

Granulatie van zon en sterren

Wie het oppervlak van de zon bekijkt bij een hoog scheidend vermogen, 1" of beter, ziet de *granulatie*, bestaande uit heldere *granulen* en smalle donkere *intergranulaire* lanen. Deze korreligheid van het zonsoppervlak is reeds lang bekend; ook is het al lang duidelijk dat de *convectie* er aan ten grondslag ligt, het opborrelen van hete gassen waarmee energie uit het inwendige naar het oppervlak van de zon wordt gebracht. Het precieze hoe en waarom van de granulatie is echter pas kort geleden duidelijk geworden, dankzij nieuwe waarnemingen en grootschalige computerberekeningen. Zulke berekeningen zijn er ook al voor een viertal andere sterren dan de zon; ze voorspellen hoe hun oppervlak er in detail uitziet. Deze details zijn met geen enkele telescoop te zien, maar toch zijn er waarnemingen die de computervoorspellingen bevestigen.

Sir William Herschel (1738-1822) was de eerste die de korrelige structuur van het zonsoppervlak beschreef. Hij gebruikte een zelfgebouwde telescoop met een drie voet grote spiegel van speculum (een legering van koper en tin) en schreef in 1801 dat het oppervlak van de zon oneffenheden vertoont. Volgens hem waren dit lichtgevende wolken boven een donkere zonnekorst. De laatste zou door openingen in het heldere wolkendek (de zonnevlekken) te zien zijn en zou ongetwijfeld, net als de aardkorst, voor bewoning geschikt zijn en wellicht leven zoals dat op aarde herbergen.

Na 1860 ontstond er een discussie over de precieze vorm van de oneffenheden. Nasmyth (1808-1890, uitvinder van de stoomhamer) vond dat ze sterk leken op wilgeblaadjes, terwijl anderen, waaronder dominee Dawes (1799-1868) en Pater Secchi (1818-1878), ze beschreven als 'rijstkorrels gescheiden door donkere lanen'. Dawes was de eerste die het woord granulen gebruikte. Secchi's prachtige tekeningen staan veel dichterbij moderne opnamen dan Nasmyth's wilgeblaadjes; diens tekeningen lijken vooral geïnspireerd te zijn door de filamentaire structuur van de penumbrae rond zonnevlekken.

Pater Secchi schreef in 1875 in zijn boek *Le Soleil*:

"... het zonsoppervlak is bedekt met een menigte kleine korrels, grotendeels van gelijke grootte maar zeer verschillend van vorm, waaronder ovalen het meest voorkomen. De zeer fijne afscheidingen tussen de korrels vormen een donker netwerk dat niet geheel zwart is. Deze structuur is heel duidelijk in de eerste ogenblikken van de waarneming,

Rob Rutten

maar vervagen dan snel omdat het oog vermoeid raakt en zowel het objectief als de lucht in de kijkerbuis verhit raken..."

Dat is een uitstekende samenvatting, zowel van het uiterlijk van de zonnegrnulatie als van het hitteprobleem dat zich bij zonswaarnemingen voordoet (zie kaderstuk 'Optische zonnetelescop').

Pierre Janssen (1824-1907) was de eerste zonnewaarnemer die de granulatie fotografeerde. Dat deed hij in de periode 1877-1896 vanaf de nieuwe astrofysische sterrewacht te Meudon (Parijs), waarvan hij de eerste directeur was. Zijn opnamen waren van hoge kwaliteit, dankzij zijn gebruik van navergrouting tot een zonsbeeld van 30 cm diameter en van een spleetsluis voor korte belichtingstijden. Janssens opnamen beslechtten de disputen over het uiterlijk van granulen; tegelijkertijd waren ze aanleiding tot een nieuwe discussie over het 'reseau photospherique', een ogenschijnlijk patroon van grootschalige ordening van granulen in rasters en lange lineaire structuren waaraan Janssen veel aandacht besteedde.

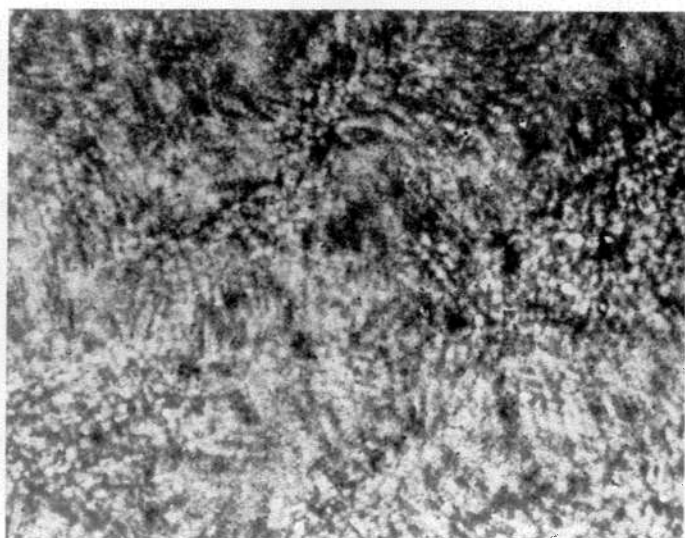
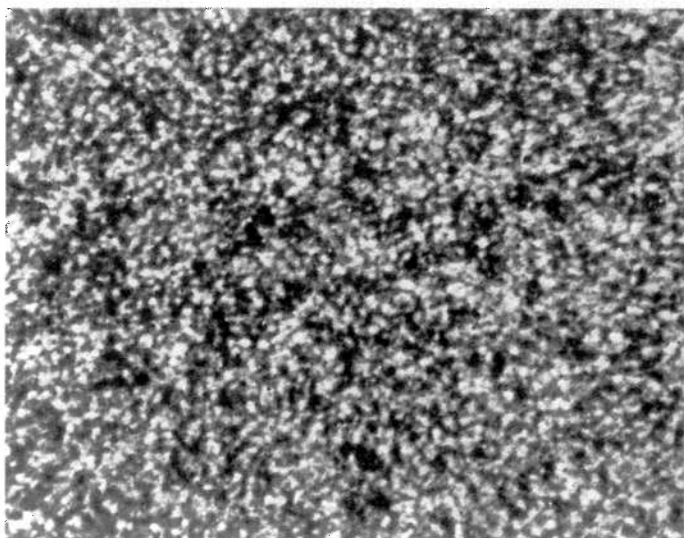
Later bleek, vooral door werk van zijn Russische leerling A. Hansky (1870-1908), dat dergelijke structuren het gevolg zijn van *atmosferische seeing*. Dat is de onregelmatige beeldvervorming die door de aardse damp-

Twee opnamen van Pierre Janssen uit 1883. De linker is van goede kwaliteit en toont de granulen als heldere korrels tegen een donkere achtergrond. De rechter toont veel langgerekte structuren. Janssen dacht dat deze op de zon ontstonden, maar ze zijn het gevolg van slechte seeing in de aardse dampkring en binnen de telescoop.



De Britse musicus, componist en astronoom William Herschel.

kring wordt veroorzaakt. Ook is er bij zonnetelescop sprake van een gelijksoortige *interne seeing* binnenin de telescoop; deze is het gevolg van de verwarming door de zon van de lucht in de kijkerbuis die Secchi al vermeldde. Daarnaast bleek uit inspectie van Janssens oirginele collodiumplaten (door Dollfus in 1955), dat deze een fijn raster van haarscheurtjes bevatten dat ook heeft geleid tot misinterpretatie; sommige lange smalle 'intergranulaire lanen' op de opnamen zijn daar het gevolg van. Deze geschiedenis maakt duidelijk dat granulatie-fotografie het uiterste van de beeldkwaliteit vergt. Het is niet verwonderlijk dat pas na de Tweede Wereldoorlog wezenlijke verbeteringen werden bereikt; eerst moesten technieken worden ontwikkeld om de



beeldbederving door atmosferische en telescoopseeing teniet te doen. De eerste granulatiefoto's waarbij dat gebeurde, en dus ook de eerste foto's die significant beter waren dan Janssens beste opname, zijn de opnamen die M. Schwarzschild (Princeton) in 1957 maakte met de *Stratoscope*: een 30-cm telescoop die met een stratosfeerballon op een hoogte van 24 km werd gebracht. Deze techniek vond later navolging in Rusland (V.A. Krat en V.N. Karpinsky van de Pulkovo-sterrenwacht) en Duitsland (de *Spectrostratoscope* van K.O. Kiepenheuer en J.-P. Mehlretter).

Convectie of turbulentie?

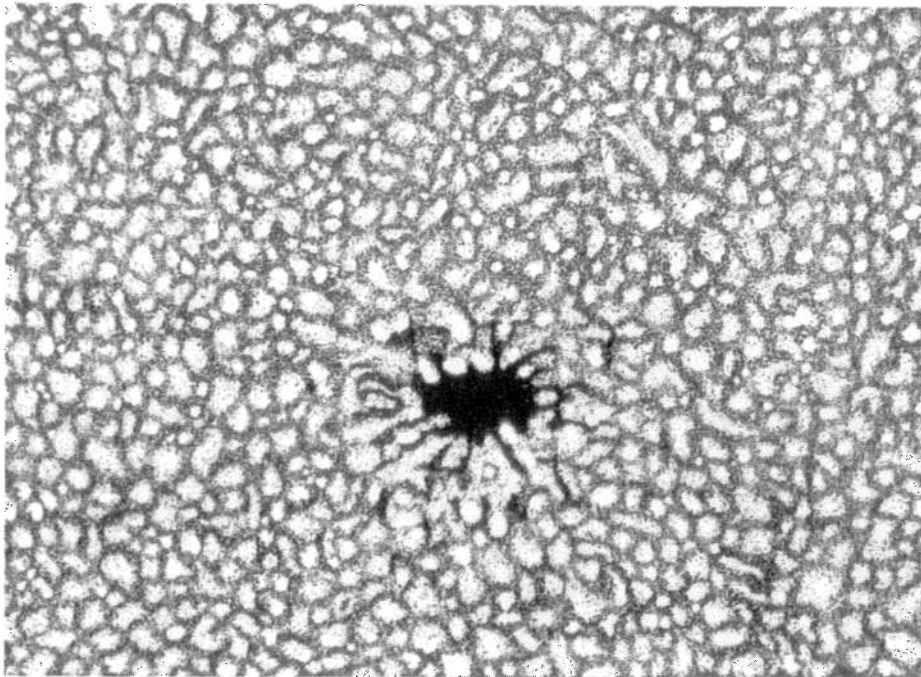
Schwarzschild's opnamen bevestigden definitief dat de granulatie in de eerste plaats een convectief verschijnsel is en niet slechts grote-schaal turbulentie. Pure convectie leidt tot een regelmatig cellulair patroon met goed bepaalde laminaire stromingen, waarin hete elementen opstijgen en afgekoelde materie daalt. In pure turbulentie is er geen correlatie tussen snelheden en temperatuurcontrast en zijn alle ruimtelijke schalen vertegenwoordigd, met een kansverdeling die tegen de Russische onderzoeker Kolmogorov wordt genoemd.

