Observationer af stjerneskælv: Seismiske undersøgelser af stjernernes indre

Hans Kjeldsen, Teoretisk Astrofysik Center, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet og Tim Bedding, School of Physics, University of Sydney, Australien

Undersøgelse af stjernernes indre

Observationer af stjernernes og Solens lys (fra radiostråling via synligt lys til Røntgenstråling) og partikelstråling gør det muligt at undersøge de fysiske forhold på stjernernes overflade og i deres atmosfærer. Vi har herved opbygget et meget detaljeret billede af de fænomener, som finder sted på stjernernes overflader og har konstrueret modeller, som beskriver de fleste af de observerede fænomener. Et eksempel på denne type observationer ses på figur 1, hvor Solens ydre atmosfære er observeret ved hjælp at SoHO satellitten. Mens vi således relativt nemt kan få adgang til data fra Solens og stjernernes overflader, er det langt vanskeligere at undersøge forholdene i det indre af stjernerne og Solen.

Seismologi

Når et jordskælv udløses, sendes der jordskælvsbølger rundt i Jordens indre. Ved at benytte de seismografer, der er opstillet overalt på Jorden, kan geologerne registrere bølgerne fra et givet jordskælv. Gennem detaljerede analyser af bølgernes løbetider og ved sammenligninger med teoretiske modeller af Jordens indre er det muligt at bestemme de fysiske forhold langt under vor planets overflade. Skønt vi ikke er i stand til at foretage direkte målinger af Jordens indre, kan seismologiske undersøgelser give endog meget detaljerede oplysninger af forholdene i Jordens kappe og kerne, bl.a. tryk- og temperaturforhold.

For stjernerne og Solens vedkommende gør noget tilsvarende sig gældende. Ved direkte målinger har man kun mulighed for at studere himmelobjekernes overflade, mens man ikke kan foretage målinger af forholdene i stjernernes indre. Imidlertid har man ved brug af computere siden 1960'erne været i stand til at fremstille gode modeller af stjerner. Disse modeller har i de fleste henseender stemt overens med de forhold, man kan observere på stjernernes overflade, som radius og energiproduktionen. Men det store problem er, at man ikke har været i stand til detaljeret at efterprøve disse computer-simulerede modeller af stjernernes indre.

Solskælv

For omkring 30 år siden blev det imidlertid opdaget, at Solen til stadighed udfører svingninger – de såkaldte solsvingninger eller solskælv – der på Solens overflade ses som et kompliceret system af bølger. Det kræver meget fintfølende måleudstyr overhovedet at se disse bølger. Men ved at måle på tusindvis af sådanne solskælv lykkedes det – takket være seismologiske metoder – at undersøge Solens indre. Som geologerne har undersøgt Jorden, har astronomerne i løbet af de sidste 20 år opbygget et meget detaljeret billede af forholdene under Solens overflade, forhold som ikke lader sig observere direkte.

Skælv på Solens overflade er blevet studeret meget detaljeret fra såvel Jorden som fra rummet – senest ved brug af SoHO satellitten. Dette arbejde har bl.a. været udført af danske forskere fra Teoretisk Astrofysik Center i Århus (se bl.a. [2] for detaljer). Resultaterne fra disse seismologiske undersøgelser har ført til en revision af forståelsen af Solens indre, hvilket naturligt nok førte til spekulationer om, hvorvidt vor indsigt i forholdene i stjernernes indre er dækkende.

Stjerneskælv?

Derfor har astronomerne i de sidste knap 20 år forsøgt at finde bølger og svingninger (stjerneskælv) på andre stjerner end Solen for her igennem at få mulighed for at foretage detaljerede undersøgelser af stjernernes indre. Men det er ikke så lige til. De periodiske bølgebevægelser, der stammer fra stjerneskælv og solskælv, er næsten umulige at måle. Og selv på Solen, der lyser over 10 milliarder gange kraftigere end den klareste stjerne, kræver det helt specielt udstyr at måle de relativt små bølgebevægelser. Forsøg på at observere stjerneskælv ved direkte måling af stjerneoverfladernes bevægelser er derfor indtil for få år siden mislykkedes. I de seneste år er præcisionen af målingerne dog forbedret så meget, at det har medført et gennembrud i studiet af stjerneskælvene, og vi har derfor nu seismiske målinger af andre stjerner.

Stjernernes svingninger

Målinger på stjerneskælv eller stjernesvingninger er et smukt fysikeksperiment. En stjerne er en kugleformet klode af gas, og den vil i princippet udføre svingninger af forskellig type, hvis disse bliver anslået. Perioderne, eller frekvenserne for disse forskellige svingninger vil afhænge af stjernens tæthed, temperatur, gasbevægelser og andre forhold i det indre af stjernen. Svingningsamplituderne afhænger af eksitationsgraden og dæmpningsprocesserne, hvilket i stjerner af solens type, afhænger af turbulens i de ydre dele af stjernen – turbulens som stammer fra konvektive bevægelser. Sammenhængen mellem de fysiske størrelser og pro-

cesser og stjernesvingningerne er den direkte årsag til, at vi forventer at kunne undersøge stjernernes indre via studiet af svingningerne.

