til energifordelingen i strålingen. De fleste kilder har et "blødt" spektrum, dvs. de taber meget hurtigt i styrke når vi bevæger os opad på energiskalaen. Undtagelserne er den stærkeste røntgenkilde i Cygnus (Cyg X-1, et formodet sort hul), den ejendommelige røntgentransient GRS 1915+10 (omtalt nedenfor) samt en kilde nær Mælkevejens centrum (formodentlig også et sort hul).

I den periode vi observerede Mælkevejens centrum blev fem nye røntgenkilder observeret, disse har fået navne som: "EU 1841-40", hvor EU står for EURECA, og tallene angiver kildens position på himlen: rektascension 18 timer 41 minutter, deklination -40° . WATCH registrerede også usædvanlig kraftig variation af flere af de kendte røntgenkilder. I dagene umiddelbart før opsendelsen af EURECA var en ny, stærk røntgenkilde, blevet opdaget med WATCH instrumenterne på GRANAT satellitten. Denne kilde, kaldet GRS 1915+10, var så heldigt placeret på himlen at WATCH-EURECA kunne følge den kontinuert i mere end tre måneder fra begyndelsen af august 1992. Desværre lykkedes det ikke i første omgang, trods en stor indsats med optiske teleskoper på Jorden, at finde den tilsvarende optiske stjerne, da den



Figur 3. WATCH himmelkort af et område på $45^\circ \times 45^\circ$ omkring 4U 0614+09 kilden. Billedet rummer ialt 3 minutters data fra 3 røntgenglimt i foråret 1993.



Figur 4 Himmelkort af samme område som Fig. 3, men baseret på cirka 3 måneders observationer. Den meget stærke kilde er Krabbetågen (Crab), men også 4U 0614+09 træder frem som en permanent kilde med en styrke svarende til 2.5% af Krabbetågens.

tilsyneladende ligger skjult bag nogle af de tætte støvskyer som der er mange af i Mælkevejen. Men senere er en meget interessant variabel radiokilde, tilsyneladende med nogle meget usædvanlige radiojets blevet fundet i samme retning.

Røntgen udbrud fra 4U 0614+09

Nogle røntgenkilder udviser kortvarige, men kraftige, udbrud af røntgen stråling (røntgenglimt). Intensiteten vokser måske 1000 gange nogle få sekunder. Strålingen falder så til det normale i løbet af cirka et minut. Intervallet mellem de kraftige udbrud kan variere fra under en time til flere uger.

I modsætning til de mystiske gammaglimt er disse røntgenglimt relativt velforståede. Kilderne til røntgenglimt er altid neutronstjerner i kredsløb om en let stjerne med masse omtrent som Solens. Neutronstjernens magnetfelt skal være lavt, hvilket for neutronstjerner vil sige mindre end 10^4 Tesla. I sådanne tilfælde kan der opstå en instabilitet i det tynde lag af stof som neutronstjernen har opsamlet fra sin makkerstjerne. Under opsamlingen forbrændes de indfaldende brintkerner løbende til helium. Når dette lag af helium opnår en kritisk tykkelse sker der en eksplosivt forløbende omdannelse til tungere grundstoffer. Denne eksplosion observerer vi som et glimt af røntgenstråling.

De fleste kendte kilder til røntgen glimt i vores Mælkevej er lokaliseret omkring Mælkevejens centrum. WATCH detektoren er ikke følsom nok til at observere røntgen glimt fra så fjerne kilder. (ca. 30000 lysår herfra). Imidlertid har vi opdaget fire glimt fra en gammelkendt røntgenkilde, 4U 0614+09, der ikke tidligere var sikkert

identificeret som kilde til røntgenglimt. Styrken af disse udbrud gør det sandsynligt at 4U 0614+09 er den nærmeste kendte glimtkilde i en afstand mindre end 10000 lysår. Det første udbrud blev observeret med WATCH-GRANAT i januar 1990, og det var en af de første rigtigt interessante begivenheder efter at WATCH var blevet "køreklar" tidligere samme måned. Stedbestemmelsen af kilden med en nøjagtighed bedre end 1° gjorde det ganske sikkert at udbruddet kom fra 4U 0614+09. Denne var nemlig, indenfor vores fejlcircel, den eneste permanente røntgenkilde der var stærk nok i sin konstante udstråling til at udsende et røntgenglimt af den observerede styrke. De tre øvrige udbrud fra denne kilde blev alle observeret med WATCH på EURECA indenfor cirka en måned i foråret 1993. Se figur 3.

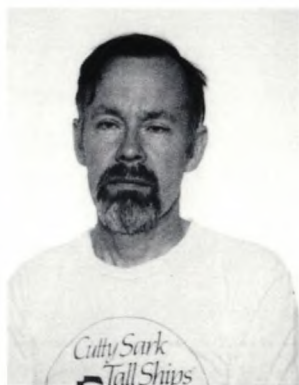
Med WATCH-EURECA var det også muligt at observere den permanente udstråling fra 4U 0614+09 som vist i figur 4. Vi kan bruge de 3 glimt til at illustrere energiregnskabet i den model, der er skitseret ovenfor. Vi vil sammenligne energien i den permanente udstråling og energien i glimt. Dette forhold skal nemlig svare til forholdet mellem den gravitationelle bindingsenergi på overfladen af en neutronstjerne og energien vundet ved kerneforbrænding af helium i det opsamlede overfladelag. Et problem i analysen er dog at vi ikke kunne observere kilden kontinuert med WATCH. EURECA var i et lavt (620 km) kredsløb om Jorden, og Jorden dækkede derfor udsynet en periode hvert omløb. Observationerne blev også fra tid til anden afbrudt af satellittens passager gennem strålingsbælterne. Derfor kan der have været udbrud, som vi ikke observerede, men vi kan bruge simple statistiske argumenter. Kilden var i synsfeltet fra midten af jan-

uar til slutningen af april '93 og med en effektivitet på ca. 40% svarer det til 40 dages observationstid. Derfor er den gennemsnitlige tid mellem to udbrud ca. 14 dage, hvilket faktisk svarer til intervallet mellem de observerede udbrud. Så måske har vi ikke mistet nogle udbrud imellem dem vi så. Hvis vi antager det, så bliver forholdet mellem den permanent udstrålede energi over en 14 dages periode og energien i et glimt cirka 100. Det svarer ganske nøje til, at den gravitationelle energi frigjort ved stoffets nedfald på neutronstjernens overflade er cirka 100 gange større end den frigjorte kerneenergi ved forbrænding af helium til kul og ilt.

Har WATCH en fremtid?

Der arbejdes til stadighed på at fremstille bedre detekortyper, så ethvert instrument bliver før eller siden overhalet af udviklingen. I dag er det muligt at oplagre langt

flere data ombord i satellitterne end for ti år siden, og det giver muligheder for at bygge vidvinkelkameraer med bedre følsomhed end WATCH. Så vi skal nok ikke forvente at se WATCH flyve igen ombord på en ny satellit. Men måske beslutter ESA at flyve EURECA igen, og det kan måske give WATCH en ny chance, fordi instrumentet kan gøres flyveklar med en begrænset arbejdsindsats. WATCH har dog egenskaber som stadig gør den konkurrencedygtig i forbindelse med mikrosatellitter. Mikrosatellitter er ofte spinstabiliseret, dvs. de udnytter gyroskopvirkningen til at bevare en stabil stilling i rummet; det er en simpel og effektiv metode. De nye typer vidvinkelkameraer bliver rundtossede af at sidde på sådan en platform, men WATCH har det fint, instrumentet kan ligefrem forenkles i forhold til dem, vi har fløjet på GRANAT og EURECA. Så helt skal vi måske ikke lægge WATCH på hylden.



Niels Lund er mag.scient i fysik og ansat på Dansk Rumforskningsinstitut. Har interesseret sig for sammensætningen af den kosmiske stråling og røntgenastronomi.



Søren Brandt er Ph.D i astronomi fra KU 1994 på arbejde med røntgendata fra WATCH. Efter en ansættelse ved DRI arbejder han nu som research fellow ved European Space Technology Center i Holland.

Solskælv, en kilde til viden om Solens indre

Jørgen Christensen-Dalsgård

Indledning

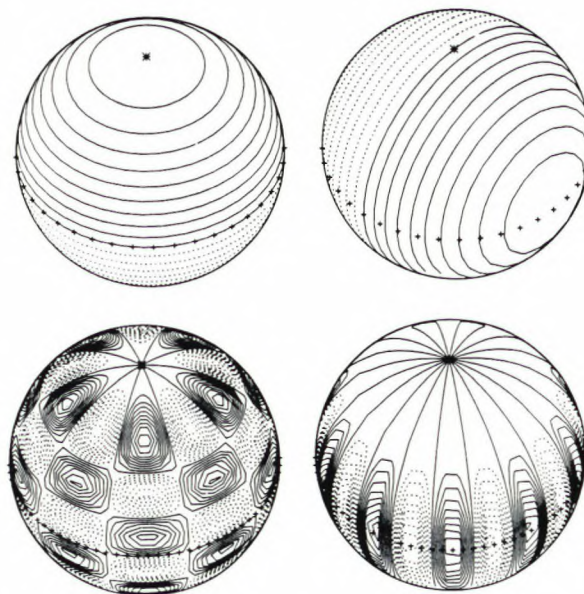
Observationer af Solens overflade viser et væld af komplicerede fænomener. Mange af dem er kontrolleret af kraftige magnetfelter, der varierer over en 11-års cyklus. Andre af Solens fænomener er mindre iøjnefaldende. Det mest slående er måske udsendelsen af en tæt strøm af neutrinoer, elementarpartikler der bliver produceret ved kernereaktioner Solens indre; disse partikler kan detekteres på Jorden, men i et antal der er markant lavere end det teoretisk forudsagte. For at forstå disse fænomener, og bestemme hvor Solens udstrålede energi kommer fra, må vi kende forholdene i Solens indre; herved får vi også en nøgle til forståelse af struktur og udvikling af andre stjerner.

Direkte betragtning af Solen fortæller ikke umiddelbart noget om, hvad der ligger under Solens overflade. En nøjere analyse af lyset fra Solen viser dog meget regelmæssige svingninger af soloverfladen, med perioder fra 3 til 15 minutter. Gennem observation over mange måneder kan svingningernes frekvens måles med stor nøjagtighed. Disse frekvenser er bestemt af forholdene i Solens indre. De kan analyseres med teknikker, der minder meget om de metoder som geofysikere bruger til at studere svingninger fra jordskælv; resultatet er en bestemmelse af lydhastighed, massefylde og rotationshastighed i Solens indre. Dette forskningsfelt, der er udviklet inden for de sidste 10 – 15 år, kaldes *helioseismologi* (af det græske ord *helios* for Solen).

Eksisterende observationer har allerede givet væsentlig ny viden. Målinger af forholdene nær Solens centrum har stort set forkastet de hidtidige forslag til forklaring af det lave antal observerede neutrinoer ud fra egenskaber ved Solen. Bestemmelse af Solens indre rotation har lagt kraftige bånd på modeller for Solens magnetiske aktivitet. I de kommende år vil nye omfattende eksperimenter give en meget kraftig forbedring af observationerne. Satellitten SOHO, der planlægges opsendt næste år, medbringer tre helioseismiske instrumenter; et af disse vil foretage målinger, der svarer til opstilling af 700 000 seismografer på Solens overflade. SOHO vil blive placeret i en bane hvor Solen kan observeres uden afbrydelser. Med denne satellit vil vi få hidtil uset nøjagtig information om Solens indre. Det vil give ny viden om stjerners udvikling og om de fysiske forhold i stjernernes indre. Fra dansk side har der været aktiv medvirken i udviklingen af disse projekter, specielt i forbindelse med forberedelse af analysen og fortolkningen af observationerne. Danske astrofysikere vil derfor få rig lejlighed til at deltage i arbejdet med de meget omfattende data, der kan forventes inden for de næste par år.