De keus tussen deze twee uitersten voor de zonnegratulatie had eerder tot veel discussie geleid. Unsöld en Siedentopf hadden al in de dertiger jaren geconcludeerd dat de granulatie convectief van aard is, maar Schwarzschild was daar niet van overtuigd. Hij mat met Richardson dat de granulaire stijgsnelheden te klein waren; ook de oppervlaktepatronen in de opwaartse en neerwaartse snelheden leken onvoldoende te corresponderen met het granulaire intensiteitspatroon. Hij besloot dat de vraag 'convectie of turbulentie' nog niet beslist was en bouwde daarom de *Stratoscope*. Deze bracht, dankzij het omzeilen van het grootste deel van de atmosfeer, veel betere beeldscherpte (0,3" in plaats van de ongeveer 1" van de beste aardse opnamen) en zou de eventuele aanwezigheid van een turbulente 'cascade' moeten tonen als een overmaat aan heldere en donkere structuren op kleinere schaal. Dat bleek echter in het geheel niet het geval te zijn: de *Stratoscope*-opnamen zijn, hoewel scherper, niet wezenlijk verschillend van de beste aardse granulatiefoto's uit die tijd. In het bijzonder zijn ook de scherpste foto's 'omkerings-variant': een positief en een negatief zijn duidelijk verschillend. Voor pure turbulente is dat niet het geval; de verklaring van de granulatie moest in 'turbulente convectie' worden gezocht (dat is onregelmatige convectie met een flinke dosis wanordelijke turbulentie erin).

Achteraf gezien heeft het bij deze waarnemingen ontbroken aan kennis van twee verschijnselen die tezamen ook voor slechte seeing zorgen, maar dan niet in de aardatmosfeer of in de telescoop maar in de atmosfeer van de zon zelf. Ook daarin wordt het granulatietoestand verwaagd; deze 'zonneseeing' wordt veroorzaakt door de de vijf-minuten oscillatie en de magnetische fluxbuizen (zie het kaderstuk hierover).

Waarnemingen vanuit Spacelab 2

In 1985 werden voor het eerst granulatiebeelden gemaakt vanuit de ruimte. Tijdens



Een tekening uit het boek 'Le Soleil' van Pater P.A. Secchi (1875). De donkere plek is een porie, een kleine umbra zonder de omringende penumbra die bij grotere zonnevlekken te zien is. De korrelige structuur rond de porie is de zonnegratulatie.

Trillingen en magnetische fluxbuizen

De vijf-minuten oscillatie werd in 1960 ontdekt door R.B. Leighton en medewerkers op Mount Wilson. Deze oscillatie bestaat uit een ingewikkeld patroon van golfbewegingen waarin het zonnepoppervlak op en neer deint (de periode is ruwweg vijf minuten, de golflengten en maximale uitwijkingen zijn uiteenlopend). In de zestiger jaren was deze golfbeweging een groot raadsel, maar in 1975 werd de oplossing gevonden in de bevestiging van een voorspelling van R.K. Ulrich: de beweging is het resultaat van een zeer groot aantal eigentrillingen van de hele zon. Dit zijn longitudinale trillingen, dat wil zeggen gewone geluidsgolven, die worden aangeslagen door de convectieve bewegingen onder het zonsoppervlak en waar de hele zon mee resonanceert, net zoals een orgelpijp. Men kan de zon uit verticale orgelpijpen opgebouwd denken; het zo aangeslagen akoord omvat echter miljoenen tonen tegelijk!

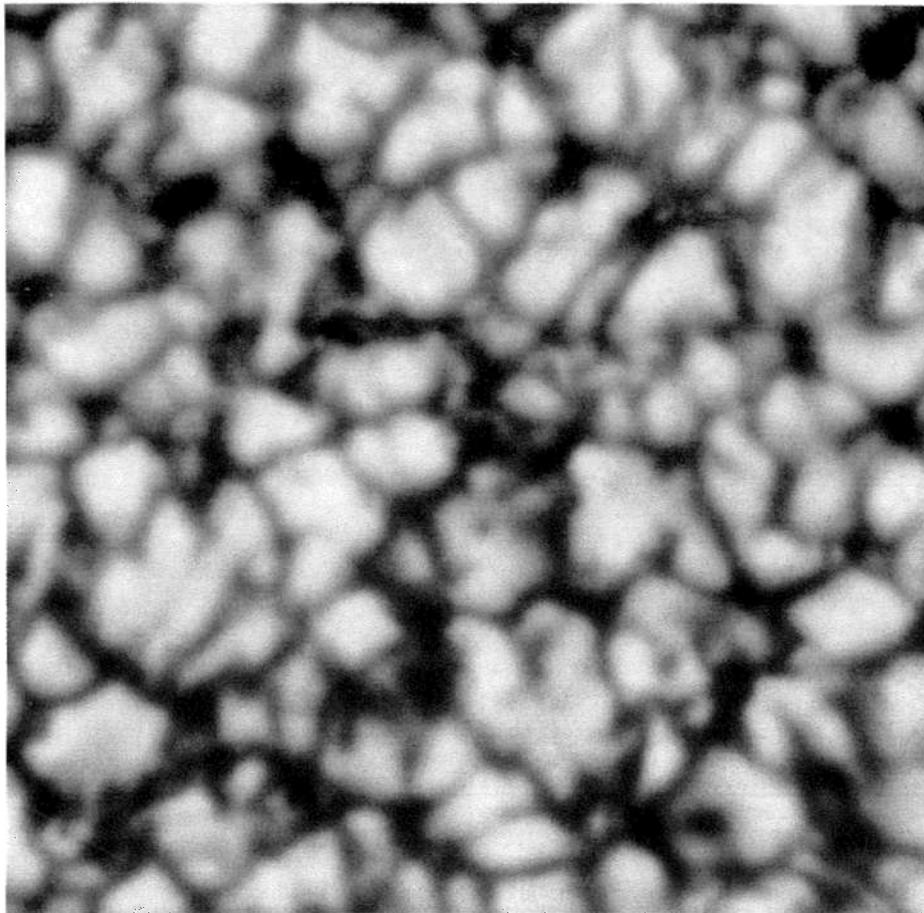
Inmiddels heeft deze ontdekking tot een nieuw vakgebied geleid, de *helioseismologie*, waarin de trilholte-eigenschappen van de zon worden ontleed aan de hand van de waarneembare oppervlaktetrillingen en leiden tot inzicht in de inwendige structuur van de zon, net zoals geoseismologie de bestudering van het inwendige van de aarde ondersteunt. Helioseismologisch onderzoek zal onder andere worden verricht met instrumenten aan boord van de in 1994 te lanceren SOHO-missie, een kunstplaneet die tussen de zon en de aarde zal worden gestationeerd.

Wat betreft de granulatie is deze oscillatie een ernstige bron van storing; snelheidsmetingen aan granulen worden er sterk door gehinderd. Dat was de reden dat Schwarzschild's snelheidsmetingen niet aan de verwachtingen voldeden. (Andersom is granulatie een ruisbron voor de helioseismologie; te Utrecht verrichten J.H.M.J. Bruls en schrijver dezes daarnaar onderzoek als jking voor SOHO.)

De magnetische fluxbuizen vormen ook een nieuw begrip dat in de zeventiger jaren werd geïntroduceerd door J.O. Stenflo op grond van waarnemingen en door de Nederlandse onderzoeker H.C. Spruit op grond van theoretische analyse. Fluxbuizen blijken het basisingrediënt te zijn van het magnetisch veld in de zon, en waarschijnlijk evenzo voor andere koele sterren (zie het artikel 'Magnetische activiteit van zon en koele sterren' van C.J. Schrijver in *Zenit*, september 1990).

De grootste fluxbuizen zijn de zonnevlekken (waarschijnlijk bestaan deze uit samenge-drukte bundels dunnere buizen). Elders op de zon, in de fakkelvelden rond zonnevlekken en in het magnetische netwerk daarbuiten, bestaat het magnetisch veld vrijwel geheel of wellicht zelfs uitsluitend uit dunne buizen van grote veldsterkte (ongeveer 0,15 tesla of 1500 gauss; de sterkte van het aardmagneetveld bedraagt slechts 0,5 gauss). Deze fluxbuisjes steken verticaal door het zonsoppervlak en zijn in diameter veel kleiner dan granulen, hooguit enkele honderden kilometers oftewel 0,1-0,2". Het zonneveld is dus heel anders van structuur dan het aardmagneetveld: waar het aardse veld ruwweg een dipoolstructuur heeft zoals dat van een staafmagneet, moet het zonneveld primair worden gezien als een kluwen spaghetti, waarvan de slierten een zeer sterk veld bevatten en door het oppervlak naar buiten steken in zich steeds wijzigende aantallen en patronen.

In gebieden waar veel van zulke fluxbuizen door het oppervlak steken wordt de granulatie ernstig verstoord, veel meer dan voorheen gedacht werd. Naast de problemen die de aardatmosfeer en de telescoopseeing geven, moet dus ook terdege rekening worden gehouden met de 'seeing' van de zon zelf.



