

De zon zingt

Inleiding: zonnezang

Bij alle speculaties over de harmonie der sferen en over de fraaie akkoorden wellicht voortgebracht door de beweging der hemellichamen in hun baan, heeft niemand zich bij mijn weten ooit druk gemaakt over de harmonische voortbrengselen van de grootste en de meest sferische sfeer van allemaal, de zon. En dat terwijl de zon zingt! Sfeer-vol, ter luider stemme, klinkend als een klok, in een harmonisch akkoord van onvoorstelbare diepgang en omvang, met ruimtelijke harmonieën die zelfs in onze kathedraalorgels afwezig zijn, en dat alles als blijk van haar welzijn en levenslust.

Pas nu wordt haar zingen door de mensheid geapprecieerd. Momenteel wordt haar zang geregistreerd met speciale apparatuur geplaatst op de zuidpool, bouwt NSO (het *National Solar Observatory* van de VS) een netwerk van zonnezangtelescopieën rond de aarde, toepasselijk “GONG” geheten, en bouwt ESA (de *European Space Agency*) de “SOHO” kunstplaneet die vanuit het Lagrangepunt tussen zon en aarde ook de laagste akkoorden moet beluisteren.

Dit nieuwe vakgebied heet *helioseismologie*. Ik introduceer het in dit artikel vanuit historisch perspectief. Dat doe ik uitvoerig omdat de ontwikkeling van dit vakgebied heel typerend is voor de evolutie van astrofysisch inzicht. De fatsoenlijke wiskundige gang van zaken met achtereenvolgens de probleemstelling, de oplosmethode, het bewijs en tenslotte de verifieerbare voorspelling komt daarin doorgaans nauwelijks aan bod. In de astrofysica nog minder dan in de aardse natuurkunde omdat in de sterrekunde de reductionistische aanpak veel minder goed opgaat. Een astronoom moet zijn onderzoeksobject nemen zoals het is, met alles erop en eraan, inclusief de hele barokke rijkdom aan bizarre verschijnselen die de natuur weet te genereren. Isolatie van een enkel fenomeen of deelaspect is vaak onmogelijk en de werkwijze is altijd indirect; je kunt niet allerlei grootheden vastpinnen en dan een thermometer in je onderzoeksobject steken om het effect van een gecontroleerde parameterverandering te meten. Waar het aan de natuurkundige is om een veelvoud van verschijnselen te versimpelen tot elementaire deeltjes en basisvergelijkingen, is het aan de astrofysicus om te begrijpen hoe en waarom de natuur uit zulke eenvoudige bouwstenen zulke complexe verschijnselen tovert.

Deze rol van de astrofysica is tevens de lol ervan: de waargenomen verschijnselen zijn vrijwel altijd complexer en fantasierijker gesmeed dan enige theoretische voorspeller had durven opperen. Zo ook hier. Zelfs de achteraf best wel voor de hand liggende veronderstelling dat de zon resonant in haar uppie staat te orgelen werd pas gemaakt toen een computer dat ongevraagd uitrekende. Zelfs daarna duurde het nog jaren voor het zonnezingen als muziek, i.e. als geluid met structureel aangebrachte harmonie, werd herkend.

Ontdekking

De geschiedenis van de helioseismologie begon, of eigenlijk niet, met de ontdekking door Plaskett in 1954 van een golfvormig snelheidspatroon dat de granulatie van het zonsoppervlak overdekt. Hij mat Dopplerverschuivingen van spectraallijnen met een typische horizontale golflengte van 5 bgsec ($1 \text{ bgsec} = 0.001R_{\odot} = 725 \text{ km}$ op de zon) en een amplitude van 0.5 km/s. Zoals ook het geval is met andere ontdekkingen uit Oxford uit die jaren bleef deze vondst echter totaal onopgemerkt. Waarom? Plaskett's artikel is niet duidelijk; follow-up en interpretatie bleven uit; bovenal, de vondst werd niet “verkocht”.

Dat gebeurde wel met de herontdekking door Leighton, Noyes en Simon op Mount Wilson in 1960, onmiddellijk en met voldoende ophef door Leighton geadverteerd in het vierde *Cosmical Gas Dynamics* symposium (IAU Symposium 12, p. 321). Dit symposium, onder Minnaert's voorzitterschap, was deel van een door Burgers en Oort begonnen serie die diende om juist dit soort fenomenologische vondsten uit de astrofysica fysisch te ordenen, en derhalve was dit hét gezelschap om de nieuwe ontdekking van het predikaat “belangrijk” te voorzien.

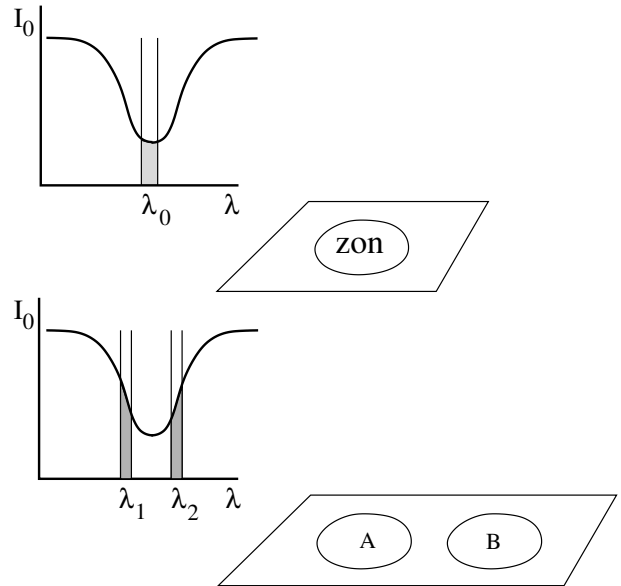
Belangrijk was de ontdekking zeker. De wijze waarop hij tot stand kwam was ingenieus. De meesterhand van Leighton, co-auteur van de *Feynman Lectures* en later teamleider voor de Voyager fly-by's, verraadt zich in de fantasie en het perfectionisme waarmee stokoude fotografische technieken werden omgesmeed tot analoge beeldverwerkingstechnieken waarvan de digitale versies pas nu, met CCD's en krachtige workstations, gemeengoed worden: optellen, aftrekken en correleren van beelden. Leighton en zijn promovendi deden dit fotografisch,

met spectroheliogrammen van maar liefst 10000×10000 pixels op glazen platen. Het was een zeer productieve techniek. Ik beschrijf haar hier in detail om de gedachte te ontzenuwen dat fatsoenlijke beeldverwerking nu pas mogelijk is.

