

Med det infrarøde rumteleskop James Webb er det blevet nemmere at kigge indenfor på stjernernes fødegang – store skyer af gas og støv som Ørnetågen, hvor stjernedannelsen er intens i det område, der kaldes Skabelsens Søjler.

Foto: NASA, ESA, CSA, STScI; Joseph DePasquale (STScI), Anton M. Koekemoer (STScI), Alyssa Pagan (STScI).

STJERNERNES SANG RØBER DERES INDRE

En gruppe astrofysikere fra Aarhus Universitet lytter til stjernernes musik. Ud fra lydbilledet kan de måle og veje stjernerne med imponerende præcision. Med teknikken kaldet asteroseismologi får de også et unikt indblik i en stjernes indre og kan for eksempel finde ud af, hvor langt den er nået i sin udvikling.

Om forfatteren
Henrik Bendix er videnskabsjournalist. Vidmere.dk

Hans Kjeldsen holdt i marts måned 2023 foredrag om "Stjernernes vilde liv" i serien Offentlige foredrag i Naturvidenskab. Artiklen bygger på foredraget og er lavet som del af projektet Brobygning på første række, finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Mennesket har altid været fascineret af de lysende prikker, der dukker op på en skyfri nattehimmel. Fascinationen har været forbundet med undren, for det har ikke været nemt at gennemskue, hvordan stjernerne egentlig fungerer. Først i løbet af det seneste århundrede er vi for alvor begyndt at forstå, hvordan stjerner opstår, hvor de får deres energi fra, og hvordan de udvikler sig. Den simple forklaring lyder således:

Stjerner dannes, når en stor interstellar sky af gas og støv begynder at falde sammen. Til at starte med kan sådan en gassky have en masse svarende til mange tusinde gange Solens masse og en ud-

strækning på adskillige lysår. Temperaturen er helt nede på cirka 10 kelvin i skyen, der fortrinsvis består af hydrogenmolekyler, og der er stof nok til masser af stjerner.

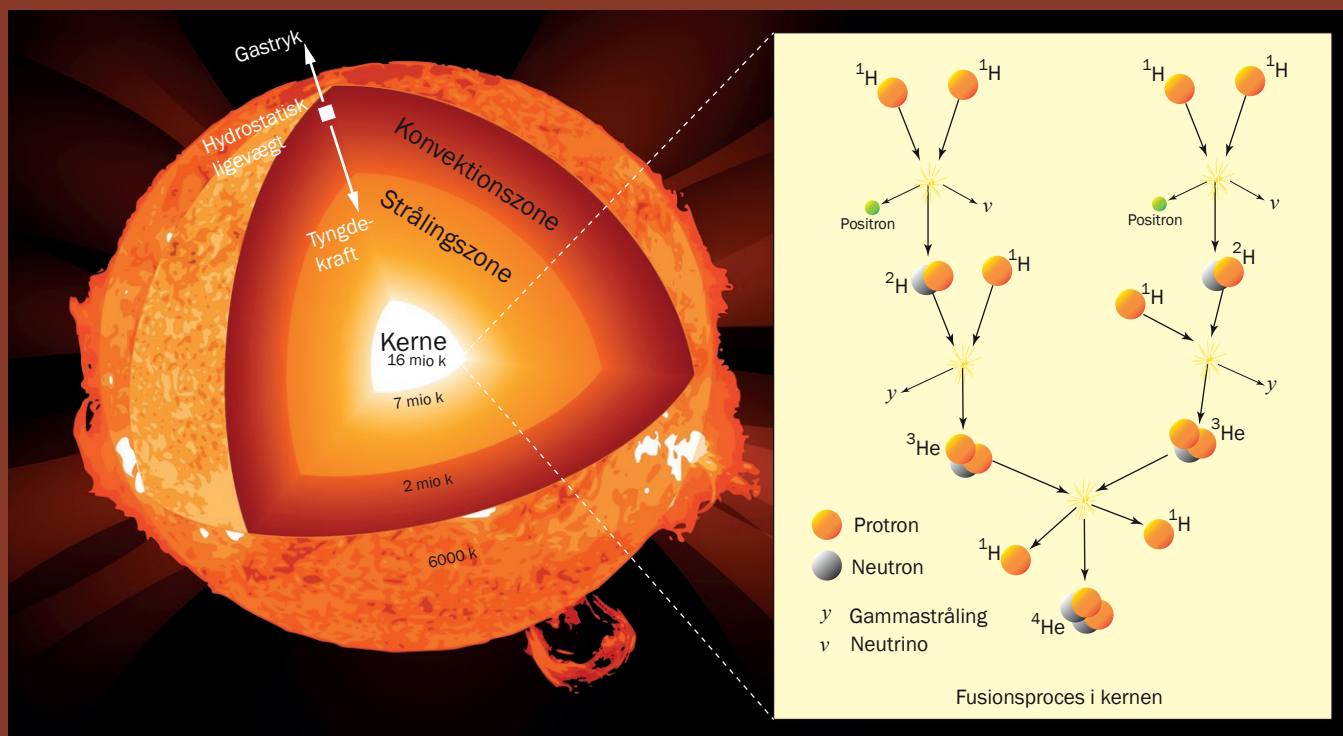
Hvor stoftætheden er højest, kan dele af gasskyen begynde at falde sammen under sin egen tyngde. I takt med, at stadig mere gas samler sig, stiger trykket og temperaturen. Gassen kollapser til et varmt, kugleformet objekt, som kaldes en protostjerne.

