

Zonneseismologie

R.J. Rutten

Sterrekundig Instituut, Universiteit Utrecht

De zon zingt. Beter gezegd, ze broemt. De zon trilt in een harmonisch akkoord van miljoenen tonen tegelijk, als een enorm kerkorgel met honderdduizenden pijpen. De tonen zijn geluidstrillingen met hele lage frequenties, rond 0.003 Hertz. Ze zijn opgesloten in het inwendige van de zon; het oppervlak deint mee op en neer. Door de deining te analyseren meet men de inwendige structuur van de zon. Dit nieuwe, veelbelovende vakgebied heet “helioseismologie”. Er zijn grootschalige projecten voor op poten gezet, ondermeer de bouw van een kunstplaneet die tussen de zon en de aarde zal komen. Ook het inwendige van andere sterren dan de zon kan zo worden onderzocht (“asteroseismologie”).

Geluidsgolven in de zon

De zon is een gasbol, en zoals in elk gas kunnen ook in de zon geluidsgolven zich voortplanten. Tussen de zon en de aarde kunnen ze dat niet omdat de interplanetaire ruimte vrijwel leeg is, leger dan het beste vacuüm in aardse laboratoria. Geluidsgolven binnen de zon kunnen er dus niet uit. Al rond 1950 werd geopperd dat opwekking van zonnegeluid vooral te verwachten is net onder het zonsoppervlak. Daar wordt het transport van energie verzorgd door *convectie*, het opborrelen van hete gasbellen zoals in kokend water. De zonne-energie wordt geleverd door waterstoffusie in het binnenste van de zon en reist langzaam naar het oppervlak, eerst als straling en dan door convectie, om daar te ontsnappen als het zonlicht dat wij zien. (afb. 1).

De bewegingen in de convectiezone zijn het heftigst vlak onder het zonsoppervlak; deze kunnen het meeste “lawaai” veroorzaken. Dat blijken ze ook te doen. Verrassend is dat dit lawaai vooral bestaat uit eigentrillingen van de hele zon. Tezamen vormen zij een harmonisch akkoord van miljoenen staande trillingen. Elk van deze trillingen is opgesloten in een trillholte, net zoals dat in een orgelpijp gebeurt: tussen een knoop aan het gesloten einde aan de basis van de pijp en een buik bij het open uiteinde aan de top (afb. 2).

De vijf-minuten trilling

Hoe weten we dat de zon als een orgel trilt? Het begon met een ontdekking van Robert Leighton en zijn medewerkers op de Mount Wilson Sterrewacht in Californië. In 1960 vonden zij dat het oppervlak van de zon beweegt met een typische periode

van vijf minuten. Dat gebeurt in een wanordelijk patroon, waarin stukjes zonsoppervlak van zo'n 3500 km doorsnede af en toe een reeks op-en-neer bewegingen maken met een typische uitslag van 30 km. Leighton c.s. maten deze bewegingen door de Dopplerverschuiving van spektraallijnen in het zonnespectrum te registreren. In die tijd ging dat nog met fotografische platen (afb. 3).

Dit trillingspatroon is heel warrig. Afb. 3 laat zien dat het over het oppervlak van de zon het een vlekkerige aard heeft. Afb. 4) toont de ontwikkeling ervan in de tijd langs een reepje zonsoppervlak. Elk stukje ervan beweegt op en neer met een periode van vijf minuten. De zig-zag patronen in afb. 4 hebben hellingen die men kan interpreteren als horizontale snelheid over het zonsoppervlak. De zo gemeten snelheden bedragen 50–100 km/s. Ze zijn veel groter dan de geluidssnelheid, die aan de buitenkant van de zon 7 km/s bedraagt. Dat geeft aan dat de waargenomen golfpatronen in de vijf-minuten trilling geen echte golven zijn, maar resulteren uit golfinterferentie. In een haven zie je dat soms ook, bij reflectie van golven aan een kademuur. Het snijpunt tussen twee elkaar kruisende golven kan zich veel sneller verplaatsen dan de golven zelf.

De warrigheid van de vijf-minuten trilling komt omdat niet slechts enkele maar miljoenen eigentrillingen van de zon samen interfereren. Ze versterken elkaar en doven elkaar uit; de resulterende uitslag van zo'n 30 km komt overeen met hun statistisch gemiddelde (de wortel uit het aantal trillingen maal de gemiddelde amplitude per trilling). De vijf-minuten trilling is dus niets anders dan de schijnbaar wanordelijke resultante van een in werkelijkheid heel ordelijk patroon van eigentrillingen, een harmonisch akkoord dat men gerust “zonnemuziek” mag noemen. Dit akkoord omvat echter zovél tonen dat het resultaat als lawaai overkomt.