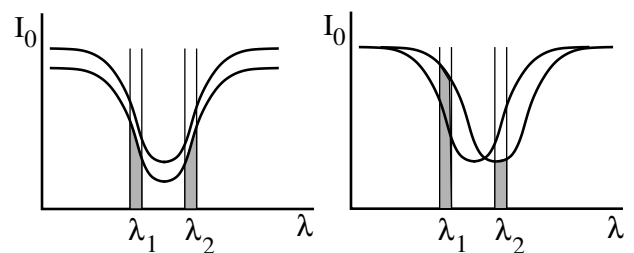
Leighton's methode

Spectroheliogrammen zijn monochromatische opnamen van de zon, gemaakt in het licht van een spectraallijn. Ze worden verkregen door een smalle spleet in het focus van een spectrograaf te plaatsen, loodrecht op de dispersierichting en evenwijdig aan de ingangsspleet waarop de zon met een telescoop wordt afgebeeld. De intreespleet wordt door de spectrograaf afgebeeld op de analysespleet: die selecteert een monochromatisch beeld, op de gekozen golflengte, van een lijnvormige uitsnede van de zonnenschijf. Als het zonsbeeld dwars over de ingangsspleet wordt verschoven terwijl synchroon een fotografische plaat dwars achter de analysespleet verschuift wordt zo op de plaat lijn na lijn een monochromatisch beeld van de zon opgebouwd. Verschillende spectraallijnen leveren daarbij verschillende beelden omdat hun vormingshoogte in de zonneatmosfeer varieert: hoe sterker de absorptie in de lijn, des te moeilijker ontsnappen de fotonen en des te hoger in de atmosfeer wordt de vrijkomende straling gevormd.

Leighton et al. perfectioneerden deze techniek. Ze spectroheliografeerden de zon in allerlei verschillende spectraallijnen en ze experimenteerden ook met een versie waarin met twee analysespleten in het spectrum twee monochromatische zonsbeelden tegelijk werden opgebouwd, voor twee verschillende golflengtes naast elkaar op één plaat. Daarvoor kozen ze de twee flanken van een tamelijk smalle spectraallijn. Eerst deden ze dat om de Zeemansplitsing van magnetisch gevoelige lijnen te bepalen, maar naderhand werden magnetisch ongevoelige lijnen gebruikt voor radiële snelheidsbepaling. Als het gas in de laag waar de lijnflanken ontstaan beweegt in de gezichtsrichting verschuift de spectraallijn volgens het Dopplereffect. Dat levert intensiteitsveranderingen van het door een in een lijnflank geplaatste analysespleet doorgelaten licht, en dus zwartingsveranderingen op elk spectroheliogram. Maar ook de intensiteitsveranderingen die de zon zelf over haar oppervlak toont, vooral de kleinschalige granulatie, leveren lokale zwartingsveranderingen. Hoe ze te scheiden? Leighton c.s. maakten contactposities waarbij zorgvuldig de emulsiesteilheidsindex γ op 1 werd gehouden. (Controle: negatief en positief tezamen levert een egaal grijs beeld.) Dan werd het eerste spectroheliogram, i.e. het in de blauwe lijnflank genomen negatief, geplaatst op het contactpositief van het heliogram voor de rode flank, en een nieuwe contactplaat werd door beide platen heen belicht. Helderheidsverschillen die voor beide heliogrammen gelijk zijn vallen dan weg. De zwartingsveranderingen die het ge-

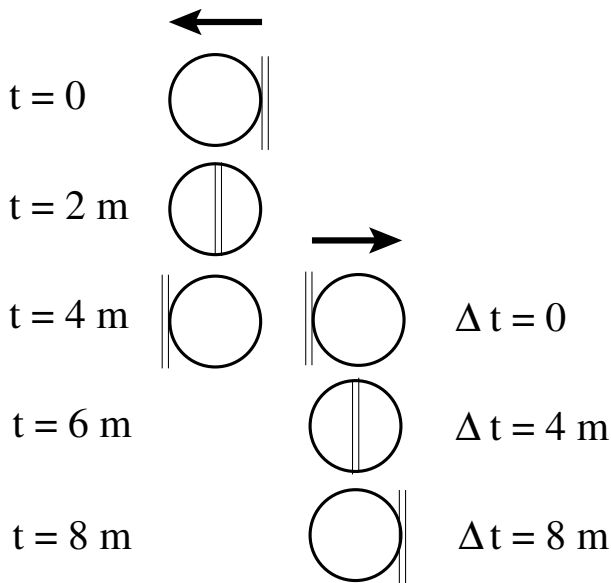


Figuur 1: Spectroheliograaf met bundelsplitsing. Boven: een spectroheliograaf levert een foto van de zon in een smalle spectrale band, hier in de kern van een spectraallijn. Het zonsbeeld wordt beeldlijn voor beeldlijn opgebouwd door de ingangsspleet van de spectrograaf over het zonsbeeld te laten scannen terwijl de uitgangsspleet die de gekozen smalle spectrale band doorlaat synchroon over de fotografische plaat schuift. Onder: met een bundelsplitser na de ingangsspleet worden gelijktijdig twee spectroheliogrammen verkregen, respectievelijk voor een golflengtebandje in de rode vleugel en voor een golflengtebandje in de blauwe vleugel van de gekozen lijn.



Figuur 2: Aftrekking van vleugelintensiteiten. Links: variatie in de intensiteit van de zon, bijvoorbeeld door de granulatie, verandert de hoeveelheid licht door beide spleten even veel, $I_1 - I_2$ niet. Rechts: Dopplerverschuiving geeft tegengestelde verandering voor de twee spleten. De hier geschetste roodverschuiving levert positieve $I_1 - I_2$.

volg zijn van Dopplerverschuivingen van de spectraallijn blijven echter behouden: bij een blauwverschuiving (beweging van een stukje zonsoppervlak naar ons toe) vermindert de opvallende intensiteit en dus de zwarting van het blauwe heliogram terwijl de intensiteit en de zwarting van het rode heliogram toenemen. Met de omkering van



Figuur 3: Dopplerverschil- en Dopplersomgram.

Links: een Dopplergram wordt gemaakt door de zon in vier minuten van rechts naar links te scannen met de ingangsspleet van de spectrograaf. De zo verkregen spectroheliogrammen in de blauwe en rode lijnflanken worden fotografisch afgetrokken tot een Dopplergram.

Rechts: na vier minuten wordt vliegensvlug de scanrichting omgedraaid en de belichte plaat door een nieuwe vervangen. Een nieuw Dopplergram wordt dan vervaardigd met tegengestelde scanrichting over de zon. De twee resulterende Dopplergrammen zijn bemonsterd met een tijdsverschil dat oploopt van bijna nul minuten links tot acht minuten rechts. Fotografisch optellen en aftrekken levert respectievelijk een Dopplersomgram en Dopplerverschilgram.

de tweede plaat tellen deze veranderingen derhalve op. Zo'n Dopplergram is dan een foto waarop egaal grijs die delen van het zonsoppervlak markeert die niet in de gezichtsrichting bewegen, terwijl witte en zwarte plekken signaleren dat daar ter plekke op de zon het gas op het moment van de belichting van dat deel van de plaat naar de waarnemer toe of van haar af beweegt.

