

PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

The following full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/19618>

Please be advised that this information was generated on 2019-11-21 and may be subject to change.

Kosmische symfonieën

INAUGURELE REDE DOOR PROF. DR. CONNY AERTS

Radboud Universiteit Nijmegen



KOSMISCHE SYMFONIEËN

Kosmische symfonieën

3

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van bijzonder hoogleraar Asteroseismologie aan de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde & Informatica van de Radboud Universiteit Nijmegen, vanwege de Stichting Nijmeegs Universiteitsfonds (SNUF) op dinsdag 5 april 2005

door prof. dr. Conny Aerts

DE GROTE FRUSTRATIE EN TEVENS TROEF VAN DE ASTRONOOM

In elk mens schuilt wel een beetje een astronoom. De vraag wat er zich daar allemaal afspeelt aan het firmament komt bij iedereen op die de fonkelende sterrenhemel aanschouwt. De sterren roepen grote verwondering en verbeelding op. Er is dan ook een ontzettende diversiteit aan hemellichamen: de zon, de maan, de planeten, kometen, interstellaire en interplanetaire stofdeeltjes, sterren, sterclusters, zwarte gaten, melkwegstelsels bestaande uit miljarden sterren - en ga zo maar door.

Om te begrijpen wat er zich allemaal afspeelt in het heelal zijn wij aangewezen op de studie van de fysica van de hemellichamen: de astrofysica. Onontbeerlijke hulpmiddelen zijn wiskunde, scheikunde, informatica en spits technologie. In tegenstelling tot de meeste fysici hebben sterrenkundigen de handicap dat ze hun laboratorium niet zelf kunnen inrichten noch hun studieobjecten manipuleren. Onze stalen bevinden zich op miljarden kilometers van ons, we kunnen er niet bij, laat staan de proefopstellingen naar eigen smaak optimaliseren. Dit lijkt heel frustrerend, maar zorgt er tegelijk voor dat astrofysici erg creatief (moeten) zijn in hun omgang met de informatie die de stalen ons gratis bezorgen: de straling uitgezonden door de hemellichamen. De interpretatie van deze straling vereist een multidisciplinaire aanpak.

Tegenwoordig is onze kennis over hemellichamen al zodanig gevorderd dat we ook de chemie en biologie ervan kunnen achterhalen. De deeltakken 'astrochemie' en 'astrobiologie' zitten dan ook in de lift. Nochtans zijn er nog heel wat vragen over de bouwstenen van de kosmos zelf, de sterren, onopgelost. Precies zij zijn onontbeerlijk om de evolutie van de kosmos (en dus ook van het leven) goed in kaart te brengen. Ik wil het vandaag dan ook vooral met u hebben over mijn geliefde hemellichamen: de sterren.

STERSTRUCTUUR EN STEREVOLUTIE VOOR BEGINNERS

Sterren bestaan uit opeengestapelde gaslagen met verschillende temperatuur, druk en chemische samenstelling. In de loop van hun leven veranderen deze gaslagen op dramatische wijze. Helaas ontvangen wij alleen licht van de buitenste lagen van de ster en kunnen we niet rechtstreeks binnenin de ster kijken, waar de fysische processen die haar leven dirigeren plaatsgrijpen.

Sterrenkundigen hebben nochtans de afgelopen eeuw een vrij goed beeld over de globale structuur van de sterren kunnen afleiden, op basis van een grote verscheidenheid aan observaties. We weten bijvoorbeeld dat sterren hun energie putten uit kernfusie. Wij mensen kunnen dit nog steeds niet op een veilige manier realiseren, maar sterren hebben daar niet de minste moeite mee en zijn superspecialisten in het opwekken van kernenergie. Kernfusie vereist zeer hoge temperaturen en gebeurt in sterren dus voornamelijk in de sterkern, waar het veel heter is dan aan de buitenkant.

Bij de kernfusie wordt massa omgezet in energie volgens de ongetwijfeld bekendste formule uit de fysica bedacht door Albert Einstein: $E = mc^2$. De geproduceerde energie

6

E uit zich in de vorm van lichtdeeltjes die we fotonen noemen. Deze fotonen worden dus in de sterkern aangemaakt en bewegen vervolgens naar het steroppervlak, waarna ze als straling de ster verlaten. Het is dankzij de kernfusie dat sterren stralen, en deze fusie dirigeert dan ook het leven van de ster. Voor jonge sterren betreft het de fusie van waterstof tot helium. Wanneer het waterstof uitgeput is in de kern, zal de fusie voortgezet worden in een waterstofschild rondom de heliumkern. De buitenlagen van de ster zwellen dan op en ze wordt rode reus. Ondertussen krimpt haar heliumkern, waardoor op die plaats de temperatuur stijgt. Wanneer de temperatuur in de heliumkern zo'n factor tien gestegen is, start daar de fusie van helium tot koolstof en zuurstof. Opnieuw zal dit doorgaan totdat alle helium is opgebruikt en de heliumfusie wordt voortgezet in een schild rondom de koolstof-zuurstofkern. De ster heeft op dat ogenblik twee schilfusiebronnen, zwelt nog verder op terwijl haar kern weerom begint te krimpen. Hierdoor wordt het heet genoeg om de volgende kernfusiecyclus te starten. Daarbij wordt koolstof omgevormd tot zuurstof, en wordt vervolgens magnesium, natrium en neon aangemaakt.

Het aantal fusiecycli dat de ster kan doorlopen hangt af van haar geboortemassa. De zwaarste sterren gaan ermee door tot ze een ijzerkern gevormd hebben, waarna ze als supernova exploderen. Deze mastodonten zijn de dominante energiebronnen in de kosmos. De lichtere sterren daarentegen, met een geboortemassa beneden zowat zes keer de massa van de zon, zullen het niet verder brengen dan een koolstofkern en eindigen hun leven als een uitdovende witte dwerg. Dit laatste geldt dus ook voor de zon.

