

# 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 stjernessvingninger (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 milliontedele (ppm). Tidsskalaerne af variationerne er, for en stjerne som Solen, få minutter.

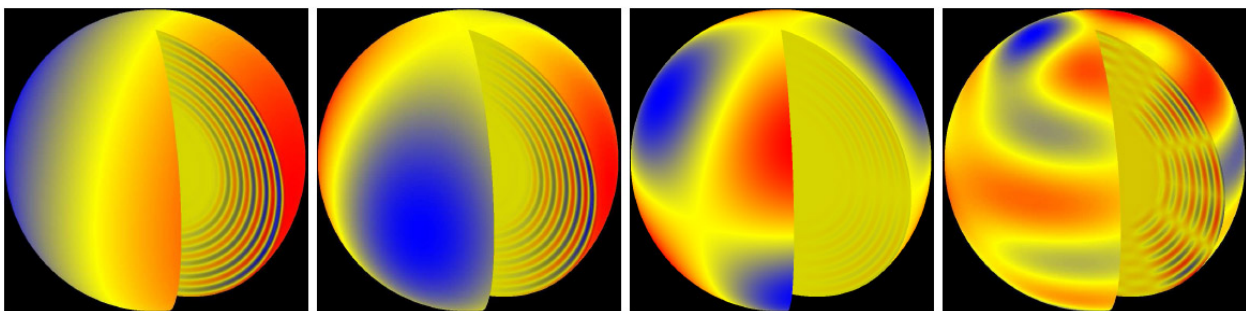
Mens disse lydbølger således ikke påvirker stjernerne nævneværdigt, så har de til gengæld en meget dramatisk indvirkning på vores forståelse af forholdene i stjernernes indre. De anslåede lydbølger afhænger meget nøje af stjernens radius og alder samt af de fysiske forhold inde i stjernen; gassens tryk, 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"<sup>1</sup>, 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  $\Delta\nu$ ,  $\epsilon$  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  $\epsilon$  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  $\nu_{nl}$ . 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  $\bar{\Omega}$ :

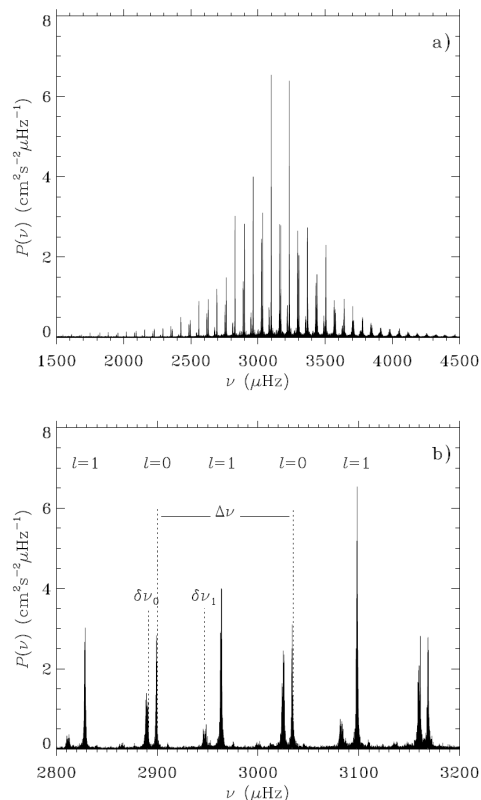
$$\Delta\nu_{nlm} \sim m\bar{\Omega}. \quad (2)$$

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.



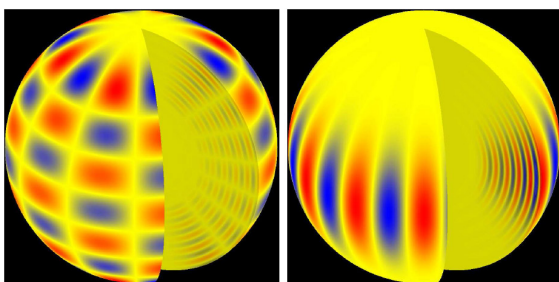
**Figur 2.** Svingningsspektrum for Solen baseret på BiSON data, hvor der på den nederste figur er zoomet ind på en lille del af frekvensspektret. Hver top i spektret svarer til en enkelt svingning. Der er en høj grad af regularitet i svingningsspektret, i overensstemmelse med ligning (1).  $\Delta\nu$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

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

<sup>1</sup>Relationen 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 stjernens 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  $(12, 12)$ .

