

De toekomst van de helio- en asteroseismologie

Het inwendige van de zon ondergaat trillingen van zeer uiteenlopende aard die door turbulente convectie worden opgewekt, vergelijkbaar met het geluid dat je hoort in een pan water die aan de kook wordt gebracht. Deze trillingen van uiteenlopende 'toonhoogte' veroorzaken allerlei golfbewegingen aan het zonsoppervlak, die zonnephysici in staat stellen om in de zon te 'kijken', net zoals geofysici de inwendige structuur van de aarde kunnen onderzoeken met behulp van seismische instrumenten. De afgelopen twintig jaar heeft de helioseismologie een aanzienlijk aantal ontdekkingen opgeleverd. Maar het mooiste moet nog komen: driedimensionale helioseismische technieken bieden unieke vooruitzichten voor het onderzoek van het mechanisme van de zonnecyclus. En dankzij de uitbreiding van het seismische onderzoek naar verre sterren breekt een compleet nieuw tijdperk voor de sterrenkunde aan.

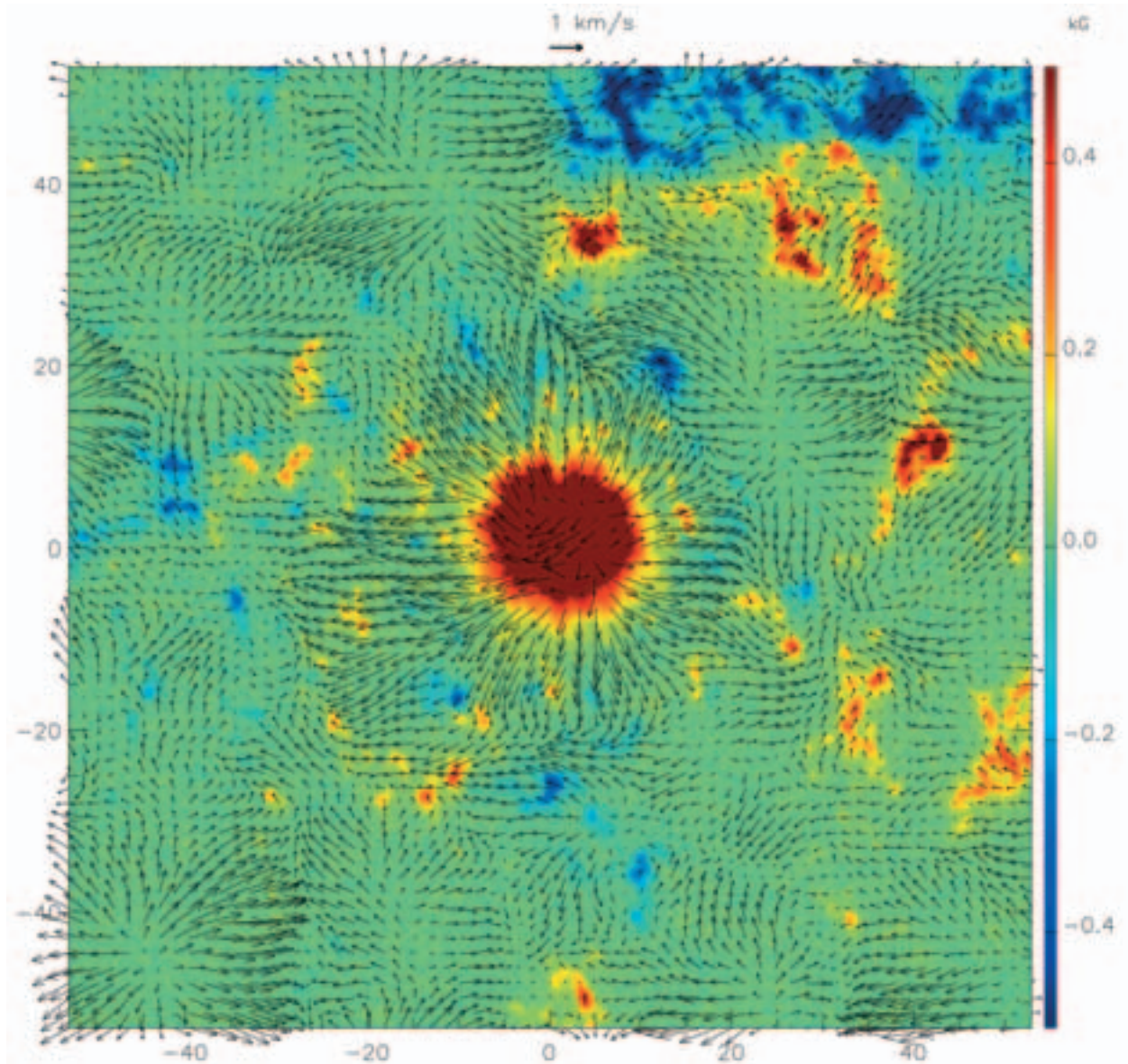
Het onderzoek van de trillingen van de zon vereist langdurige, vrijwel onafgebroken waarnemingen vanuit de ruimte of met