Een moderne opname van de granulatie, gemaakt met de Zweedse zonnetelescoop op La Palma. Het hier getoonde deel van het zonneoppervlak is 13 bij 14 boogseconden groot. In de donkere intergranulaire lanen tussen de heldere granulen zijn hier en daar ook kleine heldere structuren te zien. Deze hangen samen met de aanwezigheid van magnetische fluxbuizen.

de Spacelab 2-vlucht (de tweede en tot dusver laatste vlucht met het door ESA gebouwde ruimtelaboratorium) aan boord van de shuttle werd voor het eerst de *Solar Optical Universal Polarimeter* (SOUP) gebruikt, een door de afdeling zonnefysica van de Lockheed-fabriek gebouwde 30-cm telescoop met analyse-apparatuur. Er waren veel technische moeilijkheden tijdens de vlucht (ondermeer werkte het in Europa gebouwde Instrument Pointing System niet door fouten in de programmatuur; uiteindelijk moesten

de astronauten de telescoop op de zon richten door met behulp van een toneelkijkertje de schaduw ervan te minimaliseren), maar

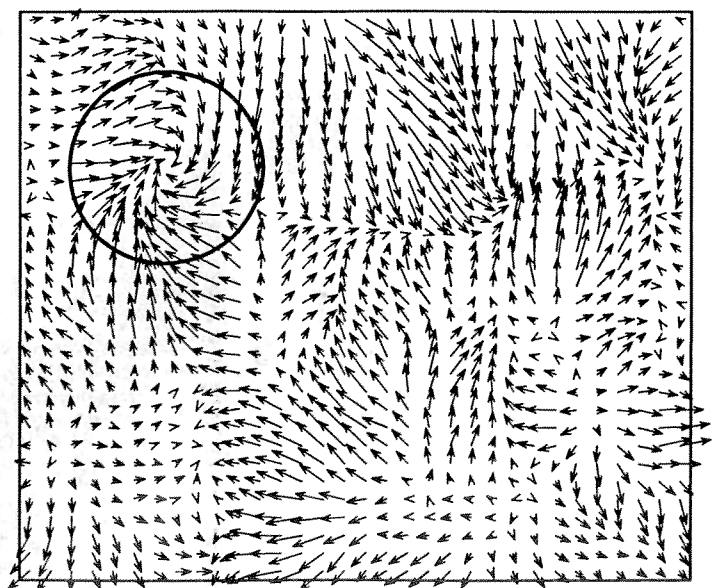
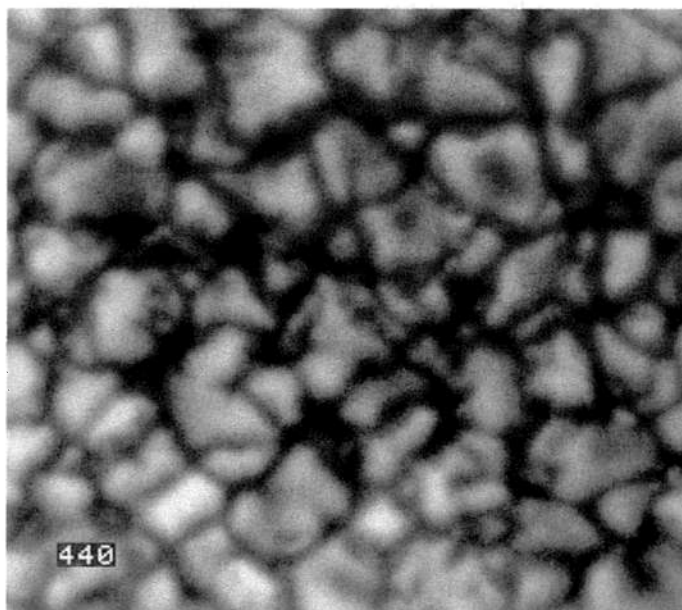
Een draaikolk op de zon. De foto links is een opname uit een tijdreeks die 79 minuten duurde, ook gemaakt met de Zweedse zonnetelescoop op La Palma. De grootte van het beeld is 10300 bij 8800 km; de belichtingstijd van de CCD-camera was 1/50e seconde. Het diagram rechts toont het over de hele beeldreeks gemiddelde patroon van horizontale stromingen. Het is gemeten door de bewegingen van opeenvolgende granulen te volgen. De pijltjes tonen grootte en richting van de gemiddelde snelheid; de pijl onder de figuur heeft een 'grootte' van 1 km/s. De cirkel markeert de grote draaikolk; de diameter ervan is 3000 km. (Figuren: P.N. Brandt, Freiburg)

in de laatste omlopen werden toch nog enkele beeldreeksen van behoorlijke kwaliteit verkregen.

Toen de SOUP-beelden als film werden vertoond, bleken er storingsgolven doorheen te lopen die voorheen door aardse waarnemers aan de dampkring waren toegeschreven. Hun aanwezigheid in deze ruimtewaarnemingen maakt duidelijk dat ze aan de vijfminuten trillingen van de zon zelf te danken zijn. De Lockheed-groep ontwikkelde ingenieuze computertechnieken om de beelden hiervan te ontdoen. Ook introduceerden ze een computerrecept om langzame veranderingen in wanordelijke bewegingspatronen te visualiseren: bestrooi het zonnebeeld in de computer aan het begin van de beeldreeks met 'kurken' en volg deze dan in de tijd. Elke kurk wordt door kortstondige bewegingen her en der gedreven, terwijl individuele granulen opkomen en weer verdwijnen. Over langere beeldreeksen bleken er niettemin systematische bewegingspatronen bestaan: de kurken dobberen langzaam maar gestaag naar kurkverzamelplaatsen: lokaties waar systematische horizontale stromingen tezamen komen en waar de materie naar beneden wordt afgevoerd.

Deze kurkconcentraties zijn ook weer in een cellulair patroon gerangschikt, net als de granulen zelf maar van grotere schaal (3000-7000 km). Dit patroon wordt de *meso-granulatie* genoemd. Het is het derde cellulaire patroon op de zon. Al veel eerder was geconstateerd dat de fluxbuizen gegroepeerd zijn in een *magnetisch netwerk* met celgroottes van 10 000-30 000 km, en ook dat er een horizontaal stromingspatroon is met cellen van dezelfde afmeting dat *supergranulatie* wordt genoemd.

Men heeft altijd aangenomen dat deze twee celpatronen ruimtelijk en causaal samenvalen. Dit kon echter pas met de SOUP-kurkenfilms definitief worden vastgesteld. Daaruit blijkt dat de ronddobberende kurken zich eerst verzamelen in meso-granulaire



1 km/s →

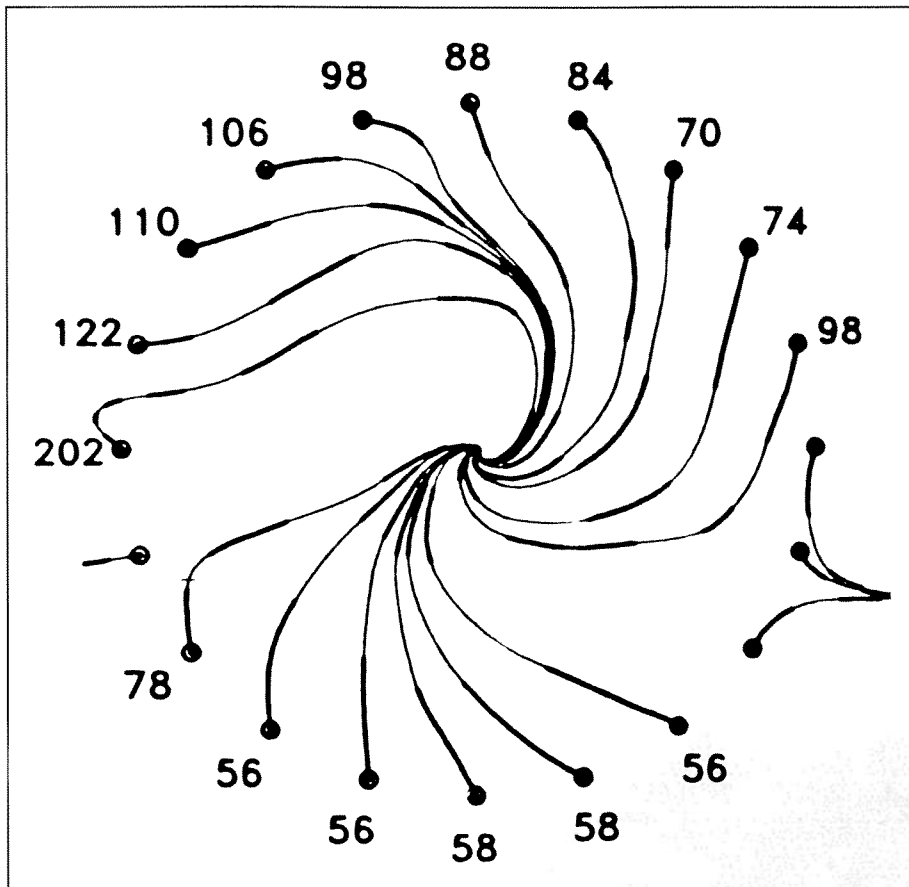
celpatronen; op langere tijdschalen vervormt en verdwijnt dit patroon weer en uiteindelijk komen de kurken inderdaad terecht op die plaatsen waarop magnetogrammen (die gelijktijdig met de Spacelab-2 vlucht vanuit het Big Bear Observatory werden opgenomen) het magnetische netwerk tonen.

Waarnemingen vanaf La Palma

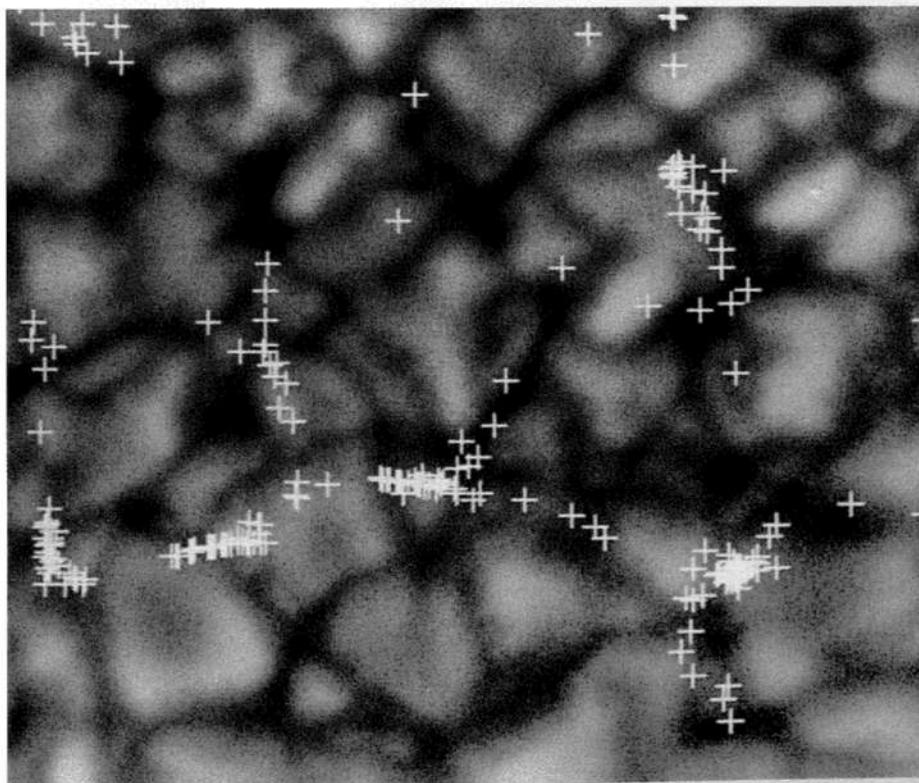
Het oorspronkelijke plan was dat SOUP meermalen met Spacelab gelanceerd zou worden; na de explosie van de Challenger werden alle verdere Spacelab-vluchten echter afgelast. Er staat wel, al jaren, een grote satelliet voor zonne-onderzoek op stapel (het *Orbiting Solar Laboratory*, OSL) waarin de SOUP gebruikt zal worden achter een 1 meter-telescoop, maar dat is vooralsnog toekomstmuziek. De huidige ontsporing van het Amerikaanse budget en ook de blunder met de Hubble Space Telescope zijn daarin harde wanklanken; het zal wel even duren voor NASA een grote zonnetelescoop in de ruimte brengt.