Hvis koncentrationen af stof bliver så høj i centrum af gasskyen, at temperaturen kommer op i omegnen af 10 millioner grader, bliver det muligt for hydrogenkerner – protoner – at smelte sammen. I en proces, hvor fire protoner fusionerer

og ender som én heliumkerne, frigives den energi, som kendetegner stjernerne.

Energien transporteres fra kernen til stjernens yderste lag. Fusionsenergien fra stjernens indre ender som synligt lys og andre former for elektromagnetisk stråling, som stjernen sender ud i verdensrummet.

Tyngdekraften vil stadig forsøge at presse stjernestoffet sammen, men kollapset stoppes af trykket fra den varme gas, der bliver tilført ny energi i samme takt, som den forsvinder ud i rummet. Stjernen finder en balance mellem tyngdekraften og trykket – en hydrostatisk ligevægt, som opretholdes, så længe stjernen kan fusionere hydrogen til helium i kernen.



Baggrundsbillede: User:Kelvinsong/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0

En stjerne af solens type producerer energi i kerne ved at omdanne hydrogen til helium i en såkaldt fusionsproces. Fusionsprocessen finder udelukkende sted i kernen, hvor temperaturen er højest. Det skyldes, at de positivt ladede atomkerner vil frastøde hinanden, med mindre temperaturen når op på flere millioner grader, hvor atomkernerne i stedet smelter sammen i en fusionsproces.

I kernen er temperaturen 16 millioner grader, og den falder ud mod overfladen. I det indre af Solen trænger energien ud mod overfladen ved hjælp af lyset (fotoner), mens energien i de yderste 30% af Solen flyttes ved det, vi kalder konvektion, hvor store varme bobler af gas stiger op mod overfladen og afgiver deres varme. Når energien når overfladen, sendes den ud i rummet som lys fra den 6000 grader varme overflade.

Dette simple billede af, hvad der foregår i stjernerne, kunne fysikere stykke sammen i første halvdel af 1900-tallet, hvor der begyndte at komme kød på stjernemodellerne. Nu forsøger astrofysikerne fra Stellar Astrophysics Centre, der hører under Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet, at tilføje flere detaljer til billedet.