Solsvingninger

Fysisk set er solsvingningerne meget lavfrekvente stående lydbølger. Opførslen af svingningerne hen over Solens overflade udviser bestemte bølgemønstre, svarende til kuglefunktioner Y_l^m , bestemt af graden l (det totale antal knudelinier) og den azimuthale orden m (hvor mange knudelinier der skærer polerne). Figur 1 viser nogle eksempler på sådanne kuglefunktioner. På Solen observeres en lang række forskellige opførsler, fra kuglesymmetriske svingninger, hvor hele overfladen udvider sig eller trækker sig sammen (svarende til $l = 0$) til svingninger med bølgelængder på nogle få tusinde kilometer (og l på flere tusinde).

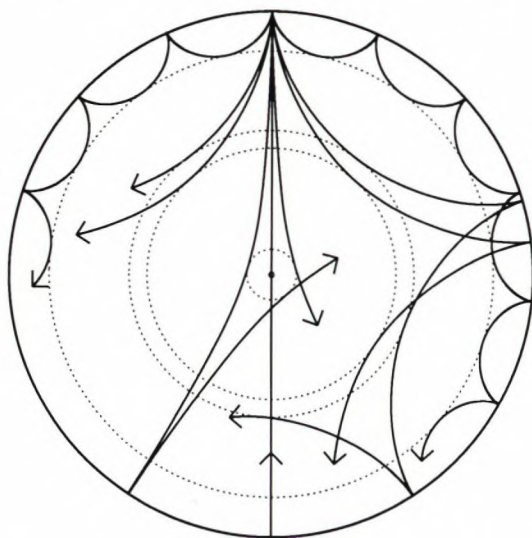


Figur 1. Kuglefunktioner der illustrerer opførslen af enkelte svingninger hen over Solens overflade. Positive udsving er markeret med fuldt optrukne konturer, negative med stiplede. Ækvator er angivet med krydser. de viste eksempler har grad l og orden m givet ved $(l,m)=(1,0),(1,1),(10,5)$ og $(10,10)$.

Svingningernes frekvenser giver information om Solens indre. For at forstå sammenhængen mellem frekvenserne og Solens struktur må vi betragte svingningernes opførsel. Solsvingningerne er analoge til de stående lydbølger i en orgelpibe. Ligesom orgelpiben har toner med bestemte frekvenser, afhængig af pibens længde, har solsvingningerne bestemte frekvenser, der afhænger af, i hvilket område af Solen svingningen udbreder sig. I Solen, som i orgelpiben, kan forekomme både grundsvingningen og overtoner; disse karakteriseres, for givet l og m , ved den radiale orden n .

I en orgelpibe skabes lyden af bevægelsen af den luft, der bliver blæst ind i piben. Det danner "støj"

med alle frekvenser og dermed bølgelængder; men kun for frekvenser svarende til bølgelængder, der passer til orgelpibens længde, sker der konstruktiv interferens, således at lydbølgen forstærker sig selv og danner en stående bølge. I Solen forekommer der gasbevægelser i de yderste ca 30 procent af Solens radius. Denne såkaldte konvektion, hvor varme gasmasser stiger til vejrs og kold gas synker ned, er ansvarlig for transporten af energi i den ydre del af Solen. Når Solens overflade når konvektionen hastigheder der er sammenlignelige med lydhastigheden; sådanne gasbevægelser er meget effektive til at generere lyd. Lydbølgerne udsendes i alle retninger og med alle frekvenser, men kun bølger med bestemte retninger og frekvenser kan danne stående bølger og bliver dermed til de observerede svingninger.



Figur 2. Udbredelsen af lydbølger i Solen. Da lydhastigheden vokser med dybden, bliver bølgerne afbøjet når de trænger ind i Solen. For en given bølge er der derfor en grænse (markeret med en stiplede cirkel) for hvor dybt bølgen når ind i Solen. En svingning af Solen er en stående bølge af denne art. Figuren viser to bølger, der når ind til lidt forskellig dybde; noget simplificeret udtrykt giver forskellen i de tilsvarende svingningers frekvenser information om det område, der ligger mellem de to tilsvarende stiplede cirkler.

Hvilke svingninger, der kan observeres, er derfor bestemt af udbredelsen af lydbølger i Solen. Her er det afgørende, at lydhastigheden vokser med temperaturen og dermed bliver større når man går ind i Solen. En lydbølge, der starter ved Solens overflade og bevæger sig indad, kommer til områder med højere lydhastighed. Som vist på Figur 2 afbøjes den derved og bliver til sidst vendt rundt og sendt tilbage mod Solens overflade. Her falder lydhastigheden brat, og det fører også til refleksion. Resultatet er, at lydbølgen udbreder sig i hop mellem Solens overflade og et niveau i Solens indre, det såkaldte *vendepunkt*, hvor bølgen bevæger sig vandret. Hvis bølgerne har den rette bølgelængde og frekvens, kan de forstærke hinanden og danne en stående bølge, ganske svarende til den stående bølge i en orgelpibe. Disse stående bølger observeres som svingninger af solover-

fladen.

Vendepunktets dybde afhænger af bølgens oprindelige retning ved Solens overflade: hvis denne retning er meget skrå, når bølgen ikke langt ned inden den bliver vendt om; den vil kun bevæge sig et lille stykke vandret, inden den når tilbage til overfladen, og svarer derfor til en svingning med lille bølgelængde. På den anden side kommer en bølge, der bevæger sig næsten lodret ved overfladen, meget langt ned inden den bliver vendt om, og den bevæger sig langt i vandret retning, inden den vender tilbage til overfladen; den svarer derfor til en svingning med stor bølgelængde. Bølger, der bevæger sig lodret, bliver ikke afbøjet og bevæger sig derfor gennem Solens centrum til overfladen på den modsatte side. De svarer til de kuglesymmetriske svingninger.

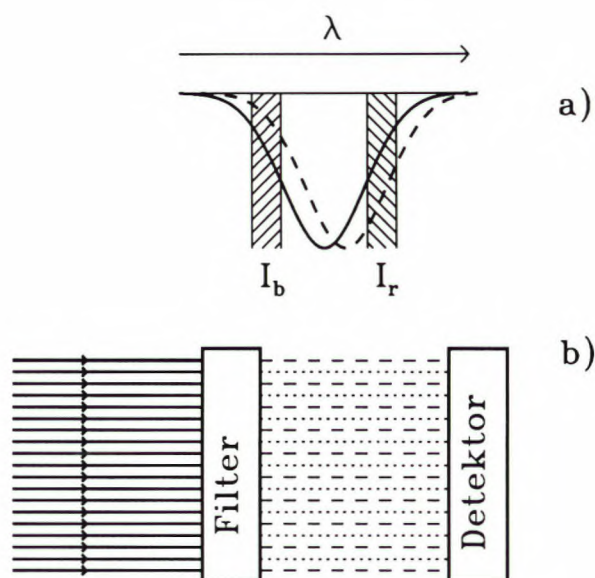
For at forstå princippet i anvendelsen af de målte frekvenser til at bestemme forholdene i Solens indre, kan vi betragte to svingninger, hvis vendepunkter ligger i lidt forskellig dybde (se Figur 2). Den ydre del af Solen er fælles for de to svingninger og påvirker derfor frekvenserne af begge svingninger; men området mellem de to vendepunkter har kun en effekt på den svingning, der trænger dybest ind. Ved at sammenholde frekvenserne af de to svingninger får man altså noget at vide om dette område. Observation af svingninger med vendepunkter, der varierer fra nær Solens overflade til nær centrum, giver derfor information om, hvordan forholdene i Solen afhænger af positionen.

Ud over de stående lydbølger har Solen mulighed for en anden type svingninger, nemlig stående indre tyngdebølger. Bølger er karakteriseret af den kraft, der forsøger at bringe stoffet i ligevægt. For lydbølger er dette den trykkraft, der opstår på grund af lokal kompression eller fortynding af gassen. Tyngdebølger (der ligner bølger på en vandoverflade) forårsager buler i lag med forskellig tæthed, og det er tyngdekraften på stoffet i disse buler der bringer stoffet tilbage mod ligevægt. Tyngdebølgerne vil have perioder der er en størrelsesorden længere end lydbølgerne. Det er endnu usikkert om sådanne svingninger rent faktisk er til stede i Solen; specielt er det uklart hvad der i givet fald skulle sætte dem i gang. Hvis de kan observeres vil det være af stor betydning for helioseismologien; for deres frekvenser er meget følsomme over for forholdene i Solens dybe indre, som kun vanskeligt kan studeres med de indtil nu observerede lydbølger.

Observation af solsvingninger

Svingningerne af Solen kan observeres ved at måle bevægelsen af Solens overflade. Det foregår som oftest i praksis ved hjælp af Doppler-effekten. Det er illustreret skematisk på Figur 3. Solspektret er afbrudt af skarpe mørke spektrallinier, der skyldes, at atomer i solatmosfæren absorberer lys ved bestemte bølgelængder, svarende til overgange mellem energiniveauer i atomerne. Når gassen bevæger sig imod eller væk fra iagttageren, forskydes spektrallinierne mod kortere eller længere bølgelængder. Det er illustreret på figuren, der viser fordelingen

af intensitet i en spektrallinie; den stiplede kurve angiver effekten af en bevægelse væk fra iagttageren. Lyset fra Solen sendes igennem et filter, der skiftevis lader lys fra snævre bølgelængdeområder (markeret som skraverede intervaller) på de to sider af en spektrallinie passere. De to lysintensiteter måles i hvert punkt på Solen med et kamera. Forskellen i intensitet ændres, når spektrallinien forskydes, og giver dermed et mål for hastigheden. Ved at optage en lang række hastighedsbilleder af denne art kan man finde ud af, hvordan hastigheden i hvert punkt på Solens overflade varierer med tiden.

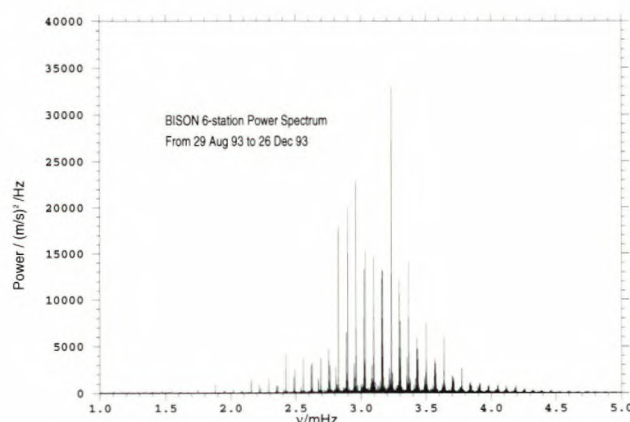


Figur 3. (a) viser princippet i måling af Doppler-hastigheden. Kurverne illustrerer intensitetsfordelingen i en spektrallinie i solspektret, som funktion af bølgelængden λ . Når det område, hvor lyset kommer fra, bevæger sig væk fra iagttageren, forskydes spektrallinien til den stiplede kurve. I de to skraverede bølgelængdeintervaller måles intensiteterne I_b og I_r . Forskydningen af linien ændrer forholdet $(I_b - I_r)/(I_b + I_r)$; dette forhold er altså et mål for forskydningen og dermed hastigheden. Som vist nedenfor kan målingen foretages ved hjælp af et filter, der skiftevis slipper lys svarende til I_b (stiplede linier) og I_r (prikkede linier) igennem. Lysintensiteten måles af en detektor, der kan bestemme intensiteten samtidigt i et stort antal punkter (i praksis bruges oftest en såkaldt CCD detektor); herved får man den øjeblikkelige hastighed overalt på solskiven.