De Lockheed-groep is echter niet bij de pakken neer gaan zitten. Zij gebruiken de SOUP vooralsnog op de grond, achter de Zweedse vacuümrefractor op La Palma en met het prototype van de elektronische camera voor de OSL, die een Texas Instruments CCD-detector bevat met 1024 x 1024 beeldpunten. Dit is geen seeingvrije ruimtetelescoop, maar niettemin worden met deze combinatie nu beeldreeksen verkregen die alle eerdere opnamen overtreffen. Een aantal factoren draagt daartoe bij. De Zweedse telescoop biedt uitmuntende beeldscherpheid; het is waarschijnlijk een der weinige telescopen in de hele astronomie die 'buigingsbegrensd' is, dat wil zeggen dat hij het theoretisch scheidend vermogen van zijn 47 cm apertuur (de diameter van het objectief) ook daadwerkelijk haalt. Ten tweede is La Palma qua seeing een der beste lokaties op aarde. Voorts bleken de computertechnieken die voor het elimineren van de zonnetrillingen in de Spacelab-2-gegevens zijn ontwikkeld ook bruikbaar om seeingverstoringen te corrigeren; daarnaast zijn nieuwe computertechnieken ontwikkeld ('lokale auto-correlatie volger'), waarin grote-schaal vervormingen van het beeld grotendeels worden weggewerkt door delen van opeenvolgende beelden in overdekking te brengen. Ook gebruikt de Lockheed-groep tussen telescoop en SOUP een 'active mirror' die de ergste bewegingen van het hele beeld opheft. Dit is een snel wiebelende spiegel ('wiebel-frequentie' tot 60 Hz) die gestuurd wordt door een kwartet fotocellen waartussen een donkere zonnevlek wordt afgebeeld; de fotocellen registreren de aanzet van beeldexcursies en regelen de spiegel tijdig bij om die te minimaliseren. Er wordt zo een veel grotere beeldstabiliteit verkregen; de indruk die men krijgt als het systeem wordt aangezet is dat de zon plotseling wordt stilgezet. De door seeing veroorzaakte verwazigingen blijven bestaan maar het rondspringen van het hele beeld wordt effectief gecompenseerd.

Tenslotte heeft de ontwerper van de Zweedse telescoop, G. Scharmer, een vernuftig 'video image-grabbing'-systeem ontworpen dat naast de OSL-camera wordt gebruikt. Dit selecteert onmiddellijk de beste opnamen van een CCD-detector die op videosnelheid 25 beelden per seconde opneemt. Deze gaan naar een analoge beeldanalyses-



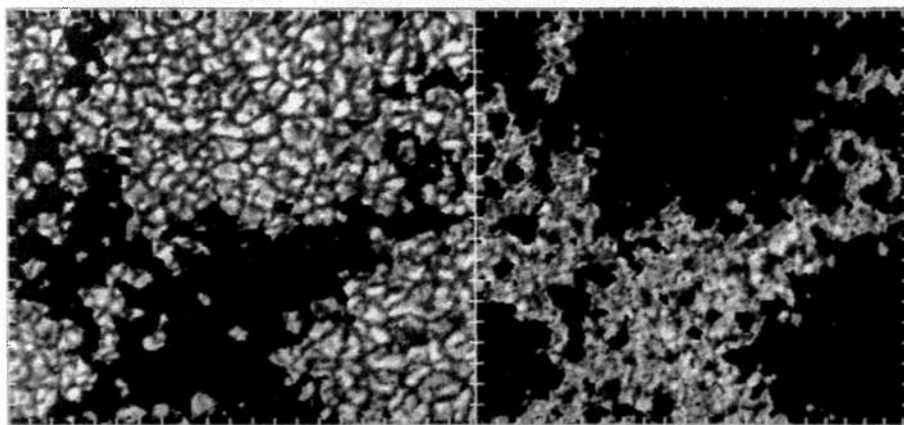
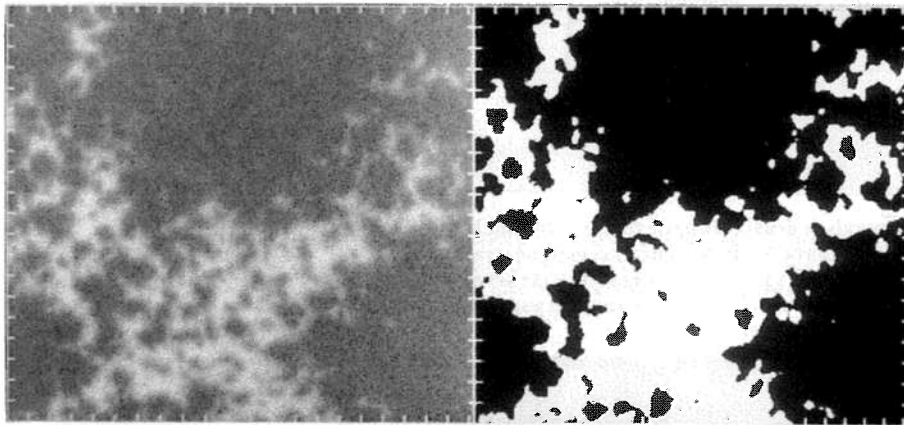
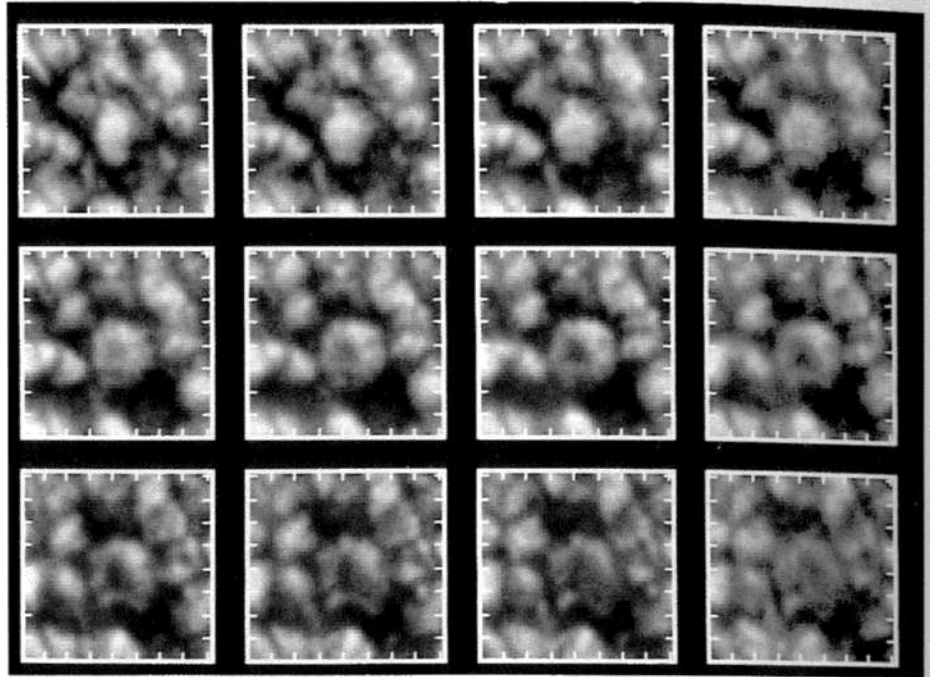
▲ Nogmaals de draaikolk op de zon. De kromme lijnen geven de paden aan van testdeeltjes ('kurken') die aanvankelijk op een cirkel met een straal van 2000 km rond het centrum van de draaikolk lagen. Ze spiraliseren langzaam naar het middelpunt van de draaikolk. De getallen geven de totale reisduur (in minuten) langs het pad aan; de dik en dun getekende segmenten van de paden zijn 15 minuten lang.



▲ Deze opname toont het middelste deel van een andere opname uit de tijdreeks van 79 minuten. De kruisjes markeren de verzamelplaatsen van 'kurken'. Het eerste beeld van de reeks is gelijkmatig met kurken bestrooid; dit beeld geeft aan waar ze na verloop van tijd terecht zijn gekomen. Het cellulaire patroon in de horizontale stromingen dat zo zicht wordt, noemt men 'mesogranulatie'.

Deze reeks beelden toont een exploderende granule, van linksboven naar rechtsonder. De beelden zijn met tussenpozen van een minuut gemaakt. De grote granule in het midden krijgt eerst een donkere kern en valt dan in stukken uiteen. De opnamen werden gemaakt op 5 augustus 1985 met het SOUP-instrument aan boord van het ruimteveer 'Challenger' (tijdens de Spacelab-2-missie).

tor waarin twee videobeelden kunnen worden opgeslagen; elk beeld komt binnen in een van de twee geheugens en overschrijft het daarin aanwezige beeld. De truc bestaat uit het slim sturen van de schakelaar tussen deze twee geheugens. Van een binnenkomend beeld wordt snel het contrast gemeten en vergeleken met het contrast van het al aanwezige beeld in het andere geheugen: hoe hoger het contrast, des te beter het beeld. Is het nieuwe beeld beter, dan wordt het eerste daaropvolgende beeld naar het andere geheugen gesluisd; is echter het beeld dat daarin stond beter, dan blijft de schakelaar staan en wordt het nieuwe beeld overschreven met het eerstvolgende. Op deze manier is na enkele seconden het beste beeld dat in



Op deze opnamen is goed te zien hoe de granulatie verschilt tussen gebieden op de zon met veel, respectievelijk weinig magnetisch veld. De opname linksboven is een magnetogram. Op deze foto zijn magnetische gebieden wit weergegeven en gebieden zonder magnetisch veld donker. Het scheidend vermogen is onvoldoende om individuele fluxbuizen op te lossen. In de magnetische gebieden is de dichtheid van de fluxbuizen veel groter; tezamen resulteren zij in grotere helderheid op deze opname. De foto rechtsboven toont een masker gebaseerd op het magnetogram. Het is in de twee onderste opnamen gebruikt om respectievelijk de magnetische gebieden (links) en de niet-magnetische gebieden (rechts) af te dekken.

De granulatie verschilt sterk voor deze twee soorten gebieden. In de niet-magnetische gebieden (linksonder) ontwikkelen de granulen zich normaal; er zijn veel grote granulen met een donkere kern. In de magnetische gebieden (rechtsonder) krijgen granulen door de grote dichtheid van de fluxbuizen de kans niet zich normaal te ontwikkelen. De waargenomen structuren zijn hier veel kleiner. (Opnamen gemaakt met het SOUP-instrument en de Zweedse zonnetelescoop op La Palma op 29 september 1988.)

die tijd binnenkwam bewaard gebleven; dat wordt dan gedigitiseerd en weggeschreven naar digitale videotape. Daar kan ruim 2 Gigabyte op, overeenkomend met duizenden beelden.