Om te weten welke gasdeeltjes allemaal kunnen deelnemen aan de kernfusie moeten we weten hoe de gasbestanddelen in een ster vermengd worden nabij haar kern. Hoe kunnen wij deze vermengingsprocessen achterhalen? Konden we maar binnenin de ster kijken en getuige zijn van deze processen... Eén van de mogelijkheden is om vermengingsprocessen na te bootsen in een laboratorium. Wat moet men zich daarbij voorstellen? We doen eerst even twee gedachte-experimenten die gemakkelijk thuis in de keuken uit te voeren zijn.

Stel dat u erg houdt van koffie met melk. Na koffie in een kopje te hebben gedaan wilt u dan ook graag melk toevoegen alvorens van de koffie te genieten. U kunt melk toevoegen en dan geduldig wachten totdat de melk homogeen verspreid raakt door de koffie. Doorgaans hebben mensen hier geen geduld voor want deze vermenging gebeurt spontaan slechts zeer traag. Ze nemen dan al gauw een lepeltje om te roeren in de kop, zodat koffie en melk snel helemaal vermengd zijn. De efficiëntie van de vermenging hangt volledig af van de draaiing die u hebt aangebracht in de kop. Er is ook nog een andere manier om vloeistoffen erg efficiënt te vermengen. Neem even een keteltje water in gedachten, waarin u een druppeltje inkt laat vallen. Deze inkt zal het water spontaan blauw maken, maar dat duurt lang als u daarbij niet ingrijpt. Veel sneller gaat het wanneer u het water met de inktdruppel in het keteltje aan het koken brengt. De opborrelende bellen maken al het water in een mum van tijd homogeen blauw.

7

In sterren gebeurt iets analogs, hoewel het hier niet om vloeistoffen gaat, maar wel om een gasbol met verschillende gasbestanddelen, zoals waterstofgas, heliumgas, koolstofgas en zo verder door het hele Periodiek Systeem der Elementen. Sterren vermengen hun gaslagen op de twee hierboven aangehaalde manieren. Het blijkt dat sommige sterren hier veel beter in zijn dan andere.

Doorgaans draaien alle gaslagen in een ster rond, zoals duidelijk blijkt door de progressie van de zonnevlekken te volgen (weliswaar met gepaste bescherming voor uw ogen!). Zo kunnen we afleiden dat de buitenlagen van de zon ronddraaien met een periode van ongeveer 26 dagen. Helaas kunnen we op die manier de rotatieperiode van de zon in haar binnenste lagen niet bepalen. Dus kunnen we ook niet weten of deze lagen wel even snel ronddraaien als de oppervlaktelagen. Indien wel, dan spreken we van starre rotatie, indien niet dan gebruiken we de term niet-starre rotatie. Voor andere sterren zijn we hoe dan ook aangewezen op andere meetmethoden omdat we hun oppervlak niet ruimtelijk kunnen oplossen.

Tevens treden er op sommige plaatsen in de ster 'kokende' gasbellen op terwijl dat op andere plaatsen niet het geval is. Net zoals de kokende waterketel de inkt onmiddellijk goed verspreidt, zal in de ster het gas efficiënt vermengd zijn als gasbellen opborrelen. We spreken dan van een convectieve sterzone. Anderzijds zal de inkt in het water van de niet-kokende ketel slechts traag vermengen met het water. De analoge situatie van bijzonder trage vermenging in sterren gebeurt in een zogenaamde radiatieve zone.

Hoe sneller de binnenste sterlagen draaien, hoe efficiënter de 'rotationele' gasvermenging. Hoe groter de convectieve zone met opborrelende gasbellen, hoe groter het gebied met efficiënte 'convectieve' gasvermenging. Deze vermengingsprocessen zijn bepalend voor de aard van het gasmengsel dat uiteindelijk deelneemt aan de kernfusieprocessen en ze bepalen zodoende mee het leven van de ster.

Helaas kunnen wij de omstandigheden in de sterkern niet nabootsen in een keuken, zelfs niet in het meest geavanceerde aards laboratorium. De drukken en temperaturen die heersen in de sterkern zijn zodanig hoog dat we geen gasmengsels in die toestand kunnen brengen. We kunnen jammer genoeg geen koppen koffie en kokende waterketels op maat van het ster materiaal realiseren. Astronomen zijn dus aangewezen op andere creatieve denkpijpen om de interne vermenging in sterren observationeel te bestuderen.

ER ZIT GELUKKIG MUZIEK IN DE STERREN

Vele sterren ondergaan oscillaties tijdens hun leven. Dit zijn veelal geluidsgolven, ook wel akoestische trillingen genoemd. Zij zijn heel vergelijkbaar met de trillingen ('klanken') geproduceerd door muziekinstrumenten. Het wiskundig formalisme ter beschrijving van de trillingen van een snaar van een gitaar of van een piano is geheel analoog aan dat van steroscillaties. De sterren met oscillaties zijn met andere woorden gigantische driedimensionale snaren die prachtige partituren voor ons spelen vanuit de kosmos.

Deze kosmische symfonieën worden u gratis aangeboden, maar helaas kunt u ze niet horen op de conventionele manier omdat er nauwelijks interstellair materie is tussen de 'muzikant' en ons oor. Deze geluidsgolven kunnen zich dus niet voortplanten van de ster tot bij ons. Wij kunnen echter wel de oscillaties detecteren omdat ze variaties in het steroppervlak teweegbrengen, waardoor het op en neer beweegt, en het effect hiervan kunnen we wel meten.

De steroscillaties geven aan sterrenkundigen een unieke kans om de interne lagen van de ster te toetsen. Deze onderzoekstak binnen de sterrenkunde noemt men asteroseismologie, naar analogie met seismologische studies van de aarde. Voor onze planeet leiden lokale aardbevingen tot gedetailleerde informatie over haar ijskern. Bij de sterren, echter, treden de oscillaties globaal in de hele ster op en zijn ze bijzonder regelmatig gedurende zeer lange tijd als we dat vergelijken met de gemiddelde levensduur van vele generaties astronomen. Nu begrijpt u ook meteen waarom we spreken over asteroseismologie, in tegenstelling tot astrochemie, astrobiologie, of astrofysica in het algemeen. In onze onderzoeksdiscipline gaat het immers enkel om de studie van oscillaties van sterren, niet van planeten, niet van stofdeeltjes, niet van melkwegstelsels, of wat dan ook, alleen van sterren ('aster' in het Grieks).