Det observerede hastighedsbillede indeholder en overlejring af alle de forskellige mulige bevægelsesmønstre, svarende til de forskellige kuglefunktioner, og viser ikke umiddelbart nogen klar struktur. Ved en passende analyse kan man isolere nogle få kuglefunktioner ad gangen. Fourier-analyse af dette signal som funktion af tiden giver derefter et spektrum, hvor de enkelte svingninger kan adskilles og deres frekvenser bestemmes. Figur 4 viser et eksempel på et sådant spektrum, svarende til svingninger med meget lave grader.

De enkelte svingninger har hastigheder op til ca 10

cm/sek, svarende til udsving af soloverfladen på nogle få meter. De mest følsomme målinger har observeret hastigheder på nogle få mm/sek. Det er klart, at observation af så små effekter stiller store krav til den anvendte observationsteknik. Desuden skal de detekterede signaler sammenholdes med, at der i solatmosfæren forekommer hastigheder på flere hundrede m/sek, forårsaget af konvektionen. At svingningerne alligevel kan detekteres skyldes at de er uhyre regelmæssige: deres faser er stabile over uger eller måneder. I modsætning hertil har de andre fænomener en tilfældig natur, både hen over soloverfladen og som funktion af tiden. Ved at kombinere observationer foretaget over hele Solens overflade, og over flere måneder, undertrykker man de tilfældige fænomener, således at svingningerne træder frem.



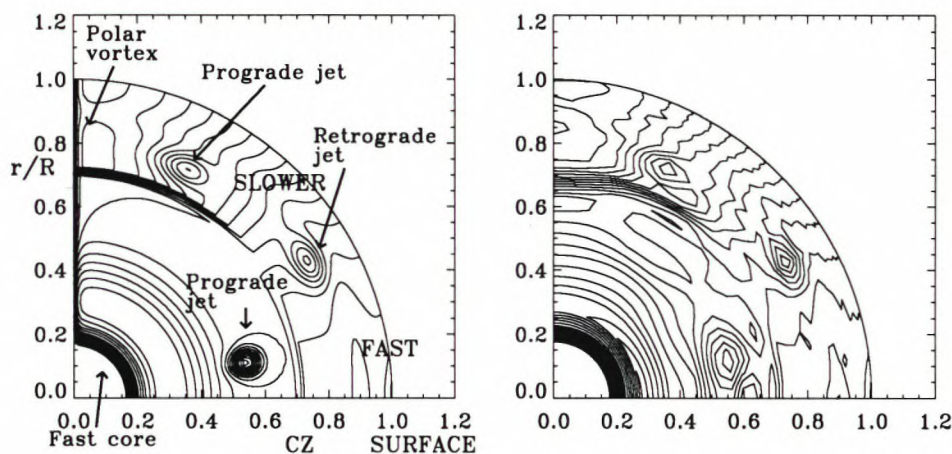
Figur 4. Spektrum af solsvingninger observeret ved hjælp af Doppler-effekten målt i lys fra hele solskiven. Målingerne stammer fra et netværk af observatorier fordelt rundt om Jorden. Hver top svarer til en enkelt svingning.

Afbrydelser i observationerne giver problemer i analyse; hvis der er et hul i observationsserien kan man, groft sagt, ikke afgøre hvor mange gange Solen har svinget i det tidsrum, hvor observationerne var afbrudt, og det giver en ubestemthed i den målte frekvens. Specielt er det et problem at observationer fra et givet sted på Jorden bliver afbrudt når Solen går ned.

Det er også muligt at studere svingningerne ved at observere dem som fluktuationer i lysintensiteten hen over solskiven. Her er effekten igen uhyre lille: hver svingning forårsager variationer i intensiteten af størrelsesordenen nogle få milliontedele. Ikke desto mindre har det været muligt at foretage nøjagtige observationer af denne art, specielt fra Solar Maximum Mission og den russiske Phobos sonde der blev sendt til Mars i 1988.

Hvad kan vi lære af de observerede frekvenser?

Solsvingningerne har givet os mulighed for at tage temperaturen på Solens indre. Uden svingningsobservationerne ville vores information om forholdene i Solen stort set



Figur 5. Test af metoder til bestemmelse af Solens indre rotation. Panel (a) viser en kunstig rotationsprofil i Solens indre, illustreret ved et konturplot i et tværsnit af Solen (kun en fjerdedel af Solen er vist; rotationen kan antages at være symmetrisk omkring ækvator). Konturerne angiver rotationsfrekvensen i nanoHz, valgt sådan at overfladeværdierne svarer til den observerede overfladerotation. I rotationsprofilen er inkluderet en række fænomener, der kunne tænkes at være tilstede i Solen, specielt tre "jets", det vil sige lokaliserede områder med særlig hurtig eller langsom rotation. Ud fra rotationsprofilen kan man beregne svingningsfrekvenser og, for at simulere realistiske observationer, inkludere "støj" beregnet som tilfældige tal med en passende fordeling. Panel (b) viser resultatet af en analyse af sådanne kunstige data, med et støjniveau svarende til hvad man kan forvente, f.eks., fra observationer fra SOHO over ét år.

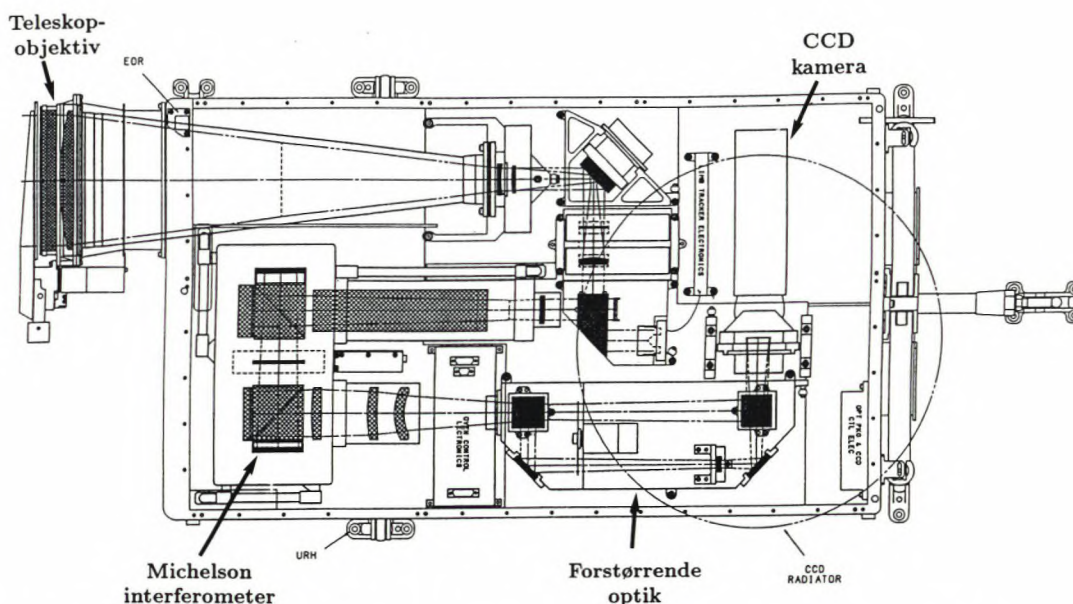
være baseret på teoretiske modeller. Beregningen af en sådan model udnytter, at man ud fra fysikkens love kan finde de betingelser, der må gælde for forholdene i det indre af en stjerne som Solen. Det fører til ligninger, der kan løses numerisk; herved kan man beregne Solens indre struktur og følge dens udvikling fra den blev dannet. Modellen involverer bl.a. beskrivelser af tilstandsligningen for stoffet i Solen, af vekselvirkningen mellem stråling og stof, og af kernereaktioner, der indgår i sammensmeltningen af brint til helium, som er ansvarlig for Solens energiproduktion. Den resulterende solmodel giver en beskrivelse af hvordan f.eks. tryk og temperatur i Solen varierer fra centrum til overfladen. I beregningerne følger man specielt de ændringer i Solens struktur, der skyldes den gradvise omdannelse af brint til helium. Beregningerne siger, at Solen i sin nuværende alder, ca 4.5 milliarder år, har opbrugt omkring halvdelen af den brint, der er til rådighed for kernereaktioner.

Hvis modellen havde været en præcis beskrivelse af Solen, ville dens frekvenser naturligvis have været de samme som de observerede frekvenser. Det er ikke tilfældet; der refter forskelle som ganske vist er små (typisk under 1 procent), men dog langt større end målefejlen. Disse frekvensforskelle, der giver en indikation af fejlene i modellen, kan analyseres med teknikker oprindeligt udviklet i geofysikken. Da de observerede svingninger er stående lydbølger, er deres frekvenser overvejende følsomme over for lydhastigheden i Solens indre. Man kan derfor ud fra forskellene i frekvenser bestemme den korrektion, der skal lægges til modellens lydhastighed, for at få lydhastigheden i Solen. På den

måde er det muligt at bestemme lydhastigheden i det meste af Solens indre med en nøjagtighed på bedre end 0.1 procent. På den anden side viser forskellen, mindre end en procent, at moderne solmodeller er ganske gode. Da der er en nøje sammenhæng mellem lydhastighed og temperatur kan vi også konkludere, at temperaturen i modellen er tæt ved den korrekte temperatur i Solen. Dette er specielt påfaldende, fordi der i modelberegningen ikke er gjort noget forsøg på at tilpasse modellen til svingningsobservationerne. Vi har altså ad rent teoretisk vej, på grundlag af kendt fysik, været i stand til at reproducere forholdene i Solens indre med stor nøjagtighed.

Der er dog stadig forskelle mellem observationer og modeller, og der er derfor ihærdige anstrengelser i gang med at fortolke dem. Disse forskelle må afspejle fejl i de fysiske antagelser, der indgår i modellen. Det er ikke overraskende: i Solen er tryk, massefylde og temperatur så ekstreme at tilsvarende forhold ikke kan reproducere i et laboratorium; vores viden om stoffets egenskaber under disse forhold er derfor mangelfuld. Et vigtigt aspekt ved de helioseismiske undersøgelser er netop at de kan afprøve fysikkens love under forhold, der ikke kan opnås på Jorden. Da der er tale om meget små effekter i de observerede frekvenser, kræver dette dog mere nøjagtige og detaljerede observationer end vi har til rådighed i dag.

Solsvingningernes frekvenser afhænger også af gasbevægelser i Solens indre, herunder Solens rotation. Det er ikke svært at se, at frekvenserne påvirkes af rotationen. Betragt svingningen længst til højre på Figur 1; i en sådan svingning bevæger bølgemønsteret sig rundt om



Figur 6. Skematisk illustration af Michelson Doppler Imager instrumentet, der skal flyve med satellitten SOHO. Lyset kommer ind i instrumentet gennem objektivet øverst til venstre, efter først at have passeret et filter der eliminerer det meste af Solens lys og varme. Efter en refleksion sendes en lille del af lyset til en detektor der sørger for at holde billedet centreret. Resten passerer ind i det egentlige interferometer. Her isoleres den ønskede spektrallinie først. Dernæst definerer interferometret skiftevis de fire spektralområder der benyttes til at bestemme liniens position og dermed Dopplerhastigheden. Efter interferometret går lyset gennem optik der tillader observation af enten hele solskiven eller en del af den. Til slut rammer lyset CCD-kameraet, hvor intensiteten måles.