een netwerk van telescopen op aarde. De meest omvangrijke reeks van gegevens tot op heden is afkomstig van het MDI-instrument aan

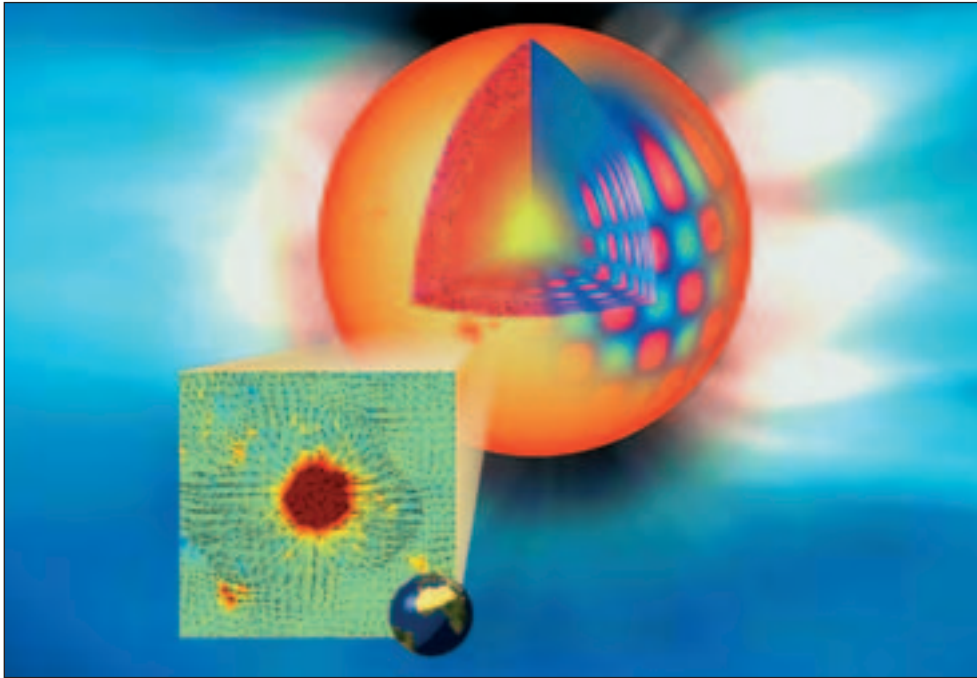
boord van de SOHO-satelliet, een samenwerkingsmissie van ESA en NASA. Sinds 1996 zendt MDI elke minuut een nieuwe afbeelding van

Laurent Gizon*

* Dr. Laurent Gizon is werkzaam bij het Max Planck-instituut voor zonnestelselonderzoek. Hij is hoofd van de onderzoeksgroep die zich bezighoudt met de seismologie van zon en sterren.



Deze figuur, gebaseerd op helioseismologische metingen, toont horizontale stromingen op ongeveer duizend kilometer onder het zonsoppervlak, in de omgeving van een zonnevlek. De kleuren geven de magnetische intensiteit aan het oppervlak aan. De getallen langs de x- en y-as zijn in duizenden kilometers. (Illustratie: L. Gizon)



Deze opengewerkte tekening van de zon toont een bepaalde modus van de globale akoestische oscillatie van onze ster (middenboven). De uitsnede toont de horizontale stromingen duizend kilometer onder een zonnevlek, zoals die zijn afgeleid uit helioseismisch onderzoek. (In rood is het magnetische veld aan het zonsoppervlak weergegeven en ter vergelijking is de aarde op dezelfde schaal afgebeeld.) Op de achtergrond is de hete, uitwaaiende corona van de zon te zien.

de snelheidsverdeling aan het zonsoppervlak naar de aarde. Uit analyse blijkt dat de sterkste oscillaties een frequentie van ongeveer 3 millihertz hebben, wat overeenkomt met ongeveer één golfbeweging per vijf minuten.