Asteroseismologie kan een antwoord bieden op de twee meest prangende vragen in de studie van de sterstructuur die we nu even bespreken.

STERSTRUCTUUR VOOR GEVORDERDEN

Tijdens de verschillende levensfasen met de kernfusiecycli hierboven beschreven, verandert het intern verloop van de druk, temperatuur en chemische samenstelling aanzienlijk. Hoewel het globaal karakter van deze verlopen goed kan worden afgeleid uit de vergelijkingen van de mechanica, van energietransport en van klassieke of ontaarde gaswetten, zijn de subtiele variaties van vermenging verre van gekend. Nochtans bepalen deze subtiliteiten mee de levensloop van de ster.

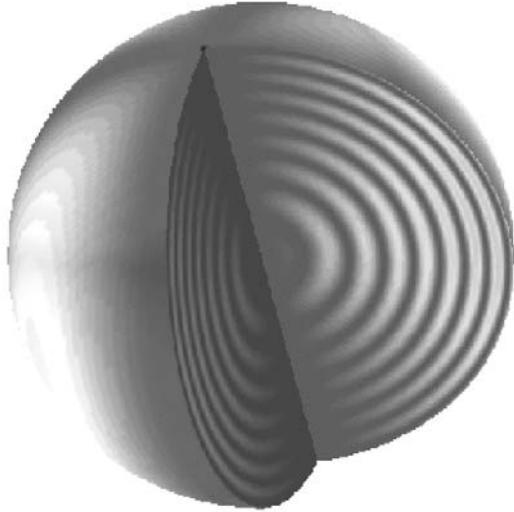
Er is het slecht begrepen fenomeen van convectief overschieten. Hiermee duiden we de vermenging van materiaal op de overgangslaag tussen een convectieve zone en een radiatieve zone in de ster aan. In een convectieve zone stijgen en dalen de macroscopische gasbellen voortdurend (denk opnieuw aan het kokend water in de ketel). In een radiatieve zone treden geen convectieve bewegingen op. De overgang van een radiatieve naar een convectieve zone is echter wellicht niet abrupt en we verwachten enigszins dat er toch nog vermenging is van het ster materiaal in deze overgangzone, zij het minder efficiënt dan binnenin een convectieve zone. De grootte van de overgangzone die nog onderworpen is aan vermenging wordt in technische termen beschreven door de dimensieloze overschietparameter, waarvan we de waarde niet kennen. Deze waarde ligt tussen nul en één, uitgedrukt in de schaalhoogte van druk. De waarde nul staat voor

een abrupte overgang en één voor maximale vermenging uitgespreid over één schaalhoogte van druk. Hoe groter deze parameter, hoe groter het overgangsgebied waarover de vermenging nog plaatsvindt. Alle sterren die meer dan dubbel zo zwaar geboren worden als de zon hebben een convectieve zone in hun kern. Voor hen bepaalt de overschietparameter mee de hoeveelheid waterstof die aan de kernfusie kan deelnemen en zodoende hun precieze levensloop. Anderzijds hebben alle rode reuzensterren erg grote buitenste convectieve zones, die in sommige levensfasen kunnen reiken tot aan de kernfusieschillen zodat ze het gasmengsel daar enorm beïnvloeden. Het is daarom duidelijk dat nauwkeurige leeftijdsschatting van sterren, wat een precieze voorspelling van de levensloop vereist, pas mogelijk is als we de overschietparameter kennen.

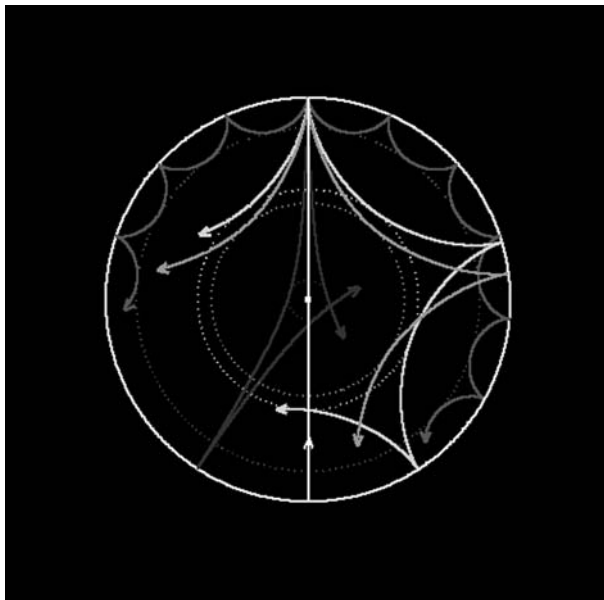
Een ander slecht begrepen fenomeen dat plaatsvindt in het sterinwendige is de reeds aangehaalde rotationele vermenging. Het is vooralsnog niet duidelijk of de interne lagen in een ster star ronddraaien of niet. Immers, wij kunnen alleen maar de draaiingsnelheid aan het oppervlak van de sterren rechtstreeks meten. Wanneer de inwendige lagen onderhevig zouden zijn aan een verschillende, dus niet-starre, rotatie, brengt dit opnieuw efficiënte vermenging van het stergas door de lagen met zich mee. Draaien de lagen daarentegen allemaal star, dan zal er vermenging optreden, maar veel minder. Denk aan twee koffiedrinkers waarbij de ene veel harder roert in zijn kop dan de andere. Opnieuw beïnvloedt de rotationele vermenging de levensloop van de ster. In de praktijk treden rotationele vermenging en overschieten tezamen op en zijn ze bijzonder moeilijk te onderscheiden.