»På Stellar Astrophysics Centre arbejder vi med den brede forståelse af stjerner, fra lige efter de er dannet, til de nærmer sig deres sidste tid,« fortæller professor Hans Kjeldsen og fortsætter:

»Vi bygger computermodeller af alle slags stjerner – store og små, unge og gamle, fra begyndelsen til slutfasen. Vi tester så, om egenskaberne

for stjernerne i computermodellen er i overensstemmelse med den virkelige verden.«

Lydbølger farer rundt i stjernerne

Når teorien skal afstemmes med virkeligheden, er der brug for observationer, og det er ikke nemt at kigge ind i stjernerne. Astrofysikere har kun det lys, der kommer fra de yderste lag af stjernerne, at gå ud fra. Ud fra det må de forsøge at danne sig et billede af, hvad der sker i stjernernes indre.

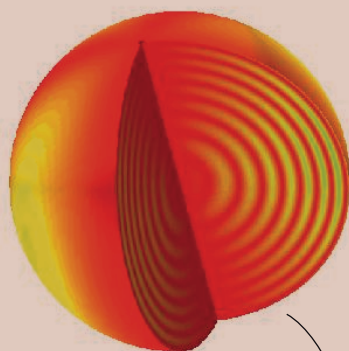
Forskerne fra Stellar Astrophysics Centre har specialiseret sig i at lytte til stjernernes musik. De måler lydbølger, der udbreder sig i stjernerne, ved at kigge på dem udefra. Med asteroseismologi kan forsker-

ne få viden om stjernernes indre på omtrent samme måde, som jordskælvsbølger giver et indblik i Jordens indre.

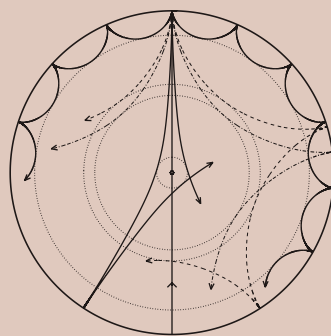
»Asteroseismologien er en metode til at undersøge stjernernes struktur. Vi måler, hvordan stjernerne pulserer, og vi bruger målingerne til at teste vores stjernemodeller. På den måde kan vi skabe et detaljeret billede af stjernernes udvikling,« fortæller Hans Kjeldsen.

»I modellerne kan vi regne ud, hvad lydets hastighed må være inde i forskellige stjerner, og dermed hvad tonerne, frekvenserne, for svingningerne i en stjerne er. Så kan vi sammenligne med observationer og se, om der er i overensstemmelse med modellen – om lydbilledet

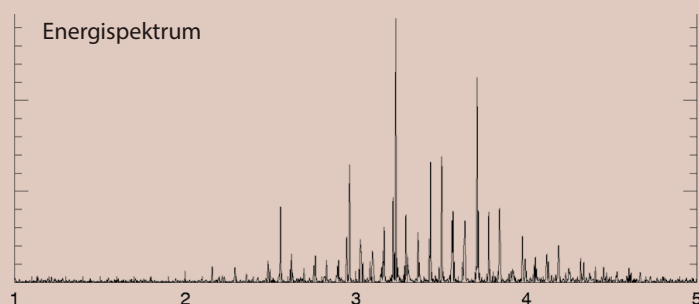
Asteroseismologi



Svingninger i stjernen



Lydbølgers bevægelse



Svingningerne i stjernen består af en stående lydbølge med en bestemt svingningsfrekvens, som afhænger af bølgens struktur (svingningsmønster) og af lydets hastighed. Ved at måle overfladens bevægelse kan man beregne et energispektrum for svingningerne og bestemme svingningsfrekvensen for hver stående bølge, som samtidigt vil indeholde information om lydhastigheden langs lydbølgens bevægelse igennem stjernen.

passer. Hvis ikke, må vi justere modellerne.«

Målinger af stjerneskaelv har vist sig at være et kraftfuldt værktøj til at få information om stjernerne. Hvis dataene er gode nok, så svingningerne ikke forsvinder i støj, kan astrofysikerne beregne stjernens masse og radius med ganske stor præcision. For stjerner, der minder om Solen – ikke alt for store, og heller ikke alt for små – kan radier måles med 1-2 procents nøjagtighed, og masserne kan afgøres med en nøjagtighed på 3-4 procent.