De methoden waar de helioseismologie gebruik van maakt, kunnen in twee klassen worden onderverdeeld: globale en lokale. De meer traditionele techniek van de globale helioseismologie bestaat uit het meten van de miljoenen trillingsfrequenties en het opstellen van een seismisch

model van de zon waarvan de trillingsfrequenties het best bij de waargenomen waarden passen. Zo'n model geeft een beeld van de bouw en rotatie van de zon als functie van de diepte en breedtegraad.

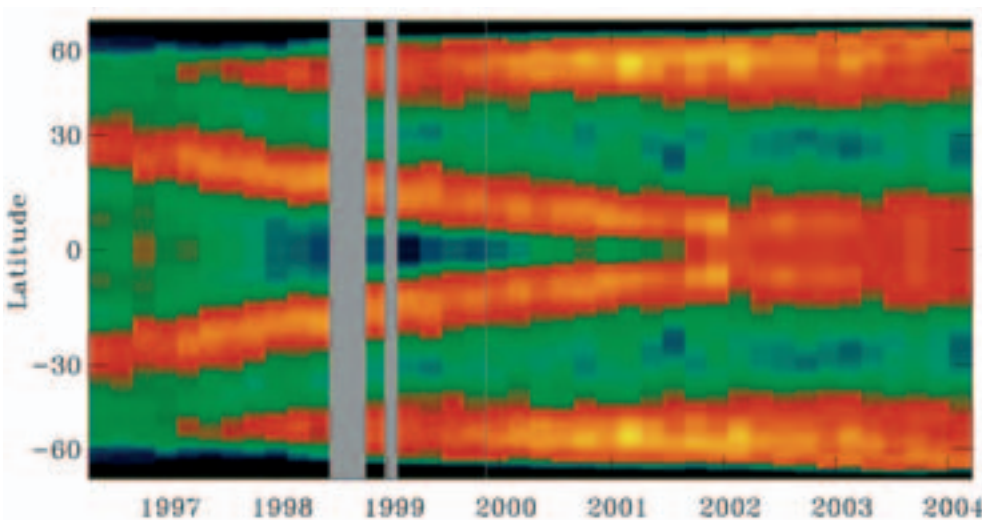
De globale helioseismologie kent echter haar beperkingen. De meer recente methode van de lokale helioseismologie resulteert in driedimensionale kaarten van het inwendige van de zon. Het basisprincipe bestaat hieruit dat de tijd gemeten wordt die een zonnegolf nodig heeft om zich via het inwendige van het

ene naar het andere punt op het zonsoppervlak te verplaatsen. Deze voortplantingstijd wordt beïnvloed door verborgen inhomogeniteiten in de zon en door stromingen die het pad van de golf kruisen.

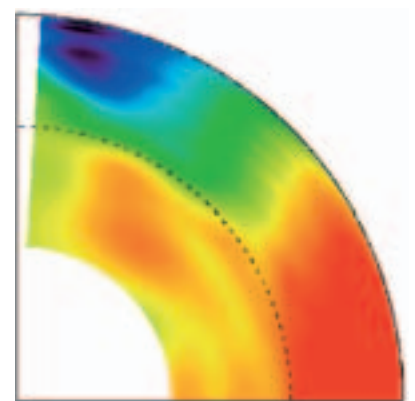
De globale helioseismologie

De globale helioseismologie is verreweg de meest nauwkeurige toetssteen voor de theorie van de bouw en evolutie van sterren (die op haar beurt weer het meest volledige theoretische bouwwerk in de astrofysica is). Met name het modelleren van de evenwichtstoestand van de zon vereist een goed begrip van de wijze waarop energie vanuit de waterstofverbrandende kern naar het oppervlak stroomt. Een van de eerste successen van de helioseismologie bestond uit de nauwkeurige meting van de diepte van de buitenste convectiezone van de zon. Dit stelde ons in staat om het juiste model voor deze zogeheten convectiezone, en de daaruit volgende voorspellingen, te kiezen. Dat heeft er bovendien toe geleid dat we de temperatuur in het hele inwendige van de zon nu met een relatieve nauwkeurigheid van beter dan 0,5% kunnen meten.