De Dopplergrammen toonden een snelheidsveld in overeenstemming met Plaskett's vondst: een patroon van stijgende en dalende plekken van ruwweg 5 bgsec diameter. Dit vlekkerige patroon is te zien op het midden van de zonnenschijf, dus daar waar de gezichtsrichting radieel is. Naar de zonsrand toe verdwijnt het patroon, dus is de beweging vooral verticaal. (Nabij de rand ontdekten ze een heel ander, grover patroon van cellen in de horizontale bewegingen, de *supergranulatie*. Die vondst vormt een verhaal apart.)

Vervolgens herhaalde Leighton dezelfde truc om de evolutie van het zo gevonden snelheidsveld te bestuderen. De tijd die nodig was om het hele zonsbeeld over de ingangsspleet te laten schuiven zó dat er een goed gedekt

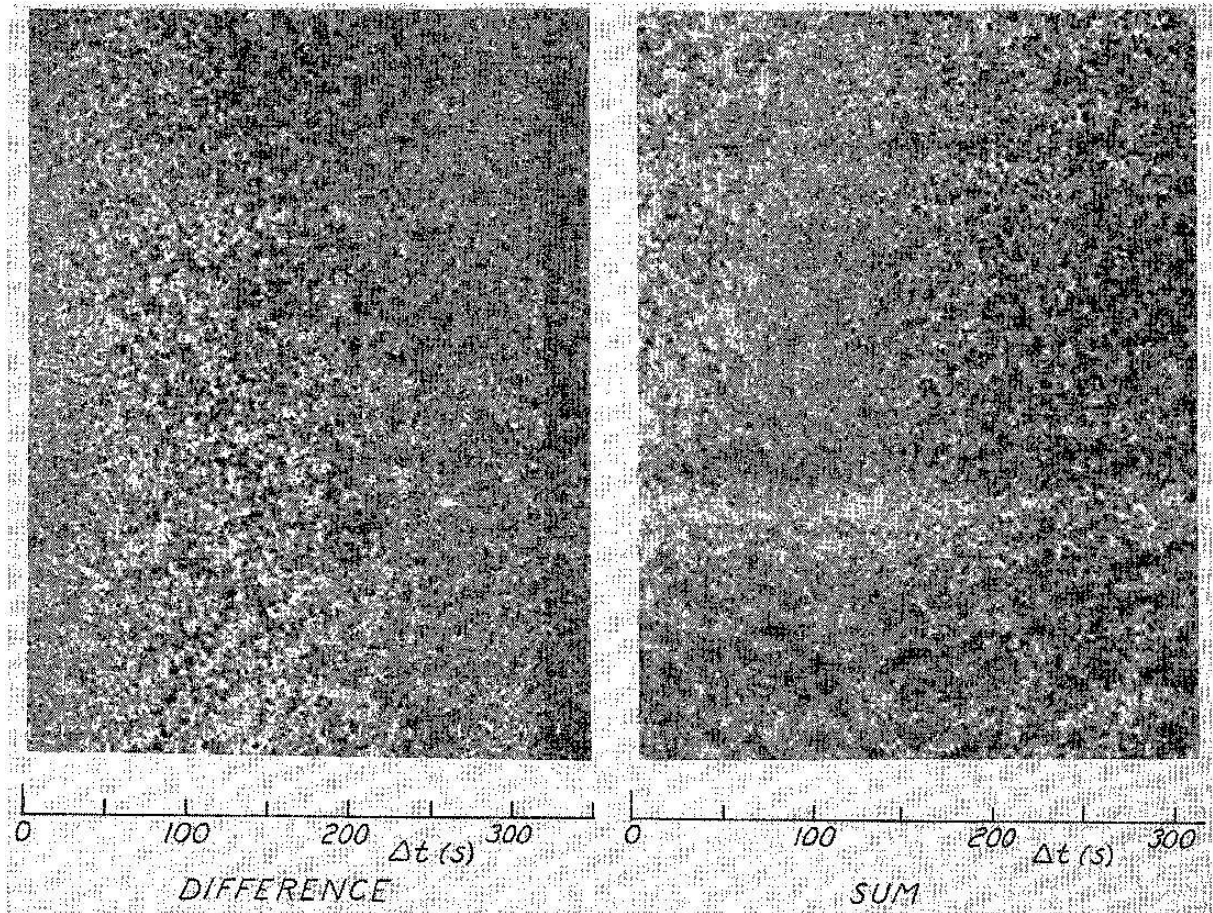
heliogram verkregen werd bedroeg vier minuten. Op dat moment werd de scanrichting omgedraaid en werd de belichte plaat vervangen door een nieuwe. Na acht minuten in totaal waren er dus vier monochromatische zonsbeelden verkregen, twee vooruit gescand en twee meteen erna in de andere richting. Elke plaat leverde één Dopplergram. Het tweede Dopplergram werd weer fotografisch omgekeerd; het eerste en het omgekeerde tweede Dopplergram tezamen belicht geven dan een kaart van de *verandering* in het snelheidsveld. Aan de ene zijde van het beeld, nabij het moment van omkering van scanrichting en van de plaatwisseling, is dat de verandering na enkele seconden, gelijkmatig oplopend tot een belichtingsinterval van acht minuten aan de andere zijde van het beeld.

Eerst is zo'n *Dopplerverschilgram* grijs, omdat het snelheidsveld nog niet de tijd heeft gekregen te veranderen. Dan wordt het vlekkerig, zwart en wit, aangevend dat het zonnegas na enkele minuten willekeurig in verticale beweging verandert. De vlekken zijn van de grootte van het snelheidsveld op de Dopplergrammen, zoals te verwachten. Verrassend was dat de plaat na vijf minuten verschil, dus halverwege, weer meer egaal grijs wordt. Na vijf minuten keert het snelheidsveld blijkbaar weer terug in uitgangspositie: *het zonsoppervlak oscilleert overal op en neer met een periode van vijf minuten*.

Een *Dopplersomgram*, beide Dopplerplaten samen belicht zonder omkering, toont egaal grijs bij 2.5 minuten tijdsvertraging. Dus is er totale uitdoving voor een faseverschuiving van een halve periode; dat laat zien dat alle vlekjes meedoen, dus dat deze oscillatie het dominante verticale snelheidspatroon is van het zonnegas op de hoogte waar de gebruikte spectraallijnen worden gevormd.

