

KVANT

Maj
2009 2

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 20. årgang

TEMANUMMER OM ASTRONOMI

Mørkt stof – vi ved så meget og dog så lidt

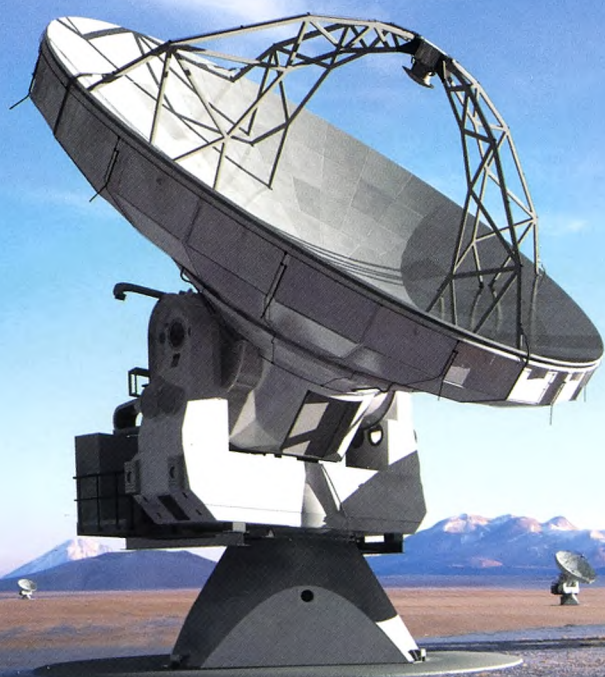
ESA's mikrobølgesatellit PLANCK

Exoplaneter og Kepler-missionen

Astronomernes kæmpeteleskoper

Helio- og asteroiseismologi

KVANT-nyheder



Løssalgspris: 45 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk

Udgives af

Astronomisk Selskab,
Dansk Fysisk Selskab,
Dansk Geofysisk Forening,
Selskabet for Naturlærens Udbredelse,

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.)
Christianshavns Gymnasium
Torsten Freltoft, Sophion Bioscience A/S
Thomas R. N. Jansson (webredaktør)
Mogens Esrom Larsen,
Matematisk Institut, KU
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen (nyhedsredaktør)
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen, DTU Space
Finn Berg Rasmussen, Ørsted Lab, KU
Svend E. Rugh

Abonnementspris : 165 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Henvendelser vedr. abonnement til forretningsfører Lene Körner tlf. 35 32 07 62 (koerner@kvant.dk).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2400 kr
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale i farver. Henvendelser om annoncer til redaktøren, tlf. 22 67 26 42.

Oplag: 2500. Tryk: HCB Tryk ApS,
Brønderslev. ISSN 0905-8893



Produktionsplan

Nr. 3-09 udkommer ca. 1. oktober
Nr. 4-09 udkommer ca. 15. december
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Exoplaneter og Kepler-missionen <i>Lars Buchhave</i>	3
Astronomernes kæmpeteleskoper <i>Hans Kjeldsen</i>	7
Mørkt stof – vi ved så meget og dog så lidt <i>Steen H. Hansen, Kristian Pedersen, Jesper Sollerman, Anja C. Andersen, Johan Fynbo, Jens Hjorth, Sune Toft og Darach Watson</i>	14
Stjernehimlen <i>Michael Cramer Andersen</i>	18
KVANT-nyheder <i>Sven Munk, John Rosendal Nielsen og Michael Cramer Andersen</i>	19
ESA's mikrobølgesatellit PLANCK <i>Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen</i>	21
Aktuelle bøger <i>Michael Cramer Andersen</i>	28
Helio- og asteroiseismologi <i>Torben Arentoft, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Hans Kjeldsen, Frank Grundahl, Søren Frandsen og Pierre-Olivier Quirion</i>	29
Hubble-teleskopets sidste servicemission <i>John Rosendal Nielsen</i>	Bagsiden



Billedet på forsiden viser hvordan Det Europæiske Sydobservatoriums kommende radioteleskoper "ALMA" vil se ud når de står færdige omkring 2012. Læs om astronomernes kæmpeteleskoper i artiklen af Hans Kjeldsen. Dette nummer af KVANT er et temanummer om astronomi og det markerer det internationale astronomiår. Man kan også læse om "Mørkt stof" og hvad "PLANCK-satellitten" skal undersøge samt to artikler om forskningen relateret til "Kepler-satellitten". Kepler, der blev sendt op i starten af marts, skal dels studere "Exoplaneter" (se artiklen af Lars Buchhave) og dels undersøge stjerners struktur og udvikling ved hjælp af stjernesvingninger – se artiklen om "Helio- og asteroiseismologi".

KVANT udsendes gratis til fysiklærerne ved alle landets gymnasier, seminarier og HTX-kurser med velvillig økonomisk støtte fra fysikinstitutterne på Danmarks Tekniske Universitet samt Københavns, Syddansk, Aalborg og Aarhus Universiteter.

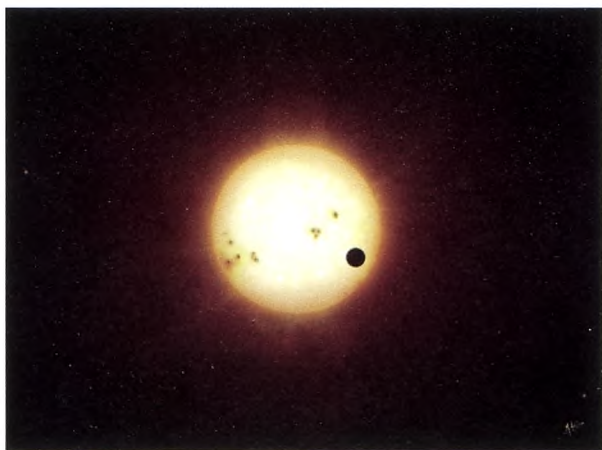
Exoplaneter og Kepler-missionen

Af Lars Buchhave, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA

Vi står på tærsklen til at finde svaret på nogle af astronomiens største spørgsmål: er Jorden unik, og findes der liv andre steder i Universet? Kepler, en NASA rummission som netop er blevet opsendt, vil tage et stort skridt i retning af at besvare et af disse spørgsmål. Keplers hovedformål er at finde formørkende exoplaneter, dvs. planeter omkring andre stjerner end Solen, hvis baneplan ligger således, at de formørker lyset fra deres værtsstjerne ved at passere ind foran denne. Når dette sker, kan man bestemme planetens masse, radius og dermed dens gennemsnitstæthed, og det er muligt at udføre et væld af spændende opfølgende observationer, bl.a. at observere planetens atmosfære. Karakteristiske træk i atmosfæren på formørkende planeter kan måske inden for en overskuelig fremtid give os indikationer på, om der eksisterer liv andre steder i universet.

Introduktion

Udviklingen inden for exoplaneter er gået utrolig hurtigt, efter den første planet omkring en solliggende stjerne blev opdaget i 1995. Siden er næsten 350 planeter blevet opdaget, de fleste ved hjælp af radial-hastighedsmetoden, hvor man måler refleksbevægelsen af værtsstjernen, når planeten bevæger sig rundt i sin bane omkring den. Refleksbevægelserne er yderst små (fx 12 m/s for Solens påvirkning fra Jupiter), og det kræver høj præcision og stabilitet over en længere periode at kunne måle bevægelserne. Desværre giver metoden kun en nedre grænse for planetens masse, da inklinationen af planetens baneplan normalt er ukendt, så man kun finder $M \cdot \sin i$, hvor M er planetens masse og i er inklinationen af planetens baneplan, altså vinkelen af planetens baneplan i forhold til vores synsvinkel.



Figur 1. En kunstners billede af en formørkende planet (M.A. Garlick).

Der er fundet 8 planeter via mikrolinseteknikken, som Danmark også er involveret i. Teknikken benytter, at planeten og dens værtsstjerne virker som en gravitationel linse, som forstærker lyset fra en fjern baggrundsstjerne. Når en planet er til stede i linsen kan det ses i det forstærkede signal af baggrundsstjernen. Mikrolinseteknikken har den fordel, at den kan finde planeter

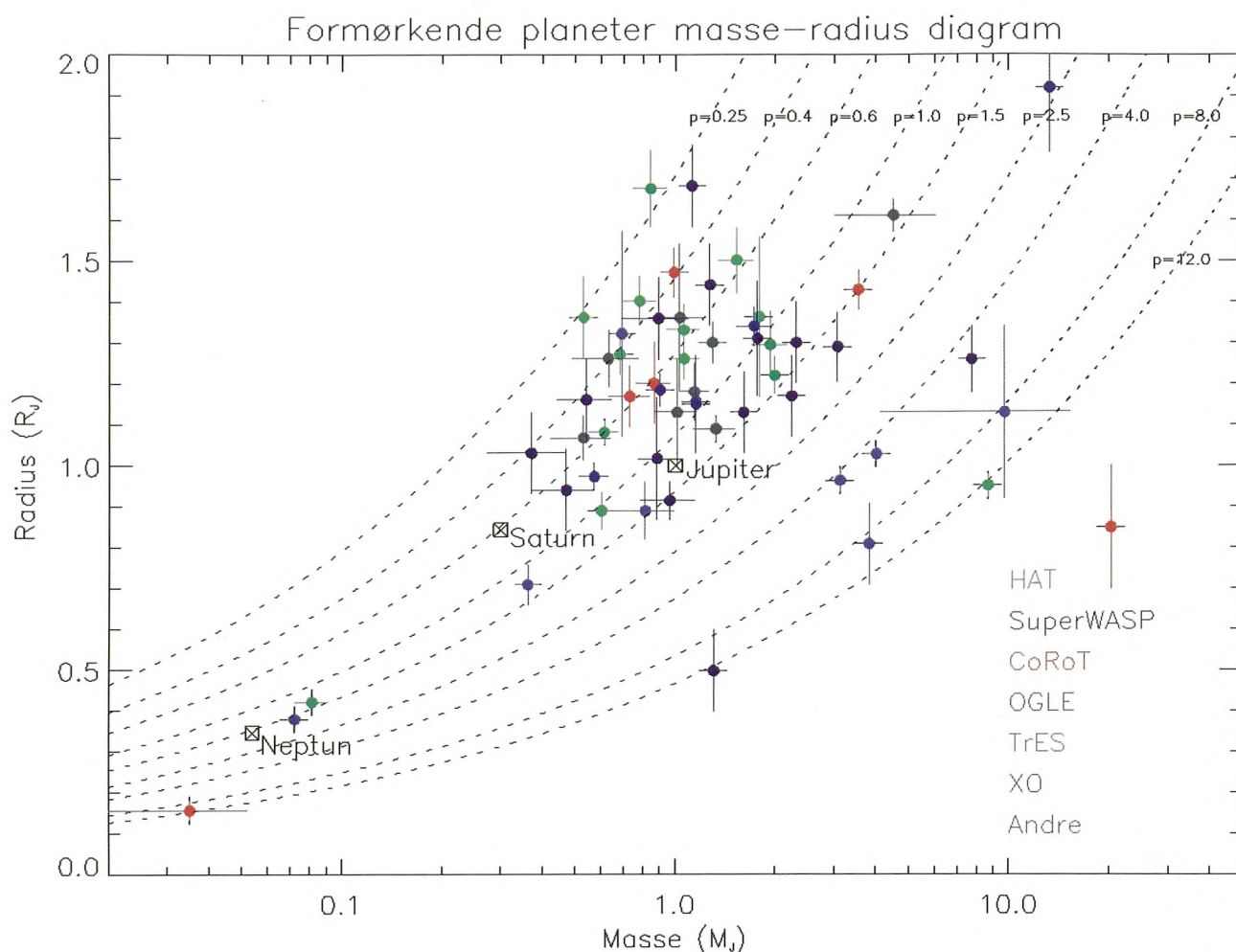
med små masser, som befinder sig langt fra deres værtsstjerne, et parameterområde hvor andre teknikker ikke har tilstrækkelig følsomhed. En anden fordel er, at observationerne kan udføres med forholdsvis små teleskoper; således hjælper amatørastrofomer med at observere begivenhederne. Desværre er det ikke muligt at udføre opfølgende observationer, efter at mikrolinsebegivenheden er overstået, da selve værtsstjernen normalt er så svag at den ikke kan ses.

Formørkende planeter

Over 50 af de 350 planeter er formørkende planeter: planeter hvis baneplan tilfældigvis ligger således, at planten passerer ind foran værtsstjernen og dermed formørker denne. Når en planet formørker sin værtsstjerne, er det muligt at bestemme både den eksakte masse og radius af planeten og dermed den gennemsnitlige tæthed, som kan hjælpe os til at forstå planetens sammensætning og indre struktur. Derudover muliggør en formørkende planet et væld af interessante opfølgende observationer, som beskrives senere i artiklen, bl.a. observationer af planetens atmosfære.

I figur 2 ses et masse-radius plot, som viser mangfoldigheden af de planeter, der er fundet indtil nu. Forskelligheden i de fundne planeter og planetsystemer – og ikke mindst forskellene fra vores eget solsystem – har overrasket. De eksisterende teorier kan ikke forklare denne store mangfoldighed af planetsystemer, og det er derfor vigtigt at udfylde parameterrummet med endnu flere planeter for bedre at sætte grænser for dannelses-teorierne.

En klasse af planeter, der ikke var forudset, er de "varme Jupiterplaneter", som er tunge gasplaneter med masser mange gange større end Jupiters og med meget korte omløbstider, helt ned til én dag. Da man ikke mener, at disse planeter kan dannes tæt på deres værtsstjerne, må de have flyttet sig fra deres dannelsessteder længere ude, ind til deres nuværende position – en vandring, man endnu ikke helt forstår.



Figur 2. Masse-radius diagram af formørkende planeter opdaget indtil nu. Radius og masse er indikeret i enheder af Jupiters masse. De stiplede linjer repræsenterer en bestemt tæthed i g/cm^3 .

Ser man på de forskellige tætheder af planeterne i figur 2, opdager man, at tætheden varierer over et utroligt stort spænd. De varme Jupiterplaneter er opustede på grund af den kraftige opvarmning fra den meget nære værtsstjerne, men selv ikke denne oppustning kan forklare de meget lave tætheder, man ser i figur 2, helt ned til $0,25 \text{ g/cm}^3$. I den anden ende af skalaen er der nogle ufattelig kompakte planeter, med gennemsnitstætheder helt oppe på 12 g/cm^3 – svarende til planet lavet af massivt bly!

Søgning efter formørkende planeter

Et antal projekter er i øjeblikket i gang med at lede efter formørkende planeter, både fra jorden og i rummet. De mest succesfulde jordbaserede søgninger er HATnet, SuperWASP, XO og TrES. I rummet er to missioner nu undervejs, den europæiske CoRoT, et 27 cm fotometrisk teleskop med et FOV (field-of-view eller synsfelt) på 7,8 kvadratgrader opsendt i december 2006 og NASAs Kepler, et 95 cm teleskop med et FOV på 105 kvadratgrader, opsendt den 6. marts 2009.

Tilsammen har de forskellige projekter fundet over 50 formørkende planeter. Det er naturligvis lettest at finde store planeter, som er tæt på deres værtsstjerne, da disse medfører et større fald i værtsstjernens lysstyrke.

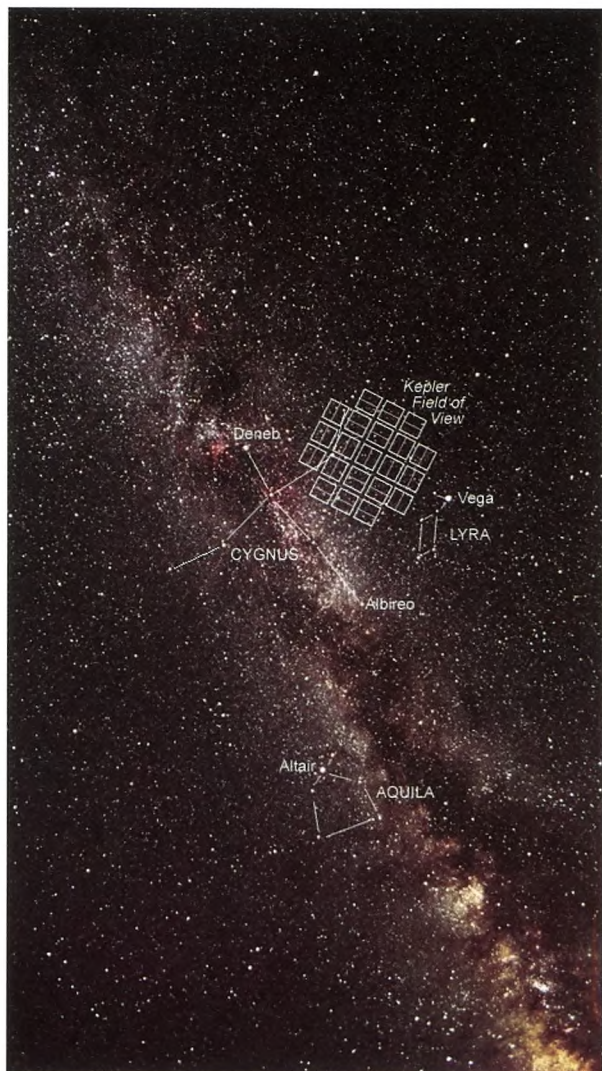
Det giver derfor en overvægt af disse typer planeter, som tydeligt fremgår af figur 2, hvor der kun ses få planeter med en radius mindre end $0,5 R_J$. Kepler vil nå ned til mindre radier og masser og dermed befolke masse-radius diagrammets nedre del.

CoRoT er den første rumbaserede fotometriske planetsøgning. Efter cirka 2,5 år har CoRoT kun fundet 7 planeter, færre end forventet. Den sidste planetkandidat, der blev fundet i februar 2009 (men stadig ikke er helt bekræftet), har en meget lav masse på 11 jordmasser og er derfor den klart mindste formørkende planet fundet endnu.

Kepler

Kepler er, som CoRoT, også en fotometrisk mission, hvis hovedformål er at finde formørkende planeter. Kepler blev opsendt 6. marts 2009 og opnåede "first light" (første detektion af lys fra teleskopet) 8. april 2009. Alt ser ud til at virke, som det skal. Fotometeret har en diameter på 0,95 m, og detektoren består af 42 CCD'er (95 Mpix), som dækker et felt på 105 kvadratgrader (se figur 3). Kepler har en utrolig præcision i målingerne af lysintensitet – 20 milliontedele eller bedre – og vil observere det samme felt i hele

missionens levetid på 3,5 år. Over 100.000 af de 14 millioner stjerner i feltet er blevet omhyggeligt udvalgt, således at missionen giver det største udbytte, da der ikke er kapacitet til at transmittere hele feltet ned til Jorden med tilstrækkelig høj frekvens.



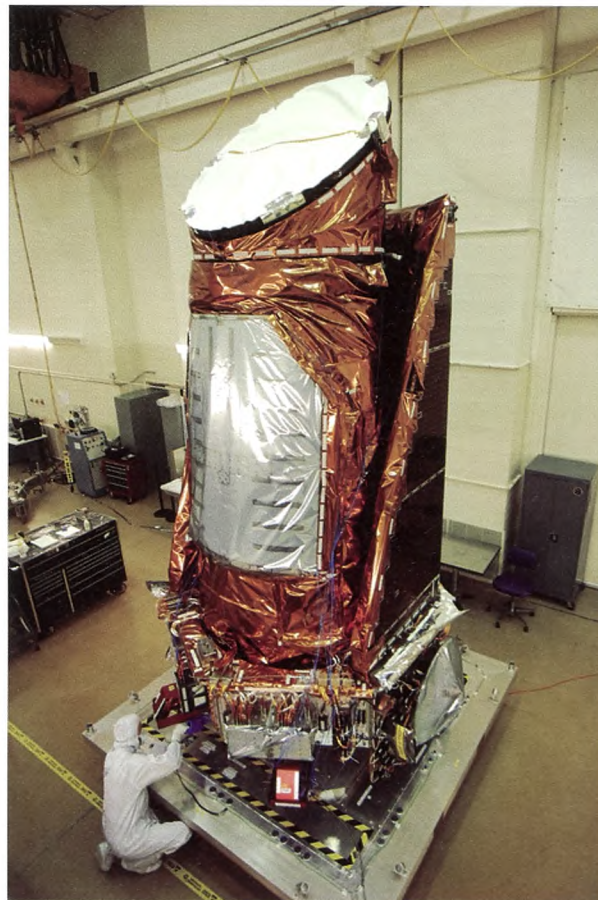
Figur 3. Kepler-feltet ligger mellem stjernebilledet Svanen og stjernen Vega. Kasserne repræsenterer de 42 CCD'er, som udgør Kepler feltet.

Da vi endnu ikke ved, hvor almindelige jordlignende planeter er, er det ikke muligt at forudsige udbyttet af Kepler uden at lave antagelser. De følgende forudsigelser er baseret på en række antagelser, bl.a. at sådanne planeter er almindelige, dvs. at der gennemsnitlig findes to jordlignende planeter mellem 0,5 og 1,5 AU om hver stjerne (1 AU er Jordens afstand fra Solen), som i vort eget solsystem. Med jordlignende planeter menes de såkaldte "super Earths", planeter der overvejende består af silikater og har masser op til 10 gange Jordens masse.

Kepler forventer at finde mellem 50 og 600 jordlignende planeter i indvendige baner (baner mindre end eller af samme størrelsesorden som det indvendige Solsystem der indeholder Merkur, Venus, Jorden og Mars), afhængig af hvad jordlignende planeters gennemsnitsradius viser sig at være, og 135 gasplaneter

i indvendige baner. Det forventes, at nogle af disse jordlignende planeter vil ligge i den beboelige zone ("the habitable zone" eller HZ), som løseligt defineres som den afstand fra værtsstjernen, hvor betingelserne er gunstige for liv, som vi kender det på Jorden.

Et spændende resultat af Kepler vil være frekvensen af jordlignende planeter. Er vores Jord en helt almindelig planet i Mælkevejen, eller er vores Jord enestående i vores galakse? Kepler er designet således, at selv et negativt resultat vil være interessant, fordi det vil betyde, at Jorden er enestående i Mælkevejen, hvis Kepler ikke finder nogen planeter som ligner Jorden.



Figur 4. Kepler satellitten inden opsendelsen. Billede: Ball Aerospace.

Keplers fotometriske observationer kan også bruges til astroseismologi, og Danmark leder denne spændende indsats (se artiklen herom andetsteds i bladet). Med planetbriller på kan den astroseismologiske analyse fortælle om vigtige parametre for værtsstjernen, så som masse, radius og alder. Da vore værdier for planetens masse og radius er direkte proportionale med de antagne værdier for værtsstjernen, er det naturligvis yderst vigtigt, at disse bestemmes med størst mulig nøjagtighed.