Solen. Hvis udbredelsen er i samme retning som Solens rotation, vil det se ud som om svingningen går hurtigere end hvis Solen ikke havde roteret, og dermed vil svingningen have en højere frekvens; en svingning, der bevæger sig i den modsatte retning, vil tilsyneladende have en lavere frekvens. Andre gasbevægelser, der fører svingningerne med sig, vil tilsvarende påvirke frekvenserne. Generelt er gasbevægelserne ikke uniforme; deres effekt på frekvensen for en given svingning er så en passende middelværdi, vægtet med svingningens amplitude i de forskellige dele af Solen.

Ved at observere et stort antal svingninger og udnytte svingningernes egenskaber, som beskrevet tidligere (se Figur 2), kan vi bestemme hvordan rotationen varierer med dybden. Det viser sig tilsvarende at være muligt at finde variationen med bredden i Solens indre. For at illustrere de muligheder, som kommende observationer fra SOHO vi give, er det nyttigt at anvende disse teknikker på kunstige data, beregnet for en model for Solens rotation. Da Solen er en kugle af gas kan den rotere med helt forskellige hastigheder i forskellige lag. Desuden kan man forvente at vekselvirkningen med gasstrømningerne i konvektionszonen vil påvirke rotationen. Vi ved fra andre eksempler på roterende konvekative systemer, specielt de store gasplaneter Jupiter og Saturn, at det kan føre til en særdeles kompliceret opførsel. Her betragter vi en model som indeholder sådanne komplikationer, for at undersøge om de vil kunne detekteres ud fra observationer af solsvingningerne. Den antagne rotationsprofil er vist på Figur 5a.

Figur 5b viser resultatet af at analysere frekvenser beregnet for denne profil for ca 200 000 enkelte svingninger; i de beregnede frekvenser er inkluderet "støj", skønnet ud fra de forventede egenskaber ved observationer foretaget, f.eks. fra SOHO. Det er klart at vi faktisk ud fra data af denne kvalitet vil være i stand til at se selv ret fine detaljer i Solens indre rotation.

Instrumenter på SOHO

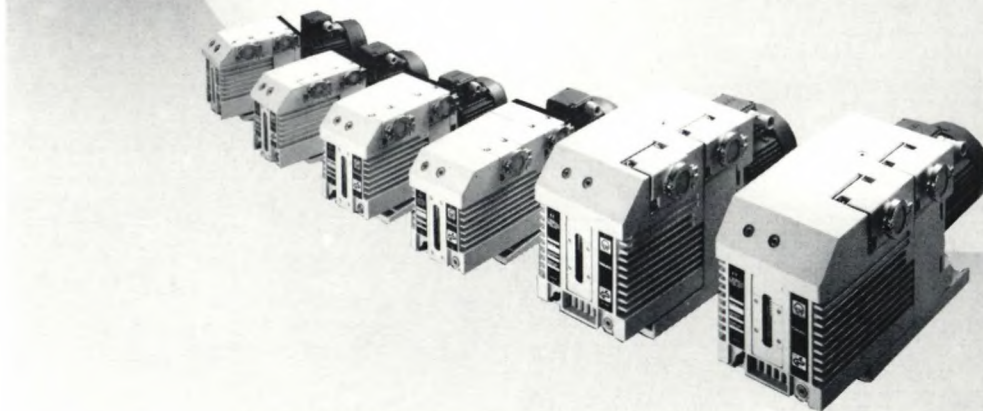
Vi har stort set nået grænsen for, hvad der kan opnåes fra enkelte observatorier på Jordens overflade: turbulensen i Jordens atmosfære forstyrrer observationerne, og observationer fra et enkelt sted på Jorden bliver uundgåeligt afbrudt af at solen går ned, eller, selv hvor det ikke er tilfældet (som f.eks. på Sydpolen hvor der faktisk er foretaget observationer af solsvingninger), af dårligt vejr. Det er muligt at minimalisere problemer med afbrydelser i observationerne ved at kombinere data fra flere forskellige observationssteder. Et ambitiøst projekt i den retning, det såkaldte GONG projekt der involverer seks optimalt fordelte stationer. GONG vil begynde at foretage observationer om ca et år. Selv i disse tilfælde sætter støj fra Jordens atmosfære en grænse for den opnåelige nøjagtighed. Disse problemer kan undgås ved observationer fra en satellit.

Satellitten SOHO (**S**olar and **H**eliospheric **O**bservatory), et fælles projekt for de europæiske og amerikanske rumfartsorganisationer ESA og NASA, skal efter planen opsendes i juli 1995 med en amerikansk Atlas

LEYBOLD *promotes progress –*

CD Werbeagentur, Bonn

171961 11.019.02



with the well-proven rotary vane TRIVAC-B vacuum pump series.
Excellent final vacuum, integrated oil circulatory pump, high level of hydrogen compatibility, and smooth running are the TRIVAC-B pump features.

Interested? Ask your Leybold adviser.

LEYBOLD AG – A Degussa Company



Leybold ApS, Roskildevej 342, 2630 Tåstrup, Tlf. 43 99 64 44

raket. Satellittens bane er i nærheden af det såkaldte L_1 punkt (eller første Langranske punkt) mellem Solen og Jorden, i en afstand af ca 1.5 millioner kilometer fra Jorden, hvor Jordens og Solens tyngdekraft, lidt forenklet, "ophæver hinanden". Herfra er SOHO i stand til at observere Solen uden afbrydelser.

SOHO vil medføre adskillige instrumenter til at studere forholdene i Solens atmosfære og i solvinden, samt tre instrumenter til observation af solsvingninger. Her koncentrerer vi os om disse instrumenter.

GOLF instrumentet (for **G**lobal **O**scillations at **L**ow **F**requency) måler Doppler-hastigheden i lys integreret over solskiven. Det betyder, at observationerne kun er følsomme over for svingninger med meget lave grader ($l \leq 3$); for andre svingninger ophæver områder med positiv og negativ hastighed stort set hinanden. Til gengæld anvender instrumentet en speciel teknik, der definerer bølglængdeintervallerne på en uhyre stabil måde. Den er baseret på spredning af lys på en gas af natrium-damp i et stærkt magnetfelt; magnetfeltet opsplitter linierne i natrium-spektret, på grund af Zeeman effekten, og beliggenheden af disse Zeeman komponenter definerer de to bølglængdeintervaller hvor intensiteterne I_b og I_r bliver målt (se Figur 3). Denne stabilitet tillader måling af svingninger med amplituder helt ned til 1 mm/sek. En tilsvarende teknik blev brugt ved de observationer, der

førte til spektret på Figur 4. Som navnet antyder, er hensigten med instrumentet specielt at observere svingninger med lave frekvenser, ikke mindst at prøve at detektere svingninger svarende til indre tyngdebølger der, som tidligere nævnt, ville give meget præcis information om forholdene i Solens kerne.

SOI-MDI eksperimentet (for **S**olar **O**scillations **I**nvestigation – **M**ichelson **D**oppler **I**mager) bruger et Michelson interferometer til at definere bølglængdeintervaller som angivet på Figur 3. Doppler-hastigheden bliver bestemt ved en passende kombination af intensiteten svarende til fire intervaller, og målingen foregår ved skiftevis at måle intensiteten i de fire intervaller. Intensiteten bliver registreret med et kamera, der dækker hele solskiven med en opløsning på 1024×1024 billedelementer. Der er hjørner med på billedet så hvert hastighedsbillede giver ca 700 000 samtidige målinger af hastigheden på Solens overflade. For en geofysiker ville det svare det til at have 700 000 seismografer på jordoverfladen. Den høje opløsning gør det muligt at observere svingninger med grader op til ca $l = 1000$, svarende til en bølglængde for svingningen på soloverfladen på nogle få tusinde kilometer. Disse svingninger er meget svære at observere fra jordoverfladen på grund af lufturoen. – En skitse af instrumentet er vist på Figur 6.

Det er værd at bemærke at dette instrument vil produ-

cere meget store datamængder: et hastighedsbillede med en million billedelementer hvert minut, i to til seks år. Her giver SOHOs placering i L_1 punktet faktisk problemer, da den relativt store afstand til Jorden begrænser data-overførselshastigheden. Det er dog planen at have adgang til NASAs Deep Space Network i en eller flere to-måneders perioder om året; i disse perioder kan den fulde datamængde sendes ned, hvorimod man i den resterende del af tiden må foretage en vis reduktion af data på satellitten.

Som diskuteret tidligere er svingninger med korte bølgelængder fanget nær Solens overflade. Resultaterne fra SOI-MDI vil derfor give meget detaljeret information om strukturen og ikke mindst gasbevægelserne i de ydre dele af Solens konvektionszone.

VIRGO eksperimentet (for Variability of solar IRradiance and Gravity Oscillations) måler Solens udstråling, dels den samlede udstråling, dels delt op på et mindre antal områder passende fordelt hen over solskiven. Som navnet antyder er det håbet at denne type observation vil være mere følsom over for de indre tyngdebølger (på engelsk: gravity oscillations) end Doppler målingerne. Desuden vil observationerne supplere målingerne af Doppler hastigheden og bl.a. give information om svingningernes opførsel i Solens atmosfære.

Det er indlysende at SOHO vil give os et væld af nye oplysninger om vores nærmeste stjerne. Men Solen er kun en enkelt blandt utallige stjerner med mange forskellige egenskaber. Lyset fra andre stjerner er blevet analyseret

på samme måde. Tyngdebølger er blevet observeret i hvide dværge og har ændret vores opfattelse af deres sammensætning. Det nyeste resultat, der har vakt opsigt, er observation af søllignende svingninger i η -Bootis, ca 30 lysår fra Solen. Observation af søllignende svingninger er dog meget krævende, på grund af svingningernes lave amplituder. Selv om det er muligt at observere fra jordoverfladen vil detaljerede data for et større antal stjerner vil kræve rumbaserede observationer. ESA er for tiden i færd med at evaluere satellitprojektet STARS (for Seismic Telescope for Astrophysical Research from Space), der vil foretage omfattende observationer af stjernessvingninger. Resultaterne herfra vil i givet fald kunne give helt ny viden om stjerners udvikling, af stor betydning for brede områder af astrofysikken.



Jørgen Christensen-Dalsgaard er Ph.D fra Cambridge University. Han leder nu Aarhus-afdelingen af Teoretisk Astrofysik Center under Danmarks Grundforskningsfond.

MODERNE VAKUUMTEKNIK TIL FORSKNING OG INDUSTRI



ALCATEL 2-trins pumpers succes giver uændrede priser i 1993.