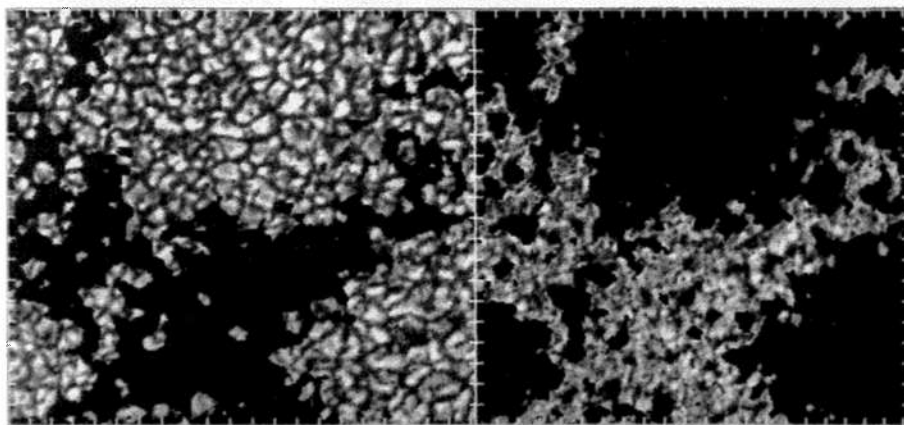
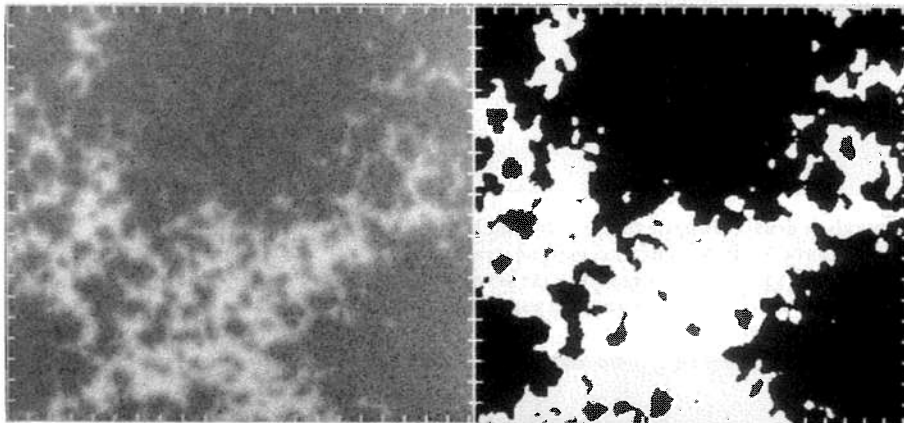
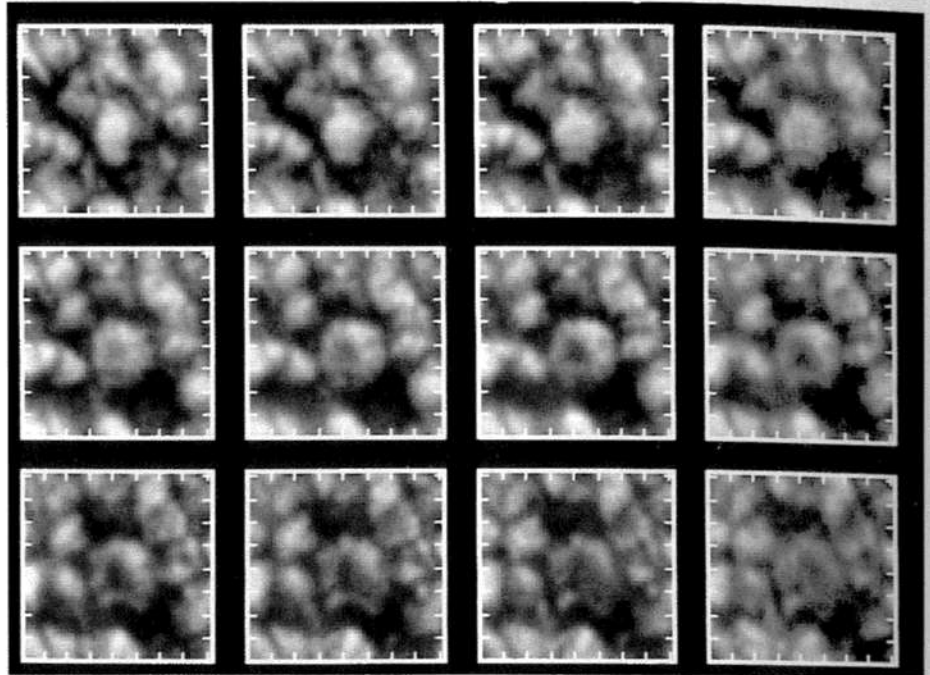
Het grote nadeel van waarnemingen vanaf de aarde blijft natuurlijk dat zelfs op La Palma de seeing maar zelden uitmuntend is; het voordeel van deze opstelling boven Shuttle-instrumentatie is echter dat, als de seeing goed is, er meetreeksen verkregen kunnen worden van meerdere uren tijdsduur, terwijl de lage baan van de Shuttle ononderbroken waarneming gedurende slechts 40 minuten toestaat. (De droom van grondwaarnemers is het behalen van ongeveer 14 uur achtereenvolgend rond de 21ste juni; in de praktijk worden zulke lange tijdreeksen echter alleen op de Zuidpool verkregen. Daar zijn meetseries van meer dan 100 uur ononderbroken zonnewaarnemingen gemaakt in het kader van helioseismologisch onderzoek.)

Deze combinatie van Canarische lokatie, Zweeds vernuft en Amerikaanse high-tech heeft geleid tot digitale granulatiefilms van uitzonderlijke kwaliteit. De mesogranulatie werd ermee bevestigd; ook op deze digitale films zijn computerkurken gestrooid en stromingspatronen geanalyseerd. Op een van de reeksen werd een enorme draaikolk gevonden waar granulen eerst omheen wervelen en dan in verdwijnen.

Het eerder als zeldzaam beschouwde verschijnsel van de 'exploderende granulen' (waaraan door Osamu Namba, aan Zenitlers welbekend, in het verleden veel onderzoek is verricht) blijkt zeer algemeen voor te komen. Dit zijn grote granulen die zich uitbreiden, een donkere kern ontwikkelen zodat ze op een ring gaan lijken en dan in stukken uiteenvallen. Voorheen was de veelvuldigheid van dit verschijnsel minder duidelijk door de verstoringe invloed van de zonne-oscillatie; in deze meetseries wordt deze per computer verwijderd en blijkt dat vrijwel alle grote granulen of zelf exploderen of door de explosie van een buurman in hun groei worden belemmerd en de kans niet krijgen zelf tot explosie-grootte uit te dijen. Ook is de mate en de aard van de verstoring van de granulatiepatronen in gebieden met veel magnetische fluxbuizen veel duidelijk-

Deze reeks beelden toont een exploderende granule, van linksboven naar rechtsonder. De beelden zijn met tussenpozen van een minuut gemaakt. De grote granule in het midden krijgt eerst een donkere kern en valt dan in stukken uiteen. De opnamen werden gemaakt op 5 augustus 1985 met het SOUP-instrument aan boord van het ruimteveer 'Challenger' (tijdens de Spacelab-2-missie).

tor waarin twee videobeelden kunnen worden opgeslagen; elk beeld komt binnen in een van de twee geheugens en overschrijft het daarin aanwezige beeld. De truc bestaat uit het slim sturen van de schakelaar tussen deze twee geheugens. Van een binnenkomend beeld wordt snel het contrast gemeten en vergeleken met het contrast van het al aanwezige beeld in het andere geheugen: hoe hoger het contrast, des te beter het beeld. Is het nieuwe beeld beter, dan wordt het eerste daaropvolgende beeld naar het andere geheugen gesluisd; is echter het beeld dat daarin stond beter, dan blijft de schakelaar staan en wordt het nieuwe beeld overschreven met het eerstvolgende. Op deze manier is na enkele seconden het beste beeld dat in



Op deze opnamen is goed te zien hoe de granulatie verschilt tussen gebieden op de zon met veel, respectievelijk weinig magnetisch veld. De opname linksboven is een magnetogram. Op deze foto zijn magnetische gebieden wit weergegeven en gebieden zonder magnetisch veld donker. Het scheidend vermogen is onvoldoende om individuele fluxbuizen op te lossen. In de magnetische gebieden is de dichtheid van de fluxbuizen veel groter; tezamen resulteren zij in grotere helderheid op deze opname. De foto rechtsboven toont een masker gebaseerd op het magnetogram. Het is in de twee onderste opnamen gebruikt om respectievelijk de magnetische gebieden (links) en de niet-magnetische gebieden (rechts) af te dekken.

De granulatie verschilt sterk voor deze twee soorten gebieden. In de niet-magnetische gebieden (linksonder) ontwikkelen de granulen zich normaal; er zijn veel grote granulen met een donkere kern. In de magnetische gebieden (rechtsonder) krijgen granulen door de grote dichtheid van de fluxbuizen de kans niet zich normaal te ontwikkelen. De waargenomen structuren zijn hier veel kleiner. (Opnamen gemaakt met het SOUP-instrument en de Zweedse zonnetelescoop op La Palma op 29 september 1988.)

die tijd binnenkwam bewaard gebleven; dat wordt dan gedigitiseerd en weggeschreven naar digitale videotape. Daar kan ruim 2 Gigabyte op, overeenkomend met duizenden beelden.

Het grote nadeel van waarnemingen vanaf de aarde blijft natuurlijk dat zelfs op La Palma de seeing maar zelden uitmuntend is; het voordeel van deze opstelling boven Shuttle-instrumentatie is echter dat, als de seeing goed is, er meetreeksen verkregen kunnen worden van meerdere uren tijdsduur, terwijl de lage baan van de Shuttle ononderbroken waarneming gedurende slechts 40 minuten toestaat. (De droom van grondwaarnemers is het behalen van ongeveer 14 uur achtereenvolgend rond de 21ste juni; in de praktijk worden zulke lange tijdreeksen echter alleen op de Zuidpool verkregen. Daar zijn meetseries van meer dan 100 uur ononderbroken zonnewaarnemingen gemaakt in het kader van helioseismologisch onderzoek.)

Deze combinatie van Canarische lokatie, Zweeds vernuft en Amerikaanse high-tech heeft geleid tot digitale granulatiefilms van uitzonderlijke kwaliteit. De mesogranulatie werd ermee bevestigd; ook op deze digitale films zijn computerkurken gestrooid en stromingspatronen geanalyseerd. Op een van de reeksen werd een enorme draaikolk gevonden waar granulen eerst omheen wervelen en dan in verdwijnen.