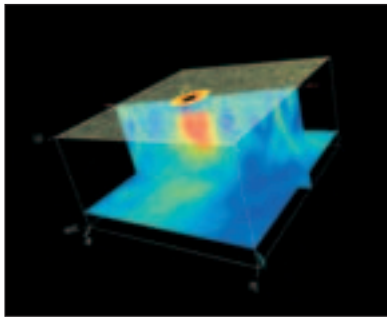
Een andere belangrijke bijdrage van de helioseismologie betreft het (voormalige) probleem van de zonneneutrino's. Toen de neutrinedetectoren op aarde nauwkeurig genoeg werden, bleek dat het aantal zonneneutrino's dat de aarde bereikt verrassend klein is. De eerste pogingen om deze discrepantie te verklaren gingen ervan uit dat de nucleaire reactiesnelheid in de zonnecore, die



Dit overzicht van rotatieverschillen aan het zonsoppervlak laat zien hoe banden van sneller (rood) en trager (blauw) bewegende materie in de loop der jaren van breedtegraad veranderen. (Illustratie: J. Schou en MDI-SOHO/ESA/NASA)

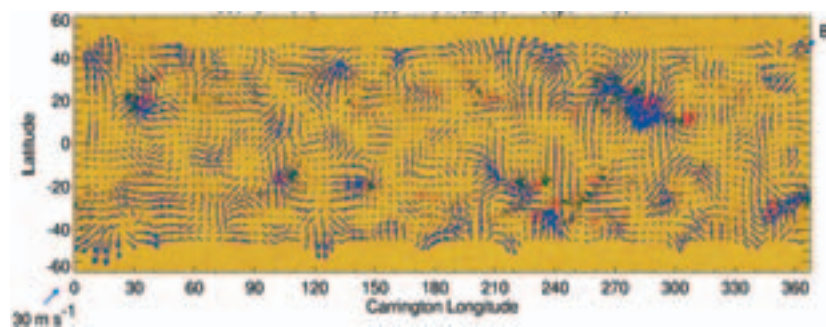


De inwendige rotatie van de zon, afgeleid uit globale helioseismologische metingen. De kleurschaal geeft de rotatiesnelheid weer: rode delen bewegen sneller dan de gele en die weer sneller dan de blauwe. In de convectiezone (buitendeel) roteren de delen rond de evenaar sneller dan die bij de polen. In de dieper gelegen stralingszone is de rotatiesnelheid vrijwel overal even groot.



Verstorings van de golfsnelheid onder een zonnevlek. Rood is sneller dan gemiddeld. De maximale diepte bedraagt 24.000 kilometer. (Illustratie: A. Kosovichev en MDI-SOHO/ESA/NASA)

wordt bepaald door de temperatuur en druk ter plaatse, een beetje afweek van wat de theoretische modellen voorspelden. Deze hypothese werd echter onhoudbaar toen, dankzij de globale helioseismologie, meer bekend werd over de omstandigheden in de kern van de zon. Inmiddels is vastgesteld dat de oorzaak gezocht moet worden bij het standaardmodel van de deeltjesfysica: neutrino's zijn niet massaloos en veranderen van aard terwijl ze door de ruimte voortsnellen, waardoor ze deels aan de aandacht van de eerste neutrinedetectors ontsnapten. Een van de meest aantrekkelijke aspecten van de helioseismologie is de mogelijkheid om verschijnselen te ontdekken die buiten het bereik van het standaardmodel van de zon vallen. Dat laatste is namelijk per definitie bolsymmetrisch en houdt geen rekening met de effecten van massaverplaatsingen of het magnetische veld. Van cruciaal belang is het opsporen van aanwijzingen betreffende de oorsprong en veranderlijkheid van het magnetische veld van de zon, dat aan de basis staat van alle