TERUG NAAR DE STEROSCILLATIES

De lezer weet wellicht dat een snaar (van een gitaar of een piano bijvoorbeeld) door de muzikant kan aangeslagen worden zodat ze een bepaalde klank produceert omdat ze trilt in de grondtoon, of in de eerste harmonische, of in de tweede harmonische, enzovoort. In wiskundige termen noemen we dat de verschillende boventonen van de snaar. Zij worden gekenmerkt door hun golfgetal n ($n=0$ voor de grondtoon, $n=1$ voor de eerste harmonische, $n=2$ voor de tweede harmonische, ...). Bij een ster is het net zo, alleen betreft het hier een 'driedimensionale snaar': elke steroscillatie heeft een welbepaalde frequentie (haar 'klank') en wordt gekenmerkt door drie golfgetallen ℓ , m , n . In figuur 1 wordt een momentopname van een mogelijke steroscillatie voorgesteld. De donkere gebieden bewegen op dat ogenblik naar het stercentrum toe (en dus weg van de waarnemer) terwijl de lichte gebieden weg bewegen van het centrum (naar de waarnemer toe). De overgangslaag tussen een licht en donker gebied noemen we een knopenlijn (op het steroppervlak) of knoopoppervlak (binnenin de ster). Het getal ℓ duidt het aantal knopenlijnen op het steroppervlak aan, het getal m het aantal van deze knopenlijnen die door de symmetrie-as van de ster gaan en het getal n het aantal knoopoppervlakken binnenin de ster. In het voorbeeld van figuur 1 hebben we dus te maken met $\ell, m=2$ en $n=14$.



Figuur 1: Momentopname van een niet-radiale steroscillatie



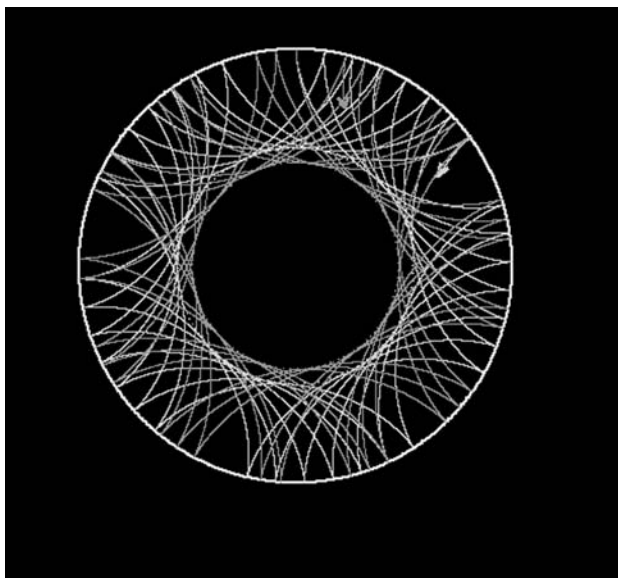
Figuur 2: De voortplanting van verschillende oscillaties doorheen de ster

De oscillaties doen de ster ritmisch bewegen volgens de oscillatiefrequentie en volgens de ℓ , m , n knopenpatronen. Immers, een halve oscillatiecyclus verder zijn de donkere gebieden in figuur 1 licht geworden en omgekeerd. Deze ritmische variatie, die verloopt met de oscillatiefrequentie, doet uitwijkingen ontstaan in de gehele ster, en op het steroppervlak in het bijzonder, waardoor dit laatste afwijkt van sferische symmetrie. Men spreekt daarom van niet-radiale oscillaties.

Gitaren van verschillende grootte en/of vervaardigd uit verschillend materiaal klinken anders, zelfs wanneer de muzikant de snaar op dezelfde wijze aanslaat. Dat komt omdat de opgewekte geluidsgolven zich voortplanten en weerkaatsen in een medium met verschillende fysische eigenschappen. Zo ook 'klinkt' elke ster anders en worden de waarden van haar oscillatiefrequenties uniek bepaald door haar bouw (haar structuur). Oscillatiefrequenties zijn dus een bijzonder krachtige diagnostiek om de structuurparameters van de ster af te leiden.

Afhankelijk van hun voortplantingsrichting nabij het oppervlak dringen de oscillaties door tot zeer verschillende diepten in de ster. In figuur 2 staan de voortplantingsrichtingen aangegeven voor oscillaties met verschillende ℓ -waarde vertrekkende vanuit eenzelfde punt nabij het steroppervlak. De stippellijnen duiden telkens het keeroppervlak van de oscillatie aan. Elke oscillatie baant zich een weg tussen dit keeroppervlak en het steroppervlak. De lezer kan vaststellen dat één van de twee donkergrijze oscillaties zich een weg baant doorheen de allerbuitenste sterlagen. Deze oscillatie heeft dan ook een hoge frequentie (korte tijd tussen het weerkaatsen aan het oppervlak wat zich reflecteert in een korte oscillatieperiode). De andere donkergrijze oscillatie, daarentegen, toetst bijna de gehele ster en doet er dus langer over alvorens terug aan het oppervlak te weerkaatsen; zij heeft met andere woorden een lage frequentie (lange periode). De witte en lichtgrijze oscillaties representeren een tussenliggende situatie. Het gedrag van deze geluidsgolven wordt bepaald door het karakter (de dichtheid, temperatuur, samenstelling) van de lagen waardoor ze zich een weg moeten banen. Op die manier kunnen de oscillaties ons dus details prijsgeven over de precieze kenmerken van de inwendige sterlagen.