Het eerder als zeldzaam beschouwde verschijnsel van de 'exploderende granulen' (waaraan door Osamu Namba, aan Zenitlers welbekend, in het verleden veel onderzoek is verricht) blijkt zeer algemeen voor te komen. Dit zijn grote granulen die zich uitbreiden, een donkere kern ontwikkelen zodat ze op een ring gaan lijken en dan in stukken uiteenvallen. Voorheen was de veelvuldigheid van dit verschijnsel minder duidelijk door de verstoringe invloed van de zonne-oscillatie; in deze meetseries wordt deze per computer verwijderd en blijkt dat vrijwel alle grote granulen of zelf exploderen of door de explosie van een buurman in hun groei worden belemmerd en de kans niet krijgen zelf tot explosie-grootte uit te dienen. Ook is de mate en de aard van de verstoring van de granulatiepatronen in gebieden met veel magnetische fluxbuizen veel duidelijk-

ker geworden. De foto's bij dit artikel tonen voorbeelden daarvan.

Granulatiesimulaties

Naast de nieuwe kwaliteitswaarnemingen van de zonnegranelatie zijn er nu ook gedetailleerde computerberekeningen van dit verschijnsel. De beste numerieke simulaties van de zonnegranelatie zijn gepubliceerd door R.F. Stein en Å. Nordlund; ze zijn gebaseerd op vele uren rekentijd in supercomputers. Voorbeelden van deze simulaties vindt u in de figuren bij dit artikel. Ze betekenen een belangrijke doorbraak die een voorbode is van toekomstige astrofysische computerberekeningen (zie kaderstuk over simulaties).

In deze granulatiesimulaties worden de natuurkundige basisvergelijkingen van de hydrodynamica en het stralingstransport opgelost voor een gedeelte van de zonnatmosfeer. De beschikbare computercapaciteit stelt hierbij de voornaamste beperkingen. Het is nog onmogelijk de hele convectiegordel van de zon uit te rekenen met de ruimtelijke resolutie die nodig is om granulen op te lossen (net zoals Nederland in het rekenmodel voor de weersvoorspelling ook niet fijnmazig wordt bedekt). Stein en Nordlund stopten een 'doos' van 6000 x 6000 x 3000 kubieke km in de computer met een maasgrootte van 128 km. Deze resolutie is onvoldoende om de schalen te representeren waarop turbulente bewegingen energie dissiperen; daarom is de *viscositeit* (stropigheid) van de stromingen de voornaamste parameter in het model. Als die is vastgelegd, is de verdere berekening echter recht-toe-rechtaan, zonder extra aanpassingsparameters.

De resultaten reproduceren de waarnemingen goed. De berekende granulen lijken sterk op de echte en gedragen zich net zo. Ze exploderen veelvuldig, tenzij ze in hun ontwikkeling door een exploderende buur worden verstoord. Computerkurken dobberen ook hier eerst naar de intergranulaire lanen en dan naar mesogranulaire concentratiepunten (voor de supergranulatie is het berekende volume nog te klein). Als er magnetische fluxbuizen in de doos worden aangebracht, verhinderen deze de ontwikkeling van normale granulatie net zoals in de waarnemingen.

Tenslotte heeft Nordlund ook uit de computerberekeningen voorspellingen gedestilleerd voor de precieze vorm van spectraallijnen bij middeling over een stukje zonnepervlak. Deze 'lijnprofielen' blijken nauwkeurig overeen te stemmen met de vorm van waargenomen spectraallijnen. Dit is een heel belangrijk resultaat, omdat voorheen altijd ad-hoc parameters moesten worden ingevoerd (de zogenaamde micro- en ma-

Simulatierevolutie

Na het beschikbaar komen van computerberekeningen van zodanige betrouwbaarheid en gedetailleerdheid dat directe vergelijking met de waarnemingen mogelijk is, maakt de zonnegranelatie deel uit van de *simulatierevolutie* in de astrofysica. Ook op andere terreinen van de sterrenkunde leveren computersimulaties belangrijke doorbraken. Daarom verdienen ze hier wat extra aandacht.

De sterrenkunde heeft al heel wat revoluties doorgemaakt. Te denken valt aan Galilei's telescoopgebruik, de introductie van spectraalanalyse door Bunsen en Kirchhoff, de kwantificatie daarvan door ondermeer Minnaert, Pannekoek en Zanstra, de openlegging van het radiodomein door Oort en anderen met Van de Hulst's 21-cm-lijn, de openlegging van de ultraviolette, röntgen en infrarode delen van het spectrum met ruimtetelescopen (waaronder de Nederlandse S59-, S100-, COS-B-, ANS-, IRAS- en SMM-experimenten), de beeldscherptetoename die de Hubble Space Telescope had moeten brengen (en hopelijk nog zal brengen), maar waarvan ESO's NTT en VLT nu de avantgarde zijn etc. Natuurlijk is er een zekere gewoonte ontstaan om van elk nieuw (en duur) instrument luidkeels te verkondigen dat het revolutionair is. Niettemin is de term hier op zijn plaats: de simulatierevolutie is er een die de naam inderdaad verdient.

Het klassieke voorbeeld van numerieke simulaties in de sterrenkunde wordt gevormd door de sterevolutie. Het in detail berekenen van de structuur van een ster om vervolgens te kijken wat daar metertijd mee gebeurt, heeft het mogelijk gemaakt de levensloop van sterren in detail te bestuderen, zonder eindeloos te hoeven wachten tot een echte ster het daadwerkelijk voordeelt.

Zulke 'tijdsafhankelijke' berekeningen worden nu op veel meer terreinen mogelijk. Ze leveren een realistische nabootsing van fysische processen die niet analytisch te beschrijven zijn. Met name is dit het geval voor de hydrodynamica. Net zoals de weersvoorspelling aanzienlijk is verbeterd door grootschalige numerieke berekening, draagt numerieke hydrodynamica ook in de astrofysica bij tot kennisvergroting. Daarbij speelt straling vaak een grote rol, zoals dat ook bij de granulatie het geval is; 'stralingshydrodynamica' wordt nu een belangrijk onderzoeksgebied. Op andere terreinen, bijvoorbeeld zwaartekrachtssimulatie met grote aantallen sterren en de magnetohydrodynamica van fluxbuizen, is de huidige computercapaciteit nog onvoldoende; in de toekomst zal parallelschakeling van grote aantallen special-purpose computers daarvoor de gewenste capaciteit brengen.

Zulke computersimulatie van de fysische omstandigheden in ver verwijderde objecten geeft de astrofysicus gereedschap dat doet denken aan de meetapparatuur van de experimentele natuurkunde. In natuurkundeproeven isoleert men een enkele parameter, varieert deze op goedgedefinieerde wijze en meet dan de invloed daarvan op een systeem. Sterrenkundige meetgegevens zoals telescoopbeelden en spectraallijnen tonen daarentegen altijd het totale resultaat, teweeggebracht door alle eigenschappen van het object tezamen. We kunnen niet een thermometer in de zon steken en kijken wat er gebeurt bij temperatuurstoename zonder dat er iets anders verandert; in de zon gebeurt altijd van alles tegelijk. In een computer kunnen echter wel zulke proefnemingen verricht worden. Dus is het in computersimulaties mogelijk te begrijpen wat zich precies afspeelt, ten eerste in de computer zelf, maar daarmee (mits de simulatie een goede is) ook in het object.

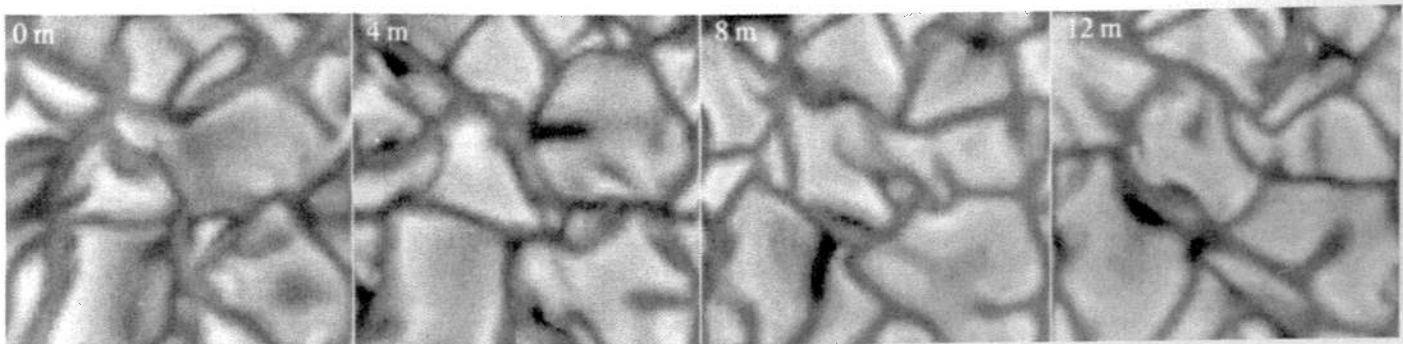
croturbulentie) om correspondentie te krijgen tussen berekening en waarneming. Met deze gedetailleerde simulaties zijn die overbodig geworden.

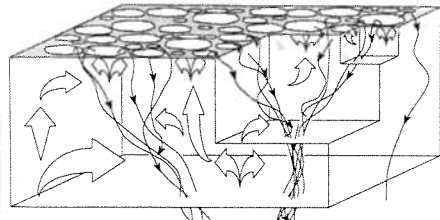
Met deze berekeningen is fysische interpretatie mogelijk geworden. Een eerste conclusie is dat het granulatie-verschijnsel zeer dicht aan het oppervlak optreedt. Granulen zijn heel plat. Ze liggen als platte pannekoeke boven op de convectiegordel, in een re-

latief dunne laag van slechts 50-100 km dik. Aan de bovenkant van deze laag ontsnapt het merendeel van de zonnestraling; eronder vindt het buitenwaartse energietransport voornamelijk door convectie plaats.

Deze convectieve energiestroom wordt abrupt omgezet in licht. Dit gebeurt plotse-ling door de zeer grote gevoeligheid die de doorzichtigheid van het fotosferisch gas heeft voor de temperatuur: al bij een kleine

Resultaten van de numerieke simulatie van zonnegranelen door Stein en Nordlund. Dit zijn vier opeenvolgende computerbeelden, met tussenpozen van 4 minuten en een afmeting van 6000 bij 6000 kilometer (8 bij 8 boogseconden). De beelden tonen de berekende helderheid van het zonnepervlak zoals die volgt uit een gedetailleerde hydrodynamische modelberekening. Ze zijn vergelijkbaar met zonnefoto's. De berekende granulen lijken sterk op de echte, maar er zijn geen kleine structuren tussen de granulen, omdat het rekenmodel geen fluxbuizen bevat.