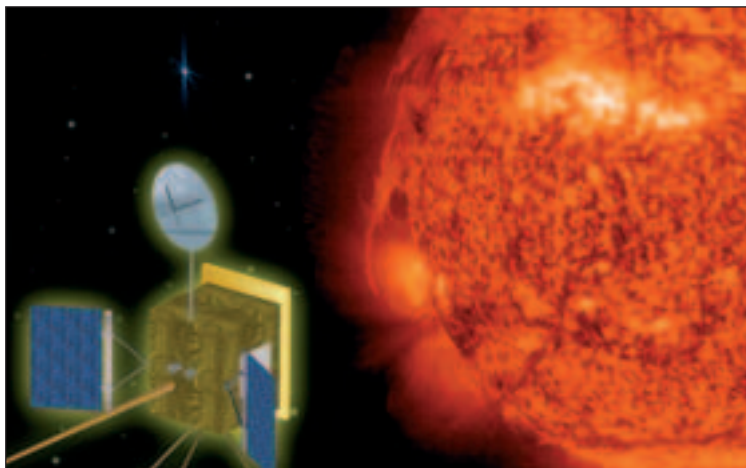
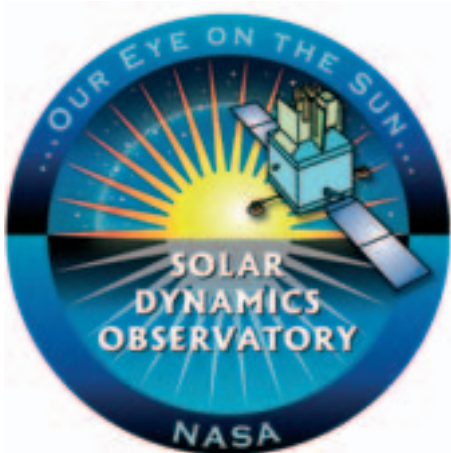


'Ondergronds zonneweer', vastgelegd met lokale helioseismologie. Horizontale stromingen op duizend kilometer onder het zonsoppervlak (pijlen) verraden een verband tussen massabewegingen en gebieden van magnetische activiteit (rood en blauw getinte gebieden). (Illustratie: L. Gizon en MDI-SOHO/ESA/NASA)

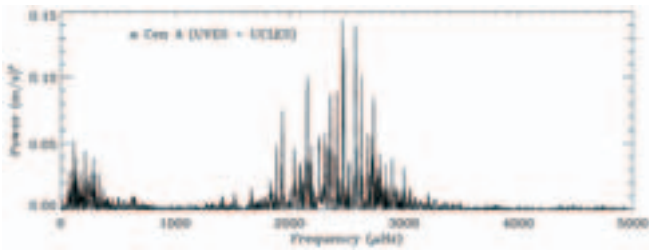
actieve verschijnselen op de zon, zoals zonnevlammen, coronale massa-ejecties en de productie van röntgen- en gammastraling. Het ontstaan van het magnetische veld van de zon, dat nog steeds niet goed begrepen wordt, is misschien wel het belangrijkste onopgeloste probleem in de moderne zonnephysica. Algemeen wordt aangenomen dat de magnetische cyclus van de zon wordt veroorzaakt door een dynamoproces. Volgens dit scenario raken magnetische veldlijnen door bewegingen in het inwendige verstregeld en uitgerekt, waarbij de verschillende rotatiesnelheden van de zon, die variëren met de diepte en de breedtegraad, een belangrijke rol spelen. Bewegingen in de noord-zuidrichting worden ook van belang geacht voor de verklaring waarom het globale magnetische veld van de zon om de elf jaar van polariteit verandert. Een van de hoofddoelen van de helioseismologie is het in kaart brengen van deze inwendige bewegingen en afwijkingen van de bolsymmetrie, om aldus het raadsel van de zonnecyclus te helpen oplossen.