Metoden kan også bruges til at aldersbestemme en stjerne, fortæller Hans Kjeldsen:

»Man kan sjusse sig frem til en stjernes alder ud fra dens lysstyrke og masse, men hvis vi skal kende

alderen i detaljer, skal vi se ind i maven på stjernen. Det kan vi kun gøre med asteroseismologi, og det er den helt store styrke ved metoden.«

I takt med, at en stjerne bliver ældre, øges lysstyrken langsomt. Da Solen var ung, lyste den for eksempel kun 70 procent så kraftigt, som den gør i dag. Så ved at måle lysstyrken af en stjerne kan man få en idé om dens alder, men det kræver, at man kender dens masse. En stjernes lysstyrke afhænger nemlig først og fremmest af dens størrelse, og hvis man kun har lysstyrken at gå efter, er det nærmest umuligt at vide, om der er tale om en gammel stjerne eller en ung stjerne, der blot er lidt større – de lyser lige kraftigt.

I asteroseismologien udnytter forskerne, at energiproduktionen i

stjernens indre ændrer på kemien i kernen, idet hydrogen løbende bliver til helium. Lydens hastighed afhænger af mediet og dermed forholdet mellem hydrogen og helium, så frekvenserne af stjernessvingningerne ændrer sig, efterhånden som stjernen ældes.

Med metoden kan forskerne skabe sig et billede af en stjernes struktur, der er så detaljeret, at de kan afgøre, hvor længe den har fusioneret hydrogen til helium i kernen. De kan måle sig frem til en stjernes alder med langt større nøjagtighed, end det ellers er muligt.

Heliumfusion kan identificeres

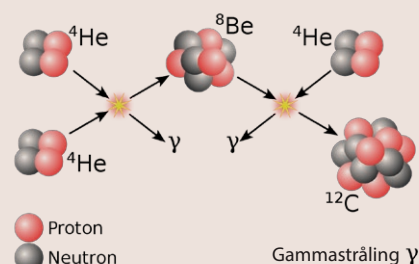
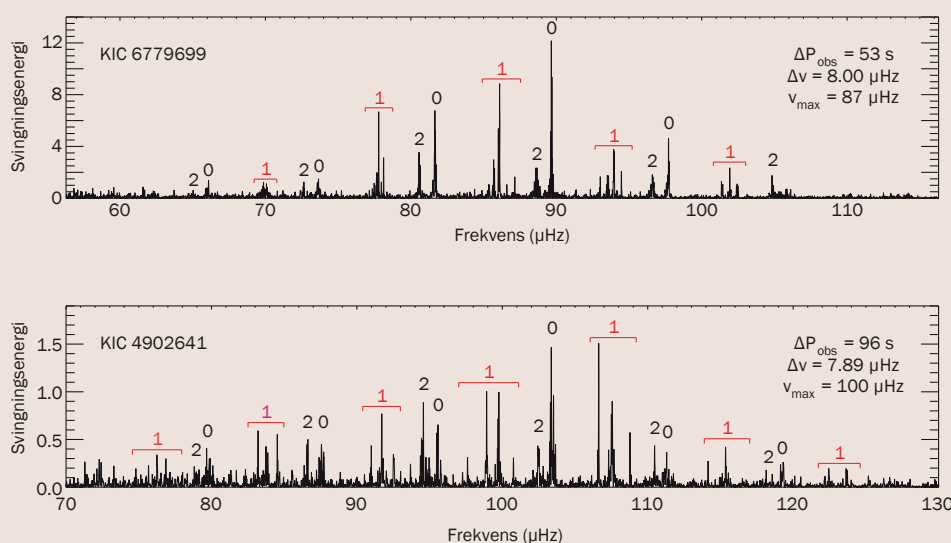
Astrofysikerne kan følge med i stjernerne udvikling, også når de løber tør for hydrogen i kernen. Når det sker, trækker kernen sig sammen, og stjernen begynder at fusionere hydrogen til helium i en skal uden om kernen, der nu kun består af helium. Stjernen svulmer op, og overfladetemperaturen falder – den er på vej til at blive en rød kæmpestjerne.