Opfølgende observationer

Når Kepler detekterer et dyk i lyset fra en stjerne, kan dette signal skyldes en lang række andre hændelser end en planetpassage, f.eks. en partielt formørkende

dobbeltstjerne, tre – eller flerdobbelte stjernesystemer, kæmpestjerner osv. For at udelukke en del af disse scenarier bruges bl.a. opfølgende spektroskopiske observationer. Fx kan en dobbeltstjerne hurtigt udelukkes, da de store masser giver langt større variationer i radialhastighed end en planet. En række lignende tests kan udføres for definitivt at afgøre, om der er tale om en planet, men det ville være for detaljeret at komme ind på her.

For at finde planetens masse bestemmes værtsstjernens bane omkring dens og planetens fælles tyngdepunkt ved meget nøjagtige spektroskopiske observationer. For en formørkende planet kan hældningen af baneplanet bestemmes, og dermed kan vi finde planetens eksakte masse relativt til stjernens. Forholdet mellem planetens og værtsstjernens radier er direkte proportional med dybden af dykket i lyskurven, så planetens radius og dermed dens middeltæthed kan hermed bestemmes. Det er dog yderst vanskeligt at måle radialhastigheder, der skyldes en planet med masse og bane som Jorden omkring en stjerne af soltype, da de tilsvarende ændringer i radialhastighed er utrolig små, cirka 50 cm/s.

Danmark er involveret i disse opfølgende spektroskopiske målinger, og det Nordisk Optiske Teleskop (NOT) på La Palma benyttes til observationerne. Jordlignende planeter kræver dog endnu højere stabilitet og man er derfor ved at bygge en ny ultrapræcis spektrograf, HARPS-NEF, specifikt designet til at finde og karakterisere sådanne planeter. HARPS-NEF er en videreudvikling af den nuværende rekordholder HARPS på 3,6 m teleskopet ved European Southern Observatory i Chile.

En formørkende planet tillader en række spændende opfølgende observationer. Præcise målinger af tiderne for formørkelserne kan afsløre tilstedeværelsen af hidtil usete planeter i systemet. Den såkaldte Rossiter-McLaughlin effekt i hastighederne kan bruges til at bestemme hældningen mellem planetens bane og stjernens rotationsakse, og dette kan bruges til at lægge bånd på dannelseteorier for planetsystemer.

De mest interessante opfølgende observationer er nok af exoplaneters atmosfære. Når planeten formørker værtsstjernen, vil en lille del af lyset passere igennem planetens atmosfære, og noget af lyset bliver absorberet. Hvis man observerer stjernens spektrum både under formørkelsen og umiddelbart før eller efter og trækker det sidste fra, har man isoleret planetens spektrum. Denne teknik kaldes transmissionsspektroskopi. Nogle af de inderste, ekstremt varme Jupiterplaneter stråler desuden selv så meget i det infrarøde område, at denne emission kan observeres ved en lignende teknik.

Observationer af stjerne og planet udføres her under og lige før eller efter den sekundære formørkelse (hvor planeten passerer *bag* værtsstjernen), og forskellen mellem disse er så emissionsspekteret fra planeten. Med disse teknikker er der observeret bl.a. vand, natrium og metan i atmosfærerne på exoplaneter.

Fremtidsudsigter

Exoplaneter har en spændende fremtid foran sig. Kepler vil inden for de næste 3,5 år finde hyppigheden af jordlignende planeter, herunder et par beboelige, hvis de eksisterer, samt fylde masse-radius diagrammet med data for et væld af nye planeter og dermed hjælpe os til at forstå, hvordan planeter og planetsystemer dannes.

Man har allerede observeret atmosfæren på et par af de varme Jupiterplaneter, og James Webb Space Telescope (JWST), et 6,5 m infrarødt rumteleskop, som bliver opsendt i 2013, vil give os mulighed for at gå endnu længere. JWST vil måske muliggøre observationer af en jordlignende planets atmosfære, hvis det lykkes at finde en formørkende planet af denne type omkring en kraftig stjerne i nærheden af vores solsystem.

Et meget spændende perspektiv er muligheden for at finde såkaldte biomarkører i atmosfæren på en sådan planet. Biomarkører betegner stoffer som f.eks. O₂ og CH₄ (ilt og metan), hvis tilstedeværelse i større koncentrationer indikerer en biologisk oprindelse. Fotosyntese danner ilt, biologisk aktivitet danner metan, og hyppigheden af disse stoffer på Jorden er langt større, end hvis liv ikke eksisterede på Jorden. Simultan detektion af ilt og metan vil være den stærkeste indikation på liv, vi kan få fra en exoplanets atmosfære, og et stort skridt i retning af at besvare spørgsmålet, om der eksisterer liv andre steder i Universet.

Litteratur

- [1] Charbonneau, D., Brown, T. M., Burrows, A., Laughlin, G. (2007), When Extrasolar Planets Transit Their Parent Stars, 2007 prpl.conf..701C.
- [2] <http://kepler.nasa.gov>



Lars Buchhave er ph.d.-studerende ved Niels Bohr Institutet og ved Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA og er involveret i det spektroskopiske opfølgingsarbejde af formørkende planetkandidater fra NASAs Keplermission og HATnet projektet.

Astronomernes kæmpeteleskoper

Af Hans Kjeldsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Noget af det som gør astrofysikken speciel er, at man på grund af de studerede objekters fjernhed næsten udelukkende får målinger via anvendelse af teleskoper. Idet såvel følsomheden som opløsningen forbedres, når teleskopets størrelse forøges, har forskernes videnskabelige krav om forbedret følsomhed og opløsning, ført til en kolossal udbygning af astronomiske teleskoper. I denne artikel vil jeg beskrive nogle af de teleskoper som danske astronomer deltager i opbygningen og brugen af og beskrive enkelte af de videnskabelige resultater, som er knyttet til disse faciliteter.

Astrofysikkens vigtigste værktøj

Astrofysikken er som andre specialiserede forskningsdiscipliner dybt afhængig af måleudstyr, og udviklingen af forskningen er derfor tæt knyttet til den teknologiske udvikling. I tråd med dette foregår der udvikling af nye teknologier, som i første omgang tjener til at forbedre de astrofysiske målemetoder, men som viser sig også at kunne anvendes andre steder i forskningen og i samfundet. Et godt eksempel på dette er brugen af den lysfølsomme CCD-detektor, som i dag findes i alle digitale kameraer.

Den første CCD-detektor blev udviklet til brug i astrofysikken og blev testet på et teleskop i 1974. I 1980'erne skete en sand revolution i astrofysikken, takket være CCD-detektoren. Det specielle ved astrofysikken er, at man på grund af de studerede objekters fjernhed næsten udelukkende får målinger via brugen af teleskoper. Ser vi bort fra vort eget solsystem, er stort set alt observationsmateriale indhentet via studiet af det elektromagnetiske spektrum. Astrofysikkens vigtigste værktøj er derfor teleskopet og de tilknyttede spektrografer, kameraer og detektorer. De teleskoper, som i tidens løb er blevet udviklet til studiet af universets objekter, er blevet konstrueret, så de fungerer optimalt til den del af det elektromagnetiske spektrum, det pågældende instrument skal dække. Mange teleskoper står på Jordens overflade, men astronomerne har også mange teleskoper i verdensrummet med henblik på at kunne studere den del af det elektromagnetiske spektrum, som ikke når ned gennem Jordens atmosfære.



Figur 1. På bjergtoppen Cerro Paranal i Chile har ESO opstillet kæmpeteleskopet, VLT. (ESO).

I det følgende vil jeg udelukkende beskæftige mig med de jordbundne teleskoper og den forskning, som er forbundet hermed. Fokus vil være på de kæmpeteleskoper, som danske og europæiske astronomer deltager i brugen og udviklingen af. Jeg vil først beskrive det såkaldte Very Large Telescope (VLT) som det Europæiske Sydobservatorium (ESO) har bygget og til stadighed udbygger på bjerget Paranal i Chiles Atacamaørken. Sidst i artiklen vil jeg se på de fremtidige kæmpeteleskoper som kaldes ALMA, E-ELT og SKA.

Følsomhed og opløsning

Det astronomiske teleskop har to hovedfunktioner. For det første skal teleskopet tjene til at detektere de svage signaler fra objekterne i Universet. Og her gælder det simple forhold, at følsomheden forøges med arealet af teleskopet (hovedspejlets areal, eller antennens areal – hvis vi taler om mikrobølgestråling eller radiostråling). Ønsket om at kunne måle signaler fra fjernere og svagere objekter har i hele astrofysikkens historie ført til bygningen af større og større teleskoper. Denne udvikling fortsætter den dag i dag, hvor teleskoperne har nået en størrelse som nødvendiggør internationalt samarbejde, som det f.eks. finder sted inden for rammerne af det Europæiske Sydobservatorium (ESO).

Teleskopets anden hovedfunktion handler om at forbedre opløsningen af de objekter, man studerer. I princippet kan man forstørre billedet i et teleskop blot ved at ændre på optikken nær teleskopets fokus, men der er en fundamental grænse for, hvor små detaljer man kan opløse på himlen, en grænse som er bestemt af lysets fysiske egenskaber, og som afhænger af teleskopets størrelse (diameter) og bølgelængden af den elektromagnetiske stråling, man observerer.

Hvis teleskopet har diameter D og bølgelængden af den elektromagnetiske stråling er givet ved λ , er den mindste vinkel (diffraktionsgrænsen), man kan adskille i teleskopets fokus, givet ved

$$d\theta \simeq \frac{\lambda/500 \text{ nm} \cdot 1''}{(D/10 \text{ cm})} \quad (1)$$

Ovenstående formel er normaliseret til en bølgelængde på 500 nm og en teleskop-diameter på 10 cm. I dette tilfælde vil de mindste vinkelafstande, man kan opløse, have en udstrækning på et buesekund (").

Anvender vi ligning (1) for forskellige bølgelængder og teleskopstørrelser, kan værdierne i tabel 1 findes. Den første linje i tabellen angiver en diameter på 0,5 cm svarende til det menneskelige øje. Det ses, at øjet ikke kan opløse detaljer på under 0,3 bueminutter (20").

Diameter	Bølgelængde	Vinkelopløsning
0,5 cm	500 nm: synligt lys	0,3'
10 cm	500 nm: synligt lys	1"
10 m	500 nm: synligt lys	0,01"
100 m	500 nm: synligt lys	0,001"
10 m	2 μm: infrarødt	0,04"
42 m	2 μm: infrarødt	0,01"
10 m	10 μm: infrarødt	0,2"
10 m	1 mm: mikrobølger	20"
10 km	1 mm: mikrobølger	0,02"
300 m	21 cm: radiobølger	2'
40 km	21 cm: radiobølger	1"
500 km	21 cm: radiobølger	0,1"

Tabel 1. Opløsning ved forskellige λ og D . ' angiver bueminut (1/60 grad) og " angiver buesekund (1/3600 grad).

Seeing og scintillation

De i tabel 1 anførte værdier for vinkelopløsningen er ikke nødvendigvis relevante for observationer fra Jordens overflade. På grund af brydning i Jordens atmosfære vil synligt lys blive delvist udtværet, og en del af lyset vil blive spredt i atmosfæren og derved ikke ramme teleskopet, hvorfor lyset vil udvise variabilitet. At lyset udtværes betyder, at de mindste detaljer, vi kan opløse, ikke nødvendigvis når den teoretiske grænse angivet i tabel 1. Astronomerne beskriver denne effekt som *seeing*, og den aktuelle værdi af seeingen angiver, hvor meget objekterne udtværes. Seeingen i synligt lys er selv under de bedste observationsbetingelser typisk 0,5"-1". Det er således svært umiddelbart at udnytte den store opløsning, man opnår ved brug af teleskoper med en diameter på flere meter. At objekter udviser variabilitet p.g.a. spredning, kaldes for *atmosfærisk scintillation*. Denne effekt får stjernerne til at blinke og afhænger af, hvor højt stjernen står på himlen, og hvor stort et teleskop, man anvender. For store teleskoper er scintillationen normalt ikke en begrænsende faktor, selv for svage objekter.



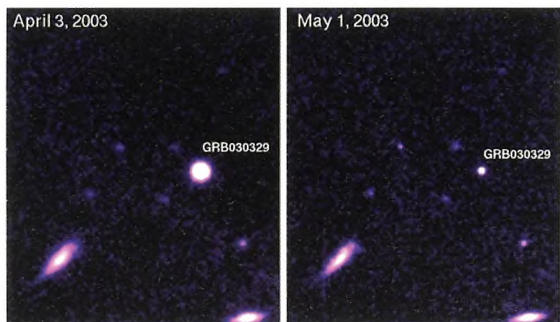
Figur 2. Very Large Telescope består af fire teleskoper på hver 8,2 m (diameter). De fire teleskoper er forbundet med hinanden via en serie underjordiske tunneller, som samtidigt forbinder dem med en række mindre teleskoper (ESO).

Very Large Telescope (VLT)

Det Europæiske Sydobservatorium, som Danmark er aktivt medlem af, byggede i gennem 1990'erne et teleskop af imponerende dimensioner. Teleskopet består af fire uafhængige teleskoper, hver med en diameter på 8,2 m. Det er konstrueret, så det kan benyttes til observation af elektromagnetisk stråling fra 300 nm til 24 μm. I slutningen af maj måned 1998 stod det første af de 4 teleskoper klar til at modtage lys fra himmelrummet, og knapt et år senere begyndte de reelle observationer med dette superteleskop. En fornemmelse af teleskopets dimensioner kan man få ved at sammenligne personen på figur 3 med teleskopet.



Figur 3. VLT Unit Telescope, KUEYEN – et af de fire teleskoper som indgår i ESO'S Very Large Telescope. Bemærk størrelsen af teleskopet i forhold til personen på billedet (ESO).



Figur 4. Lyset fra den eksplosion som forårsagede gammastrålingsglimt GRB 030329. Astronomer fra Københavns Universitet deltog i disse observationer, som er udført med VLT [3]. (ESO Pressemeddelelse 16/03).

Hvert af de fire 8,2 m teleskoper anvendes fra solnedgang til solopgang 365 nætter om året – hvis det er skyfrit – til et væld af forskelligartede observationer. Teleskopet benyttes af astronomer i alle de europæiske lande, og desuden tildeles observationstid til astronomer fra bl.a. Chile, USA og Australien.

Danske astronomer har, siden teleskopet blev taget i brug, anvendt dets unikke muligheder til et væld af observationer. Som eksempel har forskere ved Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet benyttet VLT til observationer, som kan belyse egenskaberne ved det såkaldte mørke stof og den mørke energi [1,2]. Disse studier inkluderer bl.a. observationer af de såkaldte gammastrålingsglimt, som opstår, når stjerner eksploderer (de fleste i afstande på milliarder af lysår). VLT benyttes her til studiet af det optiske signal fra afkølingen af den varme gas i eksplosionen. Et eksempel på en sådan eksplosion ses i figur 4.

Astronomerne fra Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet har anvendt VLT til at foretage de til dato mest nøjagtige målinger af bevægelserne på stjernernes overflade. Ved at nå en målepræcision på 1,5 cm/s har de Århusianske astronomer i samarbejde med kollegaer fra Australien og USA fundet svingninger i stjernerne alfa Centauri A og B, som kan benyttes til detaljerede seismologiske studier af stjernernes indre [4,5,11].

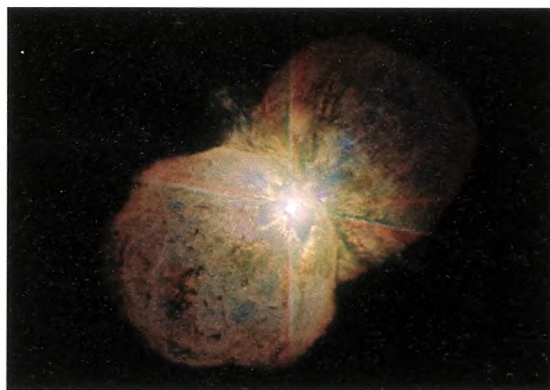
Adaptiv optik og laserguidestjerner

VLT kan anvendes til meget andet end at søge efter det svage signal fra eksploderende stjerner i det fjerne univers eller præcisionsmålinger af stjernernes overfladebevægelser. Som det fremgår af tabel 1, kan teleskopet i princippet opløse detaljer på himlen, som er langt mindre end den grænse på omkring 0,5 buesekund, som er sat af Jordens atmosfære (seeingen). Da påvirkningen af stjernelyset, som giver anledning til udtværingen, er forårsaget af afbøjning af de individuelle lysstråler, som rammer teleskopets hovedspejl, er det i princippet for hver enkelt lysstråle muligt at bestemme nøjagtigt, hvor meget den er afbøjet. Hvis man derfor kan korrigere lysets afbøjning for de individuelle lysstråler, er det muligt at fjerne en stor del af udtværingen og derved komme tæt på de teoretiske grænser, som er angivet i tabel 1. Den metode, man anvender for at måle og korrigere lysets afbøjning for hver enkelt del af spejlet, kaldes for *adaptiv optik*, og den bygger grundlæggende på en servostyring med to hovedelementer:

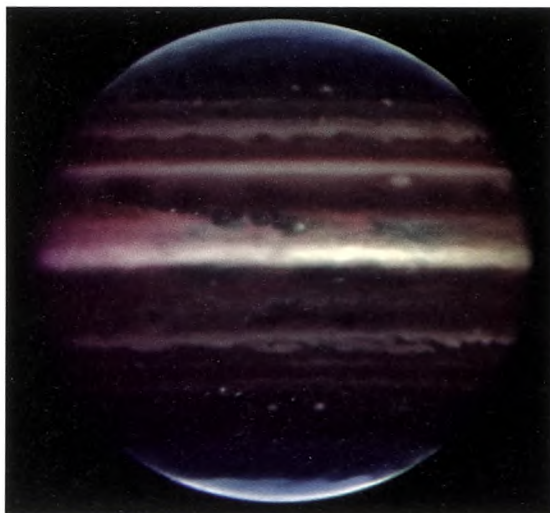
- En sensor, som kan måle variationerne (såvel de tidlige som de rumlige variationer). Dette gøres ved at måle på en klar (og punktformet) stjerne, som befinder sig nær de interessante objekter, man ønsker at måle på.
- Et variabelt spejl som for hvert enkelt del af hovedspejlet kan korrigere den afbøjning, lyset har været udsat for ved passagen gennem atmosfæren.

I praksis fungerer teknikken bedst i den nære infrarøde del af det elektromagnetiske spektrum. De instrumenter på VLT, hvor den adaptive teknik er blevet anvendt, har i praksis været i stand til at nå en opløsning, som overstiger, hvad man kan nå fra teleskoper i verdensrummet ved de bølgelængder, hvor VLT har benyttet den adaptive optik. Et eksempel på anvendelse

af adaptiv optik ses på figur 5 og 6, hvor opløsningen af det 8,2 m store spejl bliver fuldt udnyttet.



Figur 5. Observationer i den nære infrarøde del af det elektromagnetiske spektrum ved brug af VLT (og NA-CO instrumentet). Billedet viser stjernen Eta Carinae som befinder sig 9.000 lysår fra Jorden. Stjernen er formentligt i den sidste fase af sin udvikling, og den gennemløber udbrud fra sin overflade, hvor jets og stjernevinde forårsager en ekspanderende materialeskal [6]. (ESO Pressemeddelelse 17/08).



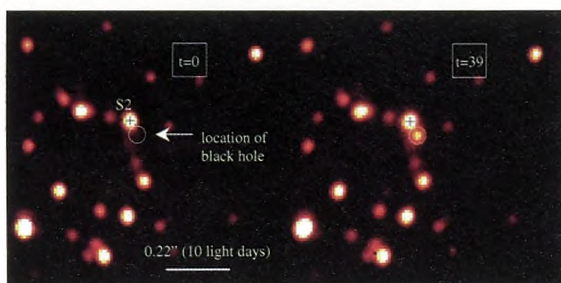
Figur 6. Observationer i den nære infrarøde del af det elektromagnetiske spektrum ved brug af VLT (og MAD instrumentet). Billedet viser Jupiter ved en bølgelængde på godt 2 μm og opløsningen er ca. 0,09" (ESO).

Problemet med anvendelse af den adaptive optik er, at det kræver, at der findes et relativt klart objekt nær det svagere objekt, man evt. ønsker at observere. Hvis der ingen klare stjerner er i nærheden, vil servostyringen ikke kunne tilsluttes, fordi målingerne af lysets afbøjning ikke bliver nøjagtige. Dette findes der dog en løsning på. Ved at anvende en Natrium-laser med en bølgelængde på 589,2 nm er det muligt at få de naturligt forekommende Natriumatomer i Jordens ydre atmosfære (Mesosfæren) i ca. 90 km højde til at lyse, og set fra VLT bliver dette lys til en kunstig stjerne, som kan anvendes til den adaptive optik. Denne type lasersystem kaldes for en laserguidestjerne, og idéen er simpelthen at sætte en kunstig stjerne op på himlen i nærheden af det objekt, man ønsker at undersøge. Ved at analysere lyset fra den kunstige stjerne, kan servostyringen fungere og man kan skabe de nødvendige skarpe

billeder. Det er dog en kostbar og kompliceret affære at anvende laserguidestjerner, og man må naturligvis tage visse forholdsregler, bl.a. i relation til evt. fly, som måtte passere hen over observatoriet i løbet af natten. Brugen af laserguidestjerner har dog været en stor succes, og observationer af det sorte hul i Mælkevejens centrum er bl.a. udført ved brug af denne teknik. På figur 7 herunder ses VLT under observation af Mælkevejens centrum ved brug af en laserguidestjerne. Figur 8 viser målinger af stjerner, som befinder sig i nærheden af Mælkevejens store sorte hul.



Figur 7. Laserguidestjerne anvendt til observation af Mælkevejens centrum ved brug af adaptiv optik (ESO).

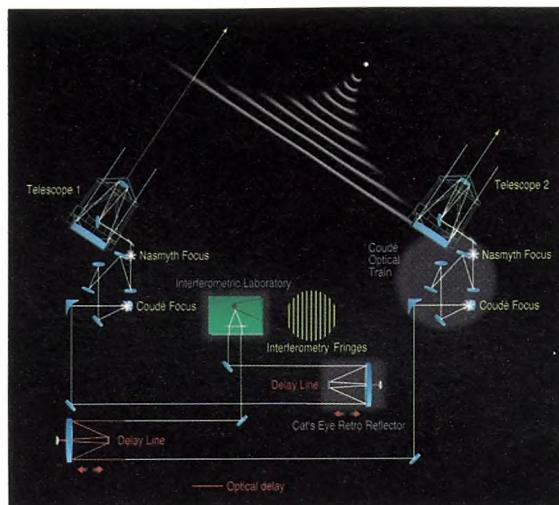


Figur 8. Stjernerne i Mælkevejens centrum observeret med VLT (og NACO). Opløsningen er $0,04''$ og billedet viser en situation hvor materiale formentligt falder ind i det sorte hul, hvilket forårsager en kortvarig opblussen af lys (et lysglimt fra det sorte hul). De to billeder er taget med 39 minutters mellemrum. Uden den adaptive optik ville atmosfæren udtvære hele billedet og det ville være umuligt at se de enkelte stjerner og lysglimt fra det sorte hul (ESO).