Fragmentarische kennis

Uit de globale helioseismologie is gebleken dat de zonsrotatie in de convectiezone vooral met de breedtegraad varieert: de rotatie is het snelst aan de evenaar (rotatietijd 25 dagen) en het traagst op hoge breedte (35 dagen). De dieper gelegen stralingszone daarentegen lijkt als een vast lichaam te roteren, met een periode van ongeveer 27 dagen. Op zowel hoge als lage breedtegraad treden onderin de convectiezone, waar vermoedelijk ook de oorsprong van de zonnedynamo ligt, dus grote schuifkrachten op. Ook vlak onder het zonsoppervlak vindt een scherpe overgang in de hoeksnelheid plaats, die met lokale helioseismologie in meer detail onderzocht moet worden. Het eerste directe bewijs voor een verband tussen de inwendige massabewegingen en de grootschalige eigenschappen van de zonnecyclus was gebaseerd op de detectie van gordels van verschillende rotatiesnelheid evenwijdig aan de evenaar, die een elfjarige periodiciteit vertonen en zich tot diep in de convectiezone voortzetten. Volgens



Toekomstige helioseismologische missies: het Solar Dynamics Observatory van NASA (links) en de Solar Orbiter van ESA (rechts).



Akoestisch spectrum van de zonachtige ster Alfa Centauri A, gebaseerd op een week van waarnemingen met de Very Large Telescope van ESO. (Illustratie: R. Butler et al, *Astrophysical Journal*, 600, L75 (2004))

één theorie zouden deze verband kunnen houden met een zich langzaam verplaatsende dynamogolf. De geheimzinnige variaties in de rotatiesnelheid met een schommelende periode van ongeveer 1,3 jaar, die onderin de convectiezone zijn ontdekt, duiden er echter op dat onze kennis van de inwendige dynamica van de zon nogal fragmentarisch is.

Lokale helioseismologie

Dankzij de nog jonge wetenschap van de lokale helioseismologie zijn stromingen tussen de evenaar en de polen van de zon ontdekt. Deze zouden kunnen fungeren als een mechanisme dat magnetische flux van en naar de evenaar verplaatst en bepalend is voor de periode van de zonnecyclus. Daarnaast heeft lokale helioseismologie gedetailleerde driedimensionale kaarten opgeleverd van plaatselijke stromingen in de bovenste vijf procent van de convectiezone, die ook wel worden aangeduid met de term 'ondergronds zonneneeuw'. In de buurt van magnetisch actieve gebieden lijken de bewegingen volgens sterk georganiseerde

patronen te verlopen. Verder daarvan zijn de stromingen ingewikkelder: kronkels, straalstromen en wervelingen, die mogelijk verband houden met grootschalige diepe convectiebewegingen.

Ook kleinschaliger verschijnselen zijn bestudeerd, zoals 'supergranulatie' (een convectiepatroon) en zonnevlekken. De cellulaire stromingen die rond zonnevlekken zijn waargenomen zouden bijvoorbeeld kunnen verklaren waarom deze structuren wekenlang stabiel blijven. Weer een andere toepassing van de lokale helioseismologie is de constructie van kaarten van actieve gebieden aan de *achterzijde* van de zon. Uit het feit dat dit slechts enkele van vele voorbeelden zijn, kunnen we afleiden hoe veelzijdig de mogelijkheden van de lokale helioseismologie zijn. Maar daarbij moet wel worden aangetekend dat er grote behoefte bestaat aan betere gegevens en (vooral) technologische ontwikkelingen om het potentieel volledig te benutten.

Technologische ontwikkelingen

De volgende grote technologische ontwikkeling in de helioseismologie is de Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) die in 2008 met de Solar Dynamics Observatory van NASA zal worden gelanceerd. Met zijn grote ruimtelijk oplossend vermogen over de hele zichtbare zonneshijf is HMI het eerste instrument dat speciaal ontworpen is voor lokale helioseismologie. Vanuit zijn lage aardbaan zal de HMI een vloedgolf aan gegevens (vijftig megabit per seconde gedurende zeker vijf jaar) over de wetenschappelijke gemeenschap uit-

storten. Een van de hoofddoelen is het onderzoek van de fijnstructuur en de ontwikkeling van magnetische gebieden in het bovenste deel van de convectiezone.

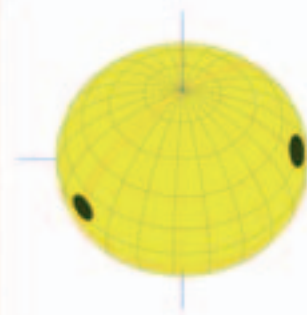
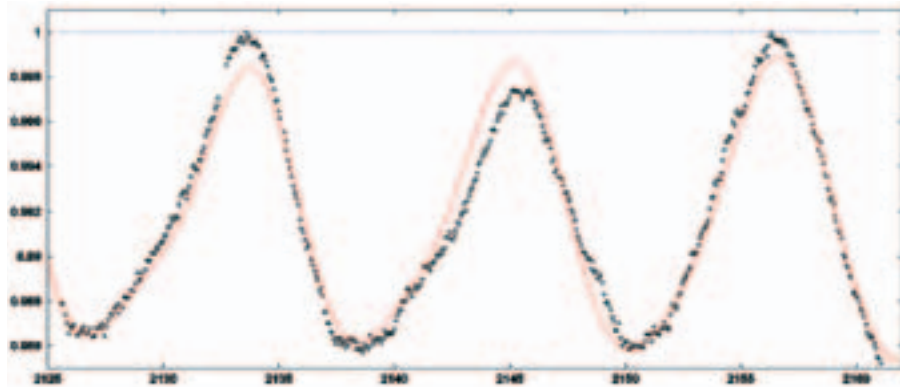
Rond 2013 wil de ESA zijn Solar Orbiter op reis door het zonnestelsel sturen, om uiteindelijk het vlak van de ecliptica te verlaten. Het zal dan voor het eerst mogelijk zijn om de 'ondergrondse' structuren en dynamica van de poolstreken van de zon te onderzoeken. Ook zal het mogelijk zijn om de waarnemingen die de Solar Orbiter van de achterkant van de zon doet te combineren met waarnemingen vanaf de aarde, zodat er aan stereoscopische lokale helioseismologie kan worden gedaan. Dat zal ons in staat stellen om nog dieper en met een nog groter oplossend vermogen in de convectiezone te kijken.

Met deze nieuwe waarnemingen zal ook de behoefte aan betere zonmodellen ontstaan. Er wordt veel verwacht van krachtige computersimulaties die meer inzicht kunnen geven in de mechanismen die de wisselwerking tussen rotatie, convectie en magnetisme regelen. Zulke berekeningen zullen ook nodig zijn om de voortplanting van golven in een sterk magnetisch fluidum te begrijpen – een noodzakelijke voorwaarde voor de toepassing van lokale helioseismologie op actieve gebieden. (Gewoonlijk worden de reistijden van golven berekend door ze als gewone geluidsgolven te beschouwen.)

De lokale helioseismologie is volop in ontwikkeling en de vooruitzichten zijn veelbelovend. Een van de meest ambitieuze doelstellingen is het



De Very Large Telescope in Chili (links) en de CNES/ESA-satelliet COROT (rechts) zullen ongekend nauwkeurige gegevens voor de asteroseismologie opleveren.



Met de kleine satelliet MOST zijn onder meer waarnemingen verricht van de zonachtige ster Epsilon Eridani. Deze ster, die ongeveer tweemaal zo snel om zijn as draait als onze zon, vertoont kleine helderheidsfluctuaties die kunnen worden toegeschreven aan de aanwezigheid van 'zonnevlekken'. (Grafiek: Bryce Croll en het MOST-team)

maken van directe afbeeldingen van het magnetische veld in het inwendige van de zon. Indien meetbaar, kan deze informatie worden afgeleid uit lokale afwijkingen in de voortplanting van golven, omdat de voortplantingssnelheid van golven evenwijdig aan magnetische veldlijnen anders zal zijn dan die in een richting loodrecht daarop.

Seismologie van sterren

Asteroseismologie is het onderzoek van sterren aan de hand van de diverse oscillaties die hun oppervlak vertoont. Veel sterren, van uiteenlopende massa's en evolutiestadia, vertonen globale oscillaties. De grote uitdaging waar sterrenkundigen voor staan is om het oscillatiespectrum – een overzicht van de verschillende golf frequenties – zodanig gedetailleerd in kaart te brengen, dat inzicht kan worden verkregen in de interne structuur van de ster, zoals dat ook bij de zon gebeurt. Met name de 'seismologie' van witte dwergsterren is zeer succesvol gebleken. Sinds enkele jaren is het echter ook mogelijk om met grote telescopen de oscillaties van zonachtige sterren te meten. Dat laatste is vooral te danken aan de spectaculaire technologische vooruitgang die werd aangemoedigd door de zoektocht naar exoplaneten. Aangezien zelfs de grootste telescopen het oppervlak van sterren nog niet ruimtelijk kunnen oplossen, zijn de mogelijkheden van asteroseismologie momenteel nog beperkt – min of meer vergelijkbaar met de begintijd van de helioseismologie. Uit de verdeling van de frequenties in het akoestische spectrum van een ster kunnen dan ook slechts twee kengetallen worden afgeleid, waarvan het ene een maat is voor de gemiddelde dichtheid van de ster en

het andere voor het heliumgehalte van de kern, dat toeneemt naarmate de ster ouder wordt. Ervan uitgaande dat andere kenmerken van de ster, zoals haar gemiddelde samenstelling, bekend zijn, kan uit het akoestische spectrum van de ster vrij nauwkeurig worden afgeleid hoe zwaar en hoe oud zij is. Naar verwachting zal deze kennis, zodra een voldoende groot aantal sterren onderzocht is, van groot belang zijn voor het onderzoek van de evolutie van sterren en melkwegstelsels.

Naarmate de metingen van steroscillaties nauwkeuriger worden, zal er ook meer informatie uit af te leiden zijn. Het is denkbaar dat ook scherpe overgangen in het sterinwendige, zoals de onderste begrenzing van de convectiezone, detecteerbaar zullen zijn. De bepaling van de ligging van de convectiezone in andere sterren is van groot belang voor de toetsing van de huidige theorie van het energietransport door convectie, die nog zeer rudimentair is. Met asteroseismologie kan ook een schatting worden gemaakt van de inwendige rotatie van een ster. Deze informatie is weer bruikbaar voor ons begrip van de activiteitscyclus van sterren en maakt een betere vergelijking van de zon met andere sterren mogelijk. Ten slotte is er nog de mogelijkheid om de ruimtelijke stand van de rotatie-as van de ster te meten, wat vooral interessant is in het geval van dubbelsterren of sterren waar planeten omheen draaien. Maar al deze boeiende mogelijkheden zijn pas uitvoerbaar als van veel sterren akoestische spectra van hoge kwaliteit zijn verkregen.

Nieuwe fase

De asteroseismologie staat aan de vooravond van een nieuwe ontwikkelingsfase die te danken is aan de

zeer geavanceerde spectrografen waarvan grote telescopen momenteel worden voorzien. Op dit moment worden de beste metingen gedaan met de HARPS-spectrograaf van de 3,6-m ESO-telescoop op La Silla en de UVES-spectrograaf van de 8-m Very Large Telescope op Cerro Paranal (beide in Chili). De meetnauwkeurigheid van beide instrumenten is echter sterk afhankelijk van de beschikbare waarnemingsduur, en die is schaars. Vandaar dat ruimtetelescopen een aantrekkelijke oplossing zijn voor het vrijwel ononderbroken verzamelen van gegevens van pulserende sterren.

Met de kleine satellieten WIRE en MOST zijn al oscillaties in de intensiteit van het licht van sterren waargenomen. Naar verwachting zullen over enige tijd nog betere fotometrische waarnemingen mogelijk zijn dankzij de Europese satelliet COROT, die eind dit jaar gelanceerd moet worden. In volgende decennia zal het vakgebied van de asteroseismologie naar verwachting nog meer vooruitgang boeken, met name door ambitieuze ruimtemissies als Kepler (NASA) en mogelijk ook Eddington of PLATO (ESA). En misschien zullen dankzij optische interferometrie vanuit de ruimte, zoals die gepland is bij het Stellar Imager-project van de NASA, de akoestische spectra van de oscillerende sterren nog veel nauwkeuriger bepaald kunnen worden. Dat is nodig ook, want sterrenkundigen willen graag zo precies mogelijk weten hoe sterren trillen en wat het verband is tussen deze oscillaties en de magnetohydrodynamische processen die zich in sterren afspelen. De Europese Commissie heeft alvast haar ondersteuning verleend aan de Helio- en Asteroseismologen in Europa in de vorm van een Coordination Action, die HELAS gedoopt werd (zie <http://www.helas.eu.org> voor verdere informatie).

Vertaling: Eddy Echternach; met dank aan Conny Aerts voor haar kritische noten.