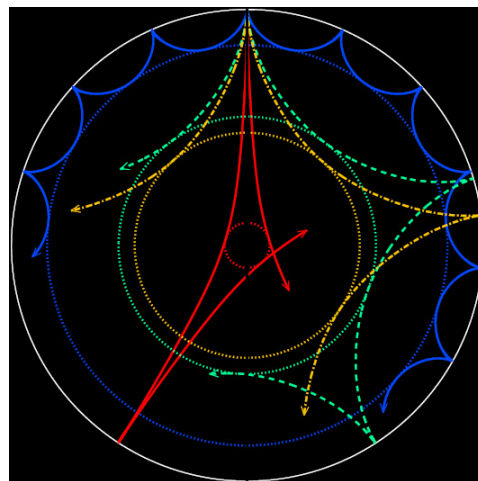
### Helioseismologi

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. Lyd-hastigheden 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 lyd-hastighed indtil de når *det indre vendepunkt* i en afstand  $r_t$  fra centrum;  $r_t$  findes som løsning til ligningen

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

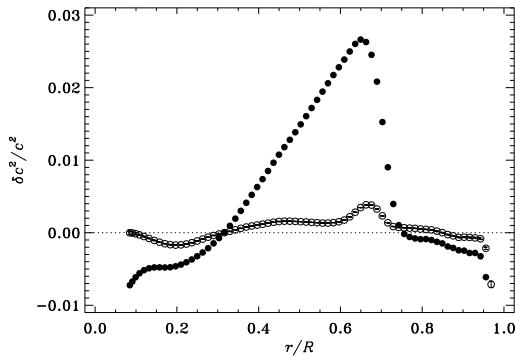
her er  $c$  lyd-hastigheden og  $\nu$  frekvensen. Da frekvenserne ligger i et relativt begrænset interval afhænger  $r_t$  overvejende af  $l$ . For bølger med høje  $l$  ligger vendepunktet ved en lav lyd-hastighed, dvs. tæt ved overfladen. Svingninger med de laveste  $l$  når helt ind til centrum 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 **G**lobal **O**scillations **N**etwork **G**roup), der har etableret seks observatorier til observation af solsvingninger passende fordelt rundt om Jorden for at sikre næsten kontinuerte observationer; og MDI (**M**ichelson **D**oppler **I**mager)

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.

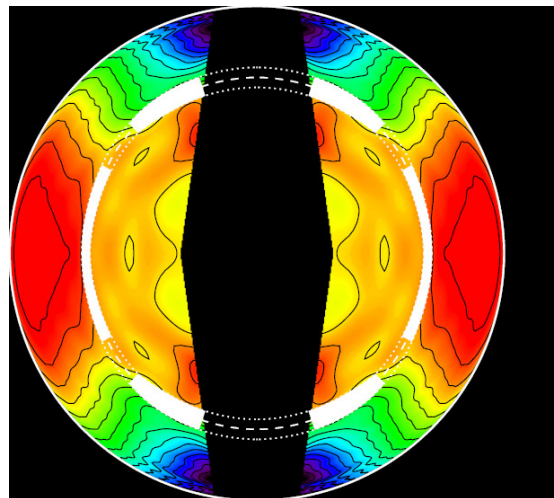


**Figur 5.** Den relative forskel mellem kvadratet  $c^2$  på lyd hastigheden i Solen, bestemt ud fra helioseismologi, og i to modeller af Solen. De åbne cirkler viser  $c^2$  i Solen minus  $c^2$  for en model med en ældre bestemmelse af Solens grundstofforekomst. De fyldte cirkler er for en model hvor grundstofforeskomsten 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 lydølger afhænger deres frekvenser overvejende af lyd hastigheden, og ved at analysere frekvenserne kan vi derfor bestemme lyd hastighedens 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 lyd hastighedens 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 døgn

ved ækvator til over 30 døgn 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.

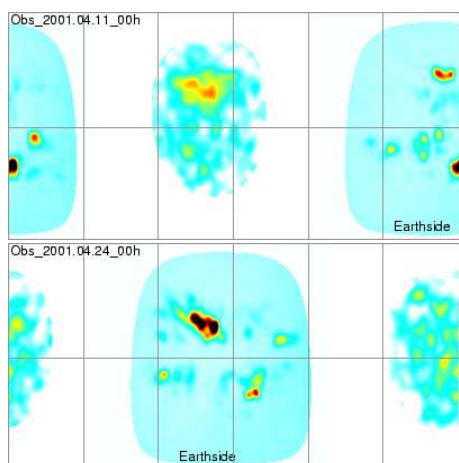


**Figur 6.** Rotationen i Solens indre, bestemt med helioseismologi. Farveskalaen markerer rotationsperioden, fra 25 døgn (rød) til 35 døgn (mørkeblå). I det sorte område omkring den lodrette rotationsakse er vi ikke i stand til at bestemme rotationshastigheden. De hvide områder markerer den såkaldte 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 lydølgerne 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.

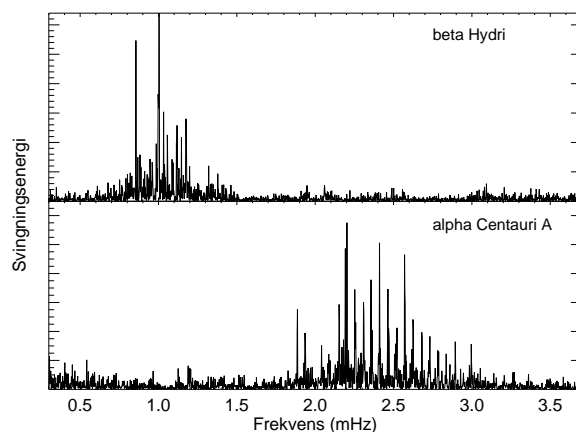
### Observationer af andre stjerner – asteroseismologi

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 asteroseismologiske 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  $\beta$  Hydri bestemt med en nøjagtighed på 0,6%, og ligesom for  $\alpha$  Cen A, den anden stjerne i diagrammet, bliver resultaterne af disse observationer i øjeblikket sammenlignet med teoretiske stjernemodeller for de to stjerner.



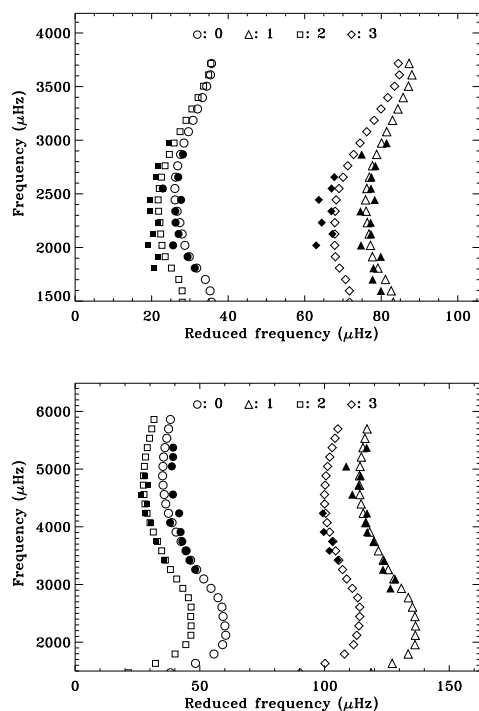
**Figur 8.** Svingningsspektre for  $\alpha$  Cen A og  $\beta$  Hydri. Forskelle i svingningsfrekvenserne for de to stjerner skyldes forskelle i deres indre struktur og størrelse.

På figur 9 illustreres denne sammenligning mellem teoretisk beregnede frekvenser og observerede frekvenser, for de to stjerner  $\alpha$  Cen A og  $\alpha$  Cen B. Disse stjerner udgør, sammen med stjernen Proxima Centauri, et tredobbelt stjernesystem, og er Solens nærmeste naboer i Mælkevejen. Da  $\alpha$  Cen A er lidt tungere end Solen og  $\alpha$  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 asteroseismiske 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  $\alpha$  Cen B (det nederste diagram), på trods af at svingningsfrekvenserne rent faktisk er noget dårligere bestemt end tilfældet er for  $\alpha$  Cen A. Forklaringen er den, at strukturen i den lettere  $\alpha$  Cen B minder en del om Solens struktur, og derfor er ganske velforstået;  $\alpha$  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.



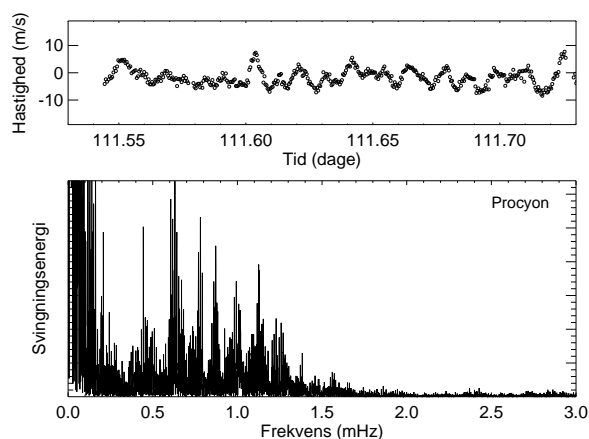
**Figur 9.** Echelle-diagrammer for stjernerne  $\alpha$  Cen A (øverste diagram) og  $\alpha$  Cen B (nederste diagram). Diagrammet viser på y-aksen svingningsfrekvenserne, og på x-aksen svingningsfrekvenserne modulo den store frekvensopsplitning for stjernen (*reducerede frekvenser*). De åbne symboler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

## Procyon

De hidtil mest ambitiøse asteroseismiske 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 asteroseismologien. 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 asteroseismiske 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  $\alpha$  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 asteroseismologi. 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 rukke frem og tilbage med en periode, der svarer til planetens omkredsningstid. Sådanne signaler vil i frekvensspektre, som dem der er vist i denne artikel, optræde ved langt lavere frekvenser end stjernesvingningerne. På den måde er der en stærk synergi mellem søgningen efter exo-planeter og asteroseismologi. 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 asteroseismologi 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 stjernesvingninger og exoplaneter, kan Kepler-satellittens målinger også bruges til at studere stjerneskælv. Som nævnt ovenfor gør kontrasten mellem stjernesvingningerne og støjsignaler fra andre processer på stjernens overflade at signalstøjforholdet 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 Asteroseismic Science Operations Centre* er placeret på Aarhus Universitet – se ref. [6]. Med andre ord bliver den asteroseismiske 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 asteroseismologer 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 Asteroseismology*, 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.