De stromingen in de computersimulatie van Stein en Nordlund. Deze schematische tekening toont de granulen als platte pannenkoeken op het zonsoppervlak. Daaronder welt de materie op in grote bellen; de neerwaartse stromingen zijn geconcentreerd in dunne stroomdraden die zich tot bundels samenvoegen. De uitsparingen tonen hoe dit samengaan zich op verschillende schalen herhaalt.

temperatuurafname wordt het gas aanzienlijk doorzichtiger. Tegelijk impliceert grote doorzichtigheid dat meer energie de zon als straling verlaat (de fotonen ontsnappen in plaats van lokaal te zijn opgesloten), hetgeen een lekkage van energie betekent en ten gevolge daarvan steilere temperatuurafval. De twee effecten versterken elkaar; als resultaat valt de temperatuur in deze dunne laag af van 11000 K eronder tot 6000 K erboven.

De convectieve warmte komt onder deze laag omhoog in brede langzaam stijgende stromen, terwijl de afgekoelde materie er uit neerdaalt in dunne draderige 'vingers' met veel draaiing. Deze dunne draden zijn gelokaliseerd onder de mesogranulaire verzamelpunten. Hoe komt dit patroon tot stand? Een opstijgend volume hete materie zet uit omdat de dichtheid van het zonnegas naar buiten afneemt. Slechts een klein gedeelte bereikt het oppervlak; de uitzetting daarvan zien wij als het aangroeien van een granule. Dit hete oppervlaktegas wordt door het verlies aan zonnestraling sterk afgekoeld. De intergranulaire lanen bevatten gas dat al enige tijd op deze wijze is afgekoeld en ze zijn daardoor donkerder en zwaarder; op die plaatsen ontstaat de neerwaartse terugstroming. Deze is het sterkste in de mesogranulaire concentratiepunten: de horizontale stromingen die daarin samenkomen, bevatten gas dat het langste aan stralingskoeling is blootgesteld en dat dus het sterkste is afgekoeld. De diepstekende en snel neerwaarts stromende vingers eronder zijn daar het gevolg van. Onder het oppervlak voegen deze zich samen; hoe dieper, hoe groter de maaswijdte tussen de nauwe neerwaartse stroomdraden.

De grootste granulen ontstaan daar waar toevallig geen andere grote granulen aanwezig zijn, zodat ze ongestoord kunnen groeien. Hun expansie wordt gedreven door een horizontaal drukverschil tussen centrum en rand dat wordt onderhouden door het opwellen van steeds nieuwe hete materie. Als de granule te groot wordt, is deze aanvoer te klein ten opzichte van de stralingsverliezen; de granule krijgt dan een donkere zware kern die de aanvoer afremt en valt uiteen in een nog expanderende ring van brokstukken. De maximale grootte van granulen wordt zo bepaald door gebrek aan evenwicht tussen aanvoer van onderen en verlies van stralingsenergie naar buiten. Meestal wordt het evenwicht al door een buurman verstoord voor de maximale afmeting is be-

Optische zonnetelescopen

Zonnetelescopen zijn in principe gewone telescopen, maar in de praktijk zijn er heel wat verschillen. De zon is veel helderder dan een ster (letterlijk een verschil van dag en nacht), zodat met een veel kleinere openingsverhouding (diameter/brandpuntsafstand) kan worden volstaan. Zonnetelescopen zijn daarom meestal veel langer (tot 150 meter), maar tegelijk kleiner in diameter (40-80 cm) dan andere telescopen.

Er zijn twee problemen die specifiek zijn voor zonnetelescopen. Het eerste is dat van de mechanische stabiliteit. Het is ondoenlijk om telescopen van 100 meter of meer met de schijnbare beweging van de zon langs onze hemel mee te laten draaien, vooral niet omdat de klemtoon in het zonnemonitoring licht op zo groot mogelijke beeldscherpte. (Dat is al moeilijk voor een 'gewone' Cassegraintelefoon. Bij het volgen van het object verandert de doorbuiging van de telescoopen enigszins, zodat de uitlijning van hoofdspiegel en secundaire spiegel slechter wordt. In feite zijn er nauwelijks spiegeltelescopen op aarde die hun theoretisch scheidend vermogen halen. Dat is wel gelukt met ESO's New Technology Telescope. Daarin wordt de hoofdspiegel actief ondersteund, zodat dergelijke vervormingen voortdurend gecorrigeerd worden (alsmede de quasi-sferische aberratie waarmee ook deze telescoop behept is, net als de Hubble Space Telescope).

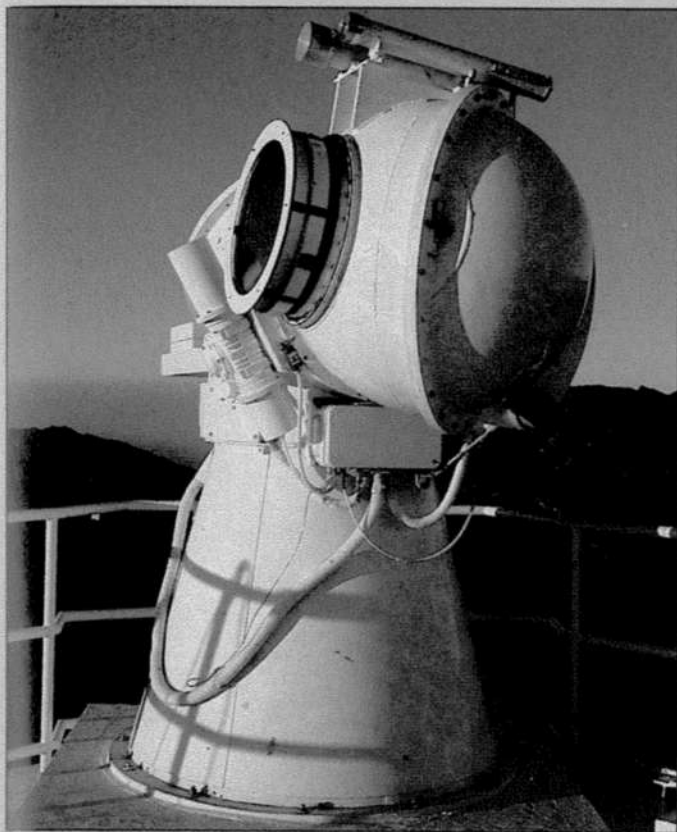
Bij zonnetelescopen wordt daarom doorgaans gebruik gemaakt van een *heliostaat*: een stelsel van twee vlakke spiegels waarmee de zon wordt stilgezet. Met twee reflecties wordt de bundel dan verticaal gemaakt, ongeacht de positie van de zon aan de hemel. De telescoop kan dan zeer solide worden opgesteld (in een zware toren).

Het tweede probleem is dat de zonnestraling veel warmte bevat en daarmee de lucht in de nabijheid van de telescoop verhit, bijvoorbeeld door het telescoopgebouw en de grond eromheen te bestralen, en zo bijdraagt tot slechte seeing. Ook, en nog erger, levert de samenbundeling van de zonnestralen nabij het brandvlak grote verhitting binnen de telescoop zelf, met ernstige interne luchtontrust en slechte interne seeing tot gevolg. Voor de grootste zonnetelescoop ter wereld, op Kitt Peak in de USA, leggen deze omgevingsseeing en interne seeing zware beperkingen op aan de beeldkwaliteit; een oplossend vermogen van beter dan enkele boogseconden wordt daar vrijwel nooit gehaald.

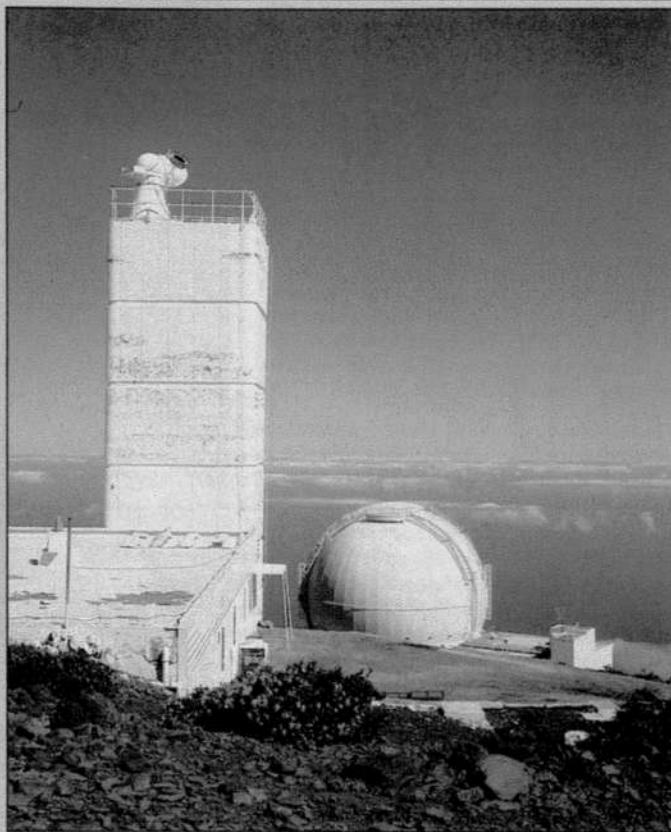
Een rigoreuze methode om van de interne seeing af te komen is het vacuüm-zuigen van de hele telescoop. Dit principe is toegepast bij de Vacuum Tower Telescope van het US National Solar Observatory op de Sacramento Peak Sterrenwacht. Deze bezit nog voor de heliostaat een grote glasplaat waarna de lichtweg in vacuüm verloopt. Ook in andere zonnetelescopen wordt deze oplossing gebruikt. Het probleem is dan echter dat in de afdekkende glasplaat door het drukverschil van één atmosfeer tussen binnen- en buitenkant interne spanningen optreden die de beeldkwaliteit benadelen. Dat probleem is door G. Scharmer in de Zweedse vacuümtelescoop op La Palma opgelost door niet een spiegel als afbeeldend element te gebruiken, maar een lens: zijn telescoop is een refractor waarin het objectief tegelijk ook de afsluiting van het vacuüm levert. Het objectief is een doublet dat zo is ontworpen dat bij een drukverschil van één atmosfeer precies de juiste vorm ontstaat.

Een andere oplossing wordt verwezenlijkt door de Utrechtse opticus R.H. Hammerschlag. Zijn telescoop is gebaseerd op een nieuw concept: de 'open' telescoop die open en bloot in de wind wordt geplaatst (op La Palma waait het in tijden van goede seeing stevig). De wind blaast dan dwars door de telescoop heen en voorkomt zo dat interne verhitting het beeld bederft. Ook is de toren waarop de telescoop wordt geplaatst van geheel open constructie, opdat de heersende luchtstroming minimaal verstoord wordt. Hetzelfde concept ligt ten grondslag aan de vier acht-meter telescopen die tezamen de Very Large Telescope van ESO zullen vormen (zie illustraties op blz. 153).