Zo'n *Dopplerverschilgram* en *Dopplersomgram* staan hierbij afgebeeld. Ze zijn genomen in de resonantielijne van Ba^+ bij 4554.0 Å. Deze lijn is bijzonder geschikt voor het meten van systematische snelheidsvelden, ten eerste omdat de thermische bewegingen van de bariumionen door het grote atoomgewicht van barium gering zijn, ten tweede omdat de partiële coherentie die in de resonantieverstrooiing van deze bijzondere lijn optreedt zijn respons vergroot. Het laatste was overigens toentertijd nog niet bekend; ik heb dat pas veel later in mijn proefschrift aangetoond.

Dit was de ontdekking van de "vijf-minuten oscillatie": een kleinschalig patroon, wanordelijk gerangschikt, waarin het zonsoppervlak op en neer golft met een periode van ruwweg vijf minuten. De ontdekking was gelukkig, in de zin dat de scansnelheid van de spectroheliograaf die was gedicteerd door de apertuur en brandpuntsafstand van de kijker, de spleetbreedte, dispersie en resolutie van de spectrograaf en de gevoeligheid van de gebruikte emulsie, precies de juiste was om dit verschijnsel te kunnen ontdekken. Ook de grootte van de vlekjes was goed oplosbaar met de gebruikte apparatuur. Het nog kleinschaliger snelheidspatroon van de granulatie bijvoorbeeld viel er niet goed mee te registreren. (In



Figuur 4: Dopplervershilgram (links) en Dopplersomgram (rechts) opgenomen in de Ba II 4554.0 Å resonantielij n van éénmaal geïoniseerd barium. Het Dopplervershilgram wordt na vijf periode weer egaler; het Dopplersomgram na de halve periode. Uit Leighton, Noyes en Simon, *Astrophysical Journal* 135 474 1962.

feite dachten Leighton c.s. dat deze oscillatie met de granulatie samenhangt maar dat bleek al snel onjuist.)

Ontwikkelingen nadien

Hoe ging het verder? Van 1962 tot 1975 verscheen er een honderdtal artikels over het verschijnsel, met nieuwe metingen en met allerlei theoretische interpretaties. De metingen gingen al snel over van fotografisch op fotoelectrisch, met de toen nieuwe photomultipliers. De snelheidsmetingen werden precieser; de nieuwe *Fast Fourier Transform* werd aangewend om de periode beter te bepalen; coherentielengtes, horizontale en verticale faserelaties werden gemeten. De interpretaties beschreven een veelvoud aan mogelijkheden, voor de terugdrijvende kracht die elk golfverschijnsel vereist (gasdruk, gravitatie, magneetveld), voor de daarmee samenhangende aard van de golven (geluidsgolven, zwaartekrachtsgolven, Alfvéngolven of hun mengsels), voor hun modus (lopend, staand, evanescent), voor de aard van de trilholtjes of de filters die de vijf minuten periode zouden kunnen bepalen, voor het mechanisme dat de benodigde energie levert, en tenslotte voor de invloed die het verschijnsel energetisch op de globale structuur van de zon zou hebben, zoals de rol ervan in de verhitting van de corona. Zowat elke combinatie van mogelijkheden had zijn kampioen en er waren velerlei debatten en speculaties — achteraf gezien grotendeels *besides the point*.

Het probleem was de wanordelijkheid van het patroon. Met de komst van de photomultipliers verdween de ruimtelijke resolutie van Leighton's methode uit het zicht en concentreerde men zich op het tijdsgedrag. Kijk je langere tijd naar een enkel punt van het zonsoppervlak, dan meet je geen nette sinusoidale golf maar een opeenvolging van losse golftreintjes. Fase-analyses daarvan gaven aan dat die golftreintjes in tijd noch ruimte kennis van elkaar hebben; na veel werk werd tenslotte met zeer gedetailleerde mathematische analyses geconcludeerd dat het verschijnsel als niets anders dan een random-getriggerde trilling zonder enige systematisch voorspelbare informatie-inhoud moet worden beschouwd. Van die artikels, twee hele dikke van White en Cha in *Solar Physics*, was ik de referee en ik heb ze tot mijn schande goedgekeurd. Ik liefhebberde in Fourieranalyse en muziek en had beter moeten weten.

Muziek

Waarom zou een random ogend, chaotisch lijkend patroon geen muziek bevatten? Een registratie van de instantane uitslag van mijn trommelvlies tijdens een orgelconcert ziet er ook behoorlijk stochastisch uit; de instantane amplitude volgt slechts een interferentiepatroon van alle drukgolven samen dat niet de juiste maat is om muziek in te herkennen. Dat doen wij

door al Fouriertransformerend de noten te scheiden, gebruikmakend van kennis van het voorafgaande en van het komende signaal. Niet voor niets zijn de geluidsloze rusten vaak de mooiste momenten — omdat je precies weet wat er komen gaat. Een Fouriertransformerend muziek-liefhebber had onmiddellijk moeten inzien dat de vijfminuten oscillatie-amplitude best slechts de interferentie kan zijn die resulteert uit een veel complexere toonzetting, en dat geen enkele conclusie over de kwaliteit van de compositie te trekken valt zolang niet met voldoende Fourierresolutie en kennis van zaken wordt waargenomen.

Dat werd uiteindelijk gedaan door Deubner uit Freiburg. Hij wendde voldoende Fourierresolutie en voldoende kennis van zaken aan, en ontrafelde zo het interferentiepatroon in de discrete tonen die tezamen de rijke zonneharmonie doen klinken. Hij staat nu derhalve bekend als de vader van de helioseismologie; terecht¹, des te meer omdat hij de beste amateurmusicus is die ik in de sterrekunde ben tegengekomen. Maar voor ik zijn ontrafeling hier uit de doeken doe is het nodig het voorafgaande theoretische werk van Ulrich en Wolff naar voren te halen; daar putte Deubner zijn kennis van zaken uit.