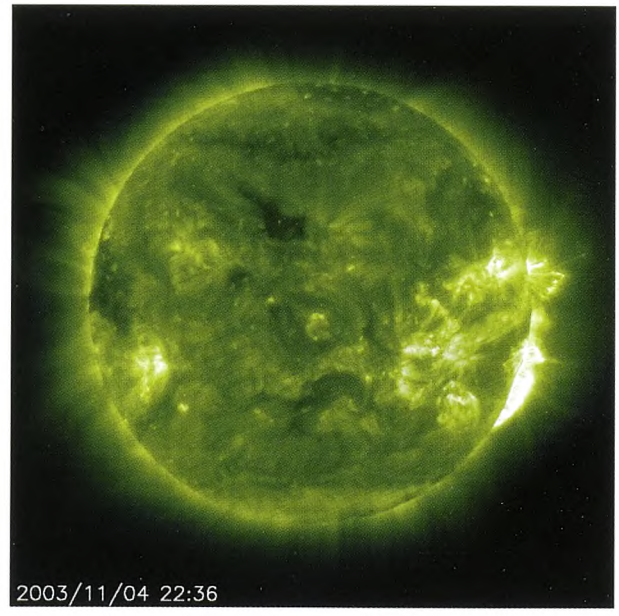
Helioseismologi

Af alle svingende stjerne er Solen den, vi har undersøgt grundigst. Solen svinger i over én million forskellige svingninger på én gang, med perioder på mellem 3 og 15 minutter. Den seismiske undersøgelse af Solen – Helioseismologien - har, som beskrevet ovenfor, resulteret i en revision af vores opfattelse af Solens indre.

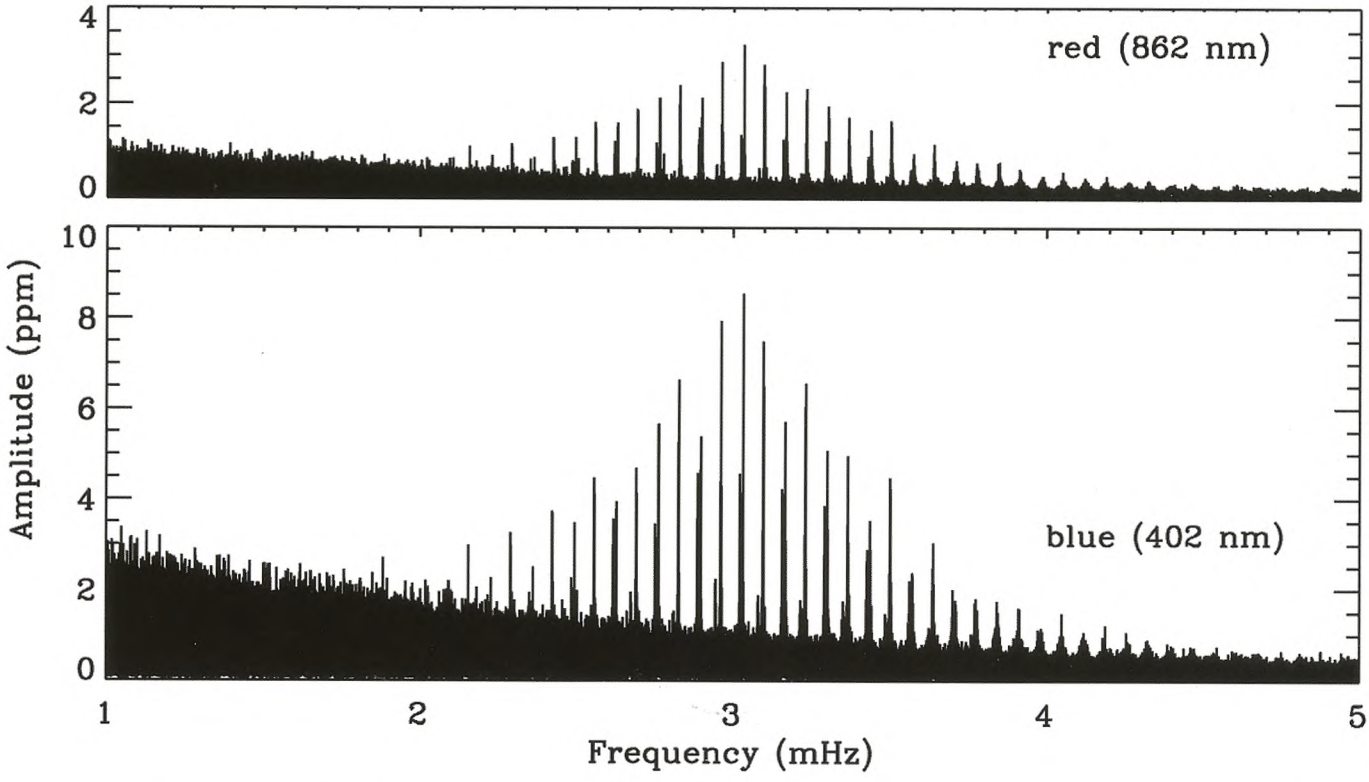
En stor del af de svingninger, vi kender på Solen, udviser en overfladestruktur, som kræver, at vi opløser Solens overflade for at kunne måle svingningsfrekvensen.

Dette kan dog kun lade sig gøre for Solens vedkommende, mens vi for stjernerne - på grund af den store afstand - er henvist til at studere det samlede lys. Svingningerne for det integrerede lys for Solen er vist i figur 2.