Type	Kapacitet m ³ h ⁻¹ nominel/Pneurop	Sluttryk hPa (mbar) partial/total/+gasballast	Pris kr. excl. moms
2002	2,0 / 1,7	<2x10 ⁻³ / <5x10 ⁻³ / <2x10 ⁻²	8.075,-
2005	5,4 / 4,8	<1x10 ⁻⁴ / <2x10 ⁻³ / <1x10 ⁻²	12.550,-
2010	9,7 / 8,5	<1x10 ⁻⁴ / <2x10 ⁻³ / <1x10 ⁻²	14.500,-
2015	15,0 / 12,5	<1x10 ⁻⁴ / <2x10 ⁻³ / <1x10 ⁻²	15.850,-
2021	20,7 / 16,5	<1x10 ⁻⁴ / <2x10 ⁻³ / <1x10 ⁻²	19.450,-
2033	35,0 / 30,0	<1x10 ⁻⁴ / <3x10 ⁻³ / <6x10 ⁻³	25.500,-
2063	65,0 / 60,0	<2x10 ⁻⁴ / <3x10 ⁻³ / <6x10 ⁻³	39.650,-
2100	120,0 / 105,0	<2x10 ⁻⁴ / <3x10 ⁻³ / <6x10 ⁻³	83.775,-

* robuste * tryksmurte * støjsvage * indbygningsvenlige * specialudførelser for korrosive gasser * reservedele og service i DK.

ALLE FORMER FOR OLIEFRI & OLIESMURTE ROTATIONSVAKUUMPUMPER • FEDTSMURTE TURBOMOLEKULAR- SPIRO- & HYBRIDPUMPER • DIFFUSIONS- & CRYOPUMPER • VAKUUMMÅLEINSTRUMENTER, VENTILER, HV & UHV FITTINGS • HELIUMLÆKSØGERE & MASSESPEKTROMETRE • SPUTTER- ELEKTRONKANON- & ÆTSEANLÆG • RF & HV STRØMFORSYNINGER • RUSTFRI SPECIALKAMRE & DELE • OMBYGNING AF VAKUUMANLÆG

WENZEL VAKUUM TEKNIK APS NYBROVEJ 283 DK-2800 LYNGBY TLF 45 87 97 35
SHOWROOM, SERVICE, LAGER NYBROVEJ 193 BIL 30 42 63 00 FAX 45 93 32 93

Krystallisation af calciumfosfat i vægtløshed

Hans Erik Lundager Madsen
Kemisk Institut, KVL

Under de fleste længerevarende rummissioner, der har været gennemført i de senere årtier, har der været udført krystallisationsforsøg med forskellige stoffer. Betydningen af sådanne forsøg ligger i, at man kan forvente at få krystaller af bedre kvalitet, når systemet ikke påvirkes af tyngdekraften. På EURECA-rumplatformen, der var i kredsløb fra august 1992 til juni 1993, var der 4 forskellige opstillinger til krystallisation. To af disse var indrettet til krystallisation fra opløsning: Protein Crystallization Facility og Solution Growth Facility (SGF). SGF omfattede 4 reaktionsbeholdere, hvoraf de to var ens; i disse udførtes forsøg af eller under medvirken af danske forskergrupper på hhv. Kemisk Institut KVL og Fysisk Institut DTU. Det ene af disse forsøg og de foreløbige resultater vil her blive beskrevet.

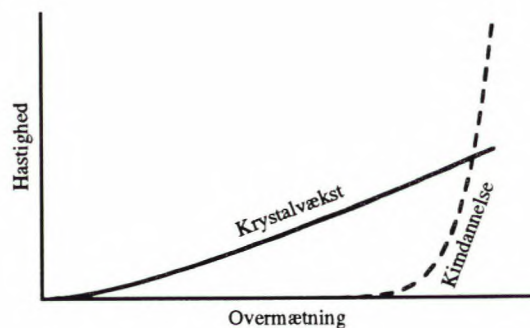
Formål med krystallisationsforsøg i rummet

De fleste, der har prøvet at udkrystallisere et stof fra en opløsning, ved, at bevægelse i væsken spiller en afgørende rolle for størrelsen og kvaliteten af de krystaller, der dannes. Hvis man lader opløsningen stå i ro, dannes der som regel få, store og ret klare krystaller, men hvis man rører rundt eller ryster beholderen, kommer der mange små krystaller. For et stof, der udskilles ved afkøling af en opløsning, er det også af betydning, hvor hurtigt afkølingen sker; vil man have store krystaller, må man afkøle langsomt. Den samlede stofmængde, der udskilles, er under alle omstændigheder lig med forskellen mellem den mængde, der oprindeligt er opløst, og det, der kan opløses ved slutbetingelserne, opløseligheden. Det er altså antallet af krystaller, der varierer med måden, man får stoffet til at krystallisere på.

For at et stof kan krystallisere fra en opløsning, må opløsningen være overmættet. Det er overmætningen, der udgør drivkraften for krystallisationsprocessen, og jo højere den er, desto højere er processens hastighed. Imidlertid består en krystallisationsproces af to trin: krystallernes dannelse, kaldet kimdannelse, og deres vækst. Disse to delprocessers hastigheder afhænger på hver sin måde af overmætningen, således som Figur 1 viser. Medens allerede dannede krystaller kan vokse selv ved lav overmætning, vil der først dannes nye krystaller, når overmætningen når et vist kritisk niveau; derover går det til gengæld hurtigt. Heri ligger forklaringen på den rolle, som afkølingshastigheden spiller for krystallernes størrelse; ved hurtig afkøling kan man nå op på en høj overmætning og dermed en høj kimdannelsehastighed.

Når der først er dannet krystaller, vil disse vokse og optage stof fra opløsningen. Dens overmætning vil derved aftage og efterhånden nå ned under den kritiske værdi, og

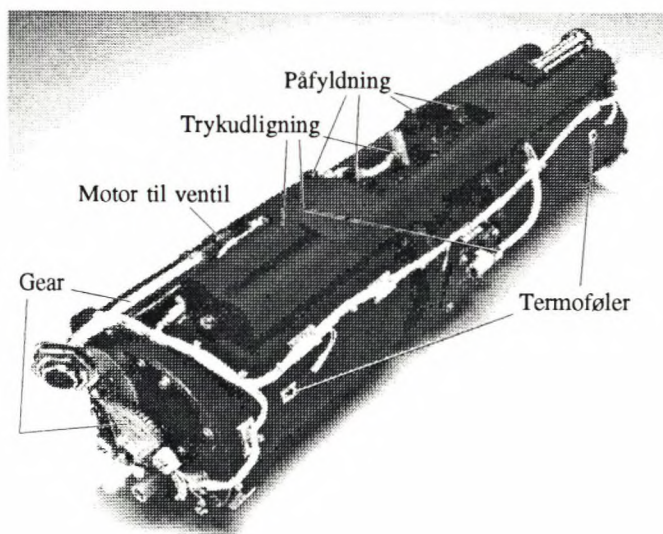
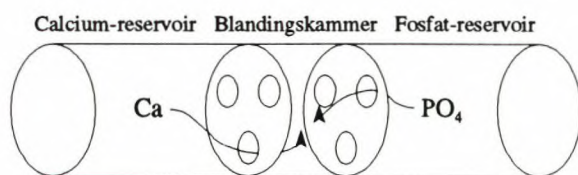
fra dette tidspunkt dannes der ingen nye krystaller. De eksisterende krystaller vil fortsætte med at vokse stadig langsommere, indtil opløsningen ikke længere er overmættet.



Figur 1. Kimdannelse- og krystalvæksthastigheder (hhv. antal pr. cm^3 opløsning pr. s og stofmængde pr. cm^2 krystaloverflade pr. s) som funktioner af overmætningen for en typisk krystal.

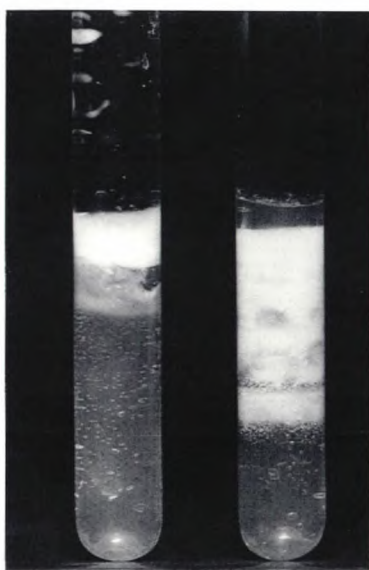
Normalt er det kun forholdsvis letopløselige stoffer, man kan få til at krystallisere i rimelig grad ved afkøling af en opløsning. De stoffer, der er tungtopløselige ved 20°C , er som regel også tungtopløselige ved 100°C , og der er endda mange tungtopløselige stoffer, hvis opløselighed aftager ved stigende temperatur. Krystaller af et tungtopløseligt stof får man normalt ved at blande to stoffer, der reagerer med hinanden og danner de ønskede krystaller; man taler her om reaktionskrystallisation. Det er imidlertid i dette tilfælde meget vanskeligere end ved letopløselige stoffer at styre overmætningen og dermed krystallisationsprocessen. Hvis man blot hælder opløsninger af de to reagerende stoffer - reaktanterne - sammen, vil overmætningen blive meget høj, og der dannes mange småkrystaller. Selv ved dråbevis tilsætning kan man næppe undgå en høj lokal overmætning der, hvor dråben rammer.

Den langsomste form for stoftransport er diffusion, som skyldes molekylernes tilfældige bevægelser. Hvis man kan blande reaktanterne ved diffusion, har man derfor en chance for at få store krystaller. Det er dog ikke tilstrækkeligt at bringe de to opløsninger i kontakt med hinanden meget forsigtigt, for hvis de har forskellig vægtfylde, vil denne forskel bevirke en hurtig blanding ved konvektion. Man kan fremstille opløsninger med nøjagtig samme vægtfylde og dermed opnå, at stofferne i begyndelsen blandes ved diffusion, men så snart der er dannet krystaller, begynder opløsningens koncentration og dermed dens vægtfylde i nærheden af disse at falde. Desuden bliver krys-



Figur 3. SGF-krystallisatoren, til venstre principskitse, til højre praktisk udførelse.

tallerne efterhånden så store, at de synker til bunds i beholderen, og dette giver ligeledes bevægelse i væsken.



Figur 2. Calciumfosfat-krystallisation i kiselsyregel. Samme opløsninger i de to glas, men med den lettere fosfatopløsning øverst i det venstre glas, nederst i det højre.

Man kan løse problemet delvis ved at gøre væsken eller en del af den stiv med et geleringsmiddel. Her-til bruger man oftest kiselsyre, der fremstilles enten ved tilsætning af en passende mængde syre til en opløsning af vandglas (natriumsilikat) eller ved at blande lidt af en ester af kiselsyre i en vandig opløsning. Andre stoffer som gelatine, agar eller polyacrylamid kan også bruges. Den enkleste metode består i, at man fylder et reagensglas

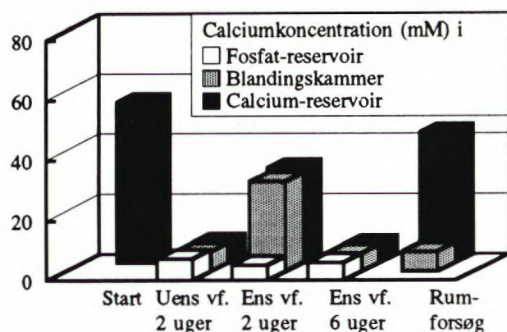
halvt med en opløsning af den ene reaktant, hvortil man har sat geleringsmidlet. Når væsken er stiv, fylder man op med en opløsning af den anden reaktant, som derefter vil diffundere ned i gelen og danne krystaller ved reaktion med den første reaktant. Metoden udgør dog ikke nogen fuldstændig løsning. For det første vil mange stoffer reagere med geleringsmidlet, eller dette kan blive indesluttet som urenhed i krystallerne, og for det andet kan man ikke regne med, at stoftransporten i gelen udelukkende er diffusion. Figur 2 viser resultaterne af to krystallisationsforsøg med calciumfosfat, hvor den ene opløsning, calciumklorid, har højere vægtfylde end den anden, ammoniumfosfat. Det ses tydeligt på udfældningen, at calciumopløsningen, når den er øverst, når meget længere ned i gelen til trods for, at de to stoffer diffunderer næsten lige hurtigt. Her bevirker tyngdekraften en hurtigere transport af det tungere stof.