Theoretische voorspelling

De artikels van Ulrich en Wolff zijn bijkans de enige uit de veelvoud van theoretische verhandelingen die achteraf gezien hout snijden. Dat is niet helemaal waar: veel van de hersengymnastiek die was aangewend met het onbegrepen verschijnsel van de vijfminuten oscillatie als aanleiding (of als excuus) is op zichzelf niet foutief, zeker informatief, en wellicht ooit

¹Niet helemaal terecht. Een paar jaar nadat ik dit verhaal voor de *Vakidoot* schreef zei ik bij wijze van grap in een review op een conferentie over helioseismologie dat omdat het $k_h - \omega$ diagram beter frequentie f en graad l als coördinaten kan hebben, het " $f-l$ diagram" moet heten en dat de naam "FLD" dan spoort met F.-L. Deubner's initialen. Dat viel gans verkeerd bij Ulrich's medewerker Ed Rhodes. Bij het diner vertelde Ulrich me dat hij indertijd na zijn voorspelling aan Simon had gevraagd of die met de grote zonnetelescoop op Sacramento Peak in New Mexico de voorspelde vermogensruggen in het $k_h - \omega$ diagram wou zoeken. Toen daar echter niets inhoudelijks gebeurde besloot hij dat hij het blijkbaar zelf moest doen en vroeg hij geld aan voor een promovendus om het met een oude telescoop op Mount Wilson te proberen. Dat werd Ed Rhodes. Het lukte: al snel na de heropening van de telescoop en de bouw van een geschikte Dopplermeter ontdekten ze inderdaad de vermogensruggen zoals voorspeld. Maar terwijl ze bezig waren hun metingen te preciseren voor de triomfantelijke publikatie kwam plotseling bericht dat Deubner de ontdekking van de vermogensruggen zojuist triomfantelijk had gepresenteerd op een conferentie in Nice (waar ik bij was). Deubner's $k_h - \omega$ diagram kwam op de omslag van de proceedings. Dat eerste diagram was maar net overtuigend, maar in het artikel erover voegde hij, als voetnoot na de acceptatie, het veel betere diagram toe dat links in Figuur 5 staat. Hij was dus formeel inderdaad de eerste, maar Ulrich en Rhodes hadden de ruggen ook al gezien; vandaar dat Rhodes zo ongelukkig was met Deubner's faam! Overigens is dit mijn enige kanttekening bij dit artikel bij de bewerking van het originele manuscript voor internet (maart 2006). Er zijn nog heel wat andere te maken, maar voor de rest laat ik dit artikel zoals het in 1989 in de *Vakidoot* verscheen.

elders van toepassing. De artikels waren ingewikkeld hetgeen niet verwonderlijk is als er dispersierelaties moeten worden gedefinieerd voor drie heel verschillende terugdrijvende krachten tegelijk in een sterk gestratificeerd medium waarin zowel stralingsverliezen als convectieve verschijnselen belangrijk zijn. Een goede indruk van zulke complexiteit geeft het recente boek *Radiation Hydrodynamics* van het echtpaar Mihalas.

Ulrich was een student van Christy op Caltech. Voor zijn promotieonderzoek werkte hij aan een model voor de convectiezone in de zon. Zijn model bleek numeriek instabiel, tot z'n ongenoegen want dat belemmerde zijn promotie. Het bleek echter zo moeilijk een fout in de programmering of de modellering te vinden dat Christy tenslotte suggereerde dat de zon zelf wellicht instabiel in haar convectiezone is, dus dat de fout geen fout was maar de werkelijkheid. Tegelijk opperde Frazier, een belangrijk waarnemer wiens observatorium helaas juist in die tijd werd gesloten zodat hij inmiddels totaal vergeten is, in een discussie met Ulrich dat de vijf-minuten oscillatie best eens een afspiegeling zou kunnen zijn van wat er in de diepte binnenin de zon gebeurt.

Die twee suggesties leidden ertoe dat Ulrich de oscillaties die zo onbedoeld uit zijn programma rolden serieus interpreteerde en presenteerde als een mogelijke verklaring van de vijf-minuten oscillatie: als het interferentiepatroon van een groot aantal staande geluidsgolven, resonant opgesloten in een trilholtte waarvan de bovenkant samenvalt met het zonsoppervlak en waarvan de onderkant wordt bepaald door de inwaartse temperatuurstijging in de convectiezone.

Geen interne gravitatiegolven dus want die komen in de convectiezone niet voor: convectie impliceert juist dat de terugdrijvende zwaartekracht niet tegen het opdrijvend vermogen op kan zodat instabiele opstijging volgt. Ook geen Alfvéngolven omdat het magneetveld binnenin de zon te vast is ingevroren in de materie.

Trilholten

Het zonsoppervlak vormt een open uiteinde aan de bovenkant van de trilholtte door de steile dichtheidsafval (als die niet heel steil was zouden we niet van oppervlak spreken). Het deint lustig mee met wat eronder beweegt. Aan de onderkant van de trilholtte vormt de temperatuurtoename een gesloten uiteinde omdat de geluidssnelheid toeneemt met de wortel uit de temperatuur. Denk je een scheef van boven invallend golf-front in, dan loopt de diepste zijde ervan sneller hetgeen resulteert in draaiing van het golf-front en uiteindelijk in spiegeling van de golfvector. Op welke diepte deze spiegeling optreedt hangt af van de horizontale uitgebreidheid van de golf: hoe uitgebreider, hoe meer diepte nodig is om de spiegeling te volbrengen. Dus hangt de steekdiepte van de trilholtte af van het *horizontale golfgetal* k_h , met $k_h^2 = k_x^2 + k_y^2$ en $k = 2\pi/\lambda$ waarin λ de ruimtelijke golf-

lengte is. De zon zingt dus in stereo: zoals de kathedraal als trilholtte het klankbeeld van een orgel mee bepaalt, zo wordt elke noot van de zonnezang gekenmerkt door een specifieke toonhoogte en een specifieke toongrootte over het oppervlak.

De convectiezone kunnen we ons dus opgebouwd denken uit verticale orgelpijpen, allemaal met hun open uiteinde boven aan het oppervlak. De steekdiepte van elke pijp levert dan voor een gegeven k_h een bijpassende eigenfrequentie $\omega = 2\pi\nu$. Aanslag van het gas op die frequentie kan een resonant staande trilling geven, en dat geldt dan ook voor alle hogere harmonischen met één of meer knopen radieel langs de pijp. Zo'n eigentrilling kan uit ruis worden aangeslagen, net als in een orgelpijp. In Ulrich's programma was dat numerieke ruis, en die was blijkbaar voldoende groot; dat "zelf-exciterende" gedrag wees erop dat ook de zon aan een kleine ruisbron genoeg heeft om resonant te orgelen.

Ulrich omschreef dit beeld in een gedetailleerde voorstelling. In een tweedimensionaal vermogensspectrum, met ω uitgezet tegen k_h en het Fouriervermogen door contouren, worden de plaatsen van resonantie waar meer Fouriervermogen valt te verwachten dan elders gegeven door parabolische krommes. De onderste is voor de grondtoon: bij elke k_h hoort een specifieke ω . Daarboven liggen overeenkomstige krommes voor de bijbehorende boventonen, netjes geordend op onderlinge afstanden volgens de octaaf-, quint-, tertsprong etc. Met voldoende Fourierresolutie zou dit patroon te herkennen moeten zijn, stelde Ulrich, en hij besloot zijn artikel met de eisen waaraan waarnemingen zouden moeten voldoen om dit patroon te vinden.