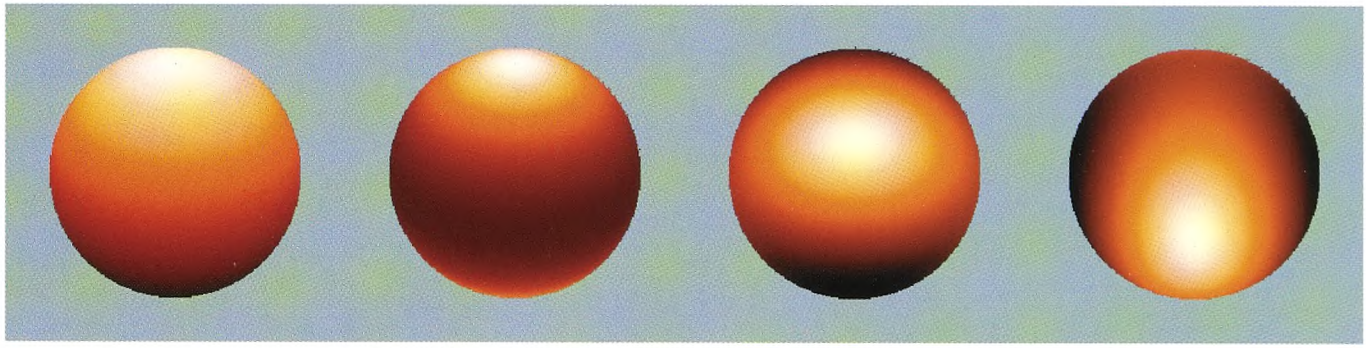
Svingningerne på Solen anslåes af de konvektive bevægelser nær Solens overflade, og vi forventer derfor, at alle stjerner med konvektion nær overfladen vil udvise svingninger, som dem vi kender i Solen.



Figur 1. Billede af Solens atmosfære taget fra SoHO (NASA/ESA) satellitten (EIT instrumentet), ved en bølgelængde på 19,5 nm. Lyset stammer fra de nedre dele af Solens varme korona. Billeder fra SoHO kan hentes via SoHO's hjemmeside – se [1].



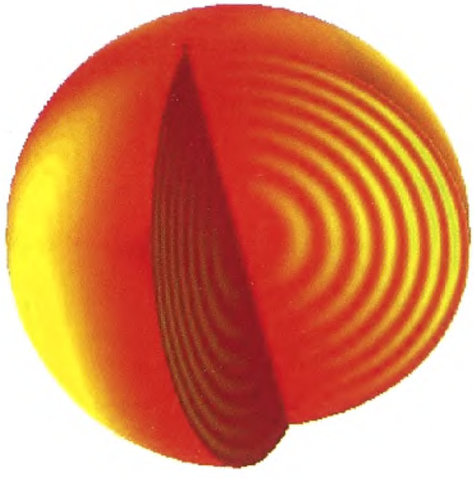
Figur 2. Amplitude spektrum af Solens samlede lys, målt ved hjælp af VIRGO instrumentet på SoHO. Observationerne er i dette tilfælde blevet udglattet og omskaleret for at vise amplitude spektret som det ser ud efter 30 dages observation. De enkelte svingninger ses som toppe oven på en skrå baggrund som stammer fra de konvektive bevægelser på Solens overflade (granulation). De viste data stammer fra [3]. Frekvensen er målt i mHz. 3 mHz svarer til en periode på omkring 5 minutter. Amplituden er målt i rødt og blåt lys og angives i enheder af en milliontedel af lysstyrken (ppm).



Figur 3. Fire forskellige svingningstyper som Solen udfører. Den første har l=1 og m=0, den anden l=2 og m=0, den tredie l=2 og m=1 og den fjerde l=2 og m=2.

Svingningernes egenskaber

Svingninger som dem vi kender i Solen er stående lydbølger, betegnet p-svingninger (p står for pressure – altså tryk). Hver enkelt af disse svingninger er karakteriseret med 3 talværdier: den radiale orden n, den angulære grad l og azimutal graden m. n beskriver svingningens karakter i den radiale retning (ind gennem stjernen), mens l og m udtrykker strukturen af svingningen på stjernens overflade. På figur 3 ses en række svingninger med forskellig l og m. Figur 4 viser den radiale struktur af svingningerne.



Figur 4. Svingning med l=2, m=2 og n=18.

Svingninger med l=0 trænger dybere ind i stjernen end svingninger med højere l værdier, og derfor er svingninger med lav l værdi ideelle til undersøgelse af stjernernes kerneområder.

Svingningsfrekvenser for p-svingninger med lav angulær grad kan bestemmes med rimelig nøjagtighed ved hjælp af den såkaldte asymptotiske formel:

$$\nu_{n,l} = \Delta\nu(n + \tfrac{1}{2}l + \epsilon) - l(l+1)D_0. \qquad (1)$$

$\Delta\nu$ betegner den såkaldte store frevensopsplitning og er et mål for stjernens gennemsnits tæthed. D_0 er primært følsom overfor lydhastigheden nær stjernens kerne, mens ϵ er følsom overfor forholdene nær overfladen.

At D_0 er følsom overfor forholdene nær stjernens kerne betyder bl.a., at den kan benyttes til at foretage direkte målinger af den kemiske sammensætning i stjernernes kerneområde, der hvor stjernen fremstiller sin energi. Da stjernerne producerer energi ved langsomt at omdanne brint til helium via fusion, kan en måling af den kemiske sammensætning benyttes til at måle en stjernes alder (hvis stjernen kun har lidt brint tilbage i kernen må den være gammel).

Det er i seismologien normalt at definere et sæt af små frekvensopsplitninger, $\delta\nu_{02}$ og $\delta\nu_{13}$, som angiver afstanden mellem nærtliggende svingninger med $l = 0$ og $l = 2$ ($\delta\nu_{02}$) og $l = 1$ og $l = 3$ ($\delta\nu_{13}$). De forskellige frekvensopsplitninger er vist i figur 5.

Hvis den asymptotiske formel var eksakt, betød det, at

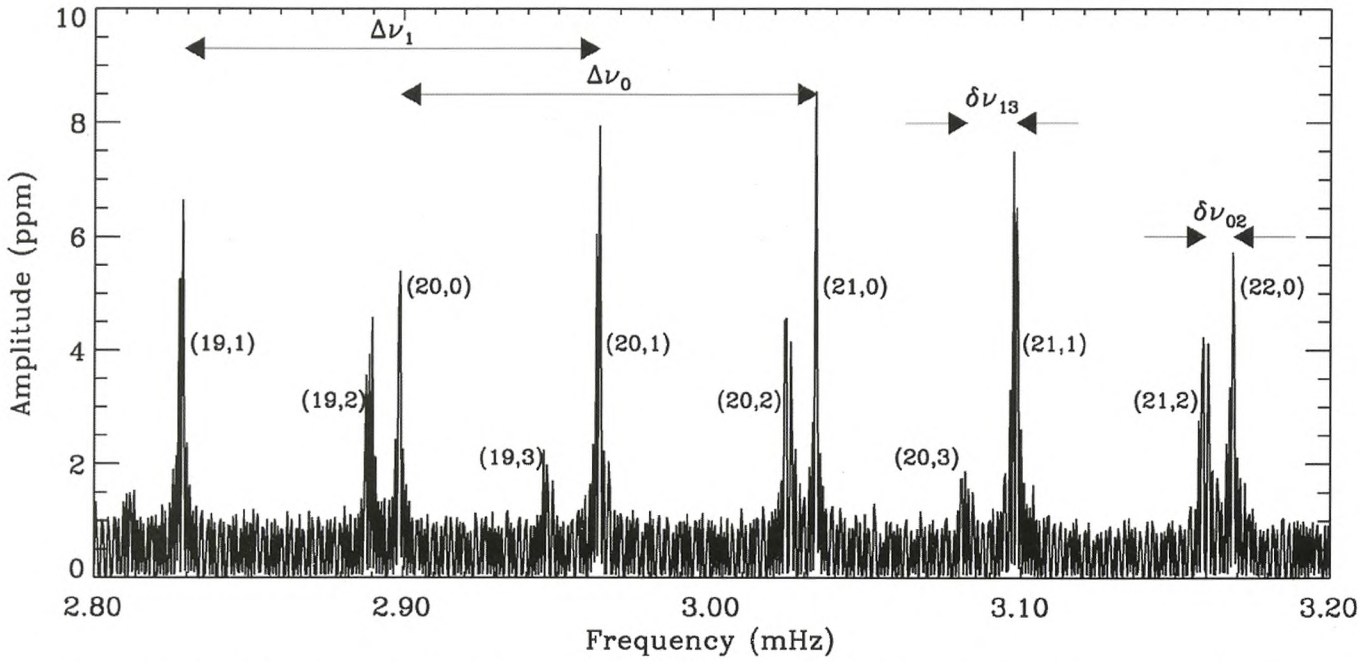
$$D_0 = \tfrac{1}{6}\delta\nu_{02} = \tfrac{1}{2}\delta\nu_{01} = \tfrac{1}{10}\delta\nu_{13} \qquad (2)$$

I praksis er der afvigelser fra denne sammenhæng, som er forårsaget af den detaljerede struktur af Solen og stjernerne. Disse afvigelser er derfor centrale for de seismologiske undersøgelser. Det viser sig f.eks., at den store frekvensopsplitning er en funktion af l, og den lille frekvensopsplitning er en funktion af frekvensen.

Observationer af stjernesvingninger

Gennem de seneste 20 år har stjernesvingninger været forsøgt observeret ved brug af flere forskellige observationsteknikker, og præcisionen er gennem årene blevet forbedret betydeligt.

Drømmen om at måle disse svingninger i andre stjerner end i Solen, er dog først blevet til virkelighed



Figur 5. En lille del af Solens amplitudespektrum, som viser (n, l) værdierne for de enkelte svingninger. De store og små frekvensopsplitninger er vist. Som beskrevet i teksten kan disse frekvensopsplitninger benyttes til bestemmelse af stjernens gennemsnitstæthed og den kemiske sammensætning af kernen – hvilket giver et mål for stjernens alder.

ved hastighedsmålinger fra højopløsnings spektrografer med stabile referencekilder. Siden midten af 1990'erne er der sket en dramatisk forbedring af Doppler hastighedsmålinger i forbindelse med eftersøgningen af planeter omkring andre stjerner.

Asteroseismologien har haft stor gavn af disse forbedringer og i takt med konstruktion af nye observationsfaciliteter (f.eks. UVES spektrografen på VLT) er drømmen efter 20 års forberedelse endelig blevet til virkelighed. Vi kender nu stjernesvingninger i en håndfuld forskellige stjerner. I det følgende vil vi beskrive nogle af resultaterne fra de nyeste undersøgelser. Flere detaljer kan findes i [4].

I Figur 7 ses alle de stjerner hvor vi har sikre målinger af stjernesvingninger. Det ses at de målte svingninger har forskellige perioder, hvilket skyldes at stjernerne har væsentligt forskellig opbygning og tæthed.

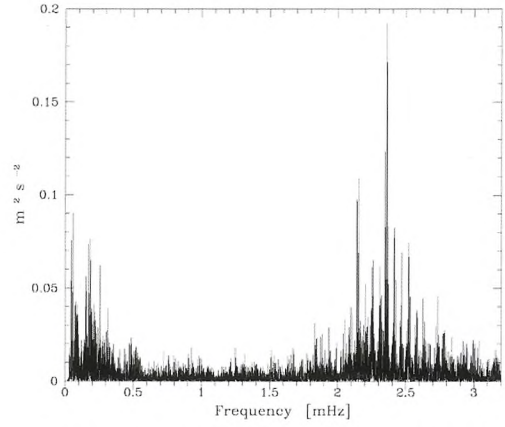
I det følgende vil vi se nærmere på stjernen α Centauri A, hvor målepræcisionen er højere end for de øvrige stjerner.

α Centauri A

Stjernen α Centauri er et tredobbelt stjernesystem, hvor hovedstjernen, α Centauri A, er af samme type som Solen. α Centauri A er af den grund et oplagt objekt til en asteroseismisk undersøgelse.

Den første klare observation p-svingninger i α Centauri A blev gjort ved brug af den svejtsiske CORALIE spektrograf på La Silla i Chile (se figur 6 og ref. [5]). I alt 28 forskellige stjernesvingninger blev fundet ved denne første undersøgelse, og det er allerede klart fra disse undersøgelser, at α Centauri A er en stjerne, som på afgørende punkter er forskellig fra Solen.

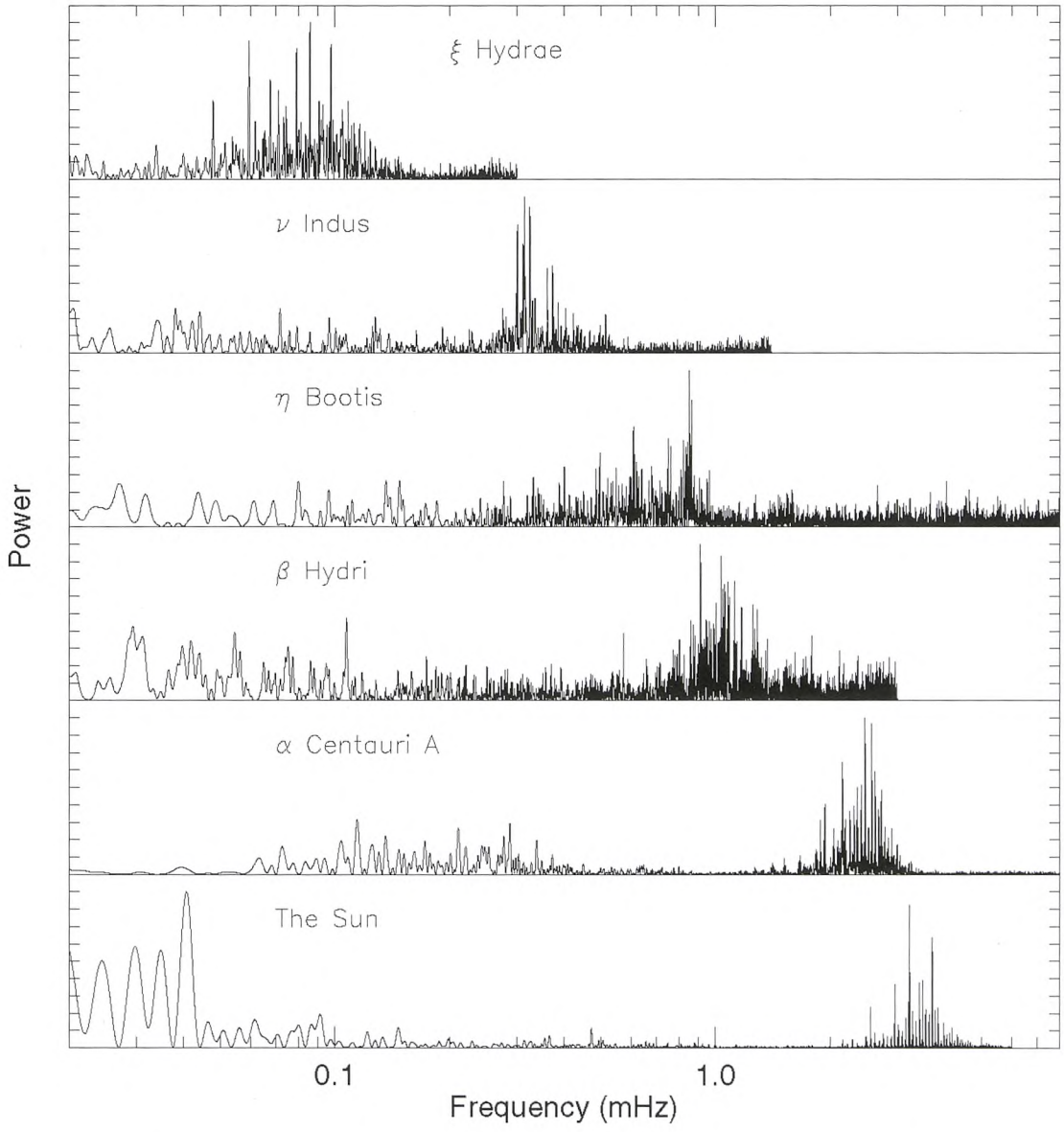
De målte værdier for den store og den lille frekvensopsplitning viser, at α Centauri A har opbrugt en væsentligt større del af sin beholdning af brint, end Solen har.



Figur 6. Power spektrum (energispektrum) for α Centauri A fra [5].

Over en periode på 5 nætter i maj 2001 observerede vi α Centauri A fra Anglo-Australien Telescope i Australien og fra VLT på Cerro Paranal i Chile. Resutatet af denne undersøgelse er de mest nøjagtige målinger af bevægelserne af nogen stjernes overflade, som endnu er gennemført. Målenøjagtigheden for VLT observationerne er så stor, at vi nemt kan se selve svingningerne blot ud fra vore data.

Et eksempel på svingningerne kan ses i figur 8. Analysen af amplitudespektret fra α Centauri A viser omkring 40 forskellige svingningsfrekvenser, og de



Figur 7. Stjernesvingninger i en serie af forskellige stjerner. Stjernerne er vist således, at stjerner med den største gennemsnitstæthed er nederst (Solen – The Sun), mens stjerner med den laveste gennemsnitstæthed er øverst (ξ Hydrae). Det ses, at alle stjernerne i deres frekvensspektrum viser toppe, som er forårsaget af stående svingninger (p-svingninger). De forskellige stjerner viser svingningerperioder fra timer til minutter. Diagrammet viser svingningsenergien (Power) som funktion af svingningsfrekvensen (målt i mHz).

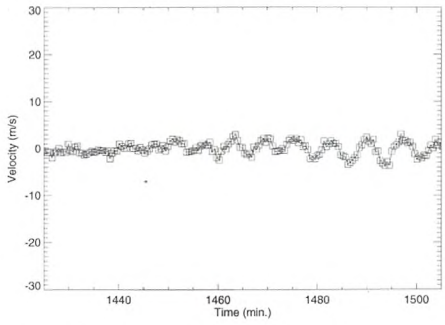
mindste svingninger, vi kan måle, har en hastighed på omkring 6-7 cm/s (med den hastighed tager det overfladen af α Centauri A 15 sekunder at bevæge sig 1 meter!). Dette er uden sammenligning de mindste stjernesvingninger, som er registreret for nogen anden stjerne end Solen.

Målingerne af α Centauri A kan på grund af den store nøjagtighed sammenlignes direkte med Solens svingninger. Dette er vist grafisk i figur 11, hvor svingningsenergien for α Centauri A og Solen vises som funktion af svingningsfrekvensen. Figuren viser, at α Centauri A har lidt længere svingningsperioder end Solen, og at frekvensopsplitningerne er mindre for α Centauri A end for Solen. Mens Solen har 0,135 mHz mellem svingninger med samme l værdi men en forskel på 1 i n værdien, så har α Centauri A en frekvensopsplitning på 0,106 mHz. Dette viser direkte at Solens gennemsnitstæthed er 60 % højere end gennemsnitstætheden for α Centauri A. Flere detaljer om α Centauri A målingerne findes i Ref. [8].

Målinger fra satellit

Foruden måling af stjernernes hastighedsvariationer ved brug af teleskoper som VLT, kan svingningerne observeres ved at undersøge lysstyrkevariationerne af klare stjerner. Fra Jordens overflade er denne type målinger delvist umuliggjort på grund af den atmosfæriske scintillation. Når vi måler på en stjerne fra

Jordens overflade, ser vi lyset gennem Jordens atmosfære. Normalt lægger vi ikke mærke til, at det generer vores muligheder for at se stjernerne, men atmosfæren påvirker faktisk lyset fra stjernerne. Er man ofte ude at kikke stjerner, har man sikkert bemærket, at stjernerne blinker. Og finder man en stjerne, som står lavt over horisonten, vil man også se, at den kan skifte farve.

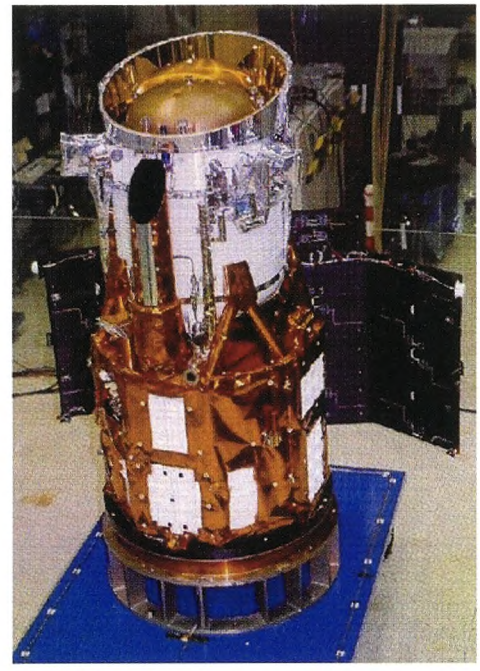


Figur 8. En 80 minutter lang tidsserie af α Centauri A fra VLT. Hastigheden (Velocity) er angivet i m/s. På figuren ses det samlede signal af 40 stjernesvingninger. Bemærk bl.a. hvordan signalet stiger i intensitet i løbet af de 80 min, et resultat af, at svingninger med lidt forskellig periode går fra at være i modfase til at være i fase (og derfor forstærker hinanden).

Figur 9. VLT på Cerro Paranal i Chile. Målingerne af α Centauri A er foretaget med dette teleskop. Ved observationerne benyttedes den såkaldte UVES spektrograf. ESO pressebillede – se ref. [6]

Det kendes bl.a. fra stjernen Sirius, som om vinteren står lavt over den sydlige horisont. Men disse effekter skyldes ikke stjernerne. De skyldes, at vi ser stjernerne fra bunden af lufthavet, som omgiver os. Det er lidt som at skulle se stjerner fra bunden af en swimmingpool. Vi kalder denne type stjerneblinken for scintillation.

Lufthavet over os får altså stjernerne til at blinke, men foretages målinger fra satellit, fri af Jordens atmosfære, kan man nå den nødvendige nøjagtighed. Målinger fra satellit er blevet foretaget fra den amerikanske WIRE satellit, og det har bl.a. resulteret i detektion af svingninger i α Centauri A og i stjernen Arcturus (se figur 12).



Figur 10. Den amerikanske WIRE satellit, som bl.a. har udført målinger af lysstyrkevariationer fra α Centauri A og Arcturus som viser p-svingninger af samme type, som kendes fra Solen

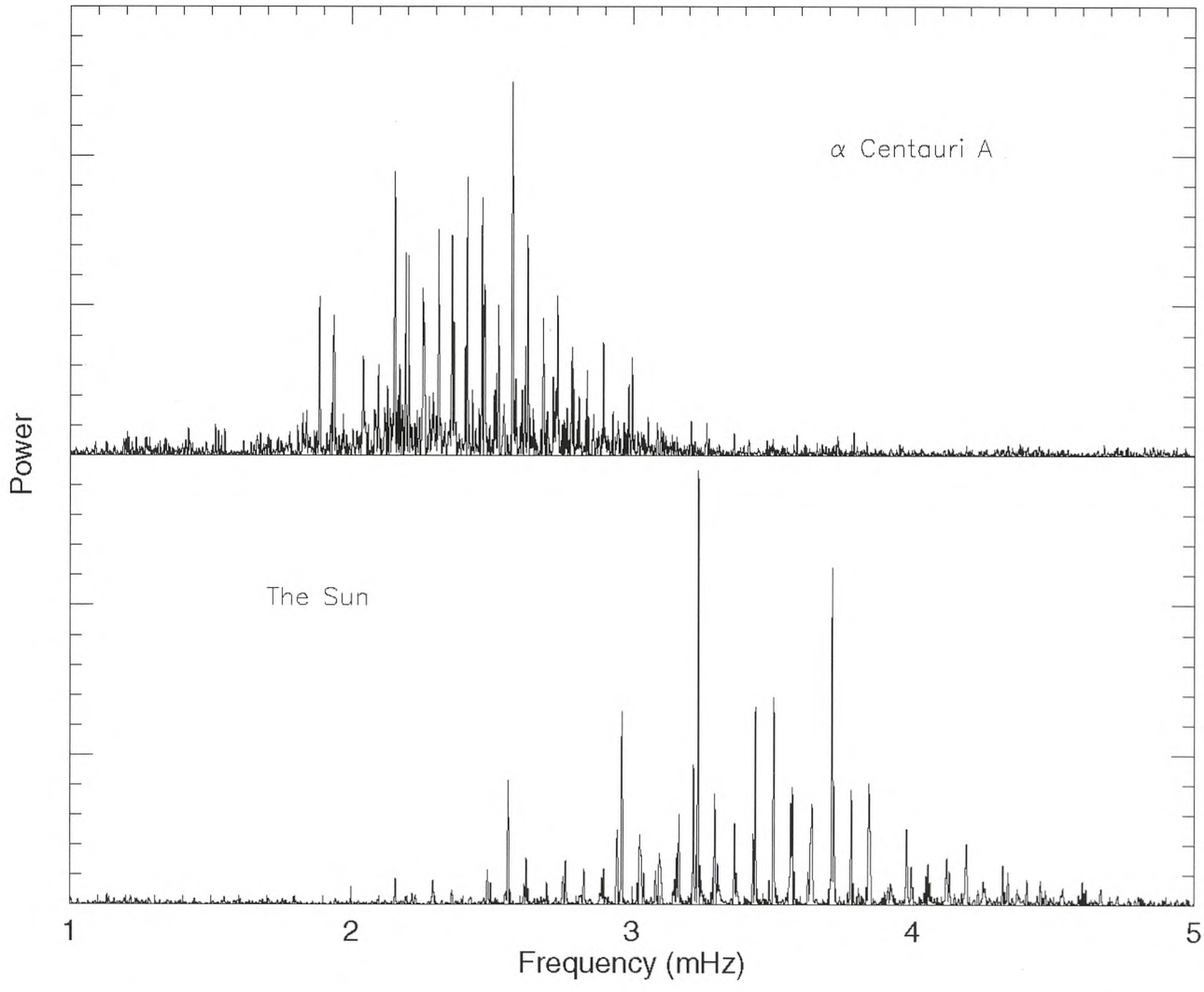
Målingerne for Arcturus viser, at kæmpestjerner (som Arcturus) udviser skælv som dem, vi kender fra Solen, blot er amplituden over 100 gange større, hvilket gør det nemmere at observere dem.

Forventningerne til fremtiden

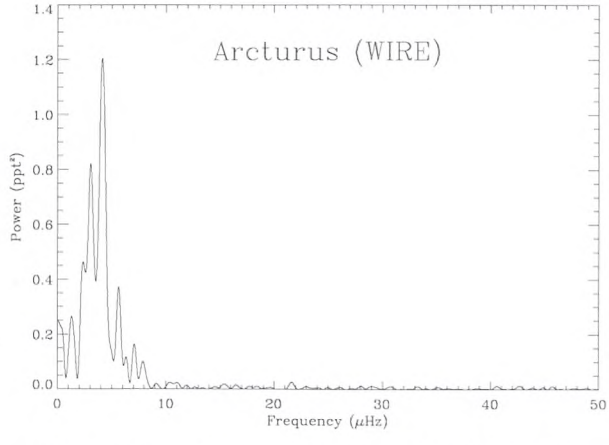
Som beskrevet i nærværende artikel er observatoner af stjerneskælv i dag gået fra at være drøm til virkelighed. Vi har foretaget præcise målinger af stjernesvingninger i et antal klare stjerner, og ved brug af svingningsfrekvenserne foretager vi nu asteroseismologiske studier af stjernernes indre.

Fremtiden ligger dog ikke kun i at forbedre de instrumenter, vi har monteret på kikkerterne rundt på Jorden. Vi forventer i løbet af en årrække at blive i stand til at foretage præcise målinger på et stort antal stjerner fra satellitter, som er optimeret til at foretage seismologiske målinger på mange stjerner samtidigt.

For at udnytte og udbygge Danmarks førende status inden for studiet af stjernerne ved brug af asteroseismologi, blev det i 1999 foreslået at bygge en dansk småsatellit med en forventet obsendelse i 2006. Satellitprojektet, som bærer navnet Rømer, var tænkt at skulle gennemføre nøjagtige målinger på ca. 20 af himlens klareste stjerner (se figur 13). Desværre er projektet p.t. ikke blevet fuldstændigt finansieret, og det er derfor højst uklart om Rømer kommer til at flyve i rummet.



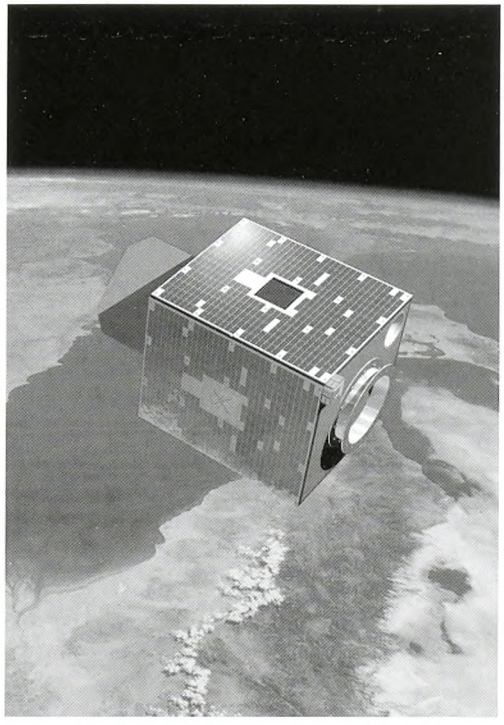
Figur 11. Svingningsenergi som funktion af svingningsfrekvensen for α Centauri A og Solen. Det ses tydeligt, at α Centauri A har lidt længere svingningsperioder, og at afstanden mellem de enkelte svingninger – frekvensopsplitningerne – er mindre for α Centauri A end for Solen



Figur 12. Energispektrum for Arcturus fra WIRE målinger af lysstyrken af denne stjerne. Ref. [7]

Andre projekter er imidlertid på vej. ESA har i en årrække gået med konkrete planer om at bygge en stor satellit bl.a. med det formål at foretage asteroseismiske målinger fra rummet. Satellitten (med navnet EDDINGTON) er dog endnu ikke færdigbygget og der mangler, som for Rømer, finansiering af projektet.

Frankrig er dog langt fremme med konstruktion af en asteroseismisk satellit. Satellitten som bære navnet COROT, skal i begyndelsen af 2006 opsendes i en lav bane omkring Jorden, hvorfra den i perioder af 5 måneder skal følge et mindre antal stjerner og søge efter stjerneskælv på deres overflader. Det er bl.a. målet med COROT at undersøge rotationsforhold og konvektive strømninger i de observerede stjerner. Endelig planlægger USA at benytte satellitten Kepler som opsendes i 2007 til at studere en større antal stjerner med det mål at finde stjerneskælv. Aarhus Universitet deltager i alle de nævnte projekter.



Figur 13. Den danske Rømer satellit, som var planlagt til i 2006 at skulle gennemføre nøjagtige målinger af stjernesvingninger for ca. 20 af himlens klareste stjerner (her iblandt α Centauri A)

Hans Kjeldsen er forskningslektor ved Teoretisk Astrofysik Center, Aarhus Universitet. Han har primært arbejdet med observationer af stjerneskælv og anvendelse af stjernernes egensvingninger til studiet af stjernernes struktur og udvikling.

Tim Bedding er lektor ved School og Physics, Univesity of Sydney i Australien. Han har arbejdet med stjerneskælv, studeret pulserende kæmpestjerner, undersøgt stjernernes massetab og udført målinger af stjernediametre ved brug af interferometri.

Referencer:

[1] SoHO: http://sohowww.nascom.nasa.gov (NASA/ESA)

[2] Christensen-Dalsgaard, J., 2002, Rev. Mod. Phys., 74, 1073.

[3] Fröhlich, C., Andersen, B. N., Appourchaux, T., et al., 1997, Sol. Phys., 170, 1.

[4] Bedding, T. R., Kjeldsen, H. 2003, PASA review, Publications of the Astronomical Society of Australia, Volume 20, Issue 2, side 203-212.

[5] Bouchy, F., & Carrier, F., 2002, A&A, 390, 205.

[6] European Southern Observatory (ESO): http://www.eso.org

[7] Retter, A., Bedding, T. R., Buzasi, D., Kjeldsen, H., & Kiss, L. L., 2003, ApJ, 591, L151

[8] Butler, P., Bedding, T. R., Kjeldsen, H., et al., 2003, Letter to ApJ, (in press)

PFEIFFER VACUUM

Totalleverandør

VACUUMKOMPONENTER

Pumpesystemer
Ventiler og fittings
Specialkamre
Massespectrometri

Alt til systemopbygning i laboratoriet for NANO FORSKNING

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