Vondst door een computer

Het inzicht dat de vijf-minuten trilling uit eigentrillingen van de hele zon zou kunnen bestaan kwam pas tien jaar na Leighton's ontdekking van de vijf-minuten trilling, met een vondst die feitelijk door een computerprogramma werd gedaan. Roger K. Ulrich, toen student aan het California Institute of Technology, berekende zonsmodellen met daarin een gedetailleerde beschrijving van de konvektie. In zijn programma bleken eigentrillingen te ontstaan die hij eerst aan numerieke instabiliteiten toeschreef. Hij kon echter geen programmeerfout vinden en besloot tenslotte dat de eigentrillingen fysisch juist waren. Dat betekende dat ze ook in de echte zon zouden kunnen worden opgewekt.

Ulrich schreef een kort artikel met de suggestie dat zulke eigentrillingen de verklaring van de vijf-minuten trilling zouden kunnen vormen. Hij voorspelde daarin dat de lokaties in een $f - l$ diagram zoals in afb. 9 dan parabolen zouden zijn. In 1975 lukte het de Duitser F.-L. Deubner als eerste deze $f - l$ parabolen in waarnemingen van de vijf-minuten trilling op te lossen. Dat gaat pas bij metingen van voldoende lange tijdsduur (zie kader over Fourieranalyse). Afb. 5 toont het resultaat van een moderne waarneming waarin de vijf-minuten trilling van het zonsoppervlak gedurende ?? dagen werd gevolgd. Hierin zijn de parabolen van de grondtoon en de

eerste ?? boventonen goed gescheiden.

Helioseismologie

Met de identificatie van de vijf-minuten trilling als het interferentiepatroon van zo'n tien miljoen eigentrillingen werd de helioseismologie geboren. De frequenties (toonhoogtes) van de eigentrillingen worden bepaald door hun trillholtes. Men meet hun frequenties aan het meedeinen van het zonsoppervlak, maar ze verschaffen informatie over de onzichtbare lagen daaronder. De voornaamste zo meetbare parameters zijn de diepte en de gemiddelde rotatiesnelheid van elke trillholte. De steekdiepte wordt per eigentrilling bepaald door de reflectie van de bijbehorende geluidsgolf. De ombuiging (afb. 2) treedt op omdat de geluidssnelheid toeneemt met de wortel van de temperatuur; de precieze waarde van de frequentie van elke eigentrilling is daarom een maat voor de temperatuur in het diepste bereik van de trilling. De rotatie van de zon levert frequentiesplitsing in verschillende m -waarden (zie kader "De zon als orgel"); meting daarvan levert de rotatiesnelheid op van de lagen die het sterkst bijdragen aan de trilling. Omdat de dichtheid van het zonnegas naar binnen toeneemt zijn dat eveneens lagen nabij de reflectiediepte. Omdat de miljoenen eigentrillingen afhankelijk van de parameters n en l (kader "De zon als orgel") allemaal hun eigen steekdiepte hebben, variërend van zeer ondiep tot ver onder de convectiezone, is het in principe mogelijk de temperatuur en de rotatiesnelheid door de hele zon heen nauwkeurig te peilen.

De metingen van het temperatuurverloop hebben tot dusver niet tot grote verrassingen geleid, en zeker niet tot grote wijzigingen in de huidige theoriën voor steropbouw en sterevolutie. Er was twijfel aan de juistheid daarvan, omdat er reeds lang een onverklaard tekort is aan waargenomen zonneneutrino's. De frequenties van de eigentrillingen blijken echter heel goed te kloppen met de structuur van de zon zoals die eerder was afgeleid uit computerberekeningen. Dat is in feite een triomf voor de gangbare theoriën. Wat er met de neutrino's mis is blijft onduidelijk (mijn artikel in *Natuur en Techniek* hierover van twintig jaar geleden is helaas nog steeds geldig).