In figuur 3 worden de voortplantingsrichtingen voor de witte en lichtgrijze oscillatie voor een groot aantal voortplantingscycli weergegeven. Men kan vaststellen dat beide oscillaties bijna, maar net niet helemaal dezelfde sterlaag doorpriemen. Hun frequenties en ℓ -waarden verschillen dan ook zeer weinig. De lichtgrijze oscillatie dringt net iets dieper door dan de witte. Asterozeismologen gaan dan ook op zoek naar oscillaties met bijna gelijke frequenties in eenzelfde ster. Immers, door de kenmerken van zulke twee oscillaties te vergelijken kunnen ze heel nauwkeurig de details afleiden van het stergebied ingesloten tussen de lichtgrijze en witte stippellijn in figuur 2. Worden er vele oscillaties gedetecteerd in een ster, dan kunnen we zo laagje per laagje de sterstructuur in kaart brengen, ook voor de zones waarin convectief overschieten en/of rotationele vermenig eventueel zouden optreden. Oscillaties zijn de enige manier om die informatie met



Figuur 3: De voortplanting van twee oscillaties met bijna gelijke frequentie doorheen de ster

grote precisie te pakken te krijgen en een waarde voor de overschietparameter af te leiden. Zij laten als het ware toe om het sterinwendige bloot te leggen.

Indien we dit blootleggen zouden kunnen doen voor de binnenste lagen van sterren in verschillende levensfasen, hebben we meteen als bonus dat we de leeftijden van sterren zouden kunnen schatten met ongeziene precisie. Dit komt omdat de chemische samenstelling van de sterkern volledig bepaald wordt door de tijd die de kernfusie al gekregen heeft om haar werk te doen. Zo stijgt de fractie aan helium in de sterkern volgens de duur van de waterstoffusie tot dan toe. Voor de zon leverde helioseismologie inderdaad een relatieve leeftijdsschatting nauwkeuriger dan 0.1% (we kennen de 'exacte' leeftijd van de zon uit studies van meteorieten). Het wordt meteen duidelijk waarom asteroseismologie van de oudste sterren van onze melkweg (en dus van het heelal) een belangrijke toepassing impliceert voor kosmologie, vermits het toelaat de leeftijd van het heelal te schatten.

Algemeen weten we dat de rotatie van de ster de frequenties van de oscillaties beïnvloedt. Immers, de oscillatiebeweging is gesuperponeerd op de draaibeweging en deze laatste verschuift de frequenties. Laten we opnieuw aan de analogie met de gitaar denken. Stel dat twee gitaristen hetzelfde muziekstuk spelen, maar dat de ene zich op een stilstaand podium bevindt en de andere op een draaiend podium. Het publiek krijgt dan de indruk dat het om twee verschillende partituren gaat, omdat de muziknoten

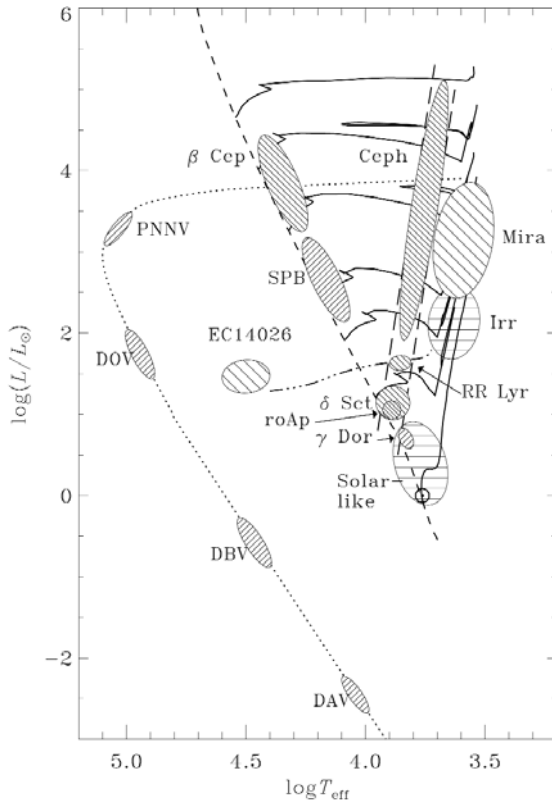
van de draaiende gitarist anders klinken dan diegenen gespeeld door de stilstaande gitarist. Hoe sneller het podium ronddraait, hoe groter het verschil tussen de klanken die het publiek te horen krijgt van de twee gitaristen. Uit deze analogie zal het duidelijk zijn dat steroscillaties meteen een geweldig krachtige diagnostiek zijn om de interne sterrotatie te toetsen. Immers, de grootte van de frequentieverschuiving wordt bepaald door de grootte van de draaisnelheid. Het frequentiepatroon van een ster zonder rotatie ziet er dus aanmerkelijk anders uit dan dat van een snel om haar as draaiende ster. Wanneer de lagen van een ster bovendien niet allemaal even snel draaien, dus bij niet-starre rotatie, is het effect hiervan anders voor de twee donkergrijze oscillaties voorgesteld in figuur 2 en dus worden hun frequenties op een verschillende wijze verschoven. De grootte van die frequentieverschuiving is rechtstreeks gekoppeld aan de lokale rotatiesnelheid. Op die manier wordt het mogelijk om uit de verschillende verschuivingen van de gemeten oscillatiefrequenties de interne rotatiesnelheid laag voor laag af te leiden.

WAAROM OSCILLEREN STERREN?

Niet alle sterren zijn lid van het kosmisch symfonisch orkest en ze komen dus niet allemaal in aanmerking voor een asteroseismologische analyse. Momenteel zijn twee mechanismen bekend die sterren doen oscilleren.

Het eerste mechanisme is ook verantwoordelijk voor de oscillaties van de zon. Het zijn de opborrelende gasbellen nabij haar oppervlak die de zon doen oscilleren. Deze oscillaties worden voortdurend aangeslagen en sterven uit op een tijdsspanne van de orde van dagen tot weken. Men kan dat erg goed vergelijken met het alsmat opwekken van muziktonen bij het aanslaan van een gong. Om van deze muziek te blijven genieten is het nodig dat een muzikant gongslagen blijft geven, want de tonen zijn binnen de kortste keren geheel uitgestorven. De opborrelende gasbellen slaan de buitenlagen van de zon voortdurend aan. We verwachten dat alle sterren met een convectieve buitenzone zoals de zon dit type oscillaties ondergaan en spreken dan van zonachtige oscillaties.

Er is ook nog een tweede geheel verschillend mechanisme dat oscillaties kan opwekken. Om dit mechanisme uit te leggen, grijpen we graag opnieuw terug naar de waterketel, die we nu in gedachten bedekken met een niet al te zwaar deksel. De lezer weet heel goed dat het deksel niet beweegt wanneer de ketel nog niet opgewarmd werd. Brengen we het water in de ketel aan de kook, dan zal op een gegeven moment het deksel beginnen te flapperen. Dat komt omdat het water in de ketel in staat is om de aangevoerde warmte om te zetten naar mechanische beweging. Het deksel zal blijven flapperen zolang er warmte wordt aangevoerd. Dit keukenvoorbeeld illustreert het algemene principe van een warmtemotor. Op geheel analoge wijze blijken sommige gaslagen in een ster bijzonder goed in staat te zijn om de aangevoerde energie geproduceerd door de kernfusie om te zetten in mechanische beweging die de ster aan het oscilleren brengt, net zoals het deksel van de waterketel begint te flapperen. Opdat dit mechanisme



Figuur 4: Alle totnogtoe gekende klassen van oscillerende sterren worden hier als ellipsen afgebeeld in een sterevolutiediagram

zou werken, moet echter aan een aantal voorwaarden voldaan zijn. Zo moet de desbetreffende activerende laag op een gunstige plaats in de ster gepositioneerd zijn. Ze mag niet te diep in de ster zijn ingebed, want dan kan ze de zware bovenlagen niet in beweging brengen, net zoals de kokende waterbellen een veel te zwaar deksel niet kunnen doen flapperen. Anderzijds mag de laag niet te ver naar buiten liggen, want dan kan ze de ster als geheel niet doen oscilleren. De keukenanalogie is dat een deksel met gaten, waardoor de warmte efficiënt kan worden afgevoerd, ook niet begint te flapperen. Het komt er dus op neer dat alleen sterren waarin de activerende laag op een gunstige positie ligt, oscillaties kunnen aanslaan door de omzetting van de opgewekte kernenergie in mechanische beweging.

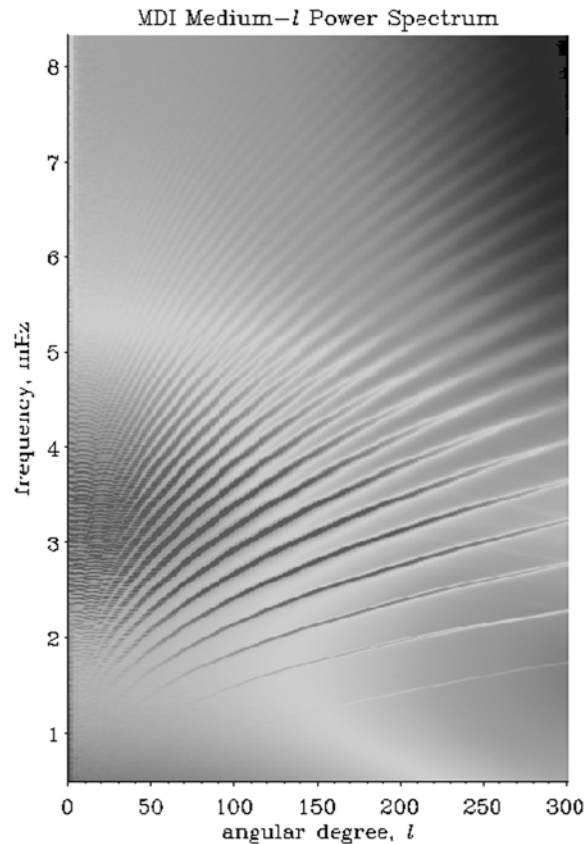
In figuur 4 worden alle klassen van oscillerende sterren die we totnogtoe kennen schematisch voorgesteld in een sterevolutiediagram, waarin de energie-uitstroom (de zogenaamde lichtkracht) van de ster wordt uitgezet ten opzichte van een maat voor haar oppervlaktetemperatuur. De ellipsen duiden de gebieden in het diagram aan waarin ster-oscillaties, veroorzaakt door de twee zopas besproken mechanismen, optreden. Zoals kan worden vastgesteld, vinden we op vele plaatsen ellipsen, maar toch bedekken ze niet het gehele diagram, doordat de lagen waarin de mechanismen actief zijn niet lukraak verdeeld mogen zitten door de ster heen, maar gunstig gelegen moeten zijn. Deze gunstige ligging vertaalt zich in welbepaalde posities in het diagram. Er zijn gelukkig meer dan genoeg sterren die gelegen zijn in elk van deze ellipsen, zodat asteroseismologie inderdaad kan toegepast worden op geheel verschillende levensfasen van sterren.

DE PARTITUUR VAN DE ZON IS EEN STRELING VOOR HET OOR VAN HELIOSEISMOLOGEN

Asteroseismologie is een nog jonge wetenschapstak binnen de sterrenkunde, omdat de detectie van vele verschillende simultane oscillaties in een ster niet zo eenvoudig is. Wij kennen al meer dan een eeuw vele sterren met één dominante oscillatie, zoals Cepheïden bijvoorbeeld, of met een paar oscillaties. Maar om asteroseismologie toe te passen hebben we zeer vele oscillaties nodig voordat we de gelaagdheid in kaart kunnen brengen (denk aan de verklaring over figuren 2 en 3). De eerste ster waarvoor dit met grote precisie gelukt is, is onze zon. Zij ondergaat duizenden oscillaties waarvan de frequenties om en bij 3 milli-Hertz bedragen (dit komt overeen met oscillatieperioden van ongeveer 5 minuten). Deze vele oscillaties vertalen zich in een gecompliceerd bewegingspatroon van haar oppervlak. De zon speelt met andere woorden een ingewikkeld partituur. De lezer ziet van dit partituur een wiskundige representatie in figuur 5, waar de frequenties van de oscillaties worden uitgezet ten opzichte van het golfgetal ℓ .

De zonneoscillaties uiteten zich in minieme snelheidsvariëaties op haar oppervlak. De snelheden die hiermee gepaard gaan bedragen slechts enkele centimeters per seconde (dit is ongeveer 0,1 kilometer per uur). Door deze snelheidsvariëaties geduldig te meten in de loop van de tijd, kunnen astronomen er de trillingsfrequenties uit afleiden aan de hand van tijdreeksanalyse. We kunnen dit evenzeer doen uit tijdreeksen van gemeten helderheidsvariëaties. Immers, door de op en neer gaande beweging zijn sommige delen van het zonsoppervlak warmer dan andere naburige delen (zie de lichte en donkere gebieden in figuur 1), waardoor ze intenser stralen. Op die manier verandert de helderheid van de ster tijdens de oscillatiecyclus en de wijze waarop deze variëaties optreden is rechtstreeks verbonden met de aard van de oscillatie, dus met de golfgetallen ℓ en m .

Omdat helioseismologen duizenden van deze oscillaties gedetecteerd en ontrafeld hebben, zijn ze in staat geweest om de interne rotatie van de zon erg nauwkeurig vast te leggen.



Figuur 5: Een wiskundige representatie van de symfonie van de zon

Op die manier is gebleken dat de zon geen starre rotator is. Binnenin de zon, vanaf het zonnecentrum tot op een afstand van 75 procent van de zonnestraal naar buiten toe, roteert ze quasi-star. Maar haar rotatie verhoogt dan met een factor 1,2 in de laag gepositioneerd tussen 75 procent van de zonnestraal en haar oppervlak. Het verschil in rotatie is relatief klein voor de verschillende diepten in de zon, zodat voor haar rotationele vermenging niet erg belangrijk is.

Helioseismologen konden tevens een nauwkeurige waarde voor de overschietparameter vastleggen voor de convectieve buitenlaag van de zon, die ons vertelt dat de overgangslaag tussen de convectieve en radiatieve zone daar uiterst miniem is. (De resultaten

van helioseismologie werden vrij recent mooi in een overzichtsartikel samengevat door Christensen-Dalsgaard, 2002, p. 1073-1129.)

ASTEROSEISMOLOGEN ZIJN NOODGEDWONGEN GEDULDIGE ASTRONOMEN
 Vraag is nu of deze resultaten ook geldig zijn voor andere sterren. Dat is hoegenaamd niet zeker, want de convectieve en radiatieve zones zijn op erg verschillende plaatsen gepositioneerd voor zware tegenover lichte sterren en vele sterren draaien veel sneller om hun as dan de zon.

Het succes van de helioseismologie heeft een enorme stimulans gegeven om ook dezelfde nauwkeurigheid na te streven voor andere sterren. Asteroseismologen zijn dan ook intensief op zoek naar oscillaties in vele soorten sterren, wat geen sinecure is vanwege de kleine afwijkingen. Bovendien kunnen de perioden van de oscillaties heel wat langer zijn dan die van de zon, wat lange meetijdreeksen van helderheids- of snelheidsvariëaties vraagt alvorens we de frequenties van de oscillaties goed kunnen ontrafelen. Asteroseismologen moeten dus veel geduld aan de dag leggen, maar als ze dat doen rendeert het wel.

Tijdens de afgelopen tien jaar werden reeds verscheidene successen van asteroseismologie geboekt voor sterren in verschillende evolutiestadia, van jonge sterren tot witte dwergen. We verwijzen graag naar Kurtz, 2004, p.123-135 voor een recent overzichtsartikel, waarin mooi wordt verteld dat de droom om ooit asteroseismologische studies in de praktijk om te zetten ondertussen werkelijkheid geworden is.

Ondanks de successen valt er nog heel wat te doen. Ook al kennen wij een honderdtal sterren waarin telkens enkele tot tientallen oscillaties gevonden zijn en waarvoor seismologische sterstructuurmodellen konden worden opgesteld, men is er nog lang niet in geslaagd om hieruit precieze waarden voor de overschietparameter en de interne rotatie af te leiden, zoals voor de zon. Om dit stadium te bereiken is het noodzakelijk dat we honderden oscillaties detecteren in plaats van de enkele die tot nu toe gevonden werden, omdat zij niet toelaten een onderscheid te maken tussen stermodellen met en zonder overschieten, al of niet met starre rotatie. Een eerste aanzet tot observationele bepaling van de overschietparameter en de mate van niet-starre rotatie voor een ster die tien keer zo zwaar is als de zon werd gerapporteerd in Aerts et al., 2003, p. 1926-1928, op basis van twintig jaar metingen. Zij vonden een overschietparameter van 0,1 en een viermaal zo snelle rotatie nabij de sterkern dan aan het steroppervlak, vrij anders dus dan bij de zon. Vraag is nu of deze resultaten algemeen gelden voor zware sterren of sterk verschillen van ster tot ster.

EEN ZEER HOOPVOLLE TOEKOMST

Momenteel is de detectielimiet voor oscillaties uit helderheidsvariëaties of snelheidsvariëaties nog te hoog en de efficiëntie waarmee we metingen kunnen verzamelen een

stuk te laag. Dit komt enerzijds doordat de aardatmosfeer ons belet om hoge-precisie helderheidsvariaties te meten en anderzijds doordat we de metingen voortdurend moeten onderbreken overdag en wanneer het bewolkt is. Zelfs voor de zon, waarvoor men op basis van een uitgebouwd netwerk van zonnetlescopen gedurende tientallen jaren de helderheid vanaf aarde gemeten heeft, is de grote doorbraak er alleen maar gekomen aan de hand van metingen vanuit de ruimte. Het is daarom evident dat een grote voorwaartse stap in dit domein slechts mogelijk is als we een beroep kunnen doen op specifieke ruimtemissies.

De eerste missie hieraan gewijd is een Canadese. Het gaat om MOST, wat staat voor **M**icrovariability and **O**scillations of **S**Tars. MOST is de allereerste Canadese satelliet en werd gelanceerd in juni 2003. Voor de eerste interessante onderzoeksresultaten verwijs ik graag naar de internetpagina <http://www.astro.ubc.ca/MOST/>. Deze satelliet heeft slechts een zeer kleine telescoop aan boord, met een diameter van 15 centimeter, waardoor ze alleen de allerhelderste sterren kan waarnemen. Bovendien impliceert haar omloopsbaan om de aarde dat ze de sterren slechts ononderbroken kan volgen gedurende enkele weken. Het is daarom duidelijk dat MOST vooral een pioniersmissie is, om de techniek van hoge-precisie helderheidsmetingen vanuit de ruimte te toetsen aan de realiteit, eerder dan diepgaande asteroseismologische resultaten op niveau van helioseismologie te kunnen opleveren. Voor wat betreft deze toetsing is de missie een groot succes.

Momenteel bouwt een Europees consortium, onder leiding van het Franse ruimteagentschap CNES, een veel grotere ruimtemissie met een telescoop die een diameter heeft van 27 centimeter. Deze zal gelanceerd worden in de loop van 2006. Het gaat om COROT, wat een acroniem is voor **C**ONvection, **R**otation and planetary **T**ransits (zie <http://smc.cnes.fr/COROT/> voor meer informatie). De missie zal asteroseismologische metingen verrichten voor een vijftigtal relatief heldere sterren en daarnaast op zoek gaan naar Jupiterachtige planeten rondom een honderdduizendtal sterren. Dit laatste zal gebeuren door de bedekkingen van de sterren door hun planeten in kaart te brengen, net zoals Venus op 8 juni 2004 de helderheid van de zon een weinig heeft doen afnemen tijdens de bedekking. Dat deze twee verschillende onderzoeksdomeinen hand in hand gaan is logisch als men bedenkt dat voor beiden toegewijde ultra-hoge-precisie helderheidsmetingen met een tijdsbasis van minstens enkele maanden nodig zijn. COROT zal de sterren telkens gedurende vijf maanden ononderbroken meten met een precisie die honderd keer beter is dan de beste vanaf aarde. Deze metingen zullen asteroseismologen in staat stellen de complexe partituren van een breed gamma van oscillerende sterren te ontrafelen en tegelijk de mogelijkheid bieden om exosolaire planeten rondom sterren te ontdekken.

Bovendien heeft het Europees ruimteagentschap ESA een plan ontworpen voor een nog ambitieuzere missie die eveneens asteroseismologie en planeetbedekkingen kan

combineren. Van deze missie, Eddington genaamd naar de peetvader van de sterstructuur, Sir Arthur Eddington, verwachten we asteroseismologische resultaten voor duizenden sterren, waaronder de oudsten in het heelal, en dat ze op zoek gaat naar allerlei soorten planeten, rondom honderdduizenden sterren. Het behoort tot de mogelijkheden van de Eddington-missie om tweelingen van de aarde te vinden. De industriële haalbaarheidsstudies van Eddington werden positief afgerond maar de implementatiefase is nog niet van start gegaan.

U merkt dat asteroseismologen en exoplanetenjagers gouden tijden tegemoet gaan.

EPILOOG

Waarde toehoorder, tijdens deze oratie heb ik u hopelijk een beetje laten meeprouwen van één van mijn passies. Ik hoop dat het u als muziek in de oren klonk. Als astromama heb ik het geluk dat mijn dochter An gitaarles volgt en interesse voor wiskunde heeft, wat een bijzonder mooie alledaagse analogie van mijn asteroseismologisch onderzoek garandeert in huis. Bovendien is mijn zoontje Jasper, ondanks zijn nog jonge leeftijd van zeven, nu al behept met nieuwsgierigheid voor de natuurwetten die hij wekelijks ondervindt bij het voetballen. Ik hoop dat ik hen beiden, samen met mijn echtgenoot Geert, kan blijven boeien voor de wonderen der natuur. Ik hoop ook dat ik nog vele Nijmeegse en Leuvense studenten kan warm maken voor mijn college asteroseismologie.

Tot slot wil ik nog een woord van dank richten aan alle astronomen van de Radboud Universiteit Nijmegen en van de Katholieke Universiteit Leuven. Ik ben vereerd lid te zijn van deze beide frisse, moderne en aangename onderzoeksgroepen, waar ontzettend hard gewerkt wordt en die wonderveel gelijkenissen vertonen. Ik wil Professor Jan Kuijpers bijzonder hartelijk feliciteren voor de werkelijk indrukwekkende wijze waarop hij de Nijmeegse groep in zeer korte tijd heeft uitgebouwd.

Dames en heren, ik dank u voor uw aandacht en bedenk dat het kosmisch orkest altijd voor u blijft spelen.

REFERENTIES

- Aerts, C., Thoul, A., Daszynska, J., Scuflaire, R., Waelkens, C., Dupret, M. A., Niemczura, E., Noels, A., 2003, *Asteroseismology of HD 129929: Core Overshooting and Nonrigid Rotation*, Science, Vol. 300, pp. 1926-1928
- Christensen-Dalsgaard, J., 2002, *Helioseismology*, Reviews of Modern Physics, Vol. 74, pp. 1073-1129
- Kurtz, D.W., 2004, *Asteroseismology: from dream to reality*, Solar Physics, Vol. 220, pp. 123-135

GEDEELTEN VAN DEZE ORATIETEKST ZIJN GEBASEERD OP VOLGENDE PUBLICATIES

- Aerts, C., 2001, *Asteroseismologie*, Heelal, Vol. 46, nummer 1, pp. 4-9
- Aerts, C., 2005, *Partituren uit de Kosmos*, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde, jaargang 71, nummer 2, pp. 52-54
- Aerts, C., 2005, *Asteroseismology*, collegenota's, Katholieke Universiteit Leuven en Radboud Universiteit Nijmegen

BRON

- Bij alle figuren: Prof. J. Christensen-Dalsgaard, Aarhus University, Denemarken