Den eneste måde, hvorpå man kan sikre sig stof-transport udelukkende ved diffusion og undgå uønskede bivirkninger, er at eliminere tyngdekraften, d.v.s. sende forsøgsopstillingen i kredsløb om jorden. Derved opnår man samtidig, at krystallerne ikke synker til bunds og kommer til at ligge tæt op ad hinanden, men bliver på det sted i væsken, hvor de er dannet. Ulempen er de store krav, der stilles til udstyrets sikkerhed, og de høje omkostninger.

Apparatur til reaktionskrystallisation i rummet

En reaktionsbeholder eller krystallisator til brug ved rumforsøg består normalt af 3 kamre, to reservoirer til reaktanterne og et blandingskammer, der tjener til yderligere forsinkelse af blandingsprocessen. Kamrene er adskilt af vægge med ventiler, der skal kunne åbnes på en sådan måde, at det enkelte kammers rumfang ikke ændres, og at bevægelsen i væsken bliver minimal; dette sidste nødvendiggør meget langsom åbn-

ing. Da man ikke kan regne med, at de tre væsker har nøjagtig samme varmeudvidelseskoefficient, er krystallisatoren udstyret med et system til udligning af trykforskelle mellem kamrene, idet en trykforskel kan medføre bevægelse i væske, når ventilerne åbnes. Endelig skal kamrene kunne fyldes helt med væske, da der ved en væske-luft-overflade kan optræde Marangoni-konvektion; denne skyldes forskelle i overfladespænding i forskellige områder af overfladen. Det er en selvfølge, at de materialer, der er i kontakt med væske, under ingen omstændigheder må kunne angribes af disse. Dette er ikke kun et spørgsmål om beholderens holdbarhed, men i mindst lige så høj grad om at undgå forurening af væske; selv meget lave koncentrationer af urenheder kan påvirke krystallisationen. Et overordnet krav til apparaturet er en meget høj grad af sikkerhed og pålidelighed. Udsivning af væske kan beskadige andet apparatur og i alvorlige tilfælde bringe rumfærgen og astronauterne i fare. Der er ingen mulighed for reparation undervejs, og hvis noget svigter eller bryder sammen, betyder det sædvanligvis et mislykket forsøg, som i bedste fald først vil kunne gentages efter længere tids forløb.



Figur 4. Fordeling af calcium mellem de tre kamre i krystallisatoren i forskellige jordbaserede forsøg og i rumforsøget. "Uens vf." betegner et forsøg med ammoniumsalte. Den forsvundne stofmængde findes i det udfældede stof.

SGF-krystallisatoren, der blev anvendt på EURECA, er vist på Figur 3. Den er konstrueret af Oerlikon-Contraves i Z-rich og består hovedsagelig af aluminium med en indvendig beklædning af en fluorholdig plasttype kaldet halar. Bælgene i trykdigningssystemet er ligeledes af halar; der er en i enden af hvert reservoir og tre i siden af blandingskammeret. Ventilerne, der åbnes ved drejning om krystallisatorens længdeakse, er af borsilikatglas. Åbning og lukning besørges af en lille motor, der trækker på ventilakslen via et gear med en udveksling på 1:13.000.000; dermed bliver tiden for åbning eller lukning knap et døgn. De to ventiler har hver sin motor, så at de kan åbnes og lukkes uafhængigt af hensyn til fyldning og tømning. Der er, som det fremgår af skitsen på Figur 3, 3 huller mellem hvert reservoir og blandingskammeret. Hvert reservoir har et rumfang på 2 liter, og blandingskammerets rumfang er 0,5 liter. For at kunne holde en konstant forsøgstemperatur er krystallisatoren anbragt i en lukket cylinder med udvendig kobberbevikling, som

forsynes med strøm fra rumplatformens solpaneler. Da der kun er 15 W til rådighed for hver krystallisator, er det nødvendigt med en god varmeisolering uden om cylinderen. Mellemrummet mellem krystallisator og cylinder er ligesom trykdigningssystemet fyldt med argon.

Resultater af jordbaserede forsøg

Omhyggelige, forberedende laboratorieforsøg er af største betydning for et godt resultat af et rumforsøg. Samtidig kan det være af stor interesse, bl.a. af hensyn til fortolkning af resultaterne, at udføre et jordbaseret referenceforsøg, der er så vidt muligt identisk med rumforsøget.

På KVL havde vi rådighed over to såkaldte "engineering models" af SGF-krystallisatoren; disse er identiske med dem, der bruges til rumforsøget ("flight models"). Med disse udførte vi en halv snes forsøg med varighed fra 2 uger til 6 måneder. I 4 af forsøgene anvendtes de samme opløsninger som ved rumforsøget: i det ene reservoir en kaliumfosfatopløsning med pH 7,6, i det andet en calciumkloridopløsning og i blandingskammeret en 0,16 M kaliumkloridopløsning. Alle tre opløsninger havde samme vægtfylde, hvilket for calciumkloridopløsningens vedkommende opnåedes ved tilsætning af kaliumklorid.

Edwards High Vacuum Turbomolekularpumper

- ★ 4 basistyper
- ★ High Power DC-motor
- ★ 40 flangevarianter
- ★ Ny EXT E økonomiversion
- ★ 17 modeller
- ★ Lavt støj- og vibrationsniveau

EDWARDS

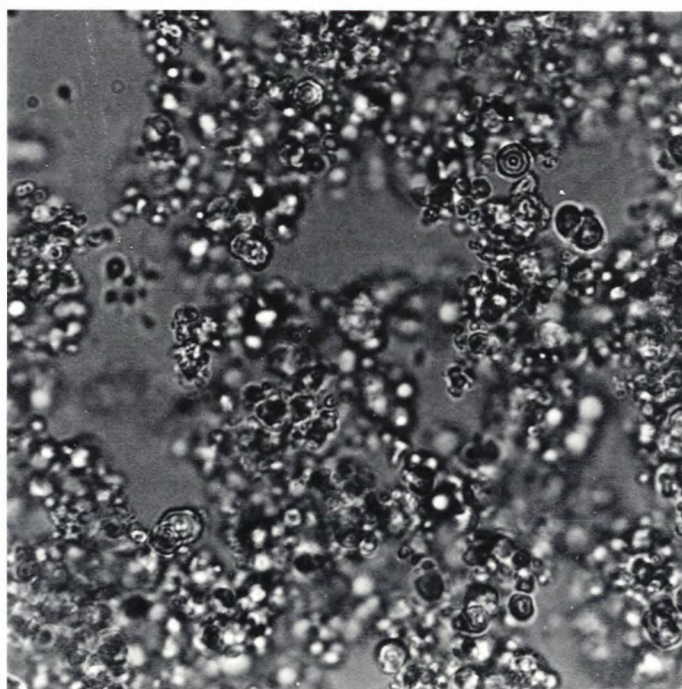


Edwards High Vacuum er en af verdens førende producenter af vakuumpumper og -udstyr. Den nye EXT E version gør det nu muligt at anskaffe en Turbomolekular Vakuumpumpe til en fornuftig pris. Kan køles enten med luft eller vand, og kan styres af den normale EXC350 og EXC500 Turbo-kontroller. Edwards High Vacuum er også Dry Pumps, Diff. Pumps, Vakuummåleinstrumenter, Frysetørningsanlæg og Pådampningsanlæg.

Ring for yderligere oplysninger!

Marielundvej 36
2730 Herlev
42 91 75 11

Buch & Holm A/S



Figur 5. Til venstre fasekontrastmikrofotografi, til højre transmissions-elektronmikrofotografi med elektrondiffraktogram af produkt fra jordbaseret referenceforsøg.

Et af de fire forsøg tjente som referenceforsøg. For at få yderligere information om vægtfyldeforskellenes betydning benyttedes ved 3 andre opløsninger af samme koncentrationer som i de 4 nævnte og rumforsøget, men med ammoniumsalte i stedet for kaliumsalte. Opløsningerne af ammoniumsalte har lavere vægtfylde end opløsningerne af kaliumsalte, hvorved calciumkloridopløsningen får højere vægtfylde end de andre opløsninger. I øvrigt er der meget ringe forskel på kalium- og ammoniumionens opførsel i opløsning.

Efter afslutning af hvert forsøg blev der bestemt calcium- og fosfatkoncentration i hvert af krystallisatorens tre kamre, og det udfældede calciumfosfat blev undersøgt ved mikroskopi og ved røntgen- og elektrondiffraktion. Figur 4 viser fordelingen af calcium mellem kamrene i udvalgte forsøg; fosfat viste en lignende fordeling, blot fra den anden ende af krystallisatoren. Det er tydeligt, at forskelle i vægtfylde bevirker en fuldstændig udjævning af koncentrationsforskelle i løbet af et par uger, hvorimod der skal udfældes en del stof i opløsningerne med samme vægtfylde, førend der kommer gang i konvektionen. Når man sammenligner med rumforsøget, der varede 5 måneder, er det dog klart, at der selv med ens vægtfylde har været nogen væskestrømning inden for de første to uger.

Det udfældede stof bestod i samtlige forsøg af hydroxylapatit ($\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$) i form af submikroskopiske krystaller (1 m og mindre). Det kunne således kun identificeres ved diffraktion og transmissionselektronmikroskopi. Krystallerne var samlet i kugleformede aggregater med en

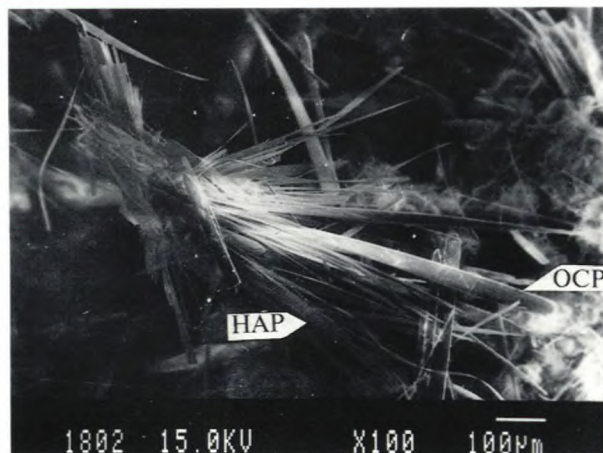
diameter på nogle få m (Figur 5). De forskellige forsøg gav ikke produkter af væsentlig forskellig krystalstørrelse. Der kunne konstateres en lidt bedre krystallinitet ved de langvarige forsøg. Under alle omstændigheder har konvektionen medført en hurtig blanding af reaktanterne, og det har givet høj overmætning og dannelse af et stort antal krystaller.

Krystalstørrelsen er typisk for udfældning ved en temperatur på 40°C . De apatitkrystaller, som findes i knoglerne, og som jo er dannet ved 37°C , er af nogenlunde samme størrelse.