De inwendige zonsrotatie is interessanter. De zon wentelt niet zoals de starre aarde in haar geheel, maar bezit een *differentiële* rotatie: verschillende delen van de zon draaien rond met ongelijke omwentelingsduur. Voor het zonsoppervlak is dat al lang bekend uit waarnemingen van zonnevlekken. Bij de polen duurt de aswenteling van de zon 36 dagen, bij de equator slechts 25 dagen. Uit de seismologische metingen blijkt dat ook binnenwaarts differentiële rotatie optreedt: de lagen binnenin de zon draaien voor een groot deel langzamer rond dan de buitenkant. De nieuwste metingen laten zien dat de zon min of meer roteert alsof zij is opgebouwd uit starre cilinders (afb. 6). De rotatie van de binnenste delen van de zon is nog niet goed gemeten, maar er zijn aanwijzingen dat die weer aanzienlijk sneller ronddraaien.

De toekomst

De helioseismologische metingen van zowel de diepte als de rotatie van de trillholtes reiken tot dusver niet veel dieper dan halverwege de zon. Dat komt omdat de amplitudes van de eigentrillingen met kleine l , die het diepste reiken, erg klein zijn; de trillingen met $l > 100$ zijn sterker aanwezig. Toch is het erg interessant juist de diepere zonneroerselen te meten.

In de eerste plaats is er de hoop dat men uit zulke metingen meer te weten komt over de *dynamo* in de zon. Dat de zon een dynamo heeft staat buiten kijf, omdat ze een sterk magnetisch veld bezit. Het is echter volstrekt onduidelijk hoe deze dynamo werkt. Het magneetveld dat we aan de oppervlakte van de zon zien uitbreken is zeer ingewikkeld. Het bestaat vooral uit *fluxbuizen*, dunne sliertjes van zeer sterk magnetisch veld (0.15 Tesla = 1500 Gauss. vergelijk dat met het aardmagneetveld dat onze kompassen richt. Dat is zelfs bij de magnetische polen maar 0.6 Gauss). Deze fluxbuizen klonteren op het oppervlak samen tot actieve gebieden en zonnevlekken. In de meer naar buiten gelegen chromosfeer en corona zorgen ze voor allerlei structuren (protuberansen, filamenten, spikulen, coronale lussen) en voor spectaculaire processen en explosies zoals zonnevlammen. De totale hoeveelheid magnetisch veld op het zonsoppervlak wisselt met de bekende elfjarige cyclus, waarin de magnetisch activiteit sterk stijgt en daalt. Daarin wordt ook de gemiddelde polarisatierichting omgepoold, met wisseling van teken tussen noordelijk en zuidelijk zonnehalfrond. Deze magnetisch bepaalde verschijnselen vormen de hoofdmoot van het moderne zonneonderzoek, dat daarmee een sterk plasmafysische inslag heeft gekregen. Het is daarin zaak beter begrip te krijgen over de onbekende dynamo in het zonsinwendige die voor dit alles zorg draagt.

Verder is het interessant de structuur van de zon te bepalen in het radiatieve inwendige onder de convectiezone, waarin het energietransport door straling wordt verzorgd. Ook is meting van het temperatuursverloop wenselijk in de binnenste delen van de zon, waarin de kernfusiereacties optreden. Zoals hierboven gezegd is het klassieke probleem van de missende neutrino's daarvandaan og steeds niet bevredigend beantwoord.

Tenslotte kan men niet alleen de frequenties (= temperatuur onderkant trillholte) en de frequentiesplitsingen (= rotatie onderkant trillholte) meten van de eigentrillingen, maar ook de trillingsterkten. Deze worden bepaald door alle processen die de excitatie en de demping van de trillingen beïnvloeden. De precieze wijze waarop de eigentrillingen worden aangeslagen en afgestopt kan ons veel leren over de convectieve bewegingen en hun interactie met het magnetisch veld in de zon.

Het accent in het onderzoek verschuift daarom nu naar het met grote precisie meten van trillingen met lage l , en vooral van die met langere perioden dan vijf minuten. De reden om naar de laatste te speuren is dat men voor $f < 0.002$ Hz mag verwachten de zogenaamde *g*-modes aan te treffen. Dit zijn eigentrillingen waarin niet de gasdruk maar de zwaartekracht de terugwerkende kracht is die een verstoring in golfbeweging omzet. De golven op zee zijn een speciaal (want oppervlakkig) voorbeeld van zulke zwaartegolven; *interne* zwaartegolven komen binnenin onze oceanen

ook voor. Ze veroorzaken zeer grootschalige golfpatronen met geringe golfhoogte, die alleen met satellieten meetbaar zijn. Ook in de aardse dampkring bestaan interne zwaartegolven. In de zon kunnen zulke g -trillingen niet bestaan binnen de convectiezone waarin de geluidstrillingen juist worden opgewekt, maar wel binnen het radiatieve inwendige. Hun ontdekking (als ze inderdaad bestaan, en mits ze de convectieve buitenkant van de zon voldoende optillen dat het oppervlak meetbaar beweegt) zal een grote stap voorwaarts betekenen in de zonneseismologie.