Interferometriske målinger med VLT

Tallene for vinkelopløsningsevnen i tabel 1 bygger på lysets bølgeegenskaber. Antagelsen bag vinkelopløsningsevnen er dog ikke, at der rent faktisk er tale om et enkelt teleskop med et hovedspejl eller en antenne, men at der er tale om lys, der kombineres fra områder, som har en given rumlig udstrækning. En given opløsning kan derfor i princippet opnås ved at kombinere lys fra to teleskoper, som befinder sig i en vis afstand fra hinanden. Denne type af observationer kaldes for interferometri og idéen er netop at kombinere lys fra to teleskoper og herved opnå en opløsning svarende til afstanden mellem de to teleskoper. Det er vigtigt at huske på, at selvom man ved denne teknik kan opnå superopløsning, er der ikke tale om, at man kan danne direkte billeder af et givent objekt. Interferometri

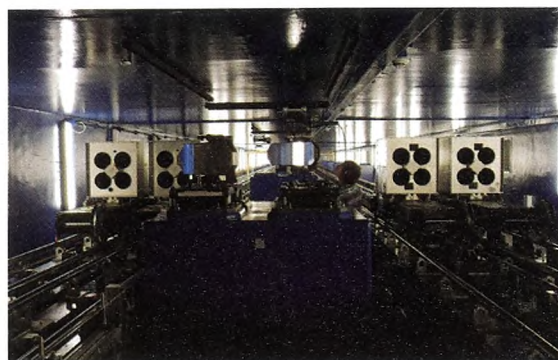
bygger derimod på, at man ved en serie af målinger kan genskabe et billede af det observerede objekt. Det er også væsentligt at minde om, at interferometri kræver en del lys, og derfor virker teknikken kun for relativt klare objekter. Figur 9 illustrerer princippet bag VLTI (Very Large Telescope Interferometer).



Figur 9. Princippet bag VLTI. Lyset fra et givent objekt bringes via underjordiske tunneller fra to eller flere teleskoper. I teleskopets laboratorium interfererer lyset og via interferensmønstret kan astronomerne opløse strukturer i de observerede objekter (ESO).



Figur 10. Tunnellerne på Cerro Paranal som sikrer at teleskoperne kan anvendes til interferometriske målinger (ESO).



Figur 11. I tunnellerne skal lyset kunne stabiliseres til en brøkdel af lysets bølgelængde for at man reelt kan kombinere lyset fra flere teleskoper (ESO).

VLTI handler ikke alene om at observere ved brug af de store 8,2 m teleskoper. Interferometret er udstyret,

så det tillige kan udnytte lyset fra en serie mindre teleskoper, der kan flyttes rundt på bjerget, og som derved kan danne interferensretninger, der kan optimere muligheden for at opløse detaljerne i de objekter, man studerer. På figur 10 vises strukturen af de underjordiske tunneller, som findes på Cerro Paranal. Desuden vises på figur 11 et billede fra tunnellerne, og endelig ses på figur 12 et af de mindre (1,8 m teleskoper), som VLTI kan udnytte.



Figur 12. To af de mindre teleskoper på 1,8 m som kan indgå i observation med de store 8,2 m VLT teleskoper (ESO).

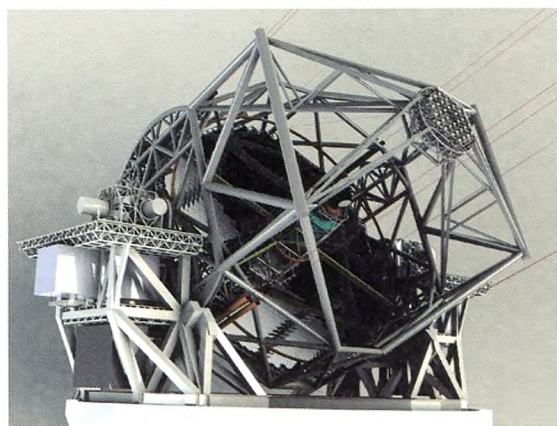
VLTI har bl.a. været anvendt til studiet af stjernernes egenskaber og stjernernes form. Et nyt instrument med navnet GRAVITY er under konstruktion og forventes færdigt i 2014. Kombinationen mellem GRAVITY og VLT Interferometeret vil give en nøjagtighed for bestemmelsen af positioner, der er så stor, at det vil være muligt at følge bevægelsen af det materiale, som falder ind i det sorte hul i Mælkevejens centrum (se figur 8). GRAVITY vil således kunne måle og teste forhold omkring Einsteins generelle relativitetsteori. Som det fremgår af tabel 1, kan VLTI med en afstand mellem de enkelte teleskoper på op over 100 m nå en vinkelopløsningsevne i det nære infrarøde på under 1/1000 buesekund. Nøjagtigheden ved at måle positionen af lyset er dog meget større. GRAVITY forventes at nå en nøjagtighed på omkring 1/100.000 buesekund, når vi taler om at måle f.eks. lysende materiale som falder ind i Mælkevejens centrale sorte hul. GRAVITY vil derfor i princippet nøjagtigt kunne følge materiale, som falder i tyngdefeltet gennem de sidste minutter, inden det forsvinder ned i det sorte hul i Mælkevejens centrum.

E-ELT: Et 42 m teleskop

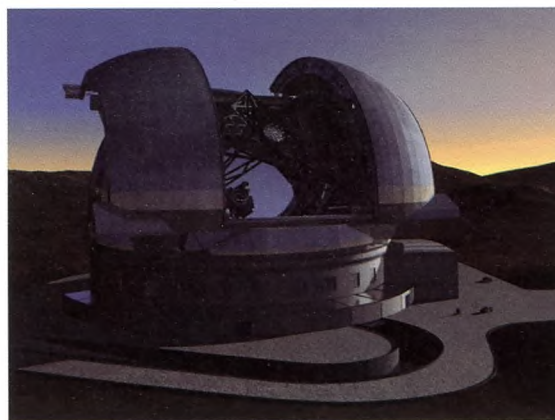
Som det fremgår af ovenstående er VLT og det tilhørende Interferometer (VLTI) et instrument som konstant udbygges og hele tiden optimeres med de nyeste teknologier og dermed leverer de bedst mulige observationsmuligheder for danske og europæiske astronomer. Det betyder dog ikke at man ikke kan bygge endnu bedre faciliteter. Et teleskop med endnu større spejl og endnu bedre vinkelopløsning end VLT's 8,2 m diameter, vil kunne give svar på en serie af helt fundamentale videnskabelige spørgsmål omkring kosmologien, kompakte objekter (sorte huller og objekter som via deres tyngdefelt tiltrækker materiale fra andre

stjerner), stjernernes overfladestruktur og dannelsen af stjerne- og planetsystemer.

I flere lande har ønsket om at finde svar på disse videnskabelige spørgsmål ført til et arbejde med at designe teleskoper med diametre på over 30 m. Det Europæiske Sydobservatorium arbejder i relation til dette med design og udvikling af det såkaldte European Extremely Large Telescope (E-ELT) – et gigantisk teleskop med en diameter på 42 m. Teleskopet vil, hvis det bygges, opnå en opløsning som nærmer sig den vi kan lave med VLTI. Men opløsningen vil – i modsætning til VLTI – kunne opnås for meget svage objekter i de meget fjerne egne (og tidlige faser) af Universet. Den endelige vedtagelse af E-ELT forventes i 2010 og det forventes at teleskopet kan begynde de første observationer i 2018. Design af teleskopet [7] er så fremskredet at det er muligt at begynde en detaljeret undersøgelse af de videnskabelige muligheder, man kan forvente ved brug af dette superteleskop.



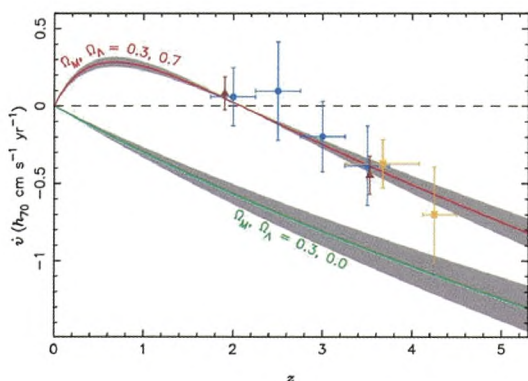
Figur 13. Den seneste version af E-ELT designet (november 2008). Hovedspejlet er 42 m i diameter og sekundærspejlet er på 6 m og er ophængt ca. 60 m over teleskopets fundament (ESO).



Figur 14. En tegners opfattelse af E-ELT teleskopet (42 m diameter) installeret i en gigantisk kuppel (ESO).

Som det fremgår af tabel 1 vil teleskopet kunne opløse detaljer ned til under 0,01'' – hvis det kan lykkes at nå diffraktionsgrænsen. Dette vil i lighed med VLT kræve udstrakt brug af laserguidestjerner. Med et lysopsamlende areal på 1350 m² vil teleskopet åbne for en række nye muligheder, som på afgørende vis

kan ændre vores forståelse af Universet. Astronomerne har identificeret studiet af planeter om andre stjerner (exo-planeter) som et af de felter hvor E-ELT åbner helt nye muligheder. Det gælder bl.a. studiet af Jordlignende planeter, undersøgelsen af atmosfærerne for exo-planeter og undersøgelsen af planeter under dannelse. Et andet vigtigt område er studiet af galaksernes dannelse og udvikling. Som et eksempel på hvor afgørende E-ELT kan vise sig at blive for astrofysikken, kan nævnes den såkaldte CODEX-spektrograf, som vil nå en nøjagtighed, der er stor nok til at kunne måle, ikke blot den kosmologiske rødforskydning (Universets udvidelse) som en konsekvens af Big Bang, men også dens variation med tiden. Over en årrække på 20-30 år vil E-ELT (med CODEX-spektrografen) via nøjagtige målinger af fjerne aktive galakseres bevægelse kunne måle ændringen i udvidelseshastigheden, som en konsekvens af de fundamentale egenskaber af universet. Det vil således være muligt at undersøge sammensætningen og mængden af universets grundbestanddele (almindeligt stof, mørkt stof og mørk energi) [8].



Figur 15. Simulering af 20-30 års observation med CODEX-spektrografen på E-ELT. Figuren viser hvordan ændringen i udvidelsen af Universet vil kunne anvendes til at skelne mellem forskellige sammensætninger af universets energityper [8].

ALMA: Det kolde Univers

I tabel 1 fremgår det at opløsningsevnen for et teleskop, som observerer i mikrobølger (f.eks. ved en bølgelængde på 1 mm) ikke ved brug af et enkelt teleskop (med en diameter på f.eks. 10 m) vil kunne nå under det, som kan opløses af det menneskelige øje. For astronomerne er mikrobølger særdeles interessante, da denne type stråling udsendes fra objekter med en lav temperatur svarende til den temperatur som findes i Universets store støv- og molekylskyer. Ønsker vi at undersøge de detaljerede forhold i forbindelse med de tidligste faser af stjernernes og planeterne dannelse, og vil vi udforske egenskaberne ved støv og gas i Universet og undersøge forekomsten af molekyler og atomer imellem stjernerne (og i de interstellare gasskyer), kan dette primært gøres ved at observere mikrobølger fra universet. Vi er dog ikke nødt til at acceptere den dårlige opløsning, som vi kan opnå ved brug af en enkelt antenne. Kombineres mikrobølgesignalerne fra en række teleskoper kan man på samme måde som

for VLTI (beskrevet ovenfor) nå en superopløsning, som svarer til den, vi kan nå med VLT og E-ELT i synligt lys. Dette kræver dog, at antennerne spredes med kilometers afstand. For at skabe egentlige billeder og samtidigt kunne foretage observationer af relativt svage objekter, kræves mange mikrobølge-teleskoper. Det er præcist det, som er tanken bag ALMA: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array [9].

ALMA er et samarbejdsprojekt mellem Europa, Japan og Nordamerika (samt Chile). Projektet består af 50 antenner hver med en diameter på 12 m. Antennerne opstilles i øjeblikket i Chiles Atacameørken på Chajnantor beliggende i 5000 meters højde. ALMA forventes taget i brug i 2012.



Figur 16. Stedet hvor ALMA opstilles i Chiles Atacameørken på Chajnantor beliggende i 5000 meters højde (ESO).



Figur 17. En tegners opfattelse af ALMA teleskopet når det står færdigt i 2012 (ESO).

SKA: Verdens største teleskop

ALMA, som opstilles i Chile, er optimeret til observation i mikrobølgeområdet. Der findes dog fysiske processer i universet som danner elektromagnetisk stråling med endnu længere bølgelængde (fra cm til km). Neutral brint udsender f.eks. stråling ved en bølgelængde på ca. 21 cm, og et teleskop, som er konstrueret til observation ved denne bølgelængde, vil derfor kunne anvendes til kortlægning og observation af neutral brint i Mælkevejen og i andre galakser. Som det fremgår af tabel 1, vil selv store antenner (f.eks. et teleskop med en diameter på 300 m) ved en bølgelængde på 21 cm end ikke kunne opløse detaljer svarende til det, et øje kan se. Derfor vil studiet af strukturdetaljer i fordelingen af neutral brint kræve et stort antal antenner fordelt over et stort areal (gerne i afstande på flere hundrede kilometer). For samtidigt at kunne detektere svage signaler vil det dog være nødvendigt at opstille mange antenner.



Figur 18. En tegning af den centrale del af SKA. Radioteleskopet består af flere tusinde antenner med et samlet areal på 1 km² [10].

Dette har ført til det såkaldte SKA-projekt – et stort antal radioantenner spredt over et stort areal med et samlet antenneoverladeareal på 1 km² – heraf navnet: Square Kilometre Array (SKA) [10]. Det videnskabelige mål med SKA dækker studiet af de tidligste faser af Universets udvikling efter den varme del af Big Bang, studiet af magnetisme i universet, sorte huller, kompakte stjerner og galaksedannelse. Projektet er endnu ikke endeligt vedtaget, men den grundlæggende idé er at bygge flere tusinde antenner og opstille dem i store og mindre grupper fordelt over et stort område. Der er to oplagte steder at placere SKA. Det ene er i Australien, det andet i Sydafrika. Teleskopet forventes ikke at være helt færdigt før om 20 år.

Litteratur

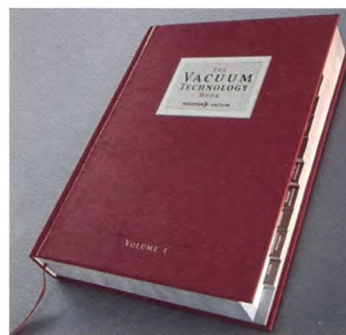
- [1] Kristian Pedersen, Anja C. Andersen, Johan P.U. Fynbo, Jens Hjorth og Jesper Sollerman, Det Mørke Univers, Naturens Verden, side 34, 1 / 2004.
- [2] Johan P.U. Fynbo, Anja C. Andersen, Steen H. Hansen, Jens Hjorth, Kristian Pedersen, Jesper Sollerman og Darach Watson, Galaksernes oprindelse og universets "Dark ages", Naturens Verden, side 26, 1/2008.
- [3] ESO Press Release 16/03: Cosmological Gamma-Ray Bursts and Hypernovae Conclusively Linked. Se URL: <http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2003/pr-16-03.html>
- [4] Hans Kjeldsen og Tim Bedding, Observation af stjerneskælv: Seismiske undersøgelser af stjernernes indre, KVANT nr. 3, November 2003.
- [5] ESO Press Release 33/05: Allo, Allo? A Star is Ringing, <http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2005/pr-33-05.html>
- [6] ESO Press Release 17/08: The Little Man and the Cosmic Cauldron, <http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2008/phot-17-08.html>
- [7] <http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/>
- [8] Luca Pasquini et al.: CODEX: the high resolution visual spectrograph for the E-ELT. Se URL: <http://www.vt-2004.org/sci/libraries/SPIE2008/7014-52.pdf>
- [9] <http://www.eso.org/sci/facilities/alma/>
- [10] <http://www.skatelescope.org/>
- [11] Torben Arentoft, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Hans Kjeldsen, Frank Grundahl, Søren Frandsen og Pierre-Olivier Quirion, Helio- og asteroseismologi, KVANT nr. 2, 2009 (dette nummer)
- [12] Steen H. Hansen et al (2009), Mørkt stof – vi ved så meget og dog så lidt, KVANT nr. 2, 2009 (dette nummer)

Hans Kjeldsen har i sin forskning benyttet teleskoper over alt på Jorden og i rummet og har udviklet teknikker til observation og analyse af stjernesvingninger med meget lav amplitude. Han deltager i øjeblikket i to satellitprojekter (NASA's Kepler-projekt og det franske CoRoT-projekt). Hans Kjeldsen har tidligere været ansat ved Nordisk Optisk Teleskop på La Palma og ved det Europæiske Sydobservatorium, ESO og har som medlem af ESO's Scientific Technical Committee i en årrække deltaget i prioriteringerne af ESO's fremtidige udvikling.



PFEIFFER VACUUM

**Vi udstiller på
DFS årsmøde**



På gensyn 16. til 18. juni

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
efa@pfeiffer-vacuum.dk

Mørkt stof – vi ved så meget og dog så lidt

Af Steen H. Hansen, Kristian Pedersen, Jesper Sollerman, Anja C. Andersen, Johan Fynbo, Jens Hjorth, Sune Toft og Darach Watson, Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Eksistensen af mørkt stof er veletableret gennem en lang række astrofysiske observationer på størrelsesskalaer fra de mindste dværggalakser til hele universet. Vi ved dog stadig overraskende lidt om den partikel, der udgør det mørke stof. Vi tilbyder her et overblik over hvor meget (eller hvor lidt) vi rent faktisk er sikre på, såsom hvad massen af den mørke partikel og dens vekselvirkninger med andre partikler er, og vi fortæller om, hvordan vi forsøger at fravriste den mørke partikel dens hemmeligheder.

Kan vi bortforklare det mørke stof?

Der er ingen tvivl om, at der findes omkring 6 gange så meget (masse bundet i) mørkt stof som i almindelige partikler. Når vi her taler om “almindelige partikler”, så inkluderer vi alting som stjerner, varm og kold gas, kaffeborde, neutroner, sutteflasker, osv. I helt gamle

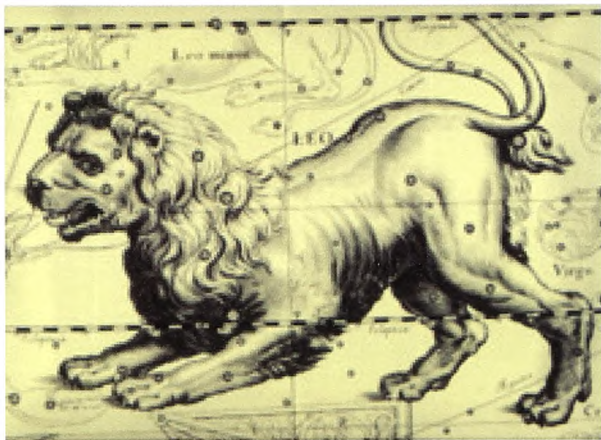
dage, altså for mere end 5 år siden, var der stadig folk, der alvorligt talte om muligheden for at undgå mørkt stof, hvis man til gengæld accepterede at modificere tyngdeloven. Med de smukke observationer af galaksehoben “Bullet cluster” (se figur 1) er der ingen, der formår at bortforklare mørkt stof længere.



Figur 1. Bullet cluster er observeret både gennem den røntgenudstrålende varme plasma (rød), gennem synligt lys (gult og hvidt) som måler stjernerne og galakserne, og ved linsemetoden (blå) som måler massen af alt stof. Den røde blob til højre minder lidt om en kugle, “bullet”, der er skudt igennem noget materiale. Observationen viser, at omkring 90 % af massen (blå) ligger rumligt forskudt i forhold til den varme gas (rød). Denne rumlige forskydning kan ikke forklares ved at modificere Newtons gravitationslov, og er derfor et af de mest direkte beviser på eksistensen af mørkt stof [1]. I dag har vi målt omkring fem tilsvarende strukturer.

Uafhængige observationer, af den kosmiske baggrundsstråling eller af de lette grundstoffer såsom helium, viser at mørkt stof ikke kan være sammensat af grundstoffer fra det periodiske system, eller andre kendte partikler fra partikelfysikkens standardmodel. Vi har altså med noget helt ny fysik at gøre, hvilket har fået feltet "astropartikelfysik" til at eksplodere over det sidste årti.

Vi har fundet mørkt stof på stort set alle kosmologiske skalaer. Det er helt fra de mindste galaktiske strukturer vi kender, nemlig dværggalakser, til hele universet. I de små dværggalakser som typisk er nogle tusind lysår store (Solen ligger omkring 25 lysår fra Mælkevejens centrum) kan vi måle position og hastighed af de meget gamle stjerner (se figur 2). Når vi har målt stjernernes dynamik, så er det ligetil at finde ud af hvor stor total masse en dværggalakse har. Vi finder, at der er fra 20 til 500 gange så meget mørkt stof som almindelige partikler i disse små galakser, der er satellitter til Mælkevejen.



Figur 2. Dværggalaksen Leo II ligger i stjernebilledet Løven. Det er en lille satellitgalakse til vores Mælkevej, der ligger omkring 690.000 lysår fra os. De omkring 80.000 målte stjerner ser lidt småkedelige ud, men de er sfærisk fordelt og i dynamisk ligevægt. Vi kan måle den totale masse og vi kan måle massen af stjerner og gas, og vi ved derfor, at Draco-dværggalaksen indeholder 30-40 gange mere mørkt stof end almindelige partikler [2].

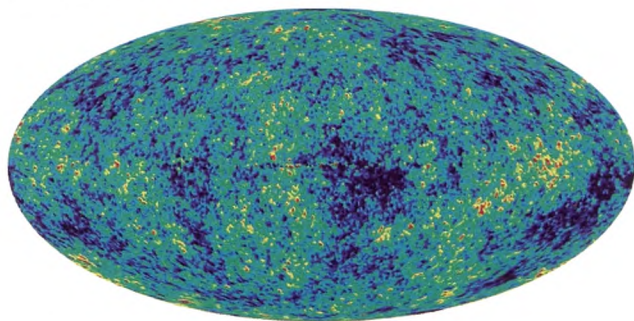
I større galakser finder vi også meget mørkt stof ved at måle rotationshastigheden af stjerner og kolde gasskyer. Vi finder typisk, at der i galakser er fra 1 til 10 gange så meget mørkt stof som almindelige partikler, hvilket afhænger af, hvor langt væk fra galaksernes centrum man kan få pålidelige observationer – jo længere ude man kan måle, jo større bliver bidraget fra mørkt stof. Helt inde i centrum af mange galakser ligger et kæmpestort sort hul, hvilket intet direkte har at gøre med mørkt stof af den slags som denne artikel omhandler.

Galaksehobe er flere millioner lysår store, og er de største strukturer, der kan opnå gravitationel ligevægt. Disse galaksehobe kan observeres på mindst tre forskellige måder, nemlig gennem røntgenstråling og linseteknikken (begge benyttet ved Bullet cluster), men også gennem Sunyaev-Zeldovich effekten (SZE). SZE

er en imponerende simpel teknik, som måler de kosmiske baggrunds-fotoner der vekselvirker med de varme elektroner i galaksehoben. Denne teknik oplever i disse år en fantastisk udvikling. Alle disse teknikker giver den samme konklusion, nemlig at den totale masse i galaksehobe udgøres af 80-90 % mørkt stof, og resten er så varm gas og stjerner.

På de allerstørste målbare skalaer – flere milliarder lysår – svarende til hele det synlige univers (altså så langt lyset kan nå på 13,7 milliarder år) observerer vi mørkt stof på mindst tre uafhængige måder: ved at observere de kolde fotoner i den kosmiske baggrundsstråling, ved at måle hvordan strukturer fordeler sig i forhold til hinanden (også kaldet "storskalastruktur") og endelig ved at observere hvordan supernovaers lysstyrker afhænger af afstanden.

Alle disse observationer peger på, at der i hele universet er omkring 6 gange så meget mørkt stof som almindelige partikler.



Figur 3. Den kosmiske baggrundsstråling viser ganske små variationer i fotonernes temperatur over hele himlen. Disse temperaturfluktuationer kan kun forklares ved at de første strukturer, der blev skabt, var af mørkt stof, og senere begyndte de almindelige partikler så at klumpe sammen inde i disse ansamlinger af mørkt stof.

Er mørkt stof en "partikel"?

Nogle ville nok spørge hvad det ellers kunne være, så lad os stille et mere utvetydigt spørgsmål: opfører mørkt stof sig som relativistiske partikler (såsom fotoner og neutrinoer), som vakuumfluktuationer (ligesom den kosmologiske konstant), eller som en tung og langsom partikel (som protoner, elektroner, neutroner,...). Dette kan omformuleres som et spørgsmål om mørk stofs "tilstandsligning". Vi kan tillægge enhver partikel et tal, som beskriver en forbindelse mellem tryk og tæthed

$$\text{tryk} = w \times \text{energitæthed}, \quad (1)$$

og for at være konkrete, så er $w = 1/3$ for fotoner og andre relativistiske partikler, $w = -1$ for vakuumfluktuationer, og $w = 0$ for protoner og andre massive ikke-relativistiske partikler. Ved at analysere den kosmiske baggrundsstråling (figur 3) i stor detalje finder vi, at $w = 0$ for mørkt stof, med en præcision på en milliontedel [3]. Vi er altså ret sikre på, at mørkt stof rent faktisk opfører sig som en partikel, der vejer noget – den kan altså ikke være helt masseløs

$$M > 0 \text{ kg}. \quad (2)$$

Hvad vejer mørkt-stofpartiklen?

Overraskende nok, så har vi stort set ingen anelse om hvad mørkt-stofpartiklens masse er. Som eksempel har vi to gode kandidater kaldet axionen og en wimpzilla. Hvis axionen skulle vise sig at være mørkt stof, så vejer den omkring en milli-elektronvolt, hvilket svarer til 10^{-42} kg. Hvis i stedet wimpzilla'en skulle vise sig at udgøre det mørke stof, så vejer den i størrelsesordenen en million-milliard giga-elektronvolt (10^{15} gange protonens masse), hvilket altså er ca. 30 størrelsesordener fra axionens masse. Til sammenligning svarer det til hvis vi ikke vidste om Jorden havde en masse som Jordens masse, eller i stedet vejede det samme som en myres venstre fod.

Den mindst modelafhængige øvre massegrænse vi har for mørkt stof er sjovt nok gennem analysen af dynamikken i dværggalakser. Den mindste rumlige opløsning vi formår at måle viser, at de mørke partikler må veje mindre end 10 millioner solmasser

$$M < 10^{37} \text{ kg.} \quad (3)$$

Det er altså kun mellem 50 og 80 størrelsesordener fra vores bedste partikkelkandidater – der er ingen der har sagt, at det skulle være let at være astrofysiker.

Hvor meget vekselvirker den?

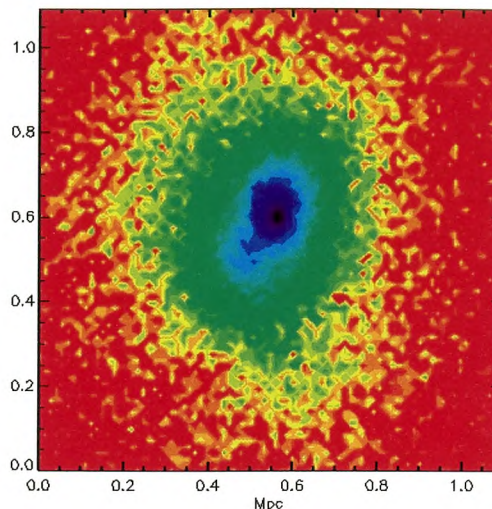
Når man spørger en teoretiker, hvad der egentlig skal til for at vi vil kalde noget for en partikel, så svarer de ofte, at den skal have en veldefineret masse, og man skal kunne fortælle, hvilke andre partikler den vekselvirker med (“ingen” er også et acceptabelt svar her, i modsætning til når man taler om folks personlighed). Når man kender vekselvirkningen med andre partikler, så kan man definere et vekselvirkningstværsnit, σ . For en almindelig bold er vekselvirkningstværsnittet blot hvor stor den ser ud, altså noget med $\sigma = 5 \text{ cm}^2$ til 500 cm^2 , afhængig af hvad man spiller. Når man dividerer med boldens masse, giver det σ/M omkring 4 til $10 \text{ cm}^2/\text{gram}$, afhængig af om man spiller bordtennis eller fodbold.

Vi har to essentielt modelafhængige målinger af dette tværsnit, som giver det samme svar. Det første er fra Bullet cluster (figur 1). Denne konfiguration er fremkommet ved, at to mindre galaksehobe er kollideret, og eftersom den varme gas har et rimelig stort vekselvirkningstværsnit, så blev det opbremset (det røde). De to klumper med mørkt stof (blå) er derimod fløjet lige igennem hinanden, hvilket giver os en øvre grænse på mørkt stofs vekselvirkningstværsnit.

Den anden metode er ved at måle om de mørke partikler kan huske, hvad der er op og hvad der er ned. Hvis de mørke partikler ofte støder sammen, så mister de hurtigt hukommelse om deres orientering. Ved at måle det mørke stofs “hukommelse” af rumlig orientering får vi derfor også en øvre grænse for deres vekselvirkning. Begge målinger giver

$$\frac{\sigma}{M} < 1 \frac{\text{cm}^2}{\text{gram}}. \quad (4)$$

Det er sandsynligvis et tilfælde at denne øvre grænse ligger så imponerende tæt ved værdien for almindelige boldspil.



Figur 4. Røntgenobservation af Galaksehoben med det poetiske navn RXJ1347, hvor vi kan måle at partiklerne der udgør det mørke stof har hukommelse om hvilken retning der er ind mod centrum. Det betyder at de ikke kolliderer ofte, hvilket giver os en øvre grænse for mørkt-stofpartiklernes vekselvirkningstværsnit [4].

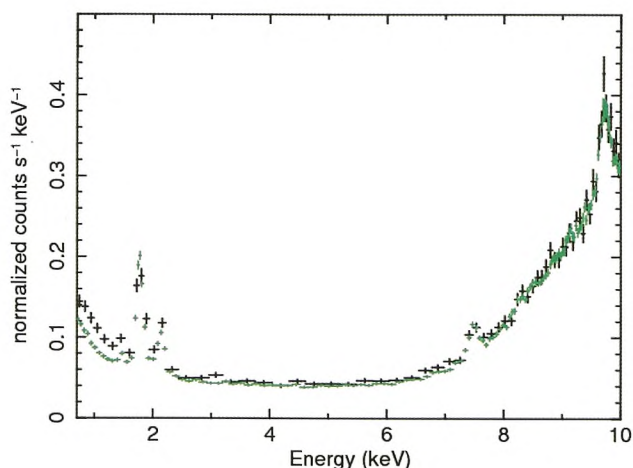
Hvordan kan vi måle mørkt stof?

Der er omkring 673 forskellige kandidater til mørkt stof som alle har forskellige egenskaber. Nogle har den heldige evne, at de kan henfalde eller annihilere med hinanden, andre kan en sjælden gang støde ind i – og vekselvirke med – almindelige partikler, og endelig er visse kandidater til mørkt stof et sandt mareridt for eksperimentalisterne fordi de essentielt er umulige at måle.

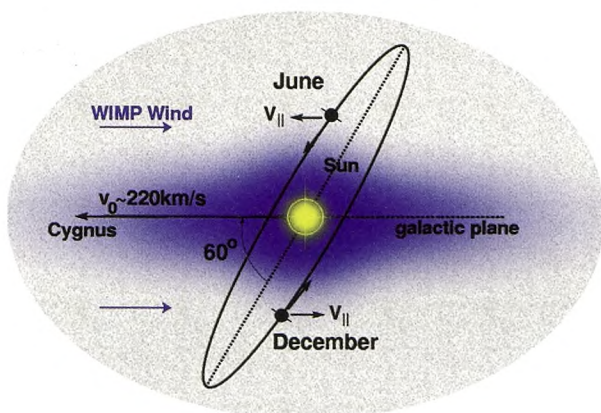
Henfald

Der er flere partikkelkandidater til mørkt stof som har den egenskab, at de henfalder. Deres levetid skal naturligvis være længere end – eller sammenlignelig med – universets alder, men selv hvis deres middellevetid er en million gange længere end 13,7 milliarder år, så kan der alligevel være mange der henfalder i en stor ansamling af mørkt stof. Hvis vi kigger på en struktur, der ligger tæt på os, så kan signalet ligefrem forventes at være stort, og så vil de udsendte fotoner have en energi der svarer præcist til halvdelen af massen af det mørke stof (som vi godt nok ikke kender). Vi ved jo at dværggalakser som ligger i udkanten af Mælkevejen er domineret af mørkt stof, så ved at kigge på fotoner fra dem kan vi blot lede efter et ikke-forventet spektralt “bump” i energien. På figur 5 ser vi et typisk spektrum fra en observation med røntgensatelliten “Chandra”. Der er en tydelig top omkring 2 keV (sort), som præcis svarer til en mørkt-stofpartikel med massen $M = 4 \text{ keV}/c^2$, svarende til knap 1 % af elektronens masse. Første gang vi opdagede dette bump sov vi ikke i tre

dage. Men det viste sig desværre at være baggrund, hvilket vi så ved at kigge lidt væk fra dværggalaksen (grøn).



Figur 5. Røntgenobservatoriet Chandra detekterer fotoner ved at kigge på dværggalaksen Draco (sort) og den forventede baggrund (grøn). Vi leder efter en afvigelse mellem disse to, som måske kommer fra en henfaldende mørkt-stofpartikelkandidat, en såkaldt "steril neutrino" [5].



Figur 6. Solens bevægelse gennem Mælkevejens halo af mørkt stof får haloen til at virke som en strid modvind for os. Da Jorden bevæger sig langsomt rundt om Solen, så vil modvinden være lidt større om sommeren end om vinteren. Denne årlige modulation kan man lede efter i underjordiske detektorer [6].

Underjordiske detektorer

En stor klasse af kandidater til mørkt stof har den egenskab, at de forventes at vekselvirke ganske svagt med almindelige partikler, hvilket åbner for en ny måde at detektere dem på med "normale" detektorer. Idéen er ret ligetil. Man bygger et laboratorium dybt under et stort bjerg for at formindske baggrunden af almindelige kosmiske stråler. Så installerer man en hyperfølsom detektor, der kan måle hvis enkelte detektorpartikler pludselig modtager en energi. Denne energi kan komme fra mange ting, såsom neutroner fra radioaktive henfald i Jorden, partikler fra normal kosmisk stråling, eller fra et sjældent sammenstød med en mørkt-stofpartikel. Måden at skelne disse bidrag fra hinanden er gennem den årlige modulation. Eftersom Solen bevæger sig

rundt om Mælkevejens centrum med omkring 220 km/s, så ser vi de mørke partikler i Mælkevejen som en strid vind. Da Jorden bevæger sig rundt om Solen, så vil styrken af vinden fra det mørke stof variere ganske svagt fra sommer til vinter, og vi kan potentielt måle denne årlige modulation (figur 6). Der er idag omkring 10-15 forskellige eksperimenter, der forsøger at identificere den mørke partikel ved at benytte denne teknik, og et af disse, DAMA, har allerede publiceret et signal, som potentielt kan være den første detektion af mørkt stof. Vi venter alle spændt på om andre eksperimenter vil bekræfte eller afvise denne detektion som uforstået baggrund, eller som den første mørkt-stofmåling med en underjordisk detektor.

Litteratur

- [1] D. Clowe, M. Bradac, A. H. Gonzalez, M. Markevitch, S. W. Randall, C. Jones and D. Zaritsky (2006), A direct empirical proof of the existence of dark matter, *Astrophys. J.* bind **648** L109, <http://lanl.arxiv.org/abs/astro-ph/0608407>.
- [2] A. Koch et al. (2007), Stellar kinematics in the remote Leo II dwarf spheroidal galaxy – Another brick in the wall, *Astron. J.*, bind **134**, 566, <http://lanl.arxiv.org/abs/0704.3437>.
- [3] C. M. Muller (2005), Cosmological bounds on the equation of state of dark matter, *Phys. Rev. D*, bind **71**, 047302, <http://lanl.arxiv.org/abs/astro-ph/0410621>.
- [4] O. Høst, S. H. Hansen, R. Piffaretti, A. Morandi, S. Ettori, S. T. Kay and R. Valdarnini (2009), Measurement of the dark matter velocity anisotropy in galaxy clusters, *Astrophys. J.*, bind **690**, 358, <http://lanl.arxiv.org/abs/0808.2049>.
- [5] S. Riemer-Sørensen and S. H. Hansen (2009), Decaying dark matter in Draco, <http://lanl.arxiv.org/abs/0901.2569>.
- [6] R. Bernabei et al. (DAMA Collaboration) (2008), First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI, *Eur. Phys. J. C* bind **56**, 333, <http://lanl.arxiv.org/abs/0804.2741>.



Fra venstre, i baggrunden: Kristian Pedersen, Anja C. Andersen, Jesper Sollerman. Foran: Sune Toft, Darach Watson, Jens Hjorth, Steen H. Hansen. Alle forfatterne er ansat ved "Dark Cosmology Centre" ved Niels Bohr Institutet. DARK er finansieret af Danmarks Grundforskningsfond siden 2005.



Stjernehimlen den 21/6 kl. 23.45

Månens faser



Solsystemet ca. 21. juni

Kun planeter synlige med det blotte øje er vist nedenfor. Udenom planetbanerne ses Dyrekredsens 12 stjernebilleder. Den røde linje markerer Ekliptika - Solsystemets baneplan.

På *morgenhimlen* ses Venus og Merkur. På *aftenhimlen* ses Saturn og efterhånden også Mars og Jupiter.

Astronomiske begivenheder

- 21/6 Sommersolhverv
- 4/7 Jorden længst fra Solen: 152,1 mio. km
- 22/7 Total solformørkelse i Asien, ikke synlig i Danmark
- 6/8 Partiel måneformørkelse kl. 1.01 til 4.17
- 7/8 De lyse nætter ender
- 12/8 Stjerneskedssværmen *Perseiderne* kulminerer.



KVANT-nyheder

Af Sven Munk, John Rosendal Nielsen og Michael Cramer Andersen, KVANT

Supermagnet på 100 Tesla

FASTSTOFFYSIK. Kun få laboratorier i verden er i stand til at frembringe meget kraftige magnetfelter. Blandt de førende pågår en konkurrence om først at nå målet 100 Tesla. Hidtil har National High Magnetic Field Laboratory i Los Alamos rekorden med 90 T. I Forschungszentrum Dresden Rossendorff har man nået 87 T, men der arbejdes energisk på at nå højere. Det egentlige mål med sådanne magnetfelter er undersøgelse af materialeegenskaber.

At lave en 100 T magnet er i høj grad et mekanisk projekt. Med 100 T vil der være et tryk i spolen på 40.000 atm – nok til at lave syntetiske diamanter. For at klare de mekaniske belastninger må der bruges meget stærke materialer såsom kul fibre.



Varmeudvikling og energiforsyning kræver også opmærksomhed. Af termiske årsager må man begrænse varigheden af den maksimale feltstyrke til 10 ms. Herefter køles spolen med flydende kvælstof. Det betyder, at der kun kan gennemføres få forsøg i løbet af en dag. Den elektriske energi, som skal tilføres magneten (op til 15 MJ) oplagres i et kondensatorbatteri bestående af 500 kondensatorer (24 kV).

De meget stærke mekaniske kræfter som ledsager magnetiske felter har gjort det nødvendigt at bygge laboratoriet af træ. Som et afsluttende indspark kan det nævnes, at russiske forskere har rekorden på 2800 T, men dog kun med en varighed på få mikrosekunder. Med en sprængladning lykkedes det at presse de magnetiske feltlinjer sammen, så værdien blev så høj.

Kilde: <http://www.fzd.de>

Ny radon isotop fundet

KERNEFYSIK. Arbejdet med at bestemme massen af ustabile radioaktive kerner er vanskelig, fordi levetiden ofte er under 1 sekund. En international forskergruppe har nu udført målinger på den ædle luftart radons 7 isotoper. Måleresultaterne afslørede en hidtil ukendt isotop, nemlig radon-229 med en levetid på 12 sek. Den længstlevende radon-222 udmærker sig med 4 dage.



Massebestemmelsen blev udført i CERN, hvor en prøve af uran blev beskudt med protoner. Radon blev som ioner ført ind i en ionfælde (se figuren), hvor atomerne holdes svævende vha. elektriske og magnetiske felter. Måles cyklotronfrekvensen er massen faktisk bestemt. Usikkerheden for den benyttede målemetode angives til 10^{-8} .

Kilde: Physical Review Letters, bind 102, no. 112501

Cerenkov-teleskop indviet

ASTRONOMI. Magic II, som det nye teleskop hedder, er placeret på de Kanariske øer i 2200 meters højde. Instrumentets formål er at bestemme gammastråling med en fotonenergi på mellem 20 GeV og ca. 200 GeV. Denne stråling bliver imidlertid absorberet i Jordens atmosfære, hvor den giver anledning til dannelse af elektron-positron-par. Disse vil bevæge sig med større hastighed end lyshastigheden i luft, hvorved der opstår Cerenkov-stråling med den karakteristiske blå farve. Det er disse blå glimt, som via teleskoperne kan fortælle hvor gammakvantet kommer fra.



Magic I og II (Major Atmospheric Gamma Imaging Cerenkov Telescope) med en spejldiameter på 17 m. For kort tid siden lykkedes det med Magic I at opfange pulserende energirig gammastråling fra Krabbetågen, som er resterne af en supernova, der eksploderede i året 1054.

Kilde: http://www.df.unipi.it/~flaminio/astroparticelle/-Magic_2_dicembre_2004.pdf

Meteoror afslører is på Mars

ASTRONOMI. NASA's marssonde *Phoenix Mars Lander* har været på den røde planet i et år og siden november sidste år har sonden sendt et væld af observationer til os. Seneste nyt fra Phoenix er, at man har fundet flydende saltvand på Mars' overflade.

Phoenix har indtil nu fundet vand i form af is, men billeder fra sondens landingsben viser tegn på mudderdråber (markeret med grøn farve). Mudderdråberne udviser en adfærd, som man tillægger dråber af flydende vand. Dråberne bliver større ved at opsamle fugtighed fra luften. Nogle af dem er blevet mørkere, har bevæget sig og er smeltet sammen. Den tynde atmosfære på Mars betyder, at vands kogepunkt er meget lavt, og vandet går derfor direkte fra fast form til dampform ved sublimering. Hvis det er saltholdigt vand, kan det godt være flydende, og meget tyder på, at det er saltvandsdråber, der har sat sig på Phoenix' landingsben.



Kilder: www.ns.umich.edu/htdocs/releases/story.php?id=7041,
www.videnskab.dk/content/dk/naturvidenskab/-billeder-tyder-pa-flydende-saltvand-pa-mars

Nyt radioteleskop i Chile

ASTRONOMI. Et meget stort radioteleskop, Atacama Large Millimeter Array (ALMA), med en baseline på flere km er under opførelse i Chile. Radioteleskopet består af 66 cirkelformede antenner typisk med en diameter på 12 m. Projektet ledes af ESO (European Southern Observatory).

Instrumenterne er designet for submillimeter stråling. Her under opstartsfasen har man målt på et 102,4 GHz signal fra Mars. Som resultat har man fået et interferens mønster som afslører Mars bevægelse.

De benyttede detektorer anvender superledende elektronik afkølet til 4 K. For at mindske strålingstabet i atmosfæren er radioteleskopet anbragt 5000 m over havet.

Kilde: <http://www.eso.org/sci/facilities/alma>

Bog om fysik til download

FYSIKUNDERVISNING. En bog med karakteristikken: "A new, twenty-second edition of the freely downloadable physics textbook" er klar til afhentning. Bogens 1600 sider skulle vise, at fysik ikke er kedelig. Emnemæssigt kommer man vidt omkring. Termodynamik, elektrodynamik, mekanik, kernefysik og astrofysik – for at nævne nogle få emner. Man finder f.eks. et vibrerende kvartskrystal i et ur, Ohms lov forklaret eller hvordan man slipper godt fra at dyppe hænderne i flydende bly. Der er noget for enhver smag.

Kilde: <http://www.motionmountain.net> (download 100 MB pdf-fil)

Meteorit fundet ved Maribo

ASTRONOMI. Mange husker måske den meget kraftige ildkugle, der den 17. januar blev observeret på himlen over den sydlige del af Danmark. Voldsomme brag fulgte den lysstærke kugle.

På baggrund af film af ildkuglen (billedet nedenfor til venstre), på vurdering af dens bane og positionen i relation til det lydniveau der fulgte ildkuglen, og endeligt på baggrund af utallige interviews med observatører på Lolland lykkedes

det efter en måneds tid den tyske meteoritjæger Thomas Grau (billedet nedenfor til højre) at skyde sig ind på et område af den gode Lollandske muld, som kunne være et aktuelt nedslagsfelt. Efter 6 dages intensiv søgning lykkedes det ham at gøre det fantastiske fund: En lille håndfuld sorte småsten, der midt i marts måned blev afleveret på bordet hos geofysiker, Henning Haack, der er kurator for meteoritsamlingen ved Geologisk Museum, Statens Naturhistoriske Museum. Det menes at være dele af en meteorit af den meget sjældne slags "kulkondrit", der indeholder de ældste dele af vores solsystem, 30 mio. år ældre end Jorden. Fundet er lidt af en sensation.



Henning Haack var ude af sig selv af begejstring, da han konstaterede, at de sorte sten virkelig er hvad man håbede på. "Det er en meget sjælden begivenhed. Der er kun fundet friskfaldne meteoritter omkring tre gange i Danmark, den seneste gang i 1951. Desværre er der ikke nogen stykker bevaret fra det første fald, der fandt sted d. 30/3 1654 kl. 08:00 i Ørsted på Fyn. Der blev ellers sendt et par stykker til København – men de er forsvundet (længe før jeg blev ansvarlig for samlingen....). Der var formentlig tale om almindelige kondritter så den nye meteorit er klart den mest interessante.", fortæller forskeren. Meget tyder på, at det er de fundne meteoritsten der var årsagen til den ildkugle som blev observeret et par måneder tidligere.

KVANT har spurgt Henning Haack om hvilke undersøgelser og målinger der skal foretages på meteoritten. "Det der sker med den nu er, at den er anbragt i en detektor dybt inde i et bjerg i Italien hvor vi tæller gammahenfald fra kortlivede isotoper. Det kan fortælle os noget om hvor længe den har rejst i rummet (hvor stor en dosis har den fået siden den blev slået løs fra en asteroide. Målingerne kan også bidrage til at vurdere hvor stor den var – eller rettere sagt hvor skærmet var det stykke vi har fået? Endelig kan målingerne hjælpe til at bestemme hvornår den faldt – vi vil gerne verificere at den faldt d. 17/1 da ildkuglen blev observeret".

Næste punkt bliver at klassificere meteoritten. Henning Haack fortæller videre "Der er tydeligvis tale om en kulkondrit – dvs. den består af primitivt støv og partikler fra Solsystemets oprindelse – der har været opbevaret på en asteroide der aldrig har været varmet op. Der er dog flere typer kulkondritter fra flere forskellige asteroider. Vi tror at der er tale om en såkaldt CM-type – baseret på størrelsen af de partikler den indeholder."

Den seneste melding kom lige før redaktionens afslutning, "Vi har bestemt iltisotopsammensætningen af meteoritten og den bekræfter, at meteoritten er en kulkondrit af type CM. CM-kulkondritter er kendt for deres høje indhold af organiske forbindelser – bl.a. aminosyrer. Med hensyn til målingerne i Italien så er de ikke gået helt så godt som forventet. Det meget omtalte jordskælv i Italien havde epicenter stort set lige i laboratoriet. Meteoritten kom ikke noget til, men målingerne blev afbrudt i to uger og flere af de isotoper vi ville bestemme, har så kort halveringstid at det nu er for sent at måle dem. Vi har dog nok data til at konkludere at det er en friskfalden meteorit. Der er med andre ord ingen grund til at tro at den ikke faldt d. 17/1.

Kilde: http://geologi.snm.ku.dk/nyheder_gm/nyhed13032009/

ESA's mikrobølgesatellit PLANCK

Af Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen, DTU Space, Institut for Rumforskning og -teknologi, Danmarks Tekniske Universitet

Med ESA's Planck satellit vil vi få kort over mikrobølge-baggrundstrålingen med hidtil uset følsomhed og detaljerigdom. Disse data vil give nye unikke informationer om de allertidligste faser i Universets udvikling. DTU Space har været ansvarlig for levering af spejlsystemet til Planck og dermed sikret danske forskere's direkte adgang til denne enestående database. Planck satellitten skal sendes op i maj år og vil nå sin bane omkring Solen ca. 1,5 millioner km fra Jorden efter ca. 2,5 måneder. I artiklen vil de videnskabelige forventninger til Planck og det danske engagement blive nærmere beskrevet.

Den kosmiske mikrobølge-baggrundsstråling

CMB (Cosmic Microwave Background) blev opdaget i 1964 af de to amerikanske astronomer Penzias og Wilson. De var igang med at undersøge mikrobølgestrålingen fra vores egen Mælkevej (se figur 1). Til deres store overraskelse registrerede de et signal, som så ud til at være konstant, uafhængigt af hvor på himlen deres teleskop pegede. Som sagt var de meget overraskede over at finde dette signal, så de gjorde et meget stort nummer ud af at undersøge, om det kunne stamme fra en nærliggende radiostation, om signalet kunne komme fra vores solsystem, eller fra Mælkevejen. De undersøgte også omhyggeligt om dette kunne stamme fra deres radioteleskop selv. De gjorde sig endog den ulejlighed at rense hele det store volumen for duereder og duemøj. Men de måtte konkludere, at signalet måtte komme fra det ydre rum.



Figur 1. Penzias og Wilson foran det store radioteleskop de brugte til opdagelsen af CMB.

De publicerede deres opdagelse i det anerkendte amerikanske tidsskrift *Astrophysical Journal* i 1965. Her gør de detaljeret rede for deres omhyggelige arbejde med først at udelukke alle mulige kilder til dette signal, og at de er sikre på at signalet kommer langt fra Jorden, Solen og vores Mælkevejen. De har ikke noget bud på, hvor strålingen stammer fra.

I artiklen lige efter Penzias og Wilson's skriver en anden amerikansk gruppe, ledet af Robert Dicke, at de kender Penzias og Wilson's opdagelse, og at de har et

godt bud på, hvor strålingen kommer fra, nemlig at den er frigivet fra stoffet lige efter Big Bang.

At der bliver frigivet elektromagnetisk stråling lige efter Big Bang blev faktisk forudsagt allerede i 1948, bl.a. af den russiske fysiker Gamow, som i øvrigt arbejdede i flere år på Niels Bohr Institutet på Blegdamsvej.

Lige omkring Big Bang er de fysiske forhold i Universet selvfølgelig meget eksotiske, langt fra noget vi kender i vore dages Univers. Men nogle få minutter efter Big Bang består Universet faktisk af elementer, som vi godt kender idag. For Big bang foregår så hurtigt, at der kun bliver dannet det simpleste atom brint og en lille smule helium. Derudover var der en masse energi i form af lys. Naturligvis er temperaturen af stoffet meget høj, hvorfor brintatomerne er spaltet i frie atomkerner, positivt elektrisk ladede protoner, og negativt ladede elektroner. Pga af den såkaldte Thompson spredning bliver lyset, dvs. fotonerne, hele tiden spredt i alle retninger af de frie elektroner, så Universet er fuldstændig uigennemtrængeligt for lys.

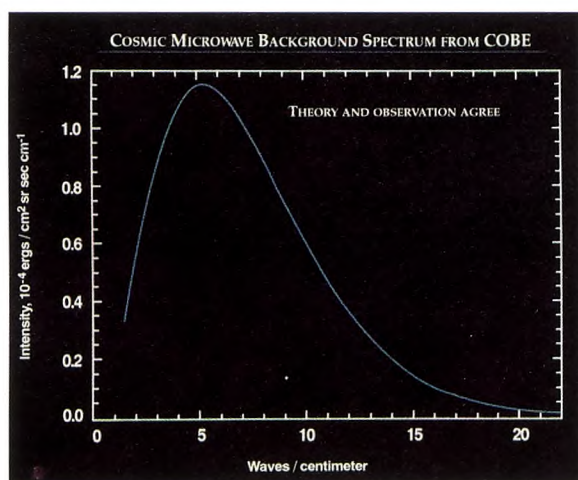
Men Big Bang betyder, at hele Universet eksploderer dvs. alt bevæger sig væk fra hinanden. Som konsekvens falder temperaturen og dermed bliver elektronernes hastigheder mindre og mindre. På et tidspunkt, ca. 400.000 år efter Big Bang, når temperaturen har nået 3.000 grader, er elektronernes hastigheder faldet så meget, at tiltrækningskraften fra de frie protoner er stor nok til at fastholde elektronerne, dvs. der bliver dannet neutrale brintatomer. Men det betyder, at de frie elektroner næsten momentant bliver fjernet, og at der derfor ikke længere er noget til at forhindre fotonerne i at bevæge sig gennem Universet. Det var det lys, som Penzias og Wilson for første gang så. For denne helt afgørende opdagelse for moderne kosmologi fik Penzias og Wilson i 1978 Nobelprisen i Fysik.

De amerikanske COBE og WMAP satellitter

Det er klart, at CMB er det tætteste vi nogensinde kommer til direkte at studere Big Bang, ihvertfald ved hjælp af elektromagnetisk stråling, for før den tid var Universet jo helt uigennemtrængeligt for lys. Derfor har der naturligvis siden Penzias og Wilson's opdagelse været udført store anstrengelser for at studere denne stråling i størst mulig detalje. Det første store gennembrud blev gennemført med den amerikanske

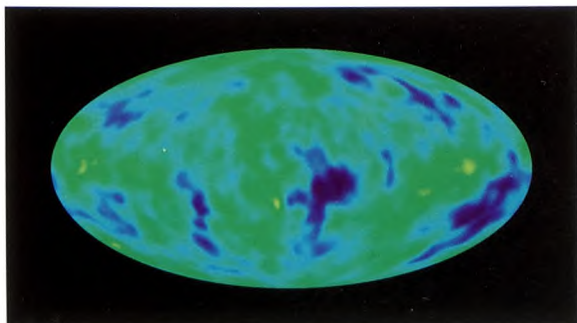
COBE satellit, som samlede data i starten af 1990'erne. Med FIRAS instrument blev spektret af CMB målt med meget stor nøjagtighed, nøje svarende til en temperatur på $2,725 \pm 0,002$ kelvin fra det absolutte nulpunkt $-273,16^\circ\text{C}$.

Den eneste kraft, der kan have dannet de strukturer, vi ser i Universet i dag, er tyngdekraften. Selvfølgelig virkede tyngdekraften også lige efter Big Bang, hvor tætheden jo var meget høj. Men hvis temperaturen var fuldstændig konstant, ophævede tyngdekraften fra de forskellige områder hinanden, og der var aldrig blevet dannet noget som helst. Da vi jo ved at der findes strukturer (galakser og galaksehobe, the Great Wall, stjerner, planeter, os selv) i Universet i dag, må der nødvendigvis være små (i størrelsesordenen 10 mikrokkelvin) temperaturforskelle, som så gennem tiden har vokset til vore dages strukturer. Disse ganske små temperaturforskelle blev første gang med sikkerhed detekteret af DMR, det andet instrument på COBE satellitten. For disse to eksperimentelle gennembrud fik de to amerikanske astronomer John Mather og Georg Smooth nobelprisen i fysik i 2006.



Figur 2. COBE/FIRAS CMB spektret. Kurven følger en Planck-strålingslov med en temperatur på 2,725 K. Målefejlene er mindre end tykkelsen af kurven!

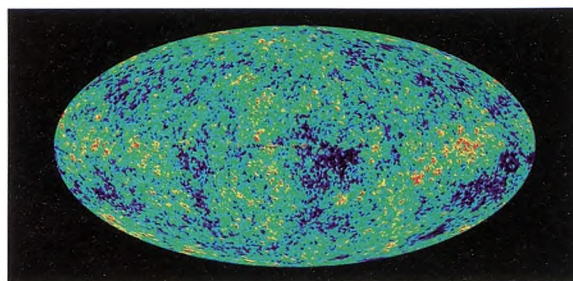
COBE/FIRAS CMB spektrum kan ses på figur 2. Det ses at spektret følger en Planck-strålingslov med temperatur på 2,725 K meget nøjagtigt, målefejlene er faktisk gemt under Planck kurven.



Figur 3. COBE/DMR kortet over temperaturvariationer på hele himlen. De falske farver viser temperaturvariationerne på $\pm 200 \mu\text{K}$ i forhold til gennemsnittet 2,725 K.

Figur 3 viser kortet over hele himlen af de ganske små temperatureforskelle, som med sikkerhed blev detekteret med COBE/DMR. Men det er tydeligt, at figuren ikke viser særlig mange detaljer. Det skyldes, at DMR instrumentet kun kunne skelne ting på himlen som er mindst 7 grader fra hinanden.

I 2001 blev COBE efterfuldt af den amerikanske WMAP satellit. Denne satellit har siden virket upåklageligt. Det bedste WMAP kort over temperaturforskelle på himlen kan ses på figur 4. Det er tydeligt at WMAP's vinkelopløsning på ca. 15 bueminutter (svarende til $0,25^\circ$) har betydet detektionen af en masse finere detaljer i CMB.



Figur 4. WMAP's CMB kort. Igen falske farver med den samme skala som figur 3 ($\pm 200 \mu\text{K}$), hvor blå er koldere og rød er varmere end gennemsnittet.

CMB stammer fra tiden ca. 400.000 år efter Big Bang. Einstein har lært os at ingen fysisk påvirkning kan bevæge sig hurtigere end lysets hastighed, dvs. områder, der har haft mulighed for at påvirke hinanden, må være mindre end 400.000 lysår fra hinanden. På himlen betyder det, at områderne skal være tættere på hinanden end ca 1 grad. Da vi primært er interesseret i at undersøge, hvilke fysiske processer der foregik i Universet på dette tidspunkt, skal vi altså have en vinkelopløsning, der er væsentligt bedre end 1 grad. Med COBE/DMR's vinkelopløsning på 7 grader fik man derfor pløret flere fysisk set uafhængig 'universer' sammen og dermed gjort det meget svært at udtrække informationer om, hvad der foregik i Universet på det tidspunkt.

Det var helt anderledes bedre med WMAP, men der er selvfølgelig stadigvæk ønske om kunne studere CMB med endnu bedre vinkelopløsning og samtidigt kunne detektere så svage signaler som overhovedet muligt.

ESA's Planck mission

Med ESA's Planck mission (figur 5) bliver det muligt at studere CMB med hidtil uset detaljerigdom. Planck er en såkaldt 'Principal Investigator' mission, dvs. at det kun er de videnskabelige grupper, der leverer de videnskabelige instrumenter, der får adgang til dataene hele den lange tid det tager fra dataene bliver opsamlet til de er færdigbehandlet (mere end 3 år). På et tidligt tidspunkt besluttede ESA sig for, at Planck spejlsystemet skulle betragtes som et videnskabeligt instrument.

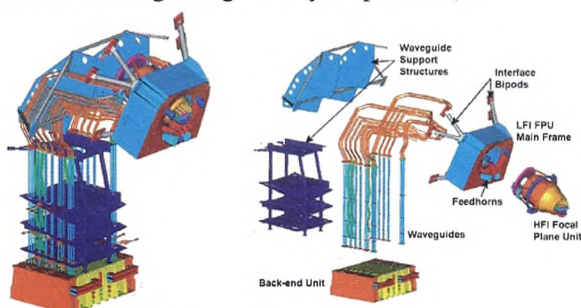


Figur 5. Planck-satellitten. Teknikerne foretager den sidste omhyggelige rengøring i det specielle rene rum i Kourou, Fransk Guyana.

Da studiet af de tidligste faser i Universets udvikling er et højt prioriteret forskningsområde i Danmark, undersøgte DTU Space muligheden for en dansk leverance. Det lykkedes at få Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd (nu FNU) med på idéen, og i 1996 lavede DTU Space og ESA en kontrakt med et tysk firma (ASTRIUM, Friedrichshafen) om produktion af Planck spejlsystemet. Med dette engagement i Planck har DTU Space sikret danske forskeres adgang til denne unikke database.

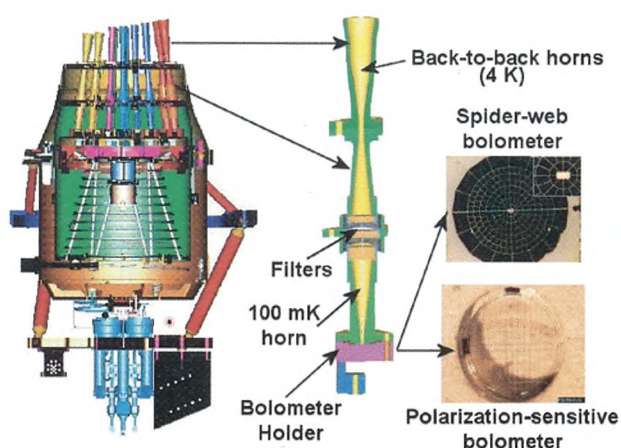
Planck's to detektorsystemer

I fokalplanet for Planck teleskopet er der anbragt en boks indeholdende to detektorsystemer: High Frequency Instrument (HFI) som dækker frekvensintervallet fra 100 GHz til 850 GHz og Low Frequency Instrument (LFI), som dækker fra 30 GHz til 70 GHz (30 GHz svarer til en bølgelængde af lyset på 1 cm).

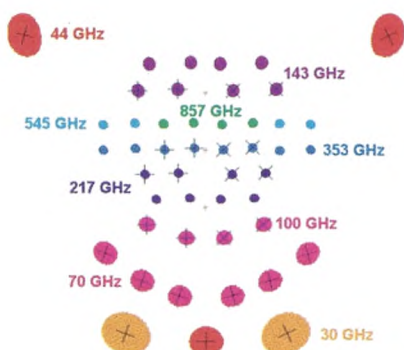


Figur 6. LFI detektorsystemet. Komplexiteten af instrument fremgår tydeligt.

LFI bygger videre på teknologien brugt i COBE/DMR og i WMAP. LFI består af en samling af 22 detektorer af indiumfosfid med 'high electron-mobility transistor' (HEMT) forstærkere. Vinkelopløsningen af LFI detektorerne varierer fra 33' til 14' (ét bueminut, 1', er lig $1^\circ/60$). De bliver kølet ned til ca. 20 K. LFI instrumentet er blevet udviklet af et internationalt konsortium, ledet af professor N. Mandolesi, Bologna. Den komplicerede opbygning af LFI fremgår af figur 6.



Figur 7. HFI detektorsystemet. Figuren viser kølsystemet (ned til 0,1 K!) og designet af hornene foran bolometrene, der kan måle temperaturstigninger.



Figur 8. Arrangementet af detektorerne i fokalplanen. Øverst ses en tegning hvor de forskellige horn til de forskellige frekvenser er placeret. Nederst ses et nærbillede af HFI-hornene, LFI-hornene kan ses i baggrunden.

HFI bygger på ny teknologi, hvor det lysfølsomme element er et bolometer. Når bolometret bliver belyst, så stiger temperaturen en lille smule. Det er denne temperaturstigning man måler. For at være følsom for mikrobølger er det nødvendigt at bolometrene bliver kølet ned til ca. 0,1 kelvin over det absolutte nulpunkt ($-273,16^{\circ}\text{C}$). HFI består af 56 bolometre hvoraf 32 også er følsomme for polarisationen af mikrobølgerne.

På figur 7 vises opbygningen af HFI instrumentet, herunder designet af hornene foran bolometrene. Disse horn modvirker effekten af diffraktionen ved disse lange bølgelængder, og er helt nødvendige for at opnå den ønskede fine vinkelopløsning. HFI er blevet udviklet af et stort internationalt konsortium under ledelse af Prof. J-L. Puget, Paris. Arrangement af LFI og HFI detektorerne i fokalplanen ses i figur 8.

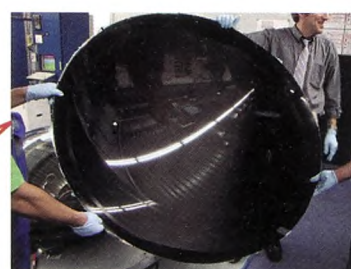
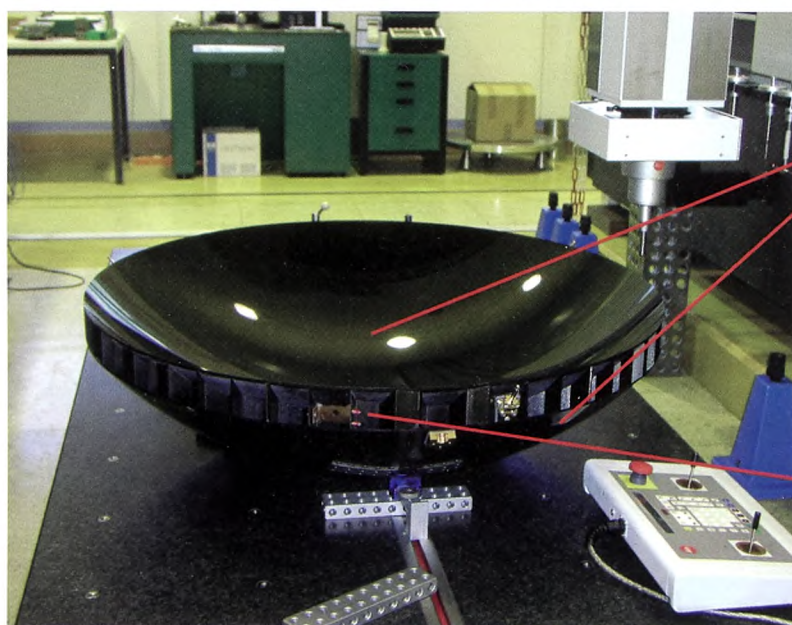
Planck teleskopet

Planck teleskopet er et 'off axis' (dvs. sekundærspjeldet skygger ikke for hovedspjeldet) design med to elliptiske spejle. Designet er optimeret for konfigurationen af HFI og LFI detektorer i fokalplanen. For yderligere at nedbringe effekten af diffraktion omkring spejlkantene bliver spejlene underbelyst, dvs. kun lys reflekteret af de inderste dele af spejlene rammer detektorerne.

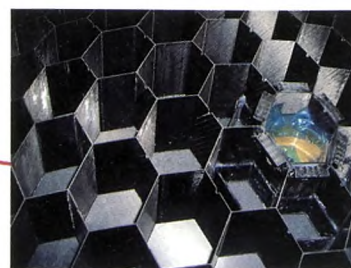
Som sagt har DTU Space været ansvarlig for levering af Planck spejlene. Der blev stillet hårde krav til disse spejle. Som sædvanlig, når vi snakker om grej, der skal sendes op i rummet, skal det veje så lidt som muligt (spejlene vejer tilsammen kun 40 kg). Spejlene skal selvfølgelig også tåle de enorme vibrationsbelastninger, de bliver udsat for ifm opsendelsen. Men det hårdeste krav var, at spejlene skulle kunne tåle at blive kølet ned til ca. -220°C og stadigvæk holde formen.

Alle disse krav kan faktisk opfyldes med en konstruktion af Carbon Reinforced Plastic (CFRP). Med CFRP kan man med den rigtige kombination af kulfiber og epoxy og de rigtige vinkler mellem de enkelte lag opnå, at emnet ændre sig meget lidt under nedkølingen. Denne ændring er så lille at man kan tage højde for den i designet.

Konstruktionen består af to lag "hud" (skin), ca. 2 mm tykke, med 14 lag CFRP. Ind imellem de to skin er der en såkaldt 'honeycomp'-struktur, bestående af sekskanter (ligesom bitavlerne i en bistade). Opbygningen kan ses på figur 9.



Skin



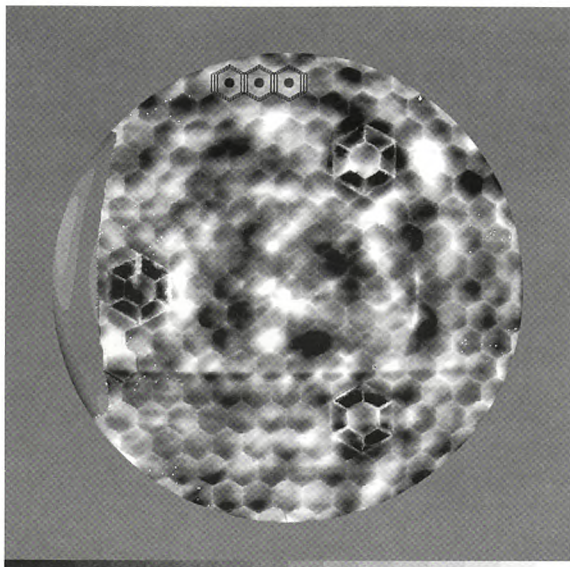
Honeycomp

Figur 9. Opbygningen af Planck CFRP sekundærspjeldet.

Ifm. CFRP designet gennemførte DTU Space en omfattende 'Finite Element'-modellering. Disse beregninger er blevet bekræftet af omfattende målinger af spejlens overflader ved disse lave temperaturer ved "Centre Spatial de Liege".

SR interferometry map 50 K

scale +- 10 10 micron



Figur 10. Overfladefejlene af Planck sekundærspejlet ved 50 K fundet med interferometer-systemet ved Centre Spatial de Liege, Belgien. Tydeligvis kan alle cellevægge ses. Pga. effektens størrelse (kun ca. $0,4 \mu\text{m}$) og det lille areal de dækker betyder det ikke noget for funktionen af spejlet.

Figur 10 viser overfladefejlene på sekundærspejlet ved 50 K. Da spejlene bliver underbelyst er kravet til fejlene i de centrale dele en rms bedre end $5 \mu\text{m}$, mens kravet i de ydre dele kun er en rms mindre end $30 \mu\text{m}$. På figuren ses tydelig alle honeycomb-væggene. Da effekten kun er ca. $0,4 \mu\text{m}$, og de fylder en meget lille del af spejlens overflader har de ingen betydning for spejlens funktion i mikrobølgeområdet.

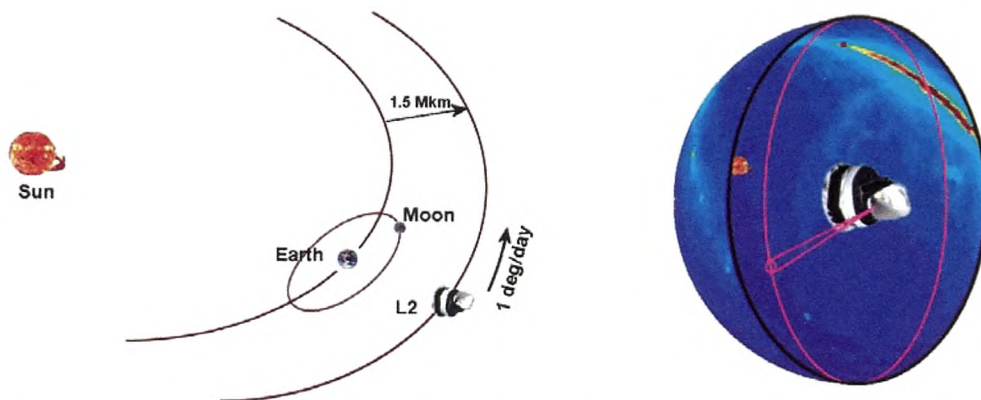
Planck-spejlene har været igennem en masse yderligere tests, og alle har vist at de til fulde opfylder de stillede krav.

Planck's bane

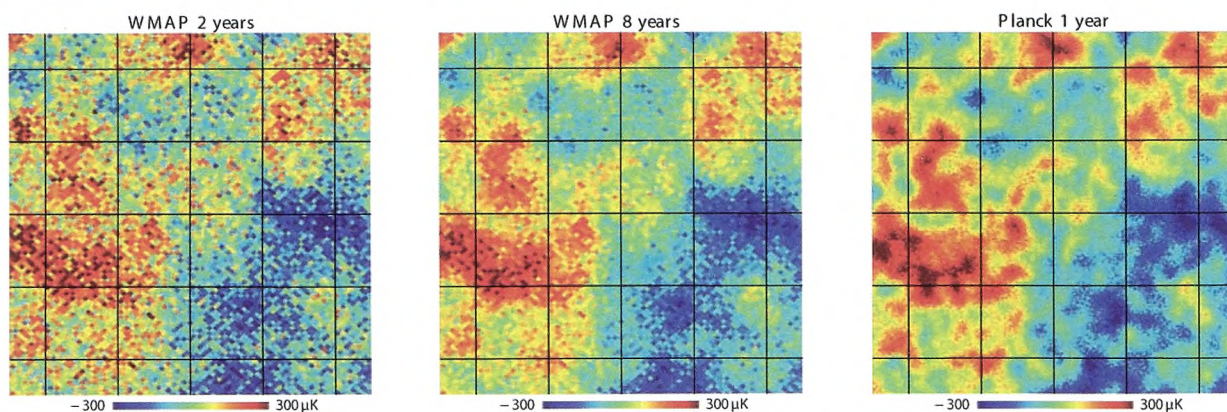
Det kosmologiske CMB signal er meget svagt. Derfor må man gøre det yderste for at sørge for, at når Planck kikker i en bestemt retning skal signalerne fra alle mulige andre retninger minimeres. Jorden, Månen og specielt Solen udsender en masse mikrobølger, så derfor vil man gerne have dem så langt væk som muligt fra den retning man kigger i. Planck bliver derfor sendt ud til det såkaldte Lagrange punkt nr. 2 (L2), et af de stabile punkter i Sol-Jord-systemet. Det ligger ca. 1,5 millioner km væk fra Jorden, i modsat retning af Solen (se figur 11). Planck roterer ca. 1 gang per minut, rotationsaksen peger væk fra Solen, og teleskopet peger ca. 85 grader fra rotationsaksen. Da L2 følger med Jorden i banen rundt om Solen, så vil Planck på den måde scanne hele himlen på ca. 6 måneder, bortset fra små områder omkring de ekliptiske poler. Planck forventes opsendt i maj 2009, og det vil tage ca. 2,5 måneder før den er ude i L2.

Planck science

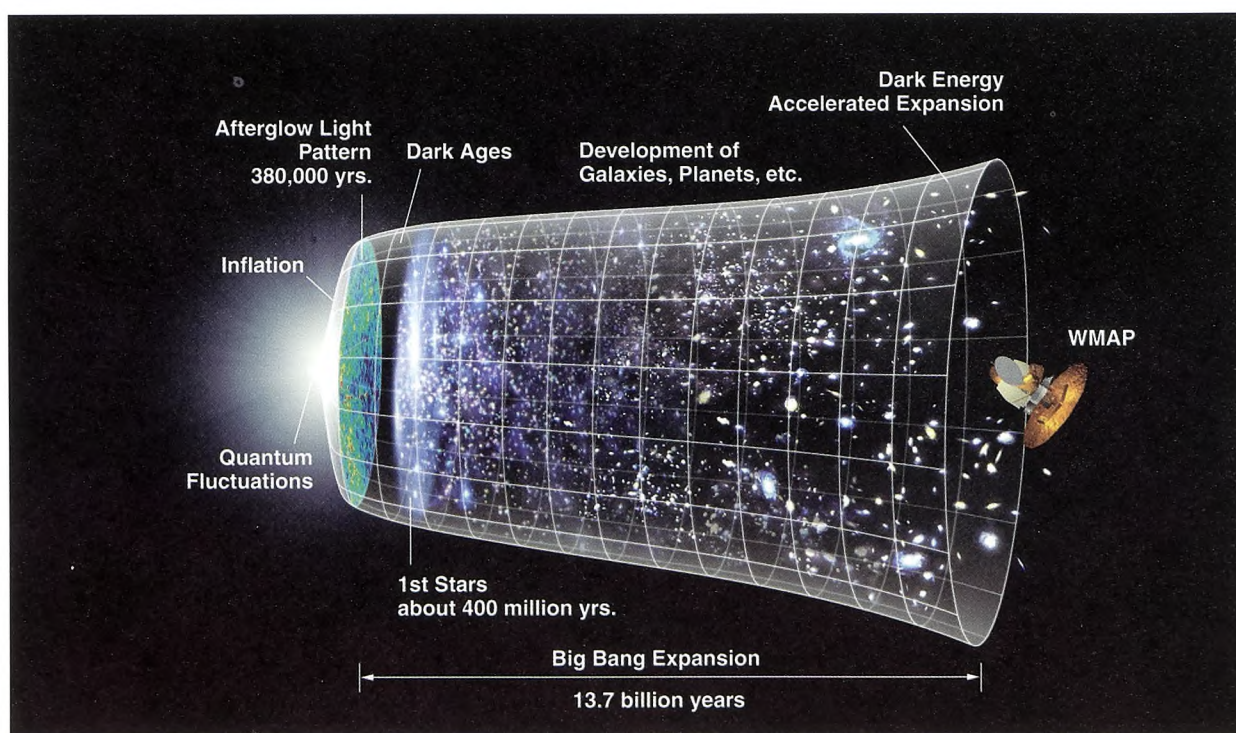
Hovedbegrundelsen for Planck er naturligvis, at den vil studere CMB i meget større detalje end tidligere missioner. Det betyder, at vi med Planck får helt nye informationer om, hvordan Universet så ud ca. 400.000 år efter Big Bang, og dermed bliver vi meget bedre til dels at ekstrapolere til hvordan Universet må have set ud før dette tidspunkt, og dels til at forstå hvordan disse ganske små temperatur- og tæthedsforskelle er vokset op og er blevet til vore dages strukturer i Universet, f.eks. galakser og galaksehobe. Figur 12 viser forskellen mellem hvor gode kort vi kan få med WMAP-satellitten, og hvad vi forventer at få med Planck. På den højre figur ses det, at med Planck vil vi få meget dybere kort med finere detaljer, end man kan opnå med WMAP, selv når man lægger data for 8 år sammen.



Figur 11. Planck's bane. For at undgå mikrobølger fra Solen, Jorden og Månen sendes Planck ud i Lagrange punkt nr. 2, ca. 1,5 millioner km modsat retningen til Solen.



Figur 12. Forskellen på kvaliteten af WMAP's CMB kort og det forventede Planck-kort. Af figuren ses at Planck på 1 år vil producere kort med større følsomhed og deltaljerighed end WMAP vil gøre på 8 år.



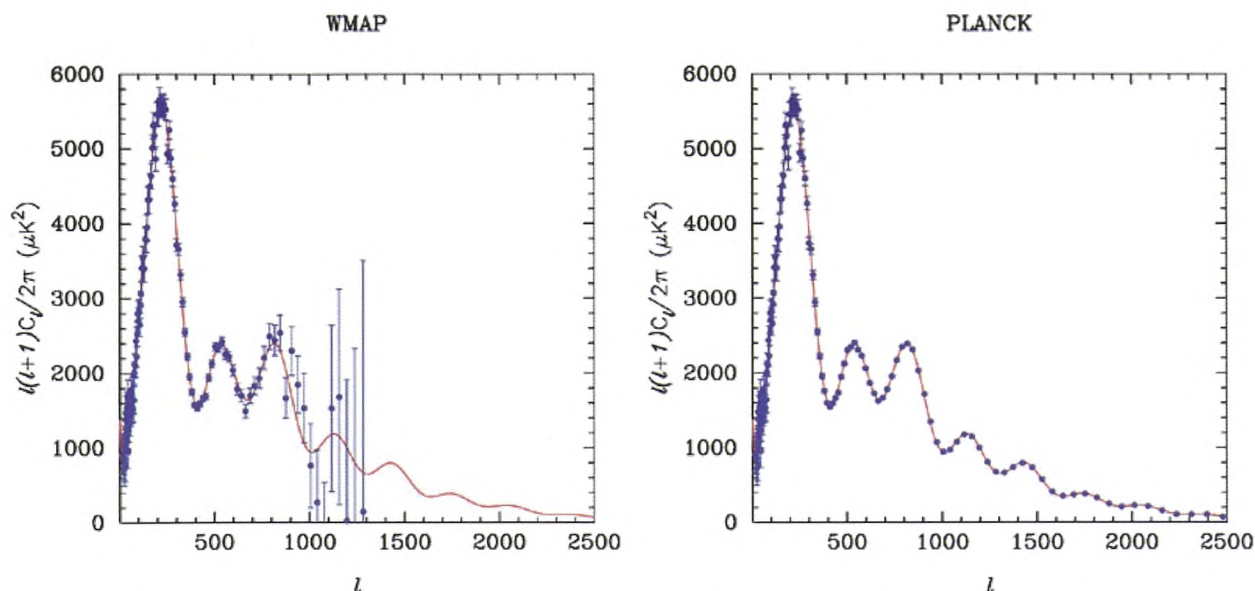
Figur 13. Ultrakort historie over Universets udvikling.

Figur 13 giver et overblik over Universets historie. Til venstre ses Big Bang og ganske kort tid (sammenlignet med Universets alder på 13-14 milliarder år) efter ses CMB. Derefter er der en periode, hvor der ikke rigtig sker noget, derfor bliver den kaldt 'Dark Age'. Det tager nemlig flere hundrede millioner år, før disse små tæthedsfluktuationer har vokset sig store nok til at danne stjerner og galakser. Da gassen i Universet kun indeholder brint og en lille smule (1/4) helium, er den første generation af stjerner meget tungere end Solen, ca. 1-200 gange. De ender deres liv, meget kort tid efter de er dannet, i nogle kæmpesæssige supernova-ekspllosioner. Herved bliver den gas, som næste generation af stjerner bliver dannet af, beriget med de tungere grundstoffer der er dannet i den første generations indre. Disse tungere grundstoffer gør, at de næste stjerner bliver mere lig Solen. På figuren kan det ses, at der også begynder at blive dannet galakser og

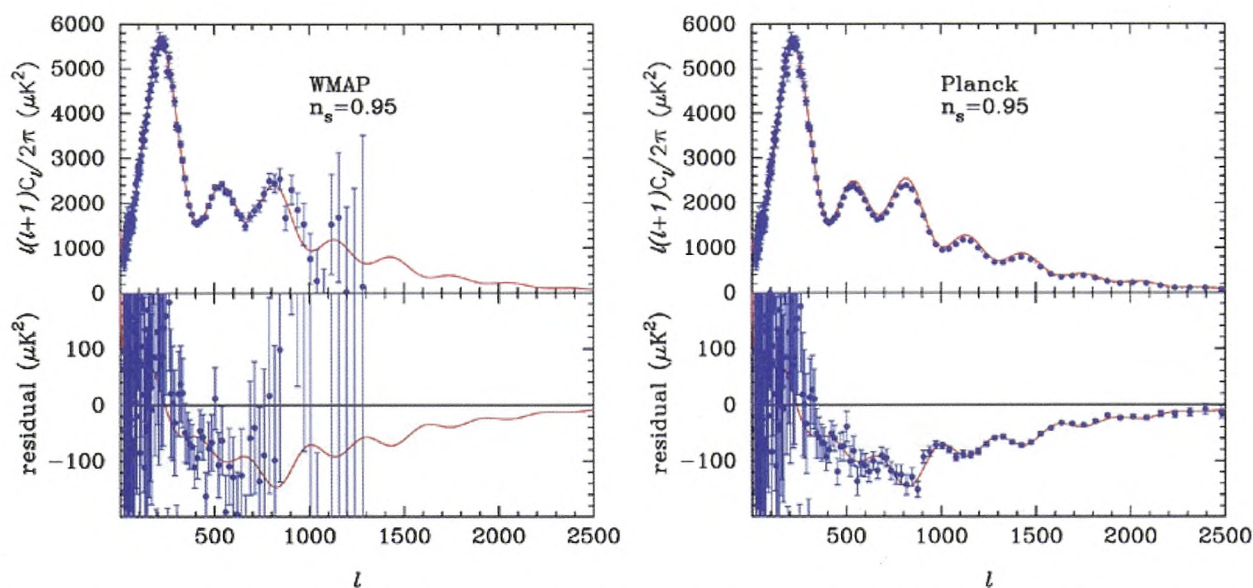
helt til højre ser vi vore dages Univers.

Traditionelt undersøger man CMB kort ved hjælp af et såkaldt 'powerspektrum'. Analogien i én dimension er Fourieranalyse, hvor man opløser en given funktion i sinus- og cosinusfunktioner på en entydig måde. På himmelkuglen opløser man CMB-kortene med sfærisk harmoniske funktioner, også på entydig måde. Hvis de områder, hvor CMB-temperaturen er over gennemsnittet og de områder, der ligger under gennemsnittet, er fuldstændig tilfældigt fordelt på himlen, så indeholder powerspektret al den information, der kan udtrækkes af kortet.

På figur 14 kan man se forskellen på det powerspektrum man får med WMAP's data, og det vi forventer at få med Planck. Skalaen på x -aksen svarer til store vinkelafstande til venstre og små vinkelafstande til højre ($l = 200$ svarer til en vinkelafstand på ca. 1 grad).



Figur 14. Teoretisk (forventet) powerspektrum af Plancks CMB-kort sammenlignet med et powerspektrum af WMAP's observationer.



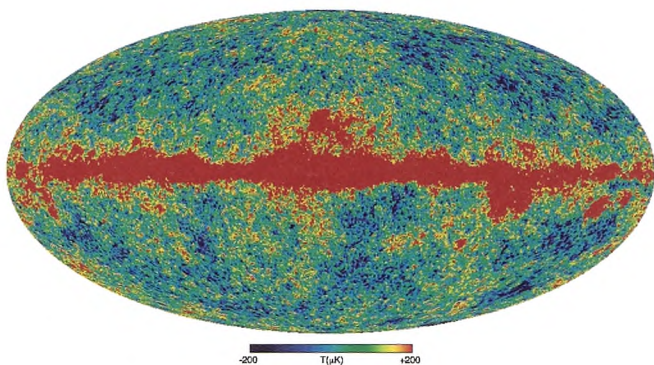
Figur 15. Viser hvor meget bedre man kan bestemme de basale kosmologiske parametre med Planck sammenlignet med WMAP. Eksemplet viser hvordan en lille ændring i antagelsen omkring de oprindelige tæthedvariationer tydeligt kan ses med Planck, men ikke med WMAP.

For at demonstrere hvor meget bedre man kan bestemme de basale kosmologiske parametre med Planck, giver figur 15 en simulering af hvad det betyder, at man i stedet for at tæthedsfluktuationer fra starten ikke har nogen karakteristisk skala, indbygger en lille forskel på de forskellige skalaer (parametren n_s ændres fra 1 til 0,95). Man ser tydeligt, at en sådan ændring er nem at se med Planck, men umulig at detektere med WMAP. På lignende måde vil Planck bestemme de andre basale kosmologiske parametre med hidtil uset nøjagtighed.

En af de helt centrale opgaver for Planck bliver at undersøge konceptet om en enorm faseudvidelse af Universet lige efter Big Bang, hvor Universet på 10^{-32} sek. blev 10^{26} gange større. Fænomenet kaldes 'Inflation'. Dette kan bl.a. forklare, hvorfor CMB er

så ensartet, når man ser områder, der f.eks. er mere end 50 grader fra hinanden på himlen. Disse områder har aldrig haft chance for fysisk at vekselvirke med hinanden så det er svært at forstå, at de har næsten samme temperatur. Inflationsidéen er på nuværende tidspunkt ganske teoretisk, men har ikke desto mindre vist sig nødvendig for fortolkningen af CMB-målinger fra f.eks. WMAP.

Der findes mange hundrede forskellige inflationsteorier. Næsten alle forudsiger, at der i denne dramatiske faseudvidelse bliver udsendt en masse tyngdebølger, og at disse vil resultere i at CMB bliver en lille smule polariseret, specielt at der vil være hvirvler i magnetfelterne. Det er en ganske lille effekt, men der er ingen tvivl om, at Planck-dataene vil blive studeret meget nøje for at finde denne effekt.



Figur 16. WMAP's kort ved 40 GHz. At Mælkevejen udsender en masse stråling i mikrobølgeområdet ses tydeligt.

Figur 16 viser WMAP's 40 GHz kort. Det er tydeligt, at Mælkevejen udsender en masse stråling ved denne frekvens. Før man med sikkerhed kan udtrække det kosmologiske CMB signal fra Plancks data, skal man være overbevist om, at alle signaler fra andre kilder, herunder vores egen Mælkevej, er fjernet fuldstændigt. Begrundelsen for de meget brede frekvensområder, som Planck dækker, er netop at sørge for, at man kan løse dette problem på tilfredsstillende måde. På DTU Space arbejder vi på at forbedre metoderne til

fjernelse af disse 'forgrundskilder'. Men der er mange astronomer, som ikke ser disse som potentielle fejlkilder. De er netop meget interesseret i disse data til at få nye informationer om de fysiske forhold i Mælkevejen, da Planck-kortene vil blive meget bedre, end hvad der ellers findes.

Litteratur

- [1] ESA-SCI(2005)1: Planck: The Scientific Programme, http://www.rssd.esa.int/?project=PLANCK&page=pubdocs_top



Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen, Lic Scient. Siden 1987 ansat som seniorforsker på DTU Space. DTU Space har siden 1994 deltaget i ESA's Planck mission. HUNN har været ansvar for levering af spejlsystemet til Planck. I forbindelse med Planck arbejder HUNN primært med metoder til at udtrække det kosmologiske signal på baggrund af signalerne fra Mælkevejen.

Aktuelle bøger

Af Michael Cramer Andersen, KVANT

Liv i Universet

Af: Ib Lundgaard Rasmussen. Politikens Forlag 2009, "Liv i Universet – Er vi alene?", 176 sider, 200 kr. <http://www.politikensforlag.dk>.



Er der liv udenfor Jorden? Dette spørgsmål har altid fascineret videnskabsmænd og almindelige mennesker. I de senere år er en ny videnskab – "Astrobiologien" – vokset frem og i dette tværvidenskabelige felt kan spørgsmålet diskuteres på videnskabeligt grundlag. Der findes dog ingen sikre svar endnu, for vi har ikke fundet sikre tegn på udenjordisk liv.

Astrofysikeren Ib Lundgaard Rasmussen har fulgt det nye felt og beskriver vor nuværende viden om betingelserne for liv, livets opståen og hvilke skridt vi vil tage i fremtiden for at finde liv.

De første ni kapitler diskuterer primært hvordan livet kan være opstået på Jorden og hvordan det har udviklet

sig. Der henvises flittigt til Darwin og evolutionsteorien, krydret med personlige iagttagelser fra rejser og lidt videnskabshistorie. Bogen rummer mange letforståelige forklaringer på tekniske emner bl.a. begrebet vækst, datering via isotoper, tidevand og begreber fra cellebiologien. Vi hører bl.a. at tidevandskræfterne fra Månen var over fem hundrede gange kraftigere i Jordens barndom og at der næppe var liv i Mars-meteoritten ALH84001, men den demonstrerede, at en sten godt kan bevæge sig fra én planet til en anden og således sprede liv gennem rummet – hvis det kan overleve faldet. Bogen argumenterer også for, at livet udvikler sig hurtigere i modvind – således fulgte den store udvikling af nye arter kaldet "Den kambriske eksplosion" sandsynligvis lige efter en periode med masseuddøen.

I de sidste fire kapitler vendes blikket ud i rummet. Et kapitel diskuterer, med udgangspunkt i livet på Jorden, hvordan ikke-jordisk liv vil se ud. Et andet kapitel diskuterer mulighederne for liv på Venus, Mars og de ydre planets store ismåner. Egenskaberne ved de 2-300 planetsystemer man har fundet omkring andre stjerner diskuteres ligesom begrebet "Den galaktiske beboelige zone" forklares. I det sidste kapitel beskrives Drake-ligningen og muligheden for at finde andre civilisationer vha. radiokommunikation. Alt i alt en meget spændende bog der giver et aktuelt overblik over et kompliceret forskningsområde i rivende udvikling.

Michael Cramer Andersen

Helio- og asteroseismologi

Af Torben Arentoft, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Hans Kjeldsen, Frank Grundahl, Søren Frandsen og Pierre-Olivier Quirion, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Observationer af stjernesvingninger (stjerneskaelv) gør det muligt at foretage seismiske undersøgelser af stjernernes indre. Dette gælder i høj grad for Solen, hvis skaelv igennem årtier er blevet observeret med både jord-baserede instrumenter og fra satellitter. Disse observationer gør, at vi i dag har et meget detaljeret billede af forholdene i Solens indre. Seismiske undersøgelser er i dag udvidet til også at omfatte andre stjerner, hvilket sætter os i stand til at undersøge stjernernes indre struktur og deres tidlige udvikling mere generelt. Dette er et forskningsfelt i kraftig udvikling, og med opsendelsen af NASA's Kepler-satellit i marts 2009, og med den påbegyndte opbygning af et dansk-ledet netværk af teleskoper SONG (Stellar Observations Network Group) vil denne udvikling for alvor tage fart.

Introduktion

Solen, og stjerner som ligner Solen, vibrerer på grund af lydbølger som udbreder sig i deres indre. Disse lydbølger får stjernens overflade til at bevæge sig i komplicerede mønstre og får stjernens lystyrke til at variere i tid. Svingningerne bliver anslået af voldsomme gasbevægelser i stjernernes ydre dele, hvor energien fra de varmere, dybereliggende egne bliver transporteret op til overflade ved konvektion. Alle stjerner med en sådan *ydre konvektionszone* vil vibrere på samme måde som Solen. Effekterne af vibrationerne på en stjernes radius og lysstyrke er dog forsvindende små; de enkelte svingninger får radius til at variere med få meter, for Solen 20-30 m i forhold til en radius på 700.000 km, og lysstyrken varierer med få millionte dele (ppm). Tidsskalaerne af variationerne er, for en stjerne som Solen, få minutter.

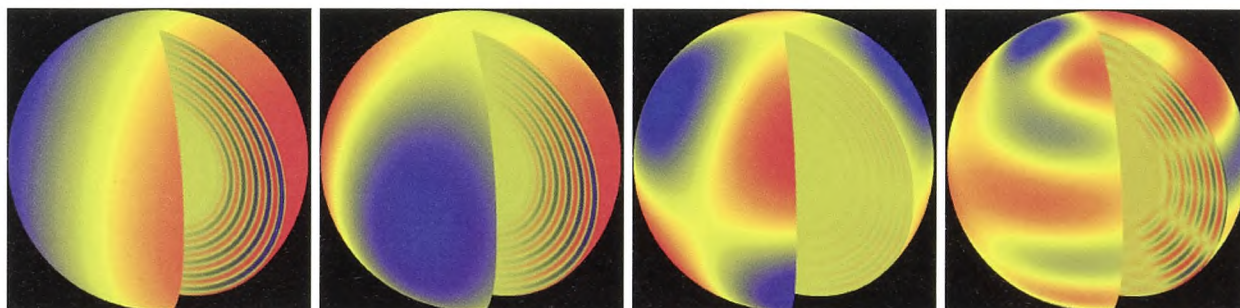
Mens disse lydbølger således ikke påvirker stjernerne nævneværdigt, så har de til gengæld en meget dramatisk indvirkning på vores forståelse af forholdene i stjernernes indre. De anslåede lydbølger afhænger meget nøje af stjernens radius og alder samt af de fysiske forhold inde i stjernen; gassens tryk, temperatur, tæthed og kemiske sammensætning, samt af de fysiske processer, der gør sig gældende i en stjernes indre. Ved at observere disse lydbølger er det således muligt at anvende seismiske teknikker på stjerner, på samme måde som når jordskaelv udnyttes til at bestemme Jordens indre struktur. Dette sker gennem

sammenligninger mellem observerede svingninger og svingninger beregnet ud fra teoretiske modeller for forholdene i stjernernes indre. Stjernerne fungerer således som laboratorier, hvori vi kan studere fysiske processer under forhold der er så ekstreme, at de er umulige at genskabe i et almindeligt laboratorium.

I en tidligere artikel i KVANT [1] blev det beskrevet hvordan stjerner som Solen vibrerer, og hvordan disse vibrationer afhænger af forholdene i stjernernes indre. I denne artikel vil vi, efter at have introduceret svingningerne, fokusere på de seneste resultater indenfor helio- og asteroseismologien, og derefter på to kommende projekter, SONG projektet og NASA's Kepler-satellit, som tilsammen vil revolutionere vores viden om stjernernes indre.

De anslåede svingninger

De komplicerede svingningsmønstre som observeres på en stjernes overflade opstår, fordi en lang række enkelt-svingninger er til stede i stjernen på samme tid. Disse svingninger har alle lidt forskellige svingningsperioder, amplituder og svingningsmønstre på overfladen og ind gennem stjernen. De enkelte svingninger beskrives med tre talværdier, l , m og n , hvor den angulære grad l angiver det totale antal af knudelinier på stjernens overflade, den azimutale grad m angiver antallet af knudelinier på overfladen som skærer ækvator, og den radiale orden n angiver antallet af knudeflader i radial retning – l , m og n giver derfor en komplet beskrivelse af svingningsmønstret for en given svingning.



Figur 1. Forskellige svingninger med forskellige værdier for l og m , alle med $n = 20$. Fra venstre mod højre vises $(l, m) = (1, 1)$, $(l, m) = (2, 2)$, $(l, m) = (3, 2)$. Figuren længst til højre viser effekten af tre simultane svingninger. Figurene viser still-billeder af variationerne i temperatur. Efter en halv svingningsperiode vil situationen være den modsatte af den viste; røde områder vil være blevet blå og blå områder røde.

På figur 1 vises tre enkelt-svingninger samt den samlede effekt på en stjerne af blot tre svingninger. I en stjerne som Solen er millioner af sådanne svingninger, med vidt forskellige l , m og n -værdier, til stede på samme tid.

For Solen observeres svingninger med både høje (op til $l \sim 300$) og lave l -værdier, helt ned til de radiale svingninger med $l = 0$, mens vi for andre stjerner, som set fra Jorden blot er punkt-lyskilder uden rumlig opløsning, kun kan observere svingninger med lave l -værdier ($l = 0 - 3$). For svingningerne med lav l og høj n gælder der tilnærmelsesvis en "asymptotisk relation"¹, således at de enkelte svingningsfrekvenser, som vil være til stede i en given stjerne, kan estimeres ud fra følgende formel:

$$\nu_{nl} = \Delta\nu(n + \frac{1}{2}l + \epsilon) - l(l + 1)D_0. \quad (1)$$

Denne formel giver allerede et glimt af styrken i asteroseismologien – studiet af stjernessvingninger i andre stjerner end Solen: svingningsfrekvenser i stjerner kan måles med meget stor nøjagtighed, hvorved $\Delta\nu$, ϵ og D_0 kan bestemmes. $\Delta\nu$ er den såkaldte store frekvensopsplitning som afhænger nøje af stjernens middeltæthed, og dermed stjernens masse og radius; stjerner med lav middeltæthed har en lav værdi af $\Delta\nu$ og vibrerer generelt i lavere frekvenser end stjerner med en høj middeltæthed, som vil have en høj værdi af $\Delta\nu$ og vibrerer i højere frekvenser. D_0 afhænger af den kemiske sammensætning af materialet i stjernens inderste dele, hvor kernereaktionerne foregår. Denne kemiske sammensætning ændrer sig gradvist i tidens løb, efterhånden som brint fusioneres til helium, hvorved D_0 bliver et mål for stjernens alder. Endelig afhænger ϵ af forholdene i stjernens yderste dele. Ud fra svingningsfrekvenserne kan en stjernes basale parametre bestemmes med meget større nøjagtighed end hvad det er muligt ud fra andre typer af observationer.

De anslåede svingninger indeholder også information om stjernens rotation. Som det fremgår af ligning (1) afhænger frekvenserne ikke af m , hvilket betyder at forskellige svingninger, som har samme n og l -værdier, men forskellige m -værdier, i princippet vil have den samme frekvens ν_{nl} . Dette gælder dog ikke når stjernens rotation tages med i betragtning da rotationen opsplitter svingningsfrekvenserne alt efter deres m -værdi. Opsplitningens størrelse $\Delta\nu_{nlm}$ afhænger af m -værdien og af stjernens gennemsnitlige rotationshastighed $\bar{\Omega}$:

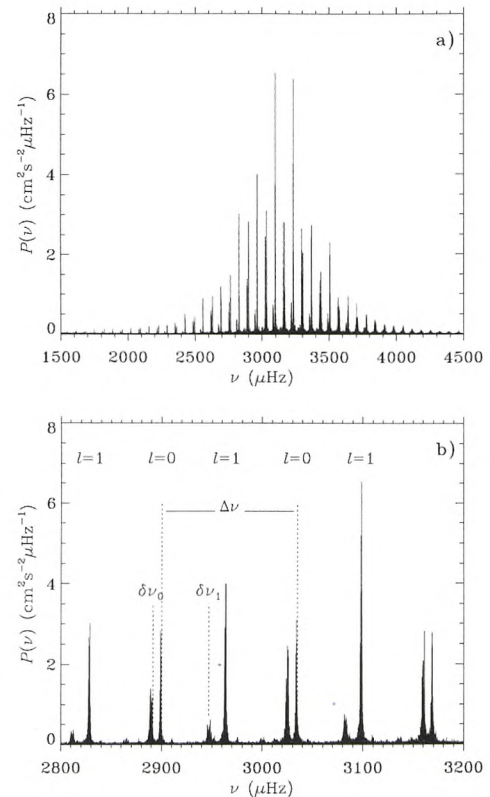
$$\Delta\nu_{nlm} \sim m\bar{\Omega}. \quad (2)$$

Dette betyder, at observationer af svingninger med samme n, l men med forskellige m -værdier giver os information om rotationsforholdene i stjernen.

Observationer af stjernessvingninger

Lydbølgerne i stjerner kan observeres med tidsseriefotometri eller med direkte målinger af variationer

i lysstyrken. I det første tilfælde udnyttes at svingningerne på overfladen af stjernen introducerer et meget lille Doppler-skift i spektrene, som får stjernens absorptionslinier til at flytte sig nogle få $\mu\text{\AA}$ i takt med overfladens bevægelser. Den periodiske flytning af absorptionslinierne udgør ikke mere end ca. en tusindedel af en pixel på de CCD chips, som bruges til at registrere stjernesspektrene. Denne type observationer kræver derfor højt specialiseret måleudstyr som kan levere meget præcise optagelser af stjernesspektre, på tidsskalaer af minutter. Kun en håndfuld teleskoper på verdensplan har den påkrævede kombination af tilstrækkelig spejldiameter og instrumentkvalitet til at kunne levere den nødvendige målepræcision. Desuden kan disse målinger, hvis vi ser bort fra Solen, kun foretages for himlens klareste stjerner. For svagere stjerner bliver målenøjagtigheden simpelthen ikke høj nok. En sådan Doppler hastighedskurve for stjernen Procyon er vist på figur 10, som bliver diskuteret senere i artiklen.



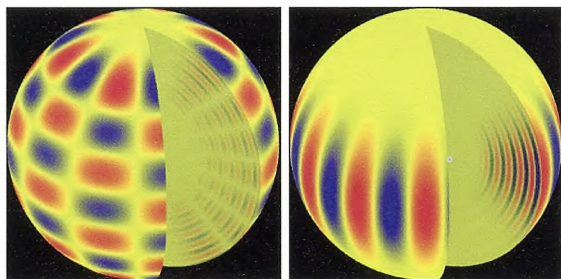
Figur 2. Svingningsspektrum for Solen baseret på BiSON data, hvor der på den nederste figur er zoomet ind på en lille del af frekvensspektret. Hver top i spektret svarer til en enkelt svingning. Der er en høj grad af regularitet i svingningsspektret, i overensstemmelse med ligning (1). $\Delta\nu$ er den store frekvensopsplitning mellem svingninger med samme l -værdi, men med n -værdier forskellig med én; desuden gælder der for de såkaldte små frekvensopsplitninger $\delta\nu_0$ og $\delta\nu_1$ at $D_0 = \frac{1}{6}\delta\nu_0 = \frac{1}{10}\delta\nu_1$. Alene ud fra sådanne frekvensopsplitninger kan stjernens middeltæthed og alder bestemmes.

Svingningerne kan også måles med tidsseriefotometri, hvor stjernens samlede lysstyrke måles

¹Relationen følger fra en asymptotisk analyse af svingningsligningerne, for svingninger af høj orden.

som funktion af tiden. Dette skal gøres fra rum-baserede teleskoper, idet Jordens atmosfære forstyrrer målingerne for meget til, at de små variationer i lysstyrken kan registreres fra Jordoverfladen. Denne metode giver dog mindre præcise målinger end Doppler målingerne, da kontrasten mellem stjernessvingningerne og støjsignaler fra andre processer, der foregår på stjernernes overflade, er langt bedre for spektroskopiske end for fotometriske målinger, selv hvis disse foretages fra rummet. Til gengæld kan man med spektroskopi kun måle på en enkelt stjerne ad gangen, mens et CCD kamera i rummet kan måle på tusindvis af stjerner samtidigt. Dette er dog ikke sket endnu, da det første rumbaserede teleskop som vil være i stand til at observere sol-type svingninger i tusindvis af stjerner er Kepler-satellitten, som påbegynder sine målinger i maj 2009. Denne satellit vil blive beskrevet senere i artiklen.

Fælles for de to observationsmetoder er, at svingningsfrekvenserne kan bestemmes ud fra tidsserie-observationerne ved hjælp af Fourier-analyse. På figur 2 vises et Fourierspektrum, eller frekvensspektrum, for Solen, baseret på 15 års tidsserie-observationer med det såkaldte BiSON (Birmingham Solar Oscillations Network) netværk, som består af seks automatiske teleskoper fordelt rundt på kloden, med det ene formål at studere Solens svingninger. Dette gøres fordi vi kun kan adskille de enkelte svingningsperioder hvis vi har næsten kontinuerte observationer; ved observationer fra et enkelt sted på Jordens overflade kan Solen eller stjernerne kun følges i typisk 8–10 timer, men i det tilfælde giver de manglende 14–16 timer problemer i bestemmelsen af svingningsfrekvenserne. Hertil kommer, at den præcision hvormed frekvenserne kan bestemmes afhænger af længden af tidsserien. I Solens tilfælde har dette ført til dedikerede observationer over mange år fra netværk som BiSON og fra satellitter, mens sådanne observationer for andre stjerner endnu er i deres vorden.



Figur 3. Kuglefunktioner med $(l, m) = (12, 6)$ og $(12, 12)$.

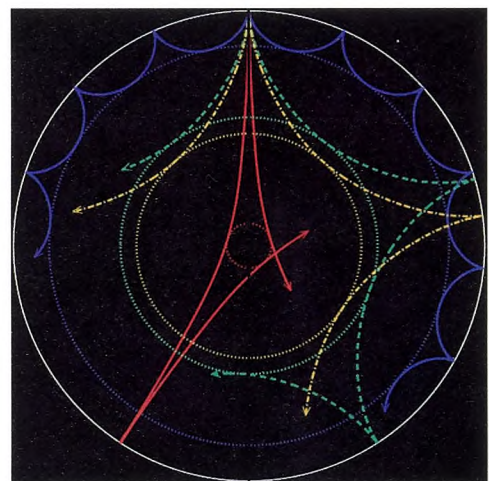
Helioseismologi

Solen har flere fordele for en stjerneseismolog. Observationerne er lettere, fordi vi modtager meget mere lys fra Solen. Desuden kan Solens overflade opløses observationelt, så vi kan se svingninger med korte bølgelængder eller, med andre ord, høje værdier af graden l . Eksempler på sådanne svingninger er vist på figur 3. Den illustrerer en anden vigtig egenskab: for højere værdier af l når svingningerne ikke så langt ind i Solen. Det er tydeligere på figur 4, der viser

udbredelsen af lydbølger, som stråler, i Solen. Lydhastigheden stiger når man går længere ind i Solen da temperaturen bliver højere med dybden. Bølger der ikke bevæger sig i den radiale retning bliver afbøjet af den voksende lydhastighed indtil de når *det indre vendepunkt* i en afstand r_t fra centrum; r_t findes som løsning til ligningen

$$\frac{c(r_t)}{r_t} = \frac{2\pi\nu}{\sqrt{l(l+1)}}; \quad (3)$$

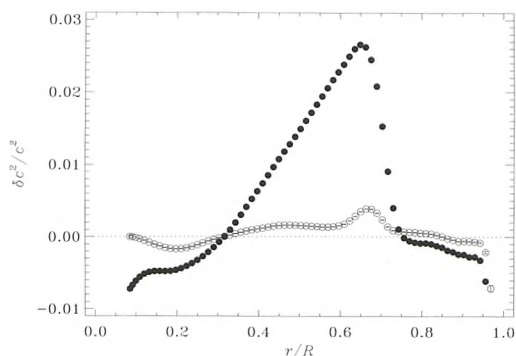
her er c lydhastigheden og ν frekvensen. Da frekvenserne ligger i et relativt begrænset interval afhænger r_t overvejende af l . For bølger med høje l ligger vendepunktet ved en lav lydhastighed, dvs. tæt ved overfladen. Svingninger med de laveste l når helt ind til centrum og er derfor følsomme for forholdene i de centrale dele af stjernen, herunder stjernens udviklingsstadium. Denne variation gør det muligt at 'opløse' Solens struktur ud fra observationerne: svingninger med de højest observerede værdier af l giver information om Solens yderste lag; givet denne information kan vi bruge data for lidt lavere l til at måle forholdene i lidt større dybde, og så fremdeles, indtil vi har bestemt strukturen eller rotationen af hele Solens indre. I praksis kræver det naturligvis en langt mere kompliceret analyse; men denne simple diskussion illustrerer princippet i *invers analyse* anvendt på helioseismiske data.



Figur 4. Udbredelse af lydbølger i Solen. Bølgerne reflekteres ved Solens overflade og i en afstand r_t bestemt af ligning (3) og markeret med cirkler for de forskellige bølger. Herved opstår de stående bølger, der observeres som svingninger af Solens overflade. Bølgerne svarer til $l = 2, 20, 25$ og 75 ; bølger med de laveste l reflekteres tættest ved Solens centrum.

Der er foretaget meget omfattende observationer af solsvingninger i de seneste årtier. De mest omfattende data kommer fra BiSON netværket og fra to andre store internationale projekter: GONG-projektet (for Global Oscillations Network Group), der har etableret seks observatorier til observation af solsvingninger passende fordelt rundt om Jorden for at sikre næsten kontinuerte observationer; og MDI (Michelson Doppler Imager)

på SOHO satellitten. Begge projekter, der har været i gang siden 1996, tager 'Doppler-billeder' af Solen hvert minut; ud fra disse målinger af Dopplerhastigheden hen over solskiven kan de enkelte svingninger adskilles, og deres frekvenser bestemmes, ved en kompliceret matematisk analyse. Resultatet er overordentlig nøjagtige frekvenser for et meget stort antal svingninger med l op til flere hundrede.

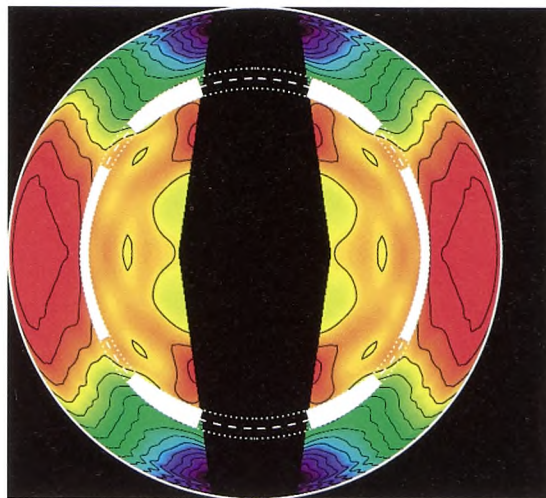


Figur 5. Den relative forskel mellem kvadratet c^2 på lydhastigheden i Solen, bestemt ud fra helioseismologi, og i to modeller af Solen. De åbne cirkler viser c^2 i Solen minus c^2 for en model med en ældre bestemmelse af Solens grundstofforekomst. De fyldte cirkler er for en model hvor grundstofforekomsten er revideret. Fejlen i forskellene er mindre end symbolernes størrelse.

Analysen af disse frekvenser har givet detaljeret viden om Solens indre. Da de observerede svingninger er lydbølger afhænger deres frekvenser overvejende af lydhastigheden, og ved at analysere frekvenserne kan vi derfor bestemme lydhastighedens variation i Solens indre og sammenligne den med vores solmodeller. Det er gjort for to modeller på figur 5. De åbne cirkler viser den relative forskel i lydhastighedens kvadrat (der er proportional med temperaturen) for en model fra 1996. Her er der helt åbenbart en glimrende overensstemmelse mellem modellen og Solen, med en maksimal afvigelse på under 1/2 procent. Modellen er beregnet så den har Solens masse, alder, radius og lysstyrke men er i øvrigt ikke tilpasset observationerne; den kan altså betragtes som en, ganske imponerende, forudsigelse af Solens indre struktur. Som vist af de lukkede cirkler, der illustrerer en nyere model, har situationen ændret sig i de senere år. Det skyldes en ny og formodentlig forbedret bestemmelse af grundstofsammensætningen af Solen, der har vist en betydelig reduktion af indholdet af specielt ilt i solatmosfæren, relativt til de ældre målinger. Det resulterer i en reduktion af absorptionskoefficienten for stråling i Solens indre og dermed en ændring i strukturen af solmodeller, som gør at de nu stemmer langt dårligere med den struktur, der er bestemt ud fra de helioseismiske undersøgelser. Det repræsenterer et potentielt alvorligt problem, som endnu ikke er løst, i vores forståelse af Solens og dermed stjernernes struktur og udvikling.

Svingningsfrekvenserne afhænger ikke kun af Solens struktur; vi kan også bestemme hvor hurtigt Solen roterer. Vi ved fra observationer af Solens overflade at rotationsperioden varierer, fra ca. 25 døg

ved ækvator til over 30 døgnet ved høje breddegrader. At en sådan variation er mulig skyldes naturligvis at Solen er en kugle af gas, der ikke nødvendigvis roterer som et stift legeme. Som diskuteret i ligning (2) giver rotationen en opsplitning af frekvenserne efter m , som afhænger af den gennemsnitlige rotationshastighed. Hver egensvingning måler et forskelligt gennemsnit, afhængigt af hvilken del af Solen der er involveret i svingningen. Som diskuteret ovenfor bestemmer l udstrækningen i r af dette område. På samme måde afhænger udstrækningen i breddegraden af m , som illustreret på figur 3. Ud fra analyse af rotationsopsplitningen for svingninger med forskellige l og m kan vi derfor bestemme rotationshastighedens variation i Solens indre. Resultatet er vist på figur 6.

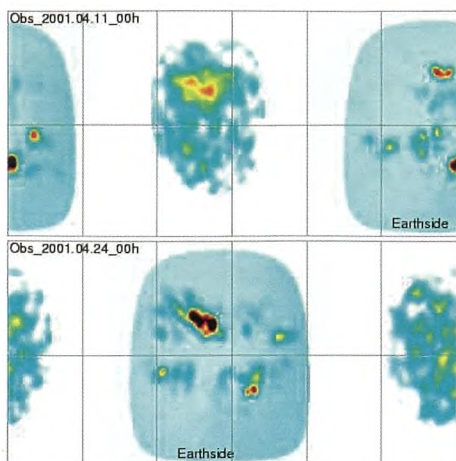


Figur 6. Rotationen i Solens indre, bestemt med helioseismologi. Farveskalaen markerer rotationsperioden, fra 25 døgnet (rød) til 35 døgnet (mørkeblå). I det sorte område omkring den lodrette rotationsakse er vi ikke i stand til at bestemme rotationshastigheden. De hvide områder markerer den såkaldte tachocline, hvor rotationshastigheden ændrer sig meget hurtigt mellem den ydre konvektionszone og det indre, hvor energien transporteres ved stråling.

I de ydre dele af Solen varierer rotationshastigheden nogenlunde som på overfladen, med hurtig rotation ved ækvator og langsom rotation ved polerne. Denne variation er begrænset til Solens konvektionszone. Ved bunden af konvektionszonen er der en brat overgang, i et snævert område omtalt som Solens *tachocline*, til næsten konstant rotation i Solens indre. Denne kraftige variation i rotationen antages ofte at spille en central rolle i dannelsen af Solens magnetfelt og den variation i magnetfeltets egenskaber der afspejles i den 11-årige solpletcyklus. Detaljerne i disse processer er dog ikke særlig godt forstået, ligesom vi heller ikke har en tilfredsstillende forståelse af de processer, der har ført til den observerede variation i Solens indre rotation.

Ud over at analysere Solens svingningsfrekvenser kan man lave seismiske analyser af Solens indre der minder mere om geoseismiske undersøgelser, hvor man måler udbredelsestiden af bølger i Jordens indre mellem to punkter. Denne form for helioseismologi kaldes *lokal helioseismologi* og har givet detaljeret information om gasstrømninger under Solens overflade og den underliggende struktur af solpletter. Da lydbølgerne udbreder

sig i hele Solen er de også følsomme over for strukturer på Solens bagside.



Figur 7. Solpletter observeret med lokal helioseismologi. I det øverste panel er det centrale område på Solens bagside; her viser den gule og røde klat et stort solpletområde, detekteret ved analyse af observerede lydbølger. I det nederste panel, 13 døgn senere, er Solen roteret så dette område nu er på Solens forside, og solpletterne kan observeres direkte.

Som illustreret på figur 7 kan det benyttes til at 'se' solpletter på bagsiden af Solen. Dette har en væsentlig praktisk betydning. Solpletter er arnesteder for voldsomme soludbrud der kan være farlige for satellitter (og astronauter) og påvirke kommunikation og i værste tilfælde elforsyning på Jorden. Ved at se et kraftigt solpletområde på bagsiden kan vi forudsige mulige problemer af denne art når området efter ca. to uger er roteret frem på Solens forside hvor eventuelle udbrud kan ramme Jorden. Man kan dermed tage forholdsregler for at minimere effekten af udbruddene.

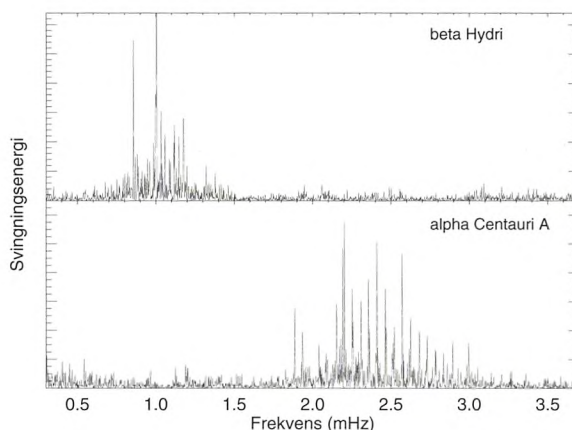
Observationer af andre stjerner – asteroiseismologi

Der er altså nogle klare fordele i analysen af Solens svingninger i forhold til tilsvarende undersøgelser af andre stjerner – der kommer langt mindre lys fra disse meget fjernere stjerner, og på grund af den manglende rumlige opløsning af overfladen kan kun svingninger med lave l -værdier observeres. Dette er dog de svingninger, der når dybest ind i stjernerne, og da vi kan observere stjerner med forskellige masser, radier og alder, er disse asteroiseismologiske undersøgelser af afgørende betydning for vores forståelse af stjernernes struktur og udvikling.

Jordbaserede observationer

Sol-lignende svingninger er i dag observeret i 15-20 stjerner hvoraf to eksempler er vist på figur 8. Forskningsfeltet er relativt nyt, da det først for omkring 10 år siden blev teknisk muligt at måle de små effekter af svingningerne på stjernernes spektre; før den tid var spektrograferne simpelthen ikke præcise og stabile nok. Ligesom for Solen foregår observationerne i organiserede netværk af teleskoper, men dog endnu ikke i dedikerede netværk. I stedet bliver observationerne af sol-lignende svingninger i andre stjerner organiseret

som *case-by-case* studier, i internationale samarbejder mellem forskere fra hele verden. De viste svingningsspektre på figur 8 stammer netop fra sådanne observationer; i begge tilfælde er en god tidlig dækning opnået over 8-10 dage ved at kombinere observationer fra Chile og Australien (se [2],[3]). Ud fra de viste svingningsspektre blev middeltætheden af stjernen β Hydri bestemt med en nøjagtighed på 0,6%, og ligesom for α Cen A, den anden stjerne i diagrammet, bliver resultaterne af disse observationer i øjeblikket sammenlignet med teoretiske stjernemodeller for de to stjerner.



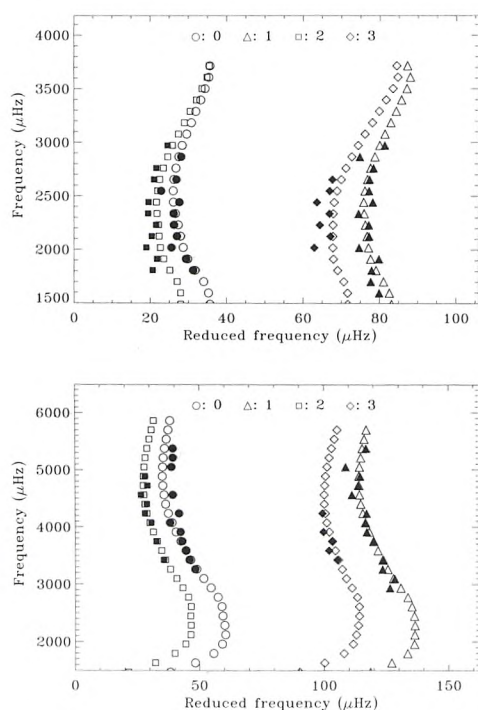
Figur 8. Svingningsspektre for α Cen A og β Hydri. Forskelle i svingningsfrekvenserne for de to stjerner skyldes forskelle i deres indre struktur og størrelse.

På figur 9 illustreres denne sammenligning mellem teoretisk beregnede frekvenser og observerede frekvenser, for de to stjerner α Cen A og α Cen B. Disse stjerner udgør, sammen med stjernen Proxima Centauri, et tredobbelt stjernesystem, og er Solens nærmeste naboer i Mælkevejen. Da α Cen A er lidt tungere end Solen og α Cen B lidt lettere – massen af stjernerne er velbestemte ud fra deres banebevægelser omkring det fælles masse-midtpunkt – og da begge stjerner hører til blandt himlens klareste stjerner og samtidig udviser sol-lignende svingninger, er de blandt de absolut vigtigste objekter for asteroiseismiske studier af andre stjerner.

I de såkaldte echelle-diagrammer vist på figur 9 er frekvenserne plottet på y-aksen som funktion af de samme frekvenser modulo den store frekvensopsplittning ud af x-aksen. Svingningsfrekvenser med samme l men voksende n -værdier vil, ifølge ligning (1), findes i et sådant diagram "stabled ovenpå hinanden", ved præcis den samme x -værdi. I praksis er dette ikke helt tilfældet, som det fremgår af figur 9, hvor frekvenser med samme l -værdi *ikke* antager lodrette, men derimod krummede former. Dette fortæller os at den asymptotiske relation givet i ligning (1) ikke gælder eksakt for stjernerne. Disse afvigelser fra den asymptotiske relation afhænger af stjernernes indre struktur, og et af formålene med de seismiske undersøgelser af stjernerne er netop at forstå disse afvigelser.

På figur 9 vises sammenligningen mellem teoretisk beregnede frekvenser (de åbne symboler) og frekvenser bestemt ud fra tidsserie-observationer af

de to stjerner (de lukkede symboler). Det er bemærkelsesværdigt, at den bedste overensstemmelse opnåes for α Cen B (det nederste diagram), på trods af at svingningsfrekvenserne rent faktisk er noget dårligere bestemt end tilfældet er for α Cen A. Forklaringen er den, at strukturen i den lettere α Cen B minder en del om Solens struktur, og derfor er ganske velforstået; α Cen A derimod er lidt tungere end Solen, og har en lidt anden struktur, og den er noget længere fremme i sin udvikling end Solen er. Den indre struktur af sådanne stjerner er mindre velforstået. Der arbejdes i øjeblikket på at forstå hvilke dele af fysikken i de teoretiske stjernemodeller som skal forbedres, for at opnå en bedre overensstemmelse mellem teori og observationer.



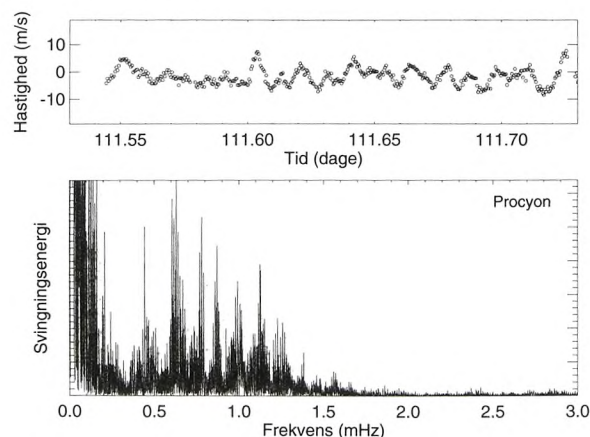
Figur 9. Echelle-diagrammer for stjernerne α Cen A (øverste diagram) og α Cen B (nederste diagram). Diagrammet viser på y-aksen svingningsfrekvenserne, og på x-aksen svingningsfrekvenserne modulo den store frekvensopsplitning for stjernen (*reducerede frekvenser*). De åbne symboler viser teoretisk beregnede svingningsfrekvenser og de lukkede symboler observerede svingningsfrekvenser, for svingninger med l -værdier mellem 0 og 3.

Procyon

De hidtil mest ambitiøse astroseismiske observationer er også stadig ved at blive analyseret. I januar 2007 brugte vi, i samarbejde med forskere fra hele verden, 11 af verdens bedste teleskop/spektrograf systemer til at observere stjernen Procyon. Procyon er i et dobbeltstjerne system – den anden stjerne er en hvid dværgstjerne – og dens masse er derfor kendt. Samtidigt er Procyon noget tungere end Solen, og er nået dertil i sin udvikling, hvor den næsten har opbrugt alt brint i centret og derfor er på vej til at blive en såkaldt subgigant stjerne. Dette er en fase i en stjernes liv, hvor der sker store strukturelle forandringer på relativt korte

tidsskalaer, og observationerne af Procyons svingninger udgør derfor en stor udfordring for stjernemodellerne.

Procyon blev over 3 uger observeret med teleskoper i Chile, USA, Australien, Japan, Spanien (De Kanariske Øer), Frankrig og Tyskland, hvilket betyder stort set alle spektrografer som er i stand til at levere den påkrævede måle-nøjagtighed (se [4]). Et udsnit af tidsserieobservationerne fra HARPS spektrografen på ESO's La Silla observatorium i Chile er vist på den øvre del af figur 10, hvor bevægelserne af Procyons overflade kan ses direkte i Doppler-hastighedsmålingerne. Svingningsspektret baseret på samtlige ca. 24.000 målinger fra alle 11 spektrografer er vist på den nedre del af figuren. Det har vist sig, at Procyon's svingningsmønster er meget komplekst, og sofistikerede matematiske teknikker bliver i øjeblikket anvendt på disse data, som er de mest omfattende seismiske data, der nogensinde er indsamlet for en anden stjerne end Solen.



Figur 10. Tidsserie og svingningsspektrum for Procyon. Svingningsenergien ses mellem 0.5 og 1.5 mHz, mens energien ved lavere frekvenser stammer fra aktivitet (stjernepletter) på Procyon's overflade.

På trods af, at dette er et fantastisk datasæt, peger observationerne af Procyon dog på nogle af de centrale problemer, vi står overfor i astroseismologien. Det kræver en ekstraordinær indsats at stable en så storstilet observationskampagne på benene og vi løber stadig ind i nogle problemer: observationerne dækker ca. tre uger i tid, men vi vil gerne observere i måneder, eller endog år på de samme stjerner. Derudover bliver datasættet meget inhomogent, idet der er stor forskel på kvaliteten af målingerne fra de mest præcise og fra de mindst præcise teleskoper. For at imødekomme disse problemer, er et dansk-ledet projekt, SONG, derfor blevet søsat, i høj grad af forfatterne af nærværende artikel.

Stellar Observations Network Group

SONG er et netværk under opbygning af fuldt automatiske 1-m teleskoper udstyret med ekstremt følsomme spektrografer. Det er planen at 8 teleskoper skal placeres rundt om på kloden, med det formål at foretage astroseismiske observationer af andre stjerner, på tilsvarende måde som GONG og BiSON har observeret Solen over de sidste årtier. Vi er i øjeblikket i samarbejde med forskere ved Københavns Universitet, ved

at designe og opbygge SONG prototypen, som skal stå klar på Observatorio del Teide på Tenerife ved udgangen af 2011. Prototypen er finansieret af Villum Kahn Rasmussen Fonden, Carlsbergfondet og Forskningsrådet for Natur og Univers (FNU). Det er idéen at prototypen herefter kopieres, og kopierne placeres på syv andre observatorier verden over. Med SONG vil vi være i stand til, for eksempel, at observere α Cen A uafbrudt i flere måneder, med høj præcision og med stor homogenitet i målingerne. Sådanne data er helt uopnåelige med eksisterende teleskoper, og vil betyde fantastiske muligheder i vores studier af stjernernes struktur og udvikling. Se [5] for flere detaljer.

SONG bliver dog ikke udelukkende dedikeret til astero-seismologi. Doppler-målinger af stjerner vil også afsløre den eventuelle tilstedeværelse af planeter, da stjernen vil kredse om det fælles massemidtpunkt og derfor se ud til at røkke frem og tilbage med en periode, der svarer til planetens omkredsningsperiode. Sådanne signaler vil i frekvensspektre, som dem der er vist i denne artikel, optræde ved langt lavere frekvenser end stjernessvingningerne. På den måde er der en stærk synergi mellem søgningen efter exo-planeter og astero-seismologi. Denne synergi er naturlig, idet de to forskningsområder bruger den samme type data, har sammenlignelige krav til måle-præcisionen, og idet planet- og stjernedannelse hænger uløseligt sammen.

NASA's Kepler-Satellit

Synergien mellem exo-planet forskningen og astero-seismologi gør sig i særdeleshed også gældende i et andet projekt, som Aarhus Universitet deltager meget aktivt i. NASA opsendte i marts 2009 Kepler-satellitten, som har til formål at lede efter jord-lignende planeter i kredsløb om andre stjerner. Kepler medbringer et 95 Mega pixel CCD kamera som er monteret i fokus på et vidvinkelteleskop med en diameter på 1 meter. Dette sætter satellitten i stand til at overvåge lysstyrken af 170.000 stjerner i et udsnit af himlen på 100 kvadratgrader, i retning af stjernebilledet Svanen, i over 3,5 år. Målet med observationerne er at finde planeter omkring andre stjerner ved hjælp af transit-metoden: ved at måle lysstyrken af de mange stjerner som funktion af tiden kan exoplaneter, hvis baneplan ligger således at planeten bevæger sig ind i synslinien mellem os og stjernen, detekteres ud fra det dyk i stjernens lysstyrke som fremkommer når planeten skygger for en smule af stjernens lys. I dag kendes ca. 350 planeter i kredsløb om andre stjerner. Kepler-satellitten bliver det første instrument, som er følsomt nok til at kunne detektere planeter på størrelse med Jorden i kredsløb om en sol-lignende stjerne, i en bane der minder om Jordens bane omkring Solen. Se i øvrigt Lars Buchhaves artikel om Kepler-satellitten i dette nummer af KVANT.

På samme måde som Doppler-målingerne kan bruges til at detektere både stjernessvingninger og exo-planeter, kan Kepler-satellittens målinger også bruges til at studere stjerneskælv. Som nævnt ovenfor gør kontrasten mellem stjernessvingningerne og støjsignaler fra andre processer på stjernens overflade at signal-støjforholdet fra Kepler-målingerne vil være dårligere

end i jordbaserede, spektroskopiske observationer. Til gengæld vil Kepler måle sol-lignende svingninger i flere tusinde stjerner, mange flere end vi nogensinde vil kunne måle fra jordoverfladen. Dertil kommer, at mange af disse stjerner med Kepler vil blive observeret kontinuerligt over flere år, noget som er umuligt at opnå fra Jordens overflade. Dette giver nogle meget spændende perspektiver for den seismiske analyse, og vi vil rent faktisk kunne se effekter af magnetiske cyklusser, svarende til Solens 11-års cyklus som også påvirker Solens svingninger, og måske endda effekten af, at stjernerne ændrer størrelse og struktur efterhånden som de udvikler sig, selv over det korte tidsrum hvor Kepler observerer dem.

Vi er på Aarhus Universitet helt centralt placeret i Kepler projektet, idet *Kepler Astero-seismic Science Operations Centre* er placeret på Aarhus Universitet – se ref. [6]. Med andre ord bliver den astero-seismiske analyse af Kepler-dataene organiseret fra Århus, hvor vi står i spidsen for et konsortium af ca. 250 forskere fra hele verden, som vil deltage i den seismiske analyse af Kepler-målingerne. Prisen for disse Kepler-data er meget enkel; dykket i lysstyrke på grund af en planet-transit afhænger af størrelsesforholdet mellem planeten og stjernen, og vi har forpligtet os overfor NASA til at levere de påkrævede stjerneradier, bestemt ud fra seismiske analyser, til Kepler projektet. For stjerner som viser sig at have planeter, vil den seismiske analyse udelukkende blive foretaget på Aarhus Universitet.

Med den sideløbende udvikling af SONG og Kepler projekterne går vi helio- og astero-seismologer ind i en spændende tid, hvor vi, bortset fra den manglende rumlige opløsning af stjernernes overflade, kan begynde at glæde os til at arbejde med seismiske data for andre stjerner af en kvalitet, som minder om den vi kender fra Solen.

Litteratur

- [1] H. Kjeldsen og T. R. Bedding, KVANT nr. 3, nov. 2003
- [2] R. P. Butler, T. R. Bedding, H. Kjeldsen et al. (2004), *Astrophysical Journal*, bind 600, Issue 1, side L75-L78
- [3] T. R. Bedding, H. Kjeldsen, T. Arentoft et al. (2007), *Astrophysical Journal*, bind 663, Issue 2, side 1315-1324
- [4] T. Arentoft, H. Kjeldsen, T. R. Bedding et al. (2008), *Astrophysical Journal*, bind 687, Issue 2, side 1180-1190
- [5] Grundahl, F., Christensen-Dalsgaard, J., Arentoft, T. et al. (2008), *Communications in Astero-seismology*, bind 157, side 273-278
- [6] <http://astro.phys.au.dk/KASC/seismology>

Fra venstre: Søren Frandsen, Pierre-Olivier Quirion, Frank Grundahl, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Hans Kjeldsen og Torben Arentoft, alle fra Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Gruppen



arbejder med udforskningen af stjernernes struktur og udvikling, i høj grad gennem seismiske undersøgelser af Solen og stjernerne.

Hubble-teleskopets sidste servicemission

I midten af april kunne Hubble rumteleskopet fejre sit 19-års jubilæum, hvilket blev fejret med et fantastisk flot billede – som vist nedenfor. Rumteleskopet har været en fast leverandør til Kvant-nyhederne med såvel smukke observationer som banebrydende opdagelser i Universet. Vi kan nu glæde os over, at Hubble får mulighed for at fortsætte sin udforskning af Universet ind i det nye årti.

Hubble rumteleskopet skal i maj have besøg af rumfærgen (indsat billede) med sine syv besætningsmedlemmer. Det er femte og sidste gang at Hubble får besøg, idet astronauter fra NASA og ESA har foretaget reparationer i 1993, 1997, 1999 og 2002. De to primære mål med denne servicemission er at udskifte

to overflødige instrumenter, COSTAR og WFPC2, med to nye instrumenter. De nye instrumenter kaldes for Cosmic Origins Spectrograph (COS) og Wide Field Camera WFC3, der vil forbedre Hubbles potentiale for observationer af det svage lys fra meget unge stjerner og galakser, betydeligt.

COS er primært beregnet til at studere lyset fra svage og fjerne kvasarer, der passerer interstellare gasskyer, galakser eller voids. Ved at bryde lyset i forskellige bølgelængder kan man få værdifuld information om den kemiske sammensætning af Universet ud fra hvilke bølgelængder af lys, der er blevet absorberet. WFC3 kan skabe billeder på baggrund af lys i det infrarøde, synlige og ultraviolette bølgelængdeområde.



Et af de mange fantastiske flotte billeder optaget med Hubble rumteleskopet. Dette fotogener system af tre galakser kaldes for Arp 194 og desuden ses myriader af stjerner samt gas og støv, der strækker sig over 100.000 lysår. Det ser ud som om at en af galakserne er sprunget læk, men den blå sky er i virkeligheden en strækket spiralarm af nydannede (ekstremt varme) blå stjerner. Dette er normalt når to galakser påvirker hinanden via tyngdekraften (NASA/ESA).