Resultater af rumforsøget

Varigheden af selve krystallisationsforsøget på EURECA var 5 måneder, hvorefter ventilerne i krystallisatoren blev lukket og yderligere stoftilførsel til blandingskammeret afskåret. Det fremgår umiddelbart af Figur 4, at stoftransporten ved rumforsøget har været meget langsommere end ved de jordbaserede forsøg, og en overslagsberegning har vist, at situationen svarer ganske godt til, at der har været tale om ren diffusion. Det har her været en fordel, at rumplatformen var ubemandet, idet astronauternes bevægelser på en bemandet rummission er tilstrækkelige til at forårsage nogen væskestrømning. Udbyttet af krystaller var kun ca. 15% af, hvad det ville have været, hvis reaktanterne var blevet blandet fuldstændigt.

Som følge af den langsomme stoftransport og den deraf følgende lavere overmætning er de enkelte apatitkrystaller blevet mange gange større end ved de jordbaserede forsøg.



Figur 6. Krystaller i produktet fra rumforsøget, til venstre set i lysmikroskop, til højre i scanning elektronmikroskop. "HAP" og "OCP" betyder hydroxylapatit og oktaaluminiumfosfat.

De danner stadig kugleformede aggregater, men nu meget mere regelmæssige, idet de enkelte krystaller ses at stråle ud fra centrum; sådanne aggregater kaldes sfærolitter (Figur 6). De fleste har en diameter på 50-100 µm, men der er fundet enkelte med en diameter på 0,5 mm. Så store apatitkrystaller er ikke tidligere fremstillet ved så lav temperatur; de kan dog muligvis dannes i kiselsyre.

Ud over apatit fandtes der i produktet fra rumforsøget endnu større krystaller af en anden form for calciumfosfat, oktaaluminiumfosfat ($\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, forkortet OCP), der er en metastabil form. Krystallerne er oftest 0,1-1 mm lange, enkelte dog helt op til 3 mm, ret smalle og meget tynde (Figur 6). De findes dels som enkeltkrystaller, dels som aggregater; det er dog ret sandsynligt, at enkeltkrystallerne oprindeligt har siddet i aggregater, hvorfra de er gået løs enten under nedtagningen af EURECA eller i laboratoriet. OCP udgør mængdemæssigt ca. 2/3 af produktet, men antallet af OCP-aggregater er kun ca. 0,2% af antallet af apatitaggregater. I de jordbaserede forsøg er der ikke fundet OCP.

Så vidt det kan konstateres, er al OCP dannet ved krystallisation på apatit (heterogen kimdannelse), altså ikke ved selvstændig (homogen) kimdannelse. Dels ser man i mange tilfælde OCP-krystaller vokse ud fra apatitaggregater (Figur 6, højre billede), dels består kernen af OCP-aggregaterne af et stof med højere brydningsforhold end OCP ($> 1,60$, mod 1,58 for OCP), hvilket svarer til apatitkrystallers brydningsforhold. At dette er muligt på trods af OCP's metastabilitet, skyldes dels den ret store lighed mellem apatits og OCP's krystalstrukturer, der giver

mulighed for epitaksi, dels, at OCP-krystallerne, når de først er dannet, vokser meget hurtigere end apatitkrystallerne.

Det forhold, at al apatit findes som sfærolitter og ingen som enkeltkrystaller, tyder på, at krystallisationen er startet ved høj overmætning. Til gengæld er ingen af sfærolitterne væsentlig mindre end 50 µm i diameter, hvorefter vi kan slutte, at kimdannelsen er gået i stå på et forholdsvis tidligt tidspunkt. Derefter har alt det tilførte stof alene bidraget til krystallernes vækst; overmætningen er derfor holdt nede på en værdi lavere end den kritiske for kimdannelse (jvf. Figur 1). Selv en svag væskebevægelse ville forstyrre denne tilstand og helt forandre produktets karakter i retning af, hvad man får ved jordbaserede forsøg.

Det er højst tænkeligt, at man ved passende ændringer af forsøgsbetingelserne for rumforsøget ville kunne fremstille krystaller, der er store nok til laboratorieforsøg med enkeltkrystaller. En interessant mulighed ville være måling af den enkelte krystalfladers væksthastighed som funktion af opløsningens sammensætning, herunder dens overmætning. Indtil nu har det kun været muligt at bestemme den gennemsnitlige væksthastighed for alle krystalflader, idet man har været nødt til at måle på et pulver bestående af mange småkrystaller af ofte mere eller mindre ukendt form.

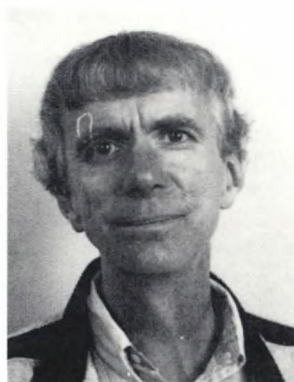
Konklusion

Af de her beskrevne forsøgsresultater fremgår det

klart, hvilken afgørende betydning vægtløshed har for størrelsen og kvaliteten af krystaller, der udskilles fra opløsning. Det, der her er opnået, ligger ganske uden for rækkevidden af normale laboratorieforsøg. Der er desuden opnået væsentlig information om krystallisationsprocessens mekanisme, hvilket der dog ikke er gjort nærmere rede for her. Det er blot beklageligt, at forsøgsomkostningerne er så høje, og at man først kan gentage et forsøg efter adskillige års forløb.

Fotografiet af krystallisatoren på Figur 3 er leveret af European Space Agency. Elektronmikrograferne på Figur 5 og Figur 6 er optaget af dr. E. I. Suvorova ved Institut for Krystallografi, Det russiske Videnskabsakademi i Moskva. De øvrige fotografier er optaget på Kemisk Institut KVL. Vi har i dette projekt haft stort udbytte af samarbejde med den russiske forskergruppe under spon-

soring af Oerlikon-Contraves, Z~rich. Desuden har vi modtaget støtte fra Rumudvalget og fra Statens naturvidenskabelige Forskningsråd.



Hans Erik Lundager Madsen er cand. scient i kemi fra Aarhus Universitet og er nu docent ved KVL. Interesserer sig for krystallisation, fortrinsvis af biologisk betydningsfulde stoffer.

COMPONENTS
SELECT CAPABILITY:
VG QUADRUPOLES
RESIDUAL GAS ANALYSIS
VACUUM GENERATORS
VG MICROTECH

Quartz makes RGA data Crystal clear

Quartz PC-driven RGAs with CrystalWindows RGA Software

Quartz Series is an integrated package of RGA instrumentation and hardware for 100, 200 or 300 amu Mass Ranges with Dual Detection available on all versions. Quartz is PC computer-driven, offering speed, flexibility and post data analysis in UHV and HV studies.

NEW CrystalWindows RGA Software uses an easy-to-operate Windows 3 platform that permits multi-tasking and access to ASCII compatible data for direct transfer into spreadsheet and graphing programs. Quartz and CrystalWindows are part of a complete range of Quadrupole RGAs.

VG QUADRUPOLES

FISONS

Instruments

*Fisons Instruments Nordic AB
Box 1176
S-171 23 SOLNA
Sweden
Tel : +46 08 730 02 95
Fax : +46 08 730 42 42*



LASERE • ELEKTROOPTIK • FIBER OPTIK • TESTUDSTYR • LASER TEKNIK

AGENTUR

ANDO
ATCOR
BIT
BURLEIGH
CYONICS
EG & G BERTHOLD
EG & G FIBER OPTICS
EG & G GAMMA SCIENTIFIC
EG & G OPTO-/JUDSON
EG & G ORTEC
EG & G PAR ECEM. DIV.
EG & G SCIENTIFIC. DIV.
EXCITON
EXFO
GENTEC
GOULD FIBER OPTICS
GRASEBY OPTRONICS (UDT)
ILEE
ILX LIGHTWAVE
JOBIN YVON
SPEX
KLINGER SCIENTIFIC
LASER PHOTONICS
LASER VISION
LSI
MALVERN
MICROCOATINGS
MICRO-CONTROLE
MOLECTRON
NE-TECHNOLOGY
NEWPORT
OFR
PTI
QUANTA RAY
QUANTEX
QUESTEK
SANTEC
SEASTAR OPTICS
SPECTRA DIODE LABS
SPECTRA-PHYSICS
STORM FIBER OPTICS
UDT SENSORS INC.
UNIPHASE

LEVERINGSPROGRAM:

Fiberoptisk måleudstyr, Datakommunikations testudstyr.
Laser partikelmåling i luft og på overflader.
Fiberoptisk splidseudstyr.
Elektrooptisk analyseudstyr, FCL-Lasere, Scanning Tunnel Mikroskoper.
Luftkølede Argon Ion lasere.
Radioaktivitetsmåleudstyr for miljø og overvågning.
Fiberoptisk testudstyr for Strain og Dispersion.
Radiometrisk/fotometrisk måleudstyr.
LED/Laserdioder - detektorer - halvleder komponenter.
Nukleart forskningsudstyr og detektorer, NIM/CAMAC-elektronik, MCA/MCS systemer.
lektrokemisk måleudstyr for korrosion.
Lock-In forstærkere, Optiske Multikanal Analysatorer, magnetometre.
Laser Dyes.
Fiberoptisk testudstyr for LAN-FDDI-FTTH-FTTC-CATV.
Laser powermetre, pyroelektriske detektorer.
Fiberoptiske koblere, optiske isolatorer.
Optisk måleudstyr, Positionsudstyr - PSD, radio/fotometrisk måling.
Halvleder laserdioder for VIS/IR med drivere.
Instrumenter, TEC og drivere for laserdioder.
Monochromatorer, ramansystemer, optiske gitre.
Fluorometre, monochromatorer og Ramansystemer.
Positionering for DC og steppermotorer, optomekanik.
LASERE: Ruby, Alexandrite, Co, Co₂, XEHE, Nd:YAG/GLASS/YLF, Ho:YAG, ER:YAG.
Laserbeskyttelsesbriller og gardiner.
LN₂ lasere og dye lasere.
Laserbaseret partikelanalyseudstyr for luft/væske/pulver/spray/aerosoler.
Optiske interferensfiltre.
Optomekanik, optik, optiske bænke, granitborde og positionering.
Laser powermetre.
Radioaktivitetsmåleudstyr for overvågning og radiologi.
Elektro-optik, vibrationsdæmpende borde, optomekanik og optik.
Præcisionsoptik, optiske isolatorer, beam expanders og mikroskopobjektiver.
Lampesystemer, ratio fluorescence - phosphorescence systemer.
Nd:YAG lasere og dye-systemer.
IR - detektering.
Excimer lasere.
Tunbare halvleder lasere og image process systemer.
Pig-tailed laserdioder og drivere.
Halvleder lasere, høj effekt, CW og PULS, 780-870-910-980 nm.
Ion lasere og Ti:SA lasere og systemer for CW og PULS.
Fiberoptiske samleled, konnektorer, attenuatorer og PatchCabler.
PSD - Ge og Si detektorer.
HeNe lasere 0,5 - 50 mW. Halvleder lasere med gode beam kvaliteter.

ANDET:

Mærk af  og udfyld:

Navn: _____

Post nr. By: _____

Firmanavn: _____

Telefon: _____

Adresse: _____

Telefax: _____

Tag kopi af hele siden og fax den til: 31 19 87 47

Dansk Fysisk Selskabs
Sektion for uddannelse og undervisning
indbyder til konference om
Projektarbejde i fysikundervisningen
27/10 – 28/10 1994
på Vissenbjerg Storkro

Formålet med konferencen er at samle fysiklærere fra alle undervisningsniveauer til en diskussion af muligheder og problemer i forbindelse med projektarbejde.