Tenslotte wordt er reikhalzend uitgekeken naar *asteroseismologie*, het doen van vergelijkbare metingen aan andere sterren dan de zon. Omdat alle andere sterren ook in de grootste telescopen nog puntvormig worden afgebeeld, kan men hiervan alleen de trillingen met heel lage graad l meten. Voor deze eigentrillingen geldt dat niet te veel golfdalen en bergen over het niet-opgeloste steroppervlak elkaar uitdoven. Zulke stellaire metingen zijn heel moeilijk omdat er, in vergelijking tot de zon, zo weinig fotonen beschikbaar zijn. Asteroseismologie is vanaf de aarde vrijwel ondoenlijk omdat de aardse dampkring de metingen sterk verstoort. De Europese ruimtevaartorganisatie ESA onderzoekt momenteel de mogelijkheid om asteroseismologie vanuit de ruimte te bedrijven.

Literatuur

Herbert Friedman: *Zon en Aarde*. Wetenschappelijke Bibliotheek Natuur & Techniek, 1989

R.J. Rutten, 1972, *Natuur en Techniek*, vol. 8, 427

C.J. Schrijver, *Zenit* jaargang 18, pag. 269, 1991

Figuren

Figuur 1: Het inwendige van de zon. In de binnenste delen (de eerste 10% van de straal) treden de kernfusie-reactieketens op waarin waterstof in helium wordt omgezet. Daaraan ontleent de zon de energie die aan het oppervlak als straling wordt uitgezonden. Deze energie diffundeert langzaam naar buiten, eerst als fotonen gamma- en Röntgenstraling dan middels convectie (buitenste derde deel). De heftige borrelbewegingen van het gas in de convectieve zone slaan eigentrillingen van de hele zon aan. Door deze te meten kan men de structuur van het inwendige van de zon bepalen. Dit is *helioseismologie*.

Opengewerkte schematische doorsnede van de zon.
Voorbeeld: Scientific American September 1985, pag 36, maar met weglating giant cell, supergranulation etc.
Eventueel opnieuw tekenen. Er zijn echter ook mooie kleurenplaten met zo'n opengewerkte zon. Eentje daarvan zou een geschikte openingsplaat zijn. Onderschrift dient dan aan opname te worden aangepast.

Figuur 2: De paden die geluidsgolven in de zon afleggen. De golffronten staan hier loodrecht op. Geluidsgolven die van binnen naar buiten lopen worden aan het zonsoppervlak gereflecteerd door de sterke dichtheidsafname van het gas bij het zonsoppervlak. Naar binnen lopende geluidsgolven worden omgebogen door de inwaartse temperatuurstijging. Zo worden geluidsgolven in de zon opgesloten in een trilholt. Alleen die golven die rondom de zon op zichzelf passen blijven over; dit zijn "resonante" eigentrillingen. De andere doven uit door interferentie.

Figuur zoals op p. 39 Scientific American, pag 273 Zenit, p. 38 Crieff Proceedings.
Valt goed zelf te tekenen (Crieff rondom?).
Eventueel schets erbij van golven die elkaar versterken / uitdoven.

Figuur 3: De oorspronkelijke opname waarmee in 1960 de vijf-minuten trilling werd ontdekt. Deze foto van de zon toont niet de intensiteit van het zonsoppervlak maar de snelheid ervan. Lichte plekken op deze opname bewegen naar ons toe, donkere van ons af. De opname werd gemaakt door de Dopplerverschuiving van een spektraallijn in het zonlicht te registreren. Met deze foto bleek het zonsoppervlak in een onregelmatig patroon te bewegen.

Zwart-wit foto uit *Astrophysical Journal* 1960. Ik heb een dia.
Referentie: Leighton, Simon & Noyes 1962 *Astrophys J.* vol 135, p 474.
Toestemming vragen.

Figuur 4: Een registratie die de typische ontwikkeling van de vijf-minuten trilling in de tijd toont. De foto toont opwaartse snelheid (naar de waarnemer toe) als wit, neerwaartse snelheid donker. De snelheden zijn gemeten langs een lijn over het zonsoppervlak, hier horizontaal uitgezet. Vertikaal staat de tijd. Het trillingspatroon is warrig omdat verschillende delen van het oppervlak langs de lijn niet in fase bewegen. De gordijnachtige zig-zag patronen zijn typerend voor interferentie van trillingen. Hun onderlinge afstand in verticale richting bedraagt doorgaans vijf minuten. Soms is een extra sterke strilling zichtbaar, op andere plaatsen en/of tijdstippen juist minder.