»Med asteroseismologi kan vi tydeligt se, om en stjerne er færdig med at fusionere hydrogen i kernen. Stjernen går ikke til grunde, når det sker, men den ændrer sig. Vi har for eksempel holdt øje med stjernen μ Herkules igennem ni år. Den viser os, hvordan Solen kommer til at se ud om fem milliarder år,« siger Hans Kjeldsen.

»Stjernerne har svingninger svarende til et simpelt musikinstrument, for eksempel et blæseinstrument, hvor der dannes en grundtone og en række overtoner. Afstanden i frekvens er nogenlunde lige stor mellem grundtonen og første overtone og mellem de følgende overtoner. Men en stjerne er ikke et finstemt instrument, og hvis der er en struktur inde i stjernen, svarer det til, at der er en bule i instrumentet.«

»Hvis man så har en stående bølge, der har sit knudepunkt der, hvor stjernen ændrer struktur, så løber bølgen helt skævt og ændrer

Tegn på helium-fusion



Efter Bedding et al (2011)

De to diagrammer viser svingningsenergien for to forskellige røde kæmpestjerner, som umiddelbart ser ens ud, når vi observerer dem med teleskoperne. Svingningsenergien for forskellige frekvenser afslører dog, at de to stjerner er meget forskellige i deres kerne.

Forskellen skyldes, at stjernen KIC 4902641 (nederste diagram) producerer energi ved kernefusion nær stjernens centrum, hvor tre heliumkerner omdannes til carbon og frigiver energi (figuren til højre). Denne energiproduktion påvirker stjernens opbygning, og det ses

ved, at de såkaldte dipol-svingninger (angivet med "1" i diagrammet) spredes og danner flere svingninger med relativ stor forskel i frekvenserne. Dette er ikke tilfældet for KIC 6779699 (øverste diagram), hvor stjernen endnu ikke er nået til den fase, hvor den producerer energi i kernen ved helium-fusion. Her sker energiproduktionen ved hydrogen-fusion i en skal uden om den heliumholdige kerne, men temperaturen er endnu ikke høj nok til, at helium kan indgå i fusion og danne carbon. Dette ses i svingningerne ved, at dipol-svingningerne ligger tæt og ikke spredes, som det sker for KIC 4902641.

frekvens. Så ved at identificere de frekvenser, der ikke passer i det overordnede billede – ved at se på disharmonier i stjernens musik – kan vi identificere, hvor i stjernen, den ændrer struktur. Det er faktisk det, vi har gjort med μ Herkules.»

Efterhånden som stadig mere brint bliver til helium i en stjerne, stiger trykket og temperaturen i kernen, og på et tidspunkt kan helium også begynde at fusionere. Ved en kerntemperatur på cirka 100 millioner grader kan tre heliumkerner blive til en kulstofkerne i en proces, der kaldes triple-alfa. Når det sker, svulmer kernen op igen, for nu er der fornyet energiproduktion.

»Overgangen fra en kompakt, ikke-energiproducerende kerne til en større kerne med heliumfusion ændrer svingningsfrekvenserne

signifikant. Tonerne ændrer sig, klaveret er stemt lidt anderledes. Så vi har fået en teknik, hvor vi kan udpege de stjerner, der endnu ikke er nået til at fusionere helium, og dem, hvor heliumfusionen er i fuld sving. Vi kan præcis identificere den fase i en stjernes udvikling, hvor den tænder for heliumfusion. Det kan vi kun gøre med asteroseismologi,« fortæller Hans Kjeldsen.

Galaksens historie skrives

Hvor perioden for de største svingninger i en stjerne som Solen er cirka fem minutter, er perioden for de røde kæmper nogle timer eller døgn. Det er nødvendigt at følge stjernerne i lang tid, hvis man skal blive klogere på deres indre. Men det er netop, hvad rumteleskoper som CoRoT, Kepler og TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) har gjort, og hvad det europæiske tele-

skop PLATO (PLAnetary Transits and Oscillations of stars), der sendes op i 2026, også vil gøre.

Disse teleskoper er egentlig primært designet til at kigge efter planeter, der kredser om andre stjerner end Solen – de såkaldte exoplaneter – ved at observere den dæmpning af stjernens lys, der skyldes, at en planet passerer ind foran den. Men dataene kan også bruges til asteroseismologi, så forskerne nu har målt svingningerne af titusindvis af stjerner, ikke mindst de røde kæmpestjerner.

Dataene kan blandt andet bruges til galaktisk arkæologi, hvor forskerne forsøger at rekonstruere Mælkevejens historie. Vores galakse har ikke altid set ud, som den gør i dag, for den er resultatet af adskillige galaksesammensmeltninger. Specielt har



SONG-teleskoper kortlægger stjernernes sang

Stjernerne røber kun deres inderste hemmeligheder, hvis astrofysikerne foretager detaljerede målinger af alle de svingninger, der manifesterer sig på stjernernes overflade. Det kræver særlige teleskoper, der kan være rettet mod den samme stjerne i lang tid, og som kun bruges til asteroiseismologi. De skal være forsynet med uhyre præcise spektrografer, der kan bruges til direkte at måle hastigheden af stjernernes overflade, når de skiftevis svinger mod os og væk fra os.

Med rumteleskoper som Kepler og TESS har det været muligt at identificere mange tusinde stjerner med periodiske variationer i lysstyrken forårsaget af stjerne-svingninger, men disse målinger rummer ofte for meget støj til, at de kan afsløre detaljer om stjernernes indre struktur og bruges til at fintune stjernemodellerne.

Derfor står forskerne fra Stellar Astrophysics Centre i spidsen for et netværk af mellemstore teleskoper kaldet Stellar Observations Network Group (SONG), der specifikt bruges til asteroiseismologi. Det første teleskop med et meterstort spejl blev taget i brug på den kanariske ø

Tenerife i 2014, og det bruges stadig flittigt til at måle overfladehastigheder helt ned til fire centimeter i sekundet.

Siden er et SONG-teleskop kommet til i Queensland i Australien, og i skrivende stund er astrofysikerne i fuld gang med at måle på stjernen Procyon med begge teleskoper. Et tredje SONG-teleskop, som blev opstillet i det vestlige Kina, er ved at blive flyttet til et højere kinesisk bjerg, så målingerne bliver bedre, og om tre års tid tilføjes et teleskop i New Mexico i USA. Det er planen, at Hawaii også kommer med på vognen.

Med flere teleskoper fordelt rundt omkring på kloden kan forskerne studere den samme stjerne uafbrudt gennem mange døgn, så alle svingningerne – stående bølger med forskellige frekvenser – kommer med. Dem kan der være snesevis af, og hver eneste af dem røber en detalje om stjernens indre, for eksempel hvordan fordelingen af grundstoffer er i de forskellige lag af stjernen, hvordan den roterer, og hvordan den påvirkes af magnetisk aktivitet. Alt sammen noget, der bidrager til en bedre forståelse af stjernernes fysik og udvikling.

SONG-teleskopet på Tenerife.
Foto: Mads Fredslund Andersen.

Mælkevejen opslugt en del mindre dværggalakser i de seneste 13 milliarder år, og særligt ved hjælp af rumteleskopet Gaia kan astrofysikere finde sporene efter galaxsekollisionerne i form af grupper af stjerner, der ser ud til stamme fra forskellige dværggalakser. De kan så aldersbestemmes med asteroiseismologi. I forhold til exoplanetforskningen er det en stor fordel, at de rumteleskoper, der er sendt op for at detektere exoplaneter ved at kigge efter stjerneformørkelser, også kan anvendes til asteroiseismologi. Viden om planeterne kræver nemlig viden om stjernerne.

Ud fra graden af formørkelsen kan astrofysikerne beregne exoplanetens diameter i forhold til stjernens diameter, så den præcise måling af stjernens størrelse, som asteroiseismologien leverer, giver også et mål for planetens størrelse.

En stjerne og dens planet kredser omkring deres fælles tyngdepunkt, og hvis det med andre teleskoper er muligt at måle, hvor meget stjernen rykker frem og tilbage under påvirkning af tyngdekraften fra exoplaneten, kan man desuden finde planetens masse – forudsat, at man kender stjernens masse,

som også kan beregnes ud fra dens svingninger.

Exoplaneter måles og vejes

Når man både kender massen og størrelsen, kender man planetens densitet, og så kan man give kvalificerede bud på, om der er tale om en klippeplanet, en gasplanet eller måske en planet, der mest består af vand. Når man kender planetens omløbstid, kan man beregne afstanden til dens stjerne, og så kan man også regne ud, hvor meget energi, planeten modtager fra stjernen og dermed dens overfladetemperatur.

Med den information om stjernerne, asteroiseismologien kan give, kan astrofysikerne med ganske stor sikkerhed eksempelvis finde ud af, om en given planet i princippet kan være beboelig, fordi den har en passende størrelse og temperatur.

»Vi kan lave kataloger over stjernernes fundamentale egenskaber med stor nøjagtighed; deres aldre, radier, masser og lysstyrker. Så kan en forsker, der har fundet en exoplanet, slå stjernen op og med det samme få vished om stjernens og dermed planetens alder og også dens størrelse og masse, alt efter hvordan exoplaneten er detekteret,« lyder det fra Hans Kjeldsen.

Med udgangspunkt i asteroiseismologi og data fra Kepler-teleskopet har astrofysikere fra Stellar Astrophysics Centre for eksempel fundet ud af, at der ikke findes exoplaneter, der er mindst dobbelt så store som Jorden, men mindre end Uranus og Neptun, blandt de varmeste planeter, der kredser rundt i en bane tæt om deres stjerne. De har nok været der, men det meste af atmosfæren af disse mellemstore planeter må simpelthen være fordampet, så kun

klippekernelen er tilbage. Adjunkt Mia Sloth Lundkvist har stået i spidsen for denne forskning.

Ud over at måle, veje og aldersbestemme stjernerne kan asteroiseismologi således også bruges til at studere hele galakser og de planeter, der kredser om de enkelte stjerner. De allermest detaljerede målinger, der kræver teleskoper, der er dedikeret til netop den opgave, kan desuden bruges til forfine stjernemodel-

lerne og måske endda give os helt ny viden om fysikken i stjernerne.

Stof kan opføre sig på uventede måder, når temperaturen skal måles i millioner af grader og trykket er langt større, end forskerne er vant til at have med at gøre, så på den måde kan stjernerne fungere som laboratorier for stof under ekstreme forhold. Asteroiseismologi er et unikt værktøj til at kigge indenfor hos stjernerne. ■

Om forskeren

Hans Kjeldsen er professor i astrofysik ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Han er centermanager i grundforskningscentret Stellar Astrophysics Center (SAC) og leder af Aarhus Universitets nye tematiske rumcenter, Aarhus Space Center (SpaCe), og sidder derudover i en række bestyrelser og komiteer. Omdrejningspunktet for Hans' forskning er undersøgelser af stjerner og exoplaneter – altså planeter der kredser om andre stjerner end Solen – ved brug af data fra både rumteleskoper og jordbaserede teleskoper. hans@phys.au.dk



Foto: Lars Kruse, AU Foto

Roskilde Universitet

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

”Vi finder et problem, og så leder vi efter naturvidenskabelige metoder til at løse det.

Vi samarbejder fx med hospitaler om modeller for, hvor lang tid kroppen kan tåle behandling med strålingsterapi mod kræft.”

— Max har læst Naturvidenskabelig Bachelor



Foto: Ture Andersen

RUC