Projektarbejde er ikke noget éntydigt begreb, men uanset om projekterne er tværfaglige eller enkeltfaglige, praktiske eller teoretiske etc., er det vigtigt, at der er god overensstemmelse mellem opgavens art, rammerne for arbejdet, herunder lærernes og de studerendes/elevernes forudsætninger, samt evalueringen af forløbet og produktet.

Konferencen vil omfatte oplæg om mange forskellige former for projektarbejde. Der vil være afsat tid til erfaringsudveksling og gruppediskussioner.

Prisen for konferencen, der starter torsdag kl. 14 og slutter fredag efter frokost er 725 kr (enkeltværelse) eller 625 kr (dobbeltværelse).

Detaljeret program for konferencen kan fås ved henvendelse til Erik Both, Fysisk Institut, bygn. 307, DTU, 2800 Lyngby, tlf 45 93 12 22, lokal 3151.

balzers

Gasdoseringsventil EVN 116

To ventiler i een



- EVN 116 har en on-off og en gasdoseringsventil, som er uafhængige af hinanden
- Reproducerbar indstilling med digitalt display
- Ventilens dødvolumen er kun 0,03 cm³

Nordiska Balzers AB
Baunegårdsvej 7 L
DK-2820 GENTOFTE
Tel: 31 68 32 61
Fax: 31 68 22 55

Box 10412
S-434 24 KUNGSBACKA
Tel: *46-300 710 80
Fax: *46-300 172 85

Astrometri fra rummet – nu og i fremtiden

Erik Høg

Hipparcos

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

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

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

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

Astrometri og fotometri

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

astrometriske resultater.

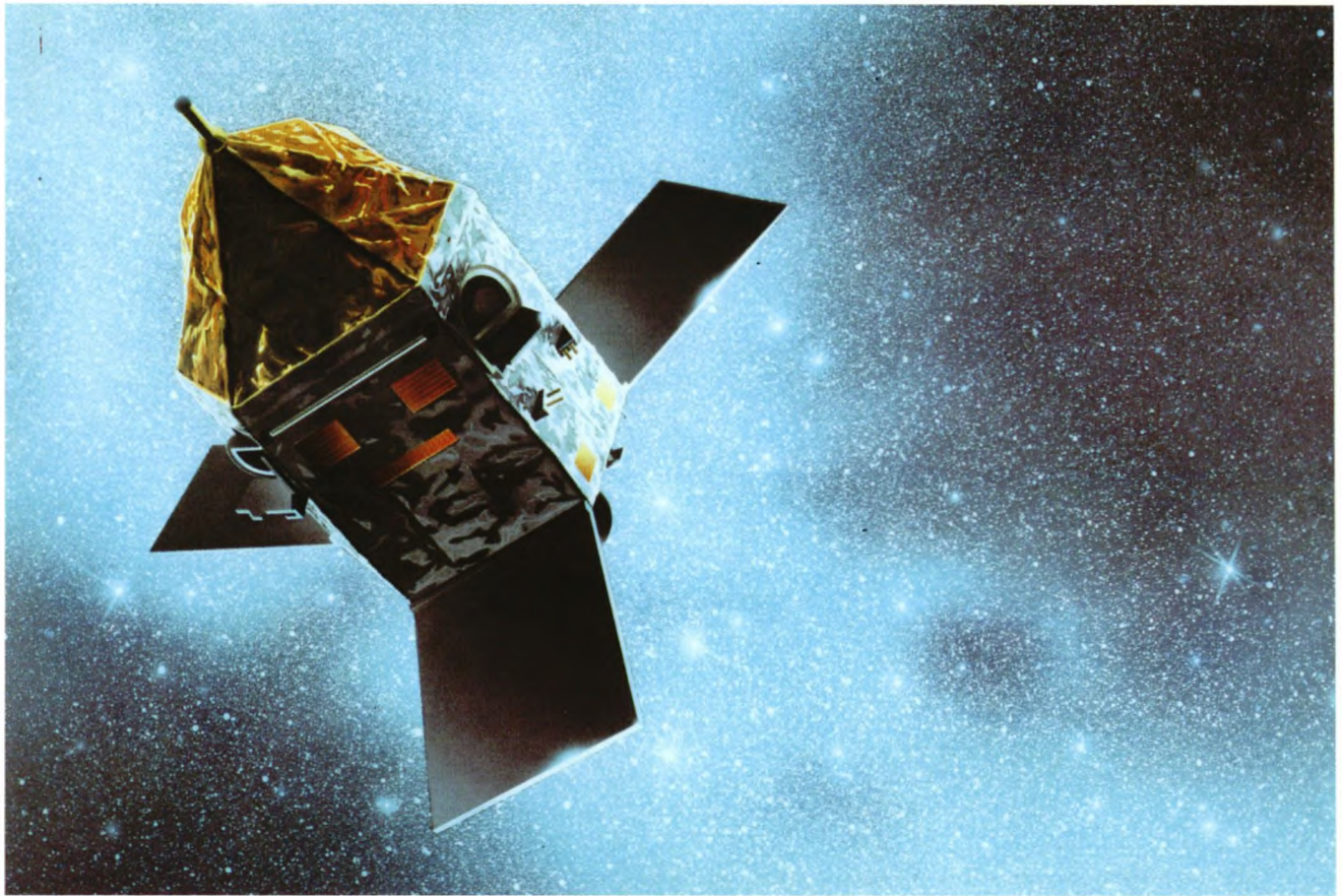
Hvis man gentager positionsmålinger over et tidsrum på nogle år som med Hipparcos satellitten, vil dataanalysen afsløre hver stjernes langsomme bevægelse på himlen, og desuden en svag årlig bølgebevægelse. Denne bølgebevægelse er en afspejling af jordens bevægelse omkring solen. Bølgens højde kaldes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

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

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

Hipparcos-Tycho missionen afsluttet i 1993

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



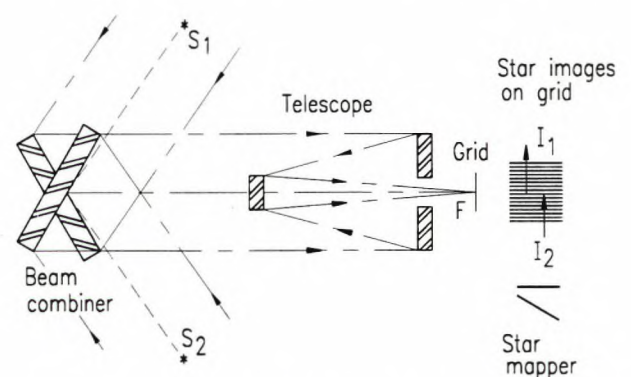
Figur 1. Hipparcos satellitten målte fra 1989 til 1993 positioner og lysstyrker for en million stjerner ved hjælp af et teleskop med to synsretninger. (Billede fra Illustreret Videnskab, Juli 1992, s. 48)

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

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

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

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



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

Roemer projektet vurderet højt af ESA

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

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

Måleprincipper for Hipparcos

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

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

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

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

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

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

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

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

100000 gange mere effektiv end Hipparcos

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

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

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

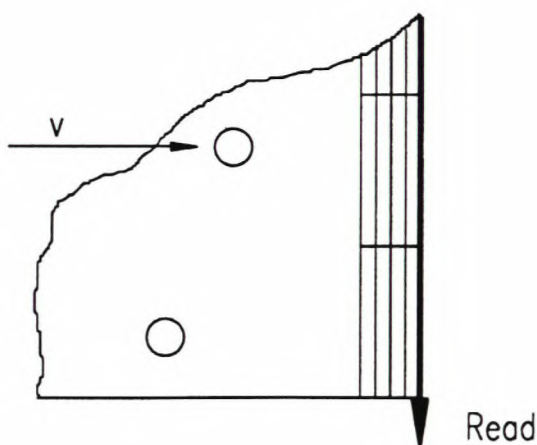
parallakser hidtil har været begrænset til stjerner i solens nærmeste omegn.

Måleprincip for Roemer

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

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

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



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

Praktisk betydning

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

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

CCD-detektorer

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

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

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

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

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

Referencer:

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

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



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

Vejledning for forfattere

Redaktionen af KVANT modtager meget gerne artikler fra læserne. Indholdet af artiklerne bør være forståelig for personer med interesse for fysik – således at en god gymnasieelev vil få noget ud af at læse artiklen. Det gør ikke noget, at der optræder enkelte (og enkle) formler i teksten. Illustrationer til artiklerne er meget velkomne.

Det er håbet, at der vil komme en række rubrikker – der er allerede en debatside, som er åben for indlæg om alt hvad der rører sig om fysik. Bladet vil også bringe meddelelser fra Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse, ligesom omtale af arrangementer, der kan have interesse for fysikinteresserede vil blive bragt. Da der kun kommer fire numre om året skal der gives meddelelse om et givet arrangement i god tid, hvis det skal kunne komme med i bladet. Redaktionen vil også stræbe efter at kunne bringe korte notitser med friske nyheder og anmeldelser af bøger af interesse for fysikere.

Vejledning i udformning af artikler til KVANT

For at lette produktionen modtages artikler helst på elektronisk facon. Det kan enten være som elektronisk post til e-mail adressen

kvant@nbivax.nbi.dk

eller (hellere) på en DOS-formatteret diskette, der sendes til

KVANT
c/o Mads Hammerich
Gersonsvej 40
2900 Hellerup

eller afleveres til et redaktionsmedlem sammen med eventuelle figurer, og – *meget vigtigt* – et billede og en præsentation af forfatteren, i stil med de præsentationer, der findes i slutningen af hver artikel i dette nummer.

Teksten kan være skrevet i L^AT_EX, som ren ASCII fil, i WordPerfect eller Word. De første formater foretrækkes. Hvis det ikke er muligt at aflevere teksten i et af disse formater, kan en papirudgave af artiklen naturligvis anvendes.

Formler og specielle symboler kan indsættes i teksten med L^AT_EX eller T_EX. De modtages dog under alle omstændigheder også gerne på papir.

Illustrationer og billeder til artiklerne afleveres separat – det er (endnu) en kvalitetsmæssig fordel at indsætte disse i artiklen på sædvanlig facon. Undlad venligst at afsætte plads til dem i teksten, men placer figurforklaringen til sidst eller for sig selv.

Tabeller og opstillinger ønskes som simple opstillinger med tabulatorer. Brug ikke for megen energi på at lave “snedige” opstillinger med linier og lignende, men vis gerne på papir hvordan du selv ville foretrække det.

- Forfatternavne skrives med kursiv.
- Afsnitoverskrifter skrives med fed skrift.
- Der er ingen tomme linier mellem afsnit, men de indledes med en indrykning (tabulering).
- Referencer anføres i teksten med et løftet ciffer, og anføres til sidst i artiklen med nummer, forfatter, artikel (eventuelt bind-nummer med fed skrift), sidetal og årstal i parentes.
- Husk et billede og en kort præsentation af forfatteren.
- Forfattere der skriver i L^AT_EX kan rekvirere en skabelon, at skrive i, hos redaktionen.

Abonnement på KVANT

koster 135 kr for en årgang og vil blive opkrævet pr. giro. Nye abonnenter vil modtage eventuelle tidligere numre af den løbende årgang. Medlemmer af Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse vil modtage bladet som et medlemsblad.

Hvis du mener at du har abonnement, men ikke får bladet – har du nok glemt at melde flytning af bladet hos dit lokale postkontor, eller måske har du ikke betalt. Bemærk at flytning af KVANT skal meddeles postvæsenet eksplicit!

Abonnement tegnes ved at skrive til

Lene Körner, Matematisk Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø