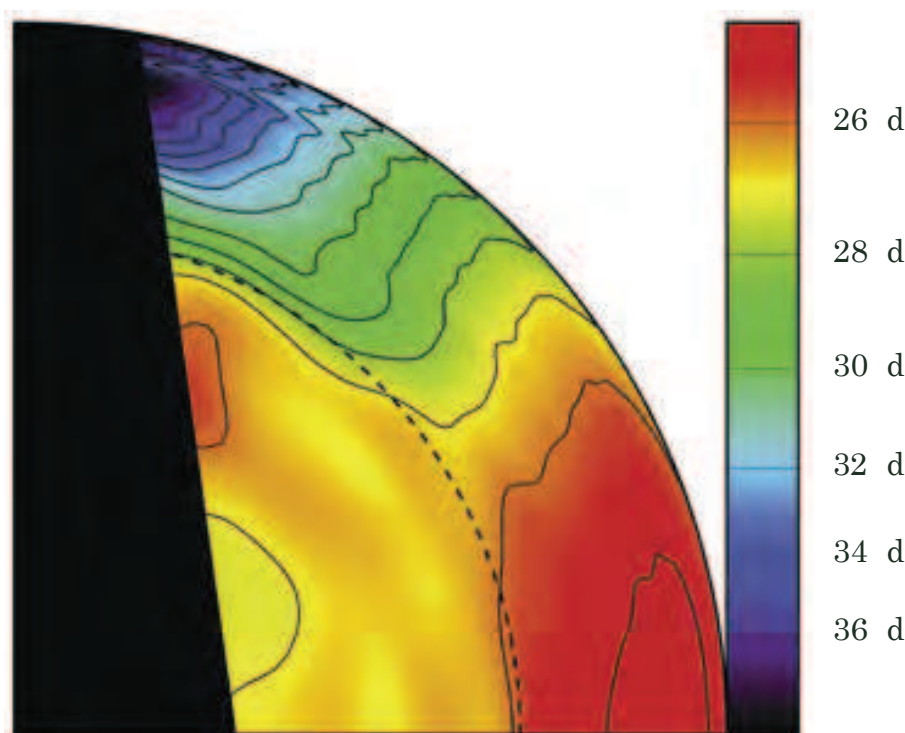

1

HVAD SKER DER INDE I STJERNERNE?

Af
**JØRGEN CHRISTENSEN-
DALSGAARD**
PROFESSOR, PH.D.,
INSTITUT FOR FYSIK OG
ASTRONOMI, AARHUS
UNIVERSITET. MODTAGER
AF CARLSBERGFONDETS
FORSKNINGSPRIS 2013 INDEN
FOR NATURVIDENSKAB

Ligesom geofysikere kan studere Jordens indre ved at observere jordskælv, kan astrofysikere bestemme egenskaberne ved det indre af Solen og andre stjerner ved at observere svingninger på stjernernes overflade. En gruppe af astrofysikere ved Aarhus Universitet har bidraget væsentligt til at udvikle disse teknikker. I de seneste 3-4 år har NASA's Kepler satellit leveret enestående data om stjernesvingninger, og analysen af disse data markerer en revolution i vores viden om stjernernes egenskaber.



Viden om stjernernes egenskaber er en grundsten for hele astrofysikken. Studiet af fjerne galakser og deres udvikling er i høj grad baseret på observationer af det lys, der er udsendt af galaksernes stjerner, ligesom hele udviklingen af universets, og dermed i den sidste ende vores egen, grundstofsammensætning er kontrolleret af kernereaktioner i stjerner. Studier af stjerner er essentielle for forståelsen af udviklingen af vores egen galakse, Mælkevejen, og for karakteriseringen af planetsystemer omkring andre stjerner, som kræver information om stjernernes størrelse og alder. Desuden er stjerner glimrende laboratorier for studiet af fysik under meget ekstreme forhold, forudsat at man kan få tilstrækkelig detaljerede observationer af forholdene i deres indre.

Desværre giver vores observationer umiddelbart ret begrænset viden om stjernernes egenskaber. Det lys vi ser, når vi observerer en stjerne, kommer fra de alleryderste lag af stjernen. Ved at ana-

lysere lyset kan vi få information om egenskaberne i stjernens atmosfære så som temperaturen, tyngdeaccelerationen og grundstofsammensætningen. I få tilfælde, hvor to stjerner kredser om hinanden, kan vi bestemme deres masser, ligesom vi for nære stjerner kan bestemme deres vinkeldiameter og dermed deres fysiske diameter, hvis afstanden er kendt. Kender vi afstanden, kan vi også bestemme stjernens lysstyrke, dvs. den samlede energiudsendelse, ud fra måling af den energi vi modtager fra stjernen. Og det er alt. Vi får ingen direkte information om forholdene i stjernens indre. Disse begrænsninger gælder også for Solen, selv om målingerne selvfølgelig er meget mere nøjagtige givet Solens relative nærhed.

Uden yderligere observationer er vores viden om det indre af stjernerne, og dermed forståelsen af stjernernes struktur og udvikling, udelukkende baseret på teoretiske modeller. De kan beregnes ud fra antagelser om de fysiske egenskaber ved stoffet

Rotationen i Solens indre, bestemt ved hjælp af helioseismologi. Figuren viser et tværsnit af en fjerdedel af Solen. Farveskalaen angiver rotationsperioden i døgn, og den stiplede cirkel markerer bunden af det område, hvor energitransporten sker ved konvektive gasbevægelser. I det sorte område er vores data ikke tilstrækkelig gode til at måle rotationshastigheden.

“
Det er her værd at huske, at Solen, ligesom andre stjerner, er en kugle af gas og derfor ikke nødvendigvis roterer med samme hastighed overalt.
 ”

i stjernerne og de processer, der styrer udviklingen. Specielt inkluderer det en beskrivelse af kilden til stjernernes energiudstråling, kerneprocesser hvor brint smelter sammen til helium. Modellerne kan sammenlignes med stjernernes observerede egenskaber, men denne sammenligning giver kun begrænset kontrol af, om vores antagelser, og dermed modellerne, er korrekte. Vi har brug for observationer, der mere direkte er følsomme for, hvad der sker inde i stjernerne.

Seismologi af Solen

Geofysikerne har vist vejen gennem deres studier af Jordens indre ud fra seismologi. Analyse af bølger, der udbreder sig gennem Jorden, fra jordskælv eller mere lokale eksplosioner, giver information om forholdene i de lag, som bølgerne passerer. Det var derfor et stort gennembrud, da observationer af Solen for 40 år siden viste regelmæssige svingninger i bevægelsen af soloverfladen, der på tilsvarende måde kan give information om Solens indre. Det dannede grundlag for udviklingen af *helioseismologi* og tilsvarende studier af andre stjerner, *asteroseismologi*. Forskningen i min gruppe, for tiden finansieret af et ERC Advanced Grant og gennem etablering af et center under Danmarks Grundforskningsfond, drejer sig i høj grad om at studere stjerners egenskaber gennem observationer af stjernesvingninger. Her har bevillinger fra Carlsbergfondet også spillet en stor rolle.

De tidlige observationer af Solen blev fulgt op af meget omfattende projekter til at observere solsvingninger fra globale netværk af teleskoper og fra rummet, specielt med SOHO-satellitten der har været i drift siden 1996. Vi har bestemt strukturen af det indre af langt det meste af Solen med stor nøjagtighed. Sammenligning med modeller af Solen viser små, men meget signifikante forskelle. Det indikerer problemer med beregningerne, som vi stadig arbejder på at identificere og korrigere.

Vi har også målt rotationen af det meste af Solens indre. Det er her værd at huske, at Solen, ligesom andre stjerner, er en kugle af gas og derfor ikke nødvendigvis roterer med samme hastighed over-

alt. Den helioseismiske analyse har faktisk vist slående variationer i rotationen. I de ydre ca. 30% af Solen, inklusive på overfladen, varierer rotationen med breddegraden med hurtigere rotation ved ækvator og langsommere rotation nær polerne. Dette område er også karakteriseret ved, at energien bliver transporteret gennem konvektion, dvs. gasbevægelser hvor varm gas stiger til vejrs og koldere gas synker ned. Det indre af Solen, hvor energien transporteres ved stråling, roterer med nogenlunde konstant hastighed. Vi har foreløbig kun begrænset forståelse af årsagen til disse egenskaber ved rotationen.

Fra Solen til stjernerne

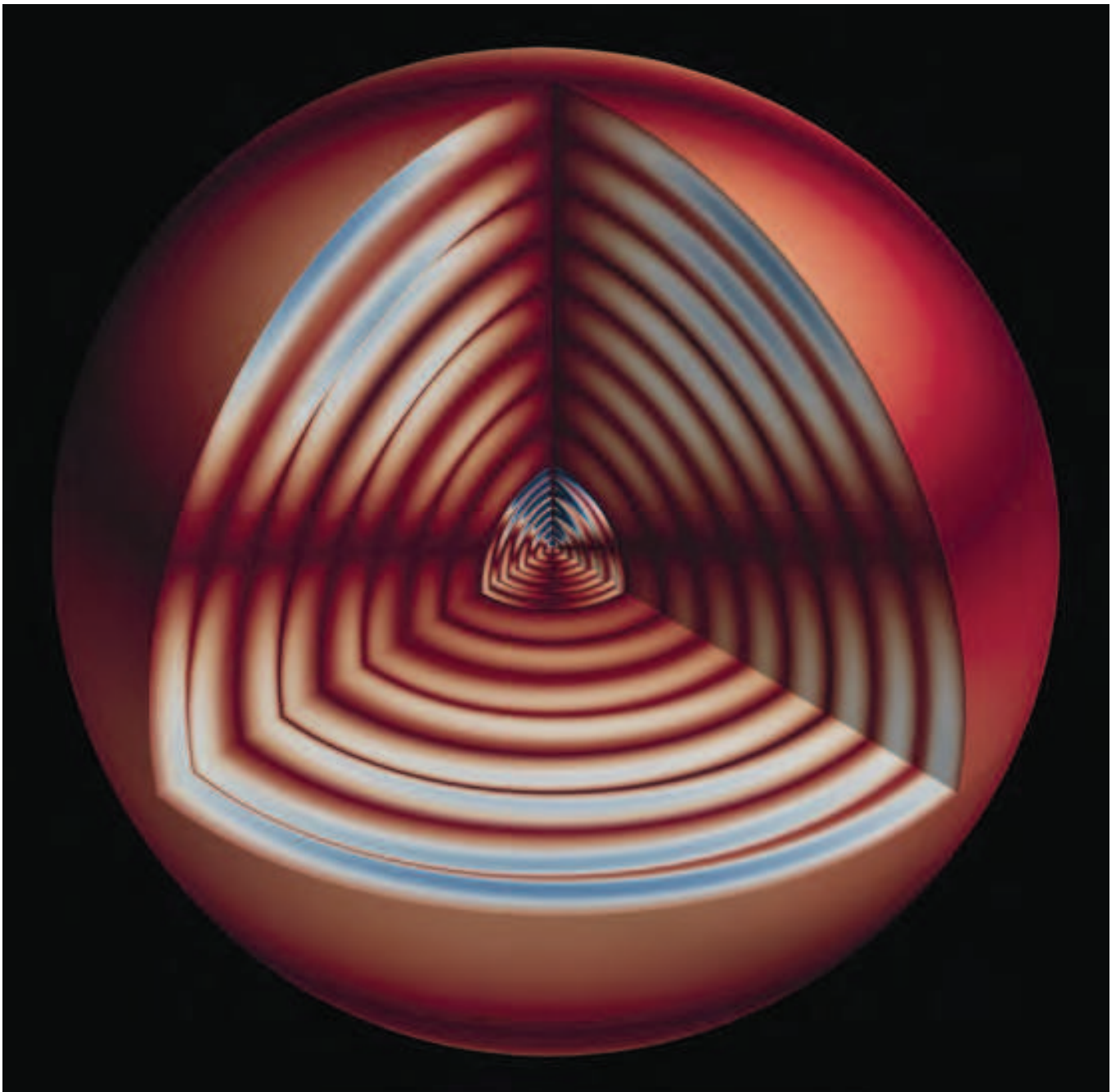
De observerede svingninger på Solen er stående lydbølger, der udbreder sig gennem store dele af Solen. De får deres energi fra konvektive gasbevægelser, der når hastigheder tæt på lydhastigheden nær Solens overflade og derfor er en kraftig kilde til akustisk støj. I Solen eksiteres et meget stort antal overtoner med forskellig struktur hen over Solens overflade og i dens indre. Det er en relativt ineffektiv process, og de observerede svingningsamplituder er tilsvarende små. De højeste amplituder, ved perioder nær 5 minutter, er omkring 20 cm/s i hastighed for individuelle svingninger. Svingningerne kan også observeres i Solens lysintensitet med amplituder på kun nogle få milliontedele. At så små effekter kan observeres i stor detalje er et udtryk for den meget højt udviklede observationsteknik.

Mange stjerner har konvektion nær overfladen, og man vil derfor forvente, at de har svingninger som Solens. Det er dog klart, at de meget små amplituder gør det særdeles svært at observere svingninger i andre stjerner, hvor vi modtager meget mindre lys, end vi gør fra Solen. De første nogenlunde sikre observationer af svingninger svarende til Solens i en anden stjerne, eta Bootis, blev foretaget af Aarhus-gruppen i 1994 med det Nordiske Optiske Teleskop på La Palma. Stjernen er lidt tungere og noget længere i sin udvikling end Solen. Specielt har den opbrugt al brinten i de centrale dele og har derfor en heliumkerne omgivet af et område, hvor der



Røde kæmpestjerner repræsenterer også et senere udviklingsstadium for Solen, som den vil nå om ca. 6 milliarder år.





Model af en svingning i en rød kæmpestjerne. I de ydre dele af stjernen opfører svingningen sig som en lydbølge, mens den i det indre af stjernen har karakter af en intern tyngdebølge. Sådanne hybride svingninger giver os glimrende muligheder for at studere struktur og rotation af den meget kompakte heliumkerne i røde kæmpestjerner. Med tak til Pieter Degroote, Leuven

SONG-teleskopet på Tenerife, med Teide-vulkanen i baggrunden. Teleskopet, delvist finansieret af Carlsbergfondet, er monteret i kuplen, mens containeren indeholder instrumenter og computer. Dette er det første af, hvad der er planlagt som et globalt netværk af teleskoper til bl.a. asteroseismologi. Det næste teleskop er bygget og ved at blive testet af vores kinesiske samarbejdspartnere i den vestlige del af Kina. Med tak til Frank Grundahl, Aarhus.

stadig sker energiproduktion ved brintfusion. En effekt af den kompakte heliumkerne er eksitation af en ny type svingninger, nemlig svingninger der opfører sig som interne tyngdebølger i stjernens centrale dele og som akustiske bølger i det ydre. Denne type hybride svingninger blev tydeligt observeret i eta Bootis. I modsætning til de akustiske svingninger observeret i Solen er de hybride svingninger meget følsomme over for forholdene i stjernens dybe indre.

Observation af svingninger med meget små amplituder er blevet hjulpet frem af et andet centralt forskningsfelt: detektion af planeter i bane omkring andre stjerner, de såkaldte exoplaneter. Specielt er der udviklet teknikker til observation ved hjælp af Doppler-effekten af stjernernes hastighed, når en planet og den centrale stjerne kredser omkring deres fælles tyngdepunkt. Disse teknikker, og meget sofistikeret udstyr på store teleskoper, har gjort det muligt at observere sølignende svingninger på nogle få stjerner. Blandt andet har Aarhusgruppen brugt et af verdens største teleskoper, Very Large Telescope (VLT) med en spejldiameter på 8 meter, til at observere svingninger af en af himlens klareste stjerner; det drejer sig om stjernen alfa Centauri, som er en af Solens nærmeste naboer og en stjerne, der på mange måder ligner Solen.

Som nævnt ovenfor kan stjernessvingninger også detekteres i stjerners lysstyrke. For sølignende svingninger er variationen alt for lille til at kunne observeres gennem Jordens urolige atmosfære, men observationer fra rummet er mulige med tilstrækkeligt stabile detektorer. Et enormt gennembrud for asteroseismologien er sket med data fra NASA's rummission *Kepler*, opsendt i marts 2009. Missionen har som mål at finde exoplaneter med en teknik, der udnytter at en planet kan skygge lidt for lyset fra den stjerne den kredser om, hvis planeten i sin bane passerer hen over stjernen, set fra Jorden. Det kræver uhyre nøjagtige målinger af stjernernes lysstyrke samt observation af et meget stort antal stjerner over lange tidsrum for at øge sandsynligheden for at finde planeter — krav der svarer nøje til kravene for studier af stjernessvingninger. *Kepler* har fundet næsten 4000 mulige exoplaneter og dermed sandsynliggjort, at stort set alle stjerner har planetsystemer. *Kepler* har desuden observeret svingninger af tusindvis af stjerner, herunder flere hundrede sølignende stjerner. Den asteroseismiske analyse af dette enorme data-materiale er blevet koordineret af Aarhus-gruppen gennem etablering af Kepler Asteroseismic Science Consortium, der omfatter mere end 550 forskere fordelt over hele verden. Vi har karakteriseret et stort antal stjerner og arbejder ihærdigt på at udvikle metoder til mere

detaljerede analyser af stjernernes indre egenskaber. Et vigtigt aspekt er bestemmelsen af stjernernes alder, som vil spille en central rolle i Mælkevejens udvikling. Vi har også været i stand til at bestemme egenskaberne ved en beskedent del af de stjerner, hvor *Kepler* har fundet exoplaneter. Således fandt vi for nyligt, at *Kepler's* første klippeplanet med en radius på 1,4 gange Jordens og en middelmassefylde på ca. 8 g/cm³, kredser omkring en stjerne, der med en alder på ca. 10 milliarder år er blandt de ældste i Mælkevejen.

Måske de mest interessante resultater fra *Kepler* er opnået for de mere end ti tusind såkaldte røde kæmpestjerner, som *Kepler* har observeret. I disse stjerner er brinten brugt op i de centrale dele, der er omdannet til en meget kompakt heliumkerne omgivet af et tyndt område med brintfusion. De ydre lag af stjernen svulmer voldsomt op, samtidig med at de afkøles noget og dermed lyser mere rødt end en stjerne som Solen. Røde kæmpestjerner repræsenterer også et senere udviklingsstadium for Solen, som den vil nå om ca. 6 milliarder år. Med *Kepler's* observationer har vi fundet, at svingningerne af de røde kæmper i mange tilfælde er domineret af interne tyngdebølger, som giver information om den meget kompakte kerne. Specielt har det vist sig muligt at afgøre, at der i nogle af de observerede stjerner sker fusion af helium til kul og ilt i de aller-inderste dele af stjernen, og vi arbejder på at studere disse processer i større detalje. Vi har også kunnet måle rotationen af heliumkernen og vise at den er væsentlig hurtigere end rotationen af stjernens overflade, men vi er stadig langt fra en forståelse af udviklingen af stjernernes rotation fra den næsten konstante rotation, vi har observeret i Solen.

Et globalt netværk

De meget omfattende rumbaserede observationer overflødiggør på ingen måde jordbaserede observationer. Stjernernes atmosfære rummer mange andre fænomener end svingningerne, og deres effekt på det observerede signal påvirker analysen af svingninger som 'støj'. Sammenlignet med svingningerne er denne støj betydeligt voldsommere i observationer af stjernernes lysstyrke, som f.eks. foretaget med *Kepler*, end i observationer af hastigheden af stjernernes overflade. Man kan derfor i princippet få væsentligt mere information om stjernernes indre ved at observere hastigheden. Som allerede nævnt har vi foretaget hastighedsobservationer med meget store teleskoper, men kun over begrænsede tidsrum, og det er klart, at vi kun kan forvente begrænset adgang til så efterspurgte faciliteter. Det var derfor et vigtigt gennembrud da vi indså, at man ved at optimere teleskopet og instrumenterne kun-



“

Første skridt, med betydelig støtte fra Carlsbergfondet, har været bygning af et teleskop på Tenerife, der fungerer som prototype for projektet.

”

ne opnå Doppler-observationer med samme følsomhed som med VLT, men med et teleskop med en diameter på kun 1 meter.

Det er baggrunden for SONG-projektet (for Stellar Observations Network Group), der har til formål at etablere et teleskop-netværk, der skal foretage lange koordinerede observationer af stjernesvingninger. Første skridt, med betydelig støtte fra Carlsbergfondet, har været bygning af et teleskop på Tenerife, der fungerer som prototype for projektet. Teleskop og instrumenter er næsten klar til at påbegynde de videnskabelige observationer, og vi har

vist, at observationerne kan foretages fra Aarhus og i høj grad automatiseres. Som næste skridt i etablering af netværket har vores kinesiske kolleger bygget et tilsvarende teleskop i den vestlige del af Kina, og vi forventer i løbet af 2014 at foretage de første observationer koordineret mellem Tenerife og Kina. På grundlag af disse første erfaringer er det planen at søge yderligere teleskoper etableret gennem samarbejde med partnere rundt omkring i verden, eller eventuelt gennem yderligere dansk finansiering. Målet er, at vi om nogle år skal kunne sige, at 'stjernerne går aldrig ned over Aarhus Universitet!'