Dit is een van de weinige voorbeelden die ik ken waarin zeer specifieke waarnemingen werden gesuggereerd om een zeer specifieke theorie te bewijzen. Meestal zijn de waarnemingen er al, en triggeren die de theorievorming. Eigenlijk was dat hier ook zo omdat een computerprogramma eigenmachtig de ontdekking deed; ook een soort triggerende waarneming. Een saillant voorbeeld dat de *artificial intelligence* van een programma gemeten moet worden in de maat van de *natural stupidity* van de programmeur: een programma is dan wel niet beter dan wat je erin stopt, maar als je er genoeg bonafide natuurkunde in doet kun je er heel wat van leren, meer dan je had gedacht.

Ook Ulrich's belangrijke artikel bleef vrijwel onopgemerkt. Wellicht omdat de waarnemers het te druk hadden met waarnemen om de *Astrophysical Journal* te lezen — er waren immers zoveel ingewikkelde artikels met vérgezochte verklaringen voor de vijf-minuten oscillatie; het was onbegonnen werk te proberen ze allemaal te begrijpen. Anderzijds stonden sommige theoretici al te vastgeroest op hun eigen barricade: er kwamen bijvoorbeeld nog immer artikels uit over verklaringen per gravitatiegolf en per magneto-akoustische golf met trilholtes in de chromosfeer of de corona die veel minder natuurlijk aandeden dan Ulrich's voorstel.

Van 2D naar 3D

Wolff echter las Ulrich's artikel wel. Wolff is een eenling, verstopt in de enorme wetenschapper-verslindende bureaucratie van NASA te Goddard. Hij schrijft elke paar jaar een heel raar artikel met vérgaande denkbeelden die ik nooit door wie dan ook zie worden aangehaald — en ik vraag me af hoeveel nog veel gekkere artikels van hem nooit door de refereeing zijn gekomen. Sommige van zijn ideeën zijn heel interessant, maar je ziet hem nooit ergens en dus zit hij nu al in de vergetelheid; men leest, zeker in de VS, immers uitsluitend de preprints van lieden die men van conferenties kent. Wolff maakte in 1972, twee jaar na Ulrich's artikel, de interessante opmerking dat Ulrich's model van orgelpijpen tussen twee lagen moet worden hergeformuleerd in bolgeometrie: voor de grootste horizontale golflengten is het zonsoppervlak niet oneindig, en als je resonantie meet over voldoende tijdsduur moeten de rondlopende golven met zichzelf in de pas lopen, coherent rondom de zon. Dus kan er ook mode-structuur met knopen en buiken rondom de zon aanwezig zijn, is mode-scheiding mogelijk niet alleen in ω maar ook in k_h en dient het golfpatroon te worden beschreven met driedimensionale bolharmonischen als orthogonaal stelsel in plaats van tweedimensionale Fourierontwikkeling.

Quantumgetallen

Een mode (resonante toon) wordt dan geïdentificeerd door de drie quantumgetallen n , l en m ; tezamen bepalen ze de frequentie ω . Het hoofdquantumgetal n geeft het aantal knopen in de radiële richting, langs de hierboven gedachte radieel in de zon stekende orgelpijp. Dat levert de keuze van harmonische: de grondtoon of één van de hogere boventonen. De keuze aan aantallen knopen en buiken rondom de zon wordt bepaald door de graad l en de azimuthale orde m : die verdelen de bol in dambordvelden, sinaasappelpartten en/of breedteringen. Hierbij geeft l met $k_h^2 = l(l+1)/r^2$ het aantal knopen rondom de zon. De voorkeurs-asrichting wordt door m gelabeld; als er geen voorkeursrichting is degenerereert de m -ontwikkeling en vallen alle eigenfrequenties met dezelfde l samen.

Daarnaast, en eigenlijk belangrijker, was dat Wolff in contact kwam met Deubner die al een hele reeks artikelen had gepubliceerd waarin Fourierspectra van de vijfminuten oscillatie werden geanalyseerd. Deubner deed die waarnemingen in het kader van een slepend conflict met Frazier over de vraag of het tweedimensionale vermogensspectrum in het k_h - ω diagram bestaat uit een enkele nette berg, zoals Deubner dacht, of twee toppen vertoont zoals Frazier had waargenomen en waarover in termen van twee soorten golven, acoustische en gravitatie, was gespeculeerd. Deubner was dus al uit op vergroting van de Fourierresolutie in zijn metingen, maar pas toen

Wolff hem attendeerde op Ulrich's artikel wist hij wat er met voldoende Fourierresolutie te halen zou zijn: de oplossing van Ulrich's voorspelde fijnstructuur.

Fourierresolutie

Het gaat hierbij om Fourierresolutie zowel in ω als in k_h . De resolutie in het Fourierdomein is evenredig met de lengte van de meetreeks in het meetdomein; dus moest voldoende lang de radiële snelheid van een voldoende groot stuk zonsoppervlak worden geregistreerd. Omgekeerd wordt er pas voldoende overdekking van het k_h - ω diagram verkregen als er voldoende frequent en op voldoende plaatsen bemonsterd wordt. Dus moest er vaak en fijnmazig op veel plaatsen op de zon gemeten worden gedurende een lange tijd, en de taak was om die vier eisen naar behoren te vervullen. Voorheen was met de spectroheliogrammen van Leighton c.s. aan de eis van ruimtelijke uitgestrektheid en fijnmazige bemonstering heel goed voldaan, maar de ω -as was met slechts één periode meetduur en slechts twee bemonsteringen per plaats nauwelijks aanwezig. Met de photomultipliers daarna lag het accent andersom; en pas met de intrede van computersturing, snelle digitisatie en opslag op tape werden lange scantijden en grote scanlengtes beide mogelijk.

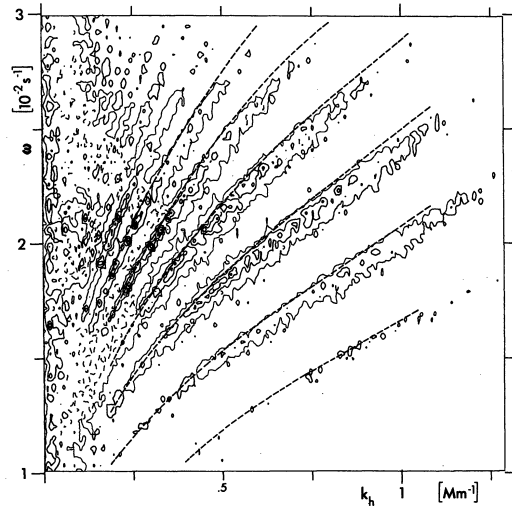
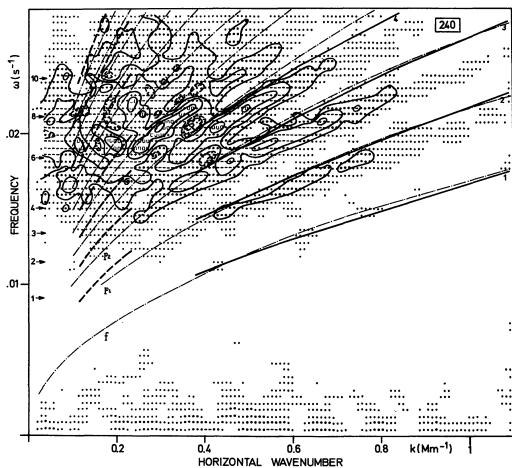
Deubner verkreeg de eerste k_h - ω diagrammen waarin Ulrich's gekromde vermogensruggen te zien zijn in 1975, precies op het moment dat Ando en Osaki in het voetspoor van Ulrich en Wolff (en geheel in het stereotiepatroon van vlijtige Japanners) met een groot computerprogramma voor steropbouw de eigentrillingen en de ligging van de ruggen nauwkeurig voorspelden. De voorspelling en de waarneming bleken vrijwel identiek.

Identificatie

Zo kwamen, vijftien jaar na de ontdekking, observatie en theorie op hetzelfde moment tot hetzelfde beeld.

Daarmee was de identificatie van de vijfminuten oscillatie als het interferentiepatroon van een groot aantal niet-radiële p -modes van de zon een feit: tienduizenden eigentrillingen, opgesloten in de convectiezone, waarmee het zonsoppervlak meedeint en die voor de langste golflengtes als coherente resonanties van de hele zon moeten worden opgevat. Niks geen random herrie, maar een prachtige meervoudige harmonie, ordelijk gerangschikt zowel in toonhoogte als ruimtelijk rondom de zon en radieel erbinnen: zonzang.

De toonhoogte is naar onze smaak wat laag. Het meeste vermogen bevindt zich bij periodes rond vijf minuten, resulterend in de dominantie van die trillingen in het totale signaal. De daarbijhorende frequentie bedraagt 3 mHz; dat halen jouw dure boxen niet. De grondtoon (mode p_0) is slecht vertegenwoordigd; net zoals onze



Figuur 5: Links: het eerste k_h - ω diagram met duidelijke vermogensruggen langs parabolen (in een voetnoot in Deubner, *Astronomy & Astrophysics* 44 371 1975). Bezie de tekentechniek: op een regeldrukker worden de vermogenswaarden met verschillende symbolen aangegeven zodat met de hand contouren kunnen worden ingetekend. Rechts een betere versie van Deubner, Ulrich & Rhodes (*Astronomy & Astrophysics* 72 177 1979), nu machinaal getekend met een CalComp plotter. De krommes zijn theoretische voorspellingen.

kerkklokken klinkt de zon voornamelijk in haar boven-tonen.

De energetica van de zonnemuziek is nog onduidelijk. Voor zowel de excitatie als de demping van de eigentrillingen zijn diverse mechanismen mogelijk; het meest waarschijnlijk is stochastische excitatie door de sterke convectieve bewegingen net onder het oppervlak. Laten we voorsnog genoeg nemen met het feit dat de zon zingt omdat ze er zin in heeft. Ze borrelt levenslustig en zingt daarbij, waarom niet.

Hierbij staan een k_h - ω diagrammen van Deubner. De metingen rechts besloegen de halve zonsdiameter en werden verricht gedurende zeven uur op de langste dag van het jaar, de Dopplerexcursies van een Fraunhoferlijn fotoelectrisch samplend om de 10 sec en de 5 bgsec. Aan de Fouriereisen lang, vaak, groot en fijn was daarmee voldaan en de ruggen zijn mooi te zien. Ze zijn duidelijk gescheiden in ω behalve voor kleine k_h . Hun ligging wordt bepaald door de geometrie van de trilholve, vooral door het vaste uiteinde van de gedachte golfpijp, dus door de geluidssnelheid en derhalve de temperatuur in de convectiezone. Voor verschillende modes ligt dat spiegelpunt op verschillende dieptes. De tienduizenden modes in het oscillatiespectrum van de zon vormen derhalve een gevoelige diagnostiek voor de structuur van het zonsinwendige, ook als zoals hier de individuele l -modes niet worden opgelost.

In feite was in deze waarneming onbedoeld aan nog een andere resolutie-eis voldaan, door Deubner's gebruik van een lange spectrograafspleet. Dat deed hij omdat hij anders onvoldoende signaal/ruisverhouding haalde in de snelle bemonstering van de spectraallijn waarvan de Dopplerverschuivingen het snelheidssignaal vormen. Zo'n lange spleet resulteert in selectie van slechts die modes

die evenwijdig aan de spleet golven; alle andere middelen uit door de sommatie langs de spleet. Daarmee is een voorkeursrichting aangebracht, dus is er resolutie in m . Met een spleet loodrecht op de zonsequator levert dat opheffing van de m -ontaarding: de zon draait immers en codeert zo het signaal met deze voorkeursrichting. Gescheiden Fourieranalyse voor de meelopende en de tegendraaiende golven (het staande patroon daaruit opgebouwd gedacht) levert lijnsplitsing in ω . De grootte daarvan wordt bepaald door de rotatiesnelheid van de zon, echter niet die van het oppervlak maar die van het gas op de diepte waar de trilling wordt bepaald: nabij de spiegel diepte. Naast de temperatuur ter plekke wordt dus ook de zonsrotatie aldaar gemeten; ook hierin was Deubner tien jaar geleden de pionier. Zulke metingen zijn van groot belang voor de dynamotheorieën die het ontstaan en de structuur van het zonnemagneetveld moeten verklaren.

Lage- l modes

De historie van de ontdekking en de identificatie van de p -modes. Het hier gegeven verhaal is echter lang niet compleet omdat ik me heb beperkt tot de geschiedenis van de modes met grote l . In hetzelfde tijdperk was er echter ook een boeiende ontwikkeling rond de trillingen met kleine l . Deze zijn te meten in het spectrum van de hele geïntegreerde zonneshijf, als je maar lang genoeg meet — weken, maanden, bij voorkeur jaren — zodat in het ééndimensionale Fourierspectrum voldoende frequentieresolutie verkregen wordt. De individuele modes (n, l, m) zijn daarin spectraallijnen die zowel oplosbaar als stuk voor stuk identificeerbaar zijn.

De lage- l historie is een lang verhaal apart. Jam-

mer, want het is heel kleurrijk! Onafhankelijk van elkaar (i.e. met veel ruzies onderling) werden hier pioniersarbeid, toevalsontdekkingen en overdramatische interpretaties gepleegd door groepen uit Nice, Birmingham, de Krim en Stanford, om nog maar te zwijgen van de hele klucht die Robert Dicke uit Princeton veroorzaakte met zijn metingen van de afplating van de zon in het kader van zijn scalar-tensor theorie voor de zwaartekracht, die hem een Nobelprijs voor de 3 K straling kostte en die in de persoon van zijn leerling Henry Hill met zijn omstreeden zonneoscillatiemetingen nog immer voortduurt. Ook dat is een heel verhaal apart. Hetzelfde geldt voor de Russische ontdekking van een resonantie met een periode van 160 minuten die eerst door niemand werd geloofd maar tegenwoordig wel, en waar geen mens raad mee weet.

Stand van zaken

Laat ik hier samenvatten wat de stand van zaken is. Helioseismologie is “big business” geworden. De klemtoon ligt nu weer op het verkrijgen van grote resolutie en signaal/ruisverhouding in het tijdsfrequentiedomein, ten koste van de k_h -resolutie.

Een praktische reden hiertoe is dat vergroting van de meetduur heel wel mogelijk is. Op de zuidpool valt tot een week continu te halen. Netwerken van telescopen rondom de aarde zoals het in aanbouw zijnde GONG stelsel van vijf á zes telescopen kunnen een vol jaar meten met een duty cycle van 95%. ESA's SOHO-missie zal een jaar continu meten zonder enige verstoring door de aardse dampkring. Ruimtelijke resolutie is daarentegen minder makkelijk; de in deze projecten te gebruiken CCD's hebben maar 500×500 pixels, zeer mager dus ten opzichte van Leighton's fotografische Dopplergrammen. Uitbreiding van de meetlengte rondom de zon kan slechts worden verkregen door kunstplaneten vór van de aarde te parkeren; dat bemoeilijkt datatransmissie van de benodigde omvang. Het GONG-project bijvoorbeeld zal al ruwweg een *terabyte* data per jaar produceren!

Nu nog g -modes

De wetenschappelijke reden voor beklemtoning van het tijdsdomein is dat op frequenties onder 0.3 mHz de interessante g -modes verwacht mogen worden. Dit zijn geen geluidsgolven maar interne gravitatiegolven. Ze kunnen resonant zijn opgesloten in het radiatieve inwendige van de zon, onder de convectiezone. Als deze eigentrillingen bestaan hebben ze veel te vertellen over de diepste zonneroerselen. Aangezien het probleem van de missende neutrino's daarvandaan nu al twintig jaar niet is opgelost zal het heel interessant zijn over deze diagnostiek te kunnen beschikken. Anders dan bij de neutrino's zal het dan niet gaan om een enkel welles/nietes getal, maar weer om een diagnostisch rijk oscillatiespectrum

met veel spectraallijnen. De precieze frequenties daarvan geven de temperatuur op allerlei dieptes (omdat voor g -modes de ligging van de bovenkant van de trilholtte middels de Brunt-Väisälä afsnijdfrequentie met de geluidssnelheid varieert. De onderkant wordt bepaald door de afname van de zwaartekrachtsversnelling nabij het middelpunt van de zon. Deze ligt voor alle niet-radiële g -modes met $l > 0$ op ongeveer dezelfde plaats). De lijnsplitsing geeft de differentiële rotatie als functie van de diepte en de heliografische breedte. De lijnhoogte en de lijnvorm tenslotte bevatten informatie over excitatie en demping.

Vooral de g -modes van lage graad l zijn het waarvoor waarneembaarheid wordt verwacht. Deze golven moeten de hele convectieve buitenkant van de zon optillen om nog waarneembare oppervlakteverstoringen te produceren, en dat gaat beter voor ruimtelijk uitgebreidere modes. Gelukkig zijn dat ook juist degene die met gebrekkige ruimtelijke oplossing nog waarneembaar zijn; trillingen met meerdere heuvels en dalen per pixel middelen te veel uit.

Het vermogen van de g -modes is veel kleiner dan het vermogen van de vijf-minuten p -modes anders waren ze al wel ontdekt. Vanaf het aardoppervlak is het moeilijk voldoende signaal/ruisverhouding te halen omdat de aardatmosfeer allerlei ruis bijdraagt door winden, differentiële refractie, seeing en eigen interne gravitatiegolven. De langdurige lage- l metingen die tot dusver zijn verkregen (vanaf de zuidpool en met kleinere netwerken die op GONG vooruitlopen) tonen alleen de vijf-minuten p -modes bij 3 mHz. (Buiten de atmosfeer worden deze modes overigens ook al zeven jaar gemeten met de ACRIM irradiantiemonitor aan boord van de *Solar Maximum Mission*. Ze blijken de de totale lichtkracht van de zon te moduleren maar met een relatieve amplitudo van slechts een miljoenste, te klein om trillingen met kleiner vermogen betrouwbaar te meten. Bovendien komt SMM komende winter omlaag vallen, veel eerder dan was voorzien omdat de zon op het moment sneller naar maximum stijgt dan ooit tevoren en daarmee de dampkring opblaast. “Guess who the enemy is?” stond er in een recente brief van NASA aan SMM-gebruikers.)

De grote vraag is derhalve of de g -modes wel waarneembaar zullen zijn — en wie ze het eerst ontdekt. De Franse, Engelse en Russische groepen beweren keer op keer dat ze ze reeds hebben aangetoond, maar elke keer weer blijkt dat voorbarige speculatie. De dure GONG en SOHO projecten mikken natuurlijk op deze detectie, zonder het al te nadrukkelijk te beloven. Afwachten dus. Maar aangezien de natuur meestal nog interessanter blijkt dan was voorspeld zal het wel meevallen.

Wat doen wij?

Wat gebeurt er in Nederland? Op het Utrechtse Laboratorium voor Ruimteonderzoek was Peter Hoyng voorheen betrokken bij de SOHO-

seismometers; hij werkt nu met Jos van Geffen aan dynamotheorie, en pioniert derhalve vóóruit op de waarnemingen. In Roden, waar een optische instrumentatiegroep is gevestigd, pioniert Harvey Butcher aan instrumentatie voor asteroseismologie: vergelijkbare metingen aan andere sterren dan de zon. De kunst is om voldoende signaal te verkrijgen zonder dat alle grote telescopen op aarde een jaar lang naar één en dezelfde ster moeten kijken. Tenslotte ben ik zelf met Jo Bruls, Han Uitenbroek en collega's in Kiev en Napels bezig met modelberekeningen van de Fraunhoferlijnen die in de helioseismometers van GONG en SOHO zullen worden gebruikt. Maar dat is weer een ander verhaal.

Rob Rutten
Sterrekundig Instituut

Aanbevolen literatuur: F.-L. Deubner en D. Gough, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 22, 593, 1984