Zwartwit foto. Dia heb ik, afdruk ook.
Eigen werk, nog niet elders gepubliceerd
(komt waarschijnlijk in *Astrophysical Journal*).
Asbijschriften moeten vertaald worden.

(KADER) De zon als orgel

In de zon vormt het oppervlak een open uiteinde voor geluidsgolven die naar buiten lopen, terwijl binnenwaarts lopende golven worden omgebogen door de inwaartse

Figuur 5: Een waargenomen $f - l$ diagram. Hier is de waargenomen vijf-minuten trilling ontrafeld in frequentie f en graad l . De intensiteit in de figuur geeft de sterkte van de betreffende trilling weer. De parabolen die de eigentrillingen van de zon kenschetsen zijn hier zeer duidelijk gescheiden. De waarneming werd verkregen met een zonneteleskoop op Hawaii gedurende ?? achtereenvolgende dagen; de lange duur van deze meetreeks resulteert in zeer goede scheiding tussen de parabolen.

Kleurenfoto die ik als nieuwjaarskaart een jaar geleden kreeg.
Aan te vragen Hawaii, bij ??
Anders gewone grafiek, van Libbrecht + Woodard *Nature* 345 779
(en dan kan theoretische $f-l$ plot weg)

Figuur 6: De differentiële rotatie van de zon zoals die volgt uit recente helioseismologische metingen. De zon roteert cilindergewijs: de oppervlakken van gelijke omloopsduur hebben ruwweg de vorm van cilinders, evenwijdig aan de rotatieas.

Nature, Libbrecht et al, twee jaar terug of zo.
Zie inleiding proefschrift Jos van Geffen.

Figuur 7: De mathematische beschrijving van bolpatronen, waarin ook de zonnetrillingen worden ontleed. De drie parameters n , l en m beschrijven de mogelijke eigentrillingen van een bol. Het getal n is het aantal knopen in radiële richting; l en m geven de verdeling over het boloppervlak.

Bollen met n, l, m patronen.
Zwartwit of kleur.
Te verkrijgen van J.W. Harvey, National Solar Observatory, Tucson.
Voorbeeld: Sf American september 1985 p. 34 en 40
Deze figuur is (inderdaad) essentieel!
Bij kader "De zon als orgel".

temperatuurstijging (afb. 2). Met toenemende temperatuur planten geluidsgolven zich sneller voort. Golfvronten worden daarom omgebogen: de onderkant van een scheef naar beneden lopend golfvront steekt dieper en loopt sneller dan de bovenkant. De zo aan het oppervlak en in het inwendige gereflecteerde golven interfereren met elkaar. Door versterking en uitdoving blijft een patroon van staande golven over, met een of meer knopen en buiken onderweg. Zulke interferentie is er radieel, en ook horizontaal rondom de zon.

De golfpatronen van de eigentrillingen worden gekarakteriseerd door drie gehele getallen, n , l en m . Het getal n meet het aantal knopen tussen het oppervlak en de reflectiediepte in het inwendige. Dit getal is vergelijkbaar met het aantal knopen langs een orgelpijp die de harmonische reeks daarvan bepalen (de grondtoon en de

Figuur 8: In een orgel worden de buitenste, zichtbare pijpen door de orgelbouwer gerangschikt in smaakvolle patronen. De zon doet dat ook. Elk stukje ervan is deel van vele "orgelpijpen" die rondom de zon zijn gerangschikt in de fraaie patronen van afb. 7. Deze voldoen aan de voorwaarde dat golven na een rondgang om de zon met zichzelf in de pas lopen.

Een kleurenfoto van een mooi orgel. Overbodig maar niet
al te ontoepasselijk.

Figuur 9: Theoretisch $f - l$ diagram. De frequentie f staat vertikaal uitgezet, tegen horizontaal de graad l . De laatste is gelijk aan het aantal knopen rondom de zon. De eigentrillingen van de zon zijn in dit diagram gerangschikt volgens parabolen volgens de radiële orde n , met van onder naar boven $n = 0$, $n = 1$ enz. Langs elke parabool neemt l naar rechts toe.

Theoretisch f-l diagram met parabolen
 Voorbeeld: Schrijver, Zenit, p. 273
 Halen uit Ando en Osaki? Jack Harvey?
 Bij kader "De zon als orgel".

opstapeling van boventonen: oktaaf, oktaaf + kwint, oktaaf + kwint + kwart, oktaaf + kwint + kwart + grote terts, enz).

De getallen l en m bepalen het aantal golven en dalen rondom de zon. Rondom de zon is er ook interferentie; een vast patroon van staande golven komt alleen te voorschijn voor die golven die na een hele omloop met zichzelf in de pas lopen. De verdeling over de bol wordt door l en m beschreven als dambordvelden, sinaasappelpartten en/of breedteringen, met l het aantal knopen rondom de zon (afb. 7).

Bij elke eigentrilling (n, l, m) hoort een specifieke trilhoute. Voor alle trilhoutes vormt het zonsoppervlak een open uiteinde, maar de diepte waarop de inwendige reflectie plaats vindt hangt af van de schaalgrootte van de golf. Hoe groter het stuk zonsoppervlak dat op en neer golft, hoe dieper de denkbeeldige orgelpijp steekt. De golven met kleine l , die maar enkele bergen en dalen rondom de zon hebben, komen het diepst, tot ver onder de convectiezone.

Iedere eigentrilling (n, l, m) heeft een specifieke bijbehorende frequentie f (toonhoogte). Deze meet het aantal trillingen per seconde (Hz) en is het omgekeerde van de periode P : $f = 1/P$. Afb. 9 toont de frequenties van vele (n, l) combinaties. De lokaties van de mogelijke trillingen in dit $f - l$ diagram liggen op parabolen die met n genummerd zijn. De onderste parabool is de grondtoon met $n = 0$, de eerstvolgende heeft één knoop onderweg ($n = 1$), enz. Bij een orgelpijp wordt frequentie in de oktaafsprong van $n = 0$ naar $n = 1$ precies verdubbeld (met een extra knoop halverwege de pijp), maar in de zon is de frequentietoename van $n = 0$ naar $n = 1$ kleiner omdat de temperatuur en daarmee de geluidssnelheid inwaarts sterk toenemen.

Langs elke parabool zijn de mogelijke eigentrillingen met de graad l genummerd. Omdat de zon draait worden deze ook nog in een aantal met m gemerkte subtonen gesplitst. Hiervan liggen de frequenties heel dicht bij elkaar. Ze zouden samenvallen als de zon niet draaide, omdat er dan geen verschil is tussen golven die met de rotatie mee lopen en degenen die daar juist tegen in bewegen. De parabolen lopen naar rechts op omdat eigentrillingen die minder diep steken (grotere l) alleen hetzelfde aantal knopen kunnen hebben tussen zonsoppervlak en steekdiepte bij kortere golflengte, dus bij grotere frequentie f .

De zon trilt op al deze frequenties. De trillingen met frequentie $f \approx 0.0033$ Hz

(periode $P \approx 300$ s) zijn het sterkst. Per trilling beweegt het zonsoppervlak maximaal zo'n vijftig meter op en neer, met hooguit 20 cm/s snelheid.

(KADER) Meting van oppervlakte-deining

In de helioseismologie en de asteroseismologie registreert men de deining van het oppervlak van een ster die veroorzaakt wordt door de interferentie van zeer veel eigentrillingen. Het ontrafelen van de interferentiepatronen gaat met Fourieranalyse en vereist meetreeksen van heel lange meetduur (zie kader Fourieranalyse). Hoe gaat het meten zelf in zijn werk?

Er zijn twee verschillende meetprincipes: men meet de verticale golfsnelheid van het oppervlak door middel van het Dopplereffekt, of men meet de veranderingen die de golven teweeg brengen in de intensiteit van de uitgezonden straling. Beide signalen zijn klein. De modulatie die de vijf-minuten trilling aanbrengt in de helderheid van het zonlicht bedraagt slechts enkele miljoenen daarvan. Slechts in nauwkeurige metingen gedurende lange tijdsduur, waarover de stoorsignalen wegmiddelen, komen de eigentrillingen te voorschijn. Dat is ondermeer gedaan met het ACRIM-instrument aan boord van de Solar Maximum Mission. Meting vanuit de ruimte maakte het daarbij mogelijk de vereiste nauwkeurigheid van $1 : 10^7$ te halen. Voor telescopen op de grond staat de onrust in de aardatmosfeer dat niet toe.

FIGUUR: foto Solar Maximum Mission (SRON-ROU Utrecht)
FIGUUR: foto ACRIM instrument? (Hugh Hudson, San Diego)
FIGUUR: registratie ACRIM instrument? (Hugh Hudson, San Diego)

In Dopplermetingen volgt men het heen en weer schuiven van een spektraallijn, waarvan de golflengte verandert met de snelheid van de laag waarin de lijn ontstaat. De Dopplerverschuiving wordt gegeven door de formule $\lambda - \lambda_0 = \lambda_0(v/c)$, waarin λ de gemeten golflengte is, λ_0 de rustgolflengte die de spektraallijn zou hebben als de laag niet op en neer beweegt, v de snelheid is in de gezichtsrichting, en c de lichtsnelheid (300,000 km/s). De gemeten snelheid dient gecorrigeerd te worden voor de snelheidscomponenten van de zonsrotatie en de aardrotatie langs de gezichtslijn, en wordt ook beïnvloed door de aardatmosfeer en door andere bewegingen in het zonnegas.

In de metingen waarmee Leighton en de zijnen in 1960 de vijf-minuten trilling ontdekten werd een gewone zonnepetrograaf gebruikt om de Dopplerverschuiving te meten. Hun truc was dat ze dat deden voor grote delen van het zonnepoppervlak tegelijk, met een slimme fotografische techniek om de lijnverschuiving om te zetten in zwarting op de plaat (afb. 3). Ook Deubner's metingen, waarin voor het eerst de parabolen in het $f - l$ diagram werden opgelost, werden met een normale zonnepetrograaf verricht. Tegenwoordig gebruikt men speciale apparatuur voor Dopplermetingen die veel betere nauwkeurigheid, met name stabiliteit biedt, dan de klassieke spektrografen. Het gaat hierbij om resonantiecellen en Michelson-interferometers.

In resonantiecellen wordt zonlicht toegevoerd aan een klein glazen vat waarin zich kalium- of natriumgas bevindt dat de kaliumlijnen of de natriumlijnen in het zonlicht kan absorberen. Om de cel wordt een sterke magneet geplaatst die Zee-

mansplitsing levert van deze absorptie. Daarmee worden twee “voelertjes” geschapen in het zonlicht waarmee de verschuiving van de zonnelyn nauwkeurig kan worden geregistreerd. De stabiliteit van zulke metingen is uitzonderlijk hoog ($1 : 10^{11}$) omdat de grootte van de golflengtesplitsing tussen de twee absorptiepieken alleen wordt bepaald door de sterkte van de magneet, en die verandert niet.

In Michelson-interferometers wordt zonlicht gemengd met een laserlijn. Het principe lijkt op de techniek die een pianostemmer gebruikt als hij de spanning van een snaar regelt door naar zwevingen tussen twee noten te luisteren. De interferometer vertaalt het golflengteverschil tussen een spectraallijn in het zonlicht en de laserlijn in modulatie van de uittredende intensiteit. Bij Dopplerverschuiving van de spectraallijn verandert de intensiteitszweving in fase. Zulke faseveranderingen kunnen zeer nauwkeurig gemeten worden.

FIGUUR: schema werking resonantiecel
FIGUUR: foto resonantiecel? van Eric Fossat, Observatoire Nice
FIGUUR: schema Michelson? wat te technisch, denk ik
FIGUUR: foto GONG tachometer = Michelson. Van Harvey, Tucson.

Naast de eis van grote meetnauwkeurigheid is er ook de Fourier-eis van lange meetduur (zie kader over Fourieranalyse). Bij een gewone zonnetelescoop heeft men al snel problemen met de beperkte daglengte. Een meetduur van hooguit een uur of twaalf (op 21 Juni, en zonder enige bewolking!) is nog veel te kort voor het nauwkeurig meten van lage l geluidstrillingen en hoge- f zwaartetrillingen waar men zich nu vooral op concentreert. Hoe krijgt men een langere meetduur? Er zijn drie mogelijkheden: Antarctica, netwerken rondom de aarde, en ruimtetelescopen.

Vanaf Antarctica wordt al jaren helioseismologie bedreven. Op de Scott-Amundsen basis op de zuidpool draait in de zuidelijke zomer (onze winter) de zon op vaste hoogte boven de horizon rond. De atmosfeer is er vaak stabiel, zonder waterdamp die door de lage temperatuur is uitgevroren. Perioden van ononderbroken zonnenschijn van honderd uur komen regelmatig voor. Hier zijn, met bescheiden telescopen, door Franse en Amerikaanse onderzoekers resultaten van hoge kwaliteit verkregen.

FIGUUR: foto teleskoop Antarctica (J. Harvey, Tucson)
FIGUUR: Scott-Amundsen basis (G. Konnen, KNMI)
FIGUUR: power spectrum = resultaat zuidpool data

De tweede oplossing is netwerken van telescopen rond de aarde te bouwen, zó dat de zon altijd wel in tenminste één telescoop waarneembaar is. De Franse en Engelse helioseismologen hebben al zulke netwerken in bedrijf; deze werken respectievelijk met natrium- en kaliumresonantiecellen. Een bijzonder ambitieus netwerk wordt momenteel voltooid door het National Solar Observatory in de VS. Het heeft een toepasselijk acronym (GONG = Global Oscillations Network Group) en zal bestaan uit zes geheel geautomatiseerde telescopen op de beste lokaties op aarde,

elk voorzien van een Michelson-interferometer. Het zal beginnen met registreren in 1994, en zal per jaar maar liefst een terabyte data per jaar leveren (1 Tbyte = 10^6 Mbyte).

FIGUUR: kaartje aarde met verdeling GONG stations (Harvey)
FIGUUR: foto GONG station in Tucson (dia van mij, anders Harvey)

Tenslotte is het natuurlijk het beste (maar ook het duurste) om helioseismologie vanuit de ruimte te bedrijven. Dit zal gebeuren met een stoutmoedig project waarin de Europese ruimtevaartorganisatie ESA de hoofdrol speelt. Dit is de SOHO-missie, waarmee men beoogt een kunstplaneet te plaatsen in het punt tussen aarde en zon waar de zwaartekracht van de aarde juist wordt gecompenseerd door die van de zon. Daarin zal de SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) met de aarde méé om de zon bewegen, in ononderbroken zonschijn en zonder de storende heen-en-weer beweging van satellieten die om de aarde draaien. De Dopplerverschuivingen die met de baan samenhangen zijn daar minimaal. SOHO zal helioseismologie bedrijven met een natrium-resonantiecel van Frans-Britse makelij en een door NASA te leveren Michelson-interferometer van Stanford University. De lancering zal, als alles goed gaat, in 1995 plaats vinden.

FIGUUR: ontwerptekening SOHO - V. Domingo - ESTEC
FIGUUR: baan en Lagrange-punt L1 plaats van SOHO, met Lissajous figuren (uitleggen in onderschrift)
Ook van Domingo, Estec.

(KADER) Fourieranalyse: transformatie en resolutie

Fourieranalyse is de wiskundige manier om te beschrijven wat elke muzikliefhebber zonder moeite doet: instantane amplitudepatronen ontleden in golfcomponenten. Als je naar een muziekstuk luistert volgt je trommelvlies de amplitudo van de drukgolven die je oor bereiken: op elk moment is dat slechts één enkele uitslag. Toch ben je al luisterend in staat om daar een mengeling van toonhoogtes in te onderscheiden. Dat is Fouriertransformatie.

Een beroemde stelling van Fourier zegt dat je elk signaal, mits continu aanwezig, tot op willekeurige nauwkeurigheid kunt beschrijven als een som van sinussen en cosinussen. Een rechthoekige blokfunctie, bijvoorbeeld, kan heel precies benaderd worden door een som van sinussen met afnemende golflengte. Fouriertransformatie is het ontleden van een gegeven signaal in zulke sinusoidale componenten. Dat is hetzelfde als toonhoogtes onderscheiden in geluid.

De eis van continuïteit is nodig omdat voor voldoende grote precisie een voldoende groot aantal metingen nodig is. In de muziek is dat direkt duidelijk: alleen van een lang aangehouden toon hoor je de hoogte precies. De hoboïst die een a blaast om het orkest te laten stemmen houdt z'n a heel lang aan. Een paukeslag is veel moeilijker te intoneren.

In de helioseismologie houdt deze eis in dat zeer langdurig gemeten moet worden. Scheiding van de parabolen in het $f-l$ diagram (afb. 9) en preciese meting van de frequenties van de eigentrillingen van de zon vereisen metingen die de lengte van de dag ruim te boven gaan. DE GONG en SOHO projekten mikken op meetduren van minstens een vol jaar.

FIGUUR: allerlei figuren en figuurtjes zijn hierbij mogelijk.

Is er niet al eens een kader over Fouriertransformatie in Natuur en Techniek geweest? Vast wel. Daar moet dan uit te putten te zijn, of op z'n minst naar te verwijzen.