De McMath-zonnetelescoop op Kitt Peak, nabij Tucson (V.S.). De McMath-telescoop is een spiegeltelescoop met een brandpuntsafstand van 83 m en een diameter van 1,50 m. Aan het begin van de scheve koker zit een heliostaat: twee vlakke spiegels die tezamen de beweging van de zon langs de hemel compenseren. De afbeeldingspiegel bevindt zich diep onder de grond, aan het eind van de 136 m lange koker. Het zonsbeeld met een diameter van 82 cm wordt ongeveer op grondniveau gevormd en geanalyseerd met spectrografen. Hoewel dit vanuit de grootste zonnetelescoop ter wereld is, haalt hij bij lange na niet de grootste beeldscherpte. De seeing van de atmosfeer boven en rondom de telescoop is doorgaans slechts: binnenin de telescoop wordt het beeld door interne verhitting ten gevolge van de felle zonnestraling verder vertroebeld. Meestal is het effectief scheidend vermogen slechts enkele boogseconden. De McMath-telescoop is daarom niet geschikt om granulen te fotograferen of met hoog scheidend vermogen spectrografisch onderzoek te verrichten. Hij is echter bij uitstek geschikt om de gemiddelde effecten van granulatie op spectraallijnen en hun zwaartekrommen te meten. Daartoe wordt gebruik gemaakt van de Fourier Transform Spectrometer (een Michelson-interferometer) die een zeer hoge spectrale resolutie heeft.



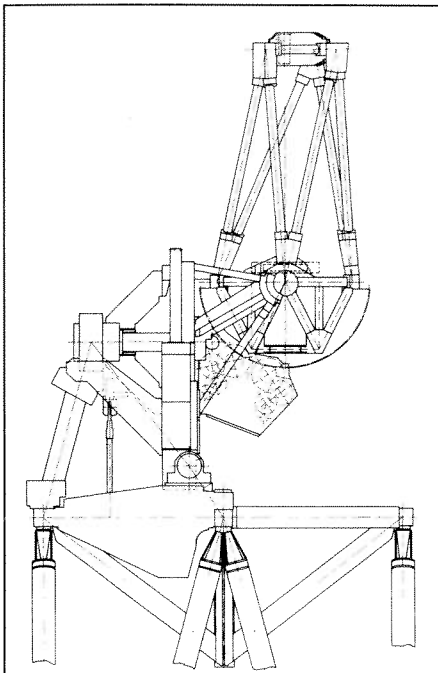
Detailopname van de 'turret' van de Zweedse vacuümrefractor. De donkere schijf is het objectief; daarachter bevinden zich, in vacuüm, de twee 45-graden afbuigingsspiegels die dienen om de zon te volgen. De twee bolvormige spiegelhouders draaien tezamen om een verticale as over een horizontaal lager. De houder met het objectief draait om een horizontale as met een verticaal lager tussen de twee bollen. Bij het volgen van de zon bewegen beide tegelijk, waarbij ze worden gestuurd door een computer. Onderin het gebouw bevindt zich bovendien een snel-beveegbare spiegel waarmee een zonnevlek door bijsturing op z'n plaats wordt gehouden; deze corrigeert volgfouten automatisch.



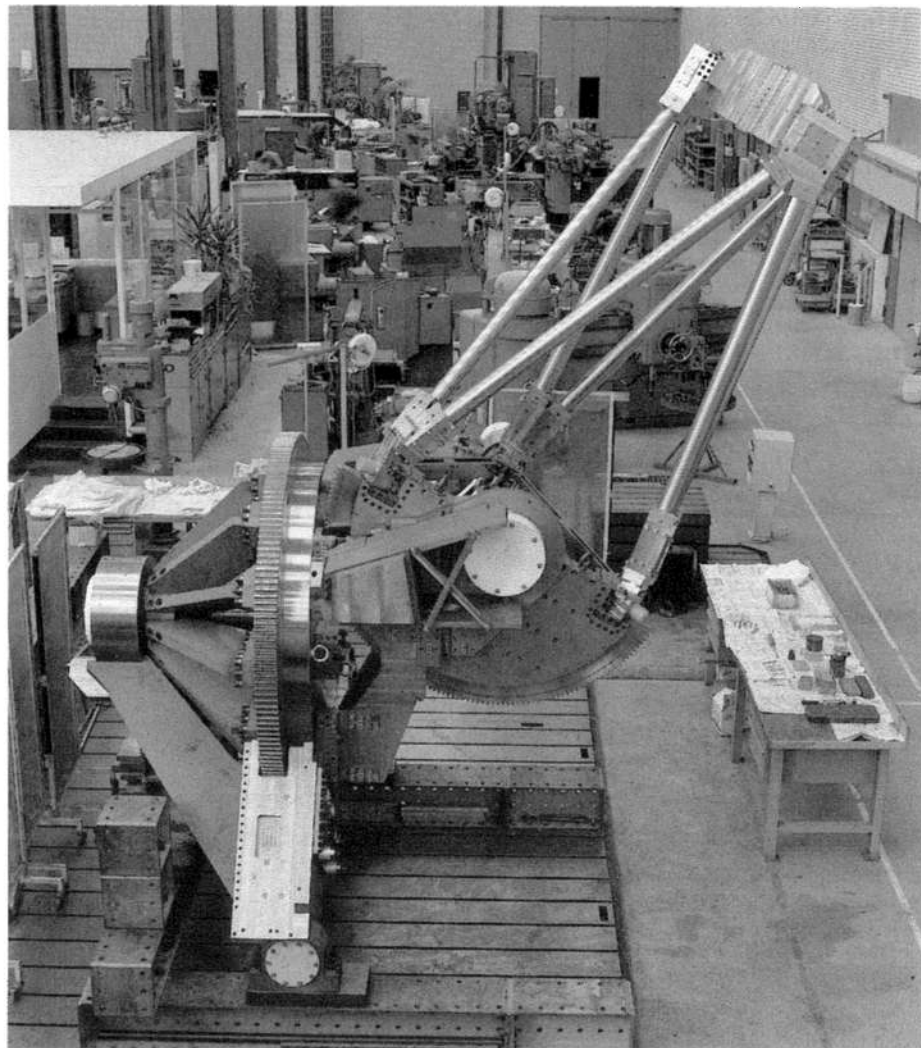
De Zweedse zonnetelescoop op La Palma. Dit gebouw bevat nu de nieuwe vacuümrefractor die in 1986 in bedrijf werd genomen. Op de achtergrond en wat lager op de rand van de caldeira staat de Brits-Nederlandse William Herschel telescoop, die een objectiefdiameter van 4,2 m heeft. De Zweden waren de eerste astronomen die op La Palma telescopen bouwden, zowel voor zonnewaarnemingen als voor nachtelijke sterrenkunde. In de meeste moderne zonnetlescopen wordt het probleem van de interne seeing door verhitting van de lucht binnen de kijkerbuis opgelost door de telescoop vacuüm te zuigen. De telescoop begint en eindigt dan met 'vensters': vlakke glasplaten waarmee het



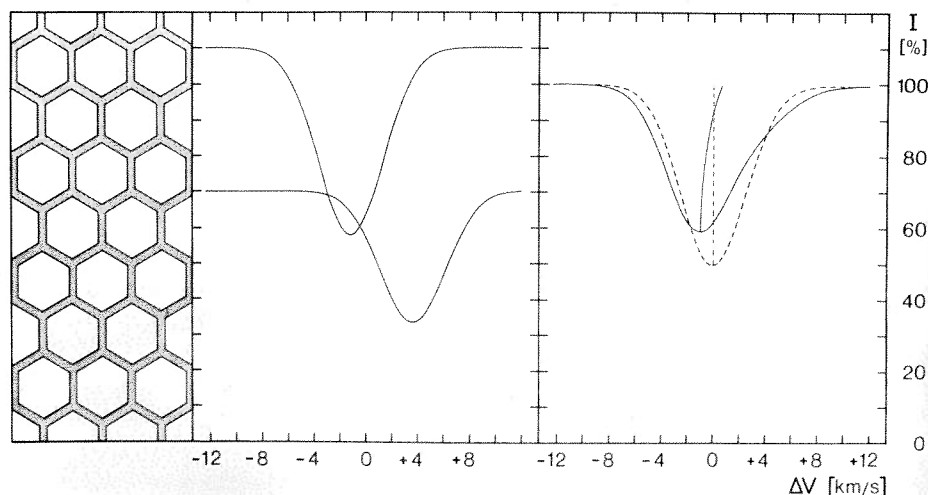
vacuüm van de atmosfeer wordt gescheiden. Een probleem dat zich daarbij voordoet, is dat het intredevenster waarmee de telescoop begint onder grote druk staat (één atmosfeer). Daardoor treden er spanningen in het materiaal op die de beeldkwaliteit nadelig beïnvloeden. De Zweedse refractor, ontworpen door G. Scharmer, ondervangt dit probleem door te beginnen met een lens in plaats van een vlak venster. Deze lens is zo ontworpen, dat hij net bij één atmosfeer drukverschil zijn juiste vorm krijgt. Tegelijk is deze lens ook afbeeldend element, zodat een diepgelegen spiegel overbodig is. Na het objectief volgen twee vlakke spiegels in alt-azimut-opstelling. Tezamen zetten ze het beeld van de zon stil: na twee weerkaatsingen blijft de bundel verticaal, terwijl de zon langs de hemel beweegt. Op grondniveau wordt de bundel met een spiegel en het uitredevenster op analyse-apparatuur gericht. De telescoop is bescheiden in afmeting (brandpuntsafstand 22 meter, objectiefdiameter 47 cm), maar uitmuntend in beeldscherpte, ook omdat hij op La Palma (één der Canarische Eilanden) op een voortreffelijke lokatie staat, waar vaak een zeer goede atmosferische seeing is. De laatste jaren gebruiken de Utrechtse zonnephysici, in samenwerking met de zonnegroep van de Lockheed Research Laboratories, vooral deze telescoop.



De Utrechtse open torentelescoop. Door R.H. Hammerschlag wordt een zonnetelescoop gebouwd volgens een nieuw principe. Het is een zeer korte telescoop (brandpuntsafstand primaire focus 2 m, diameter 45 cm) die met de zon mee kan bewegen, zodat de twee vlakke spiegels overbodig zijn. Hoe minder reflecties, des te hoger de optische kwaliteit; ook levert dit de mogelijkheid precieze polarisatiemetingen te doen. Dat is niet mogelijk als er heliostaat-spiegels worden gebruikt; geen van de bestaande zonnetlescopen is geschikt voor precisie-polarimetrie. De telescoop heeft een equatoriale opstelling. In dit schema en op de foto is dat letterlijk zo: hij staat hier in equatoriale stand, met horizontale pool-as. Hij kan ook op andere breedtegraden worden gebruikt door het grote uurhoekwiel (dat nu verticaal staat) te kantelen. Ook is toekomstig gebruik op de Zuidpool mogelijk, met het uurhoekwiel horizontaal. Het probleem van de interne beeldvertroebeling wordt in deze telescoop op originele wijze opgelost door gebruik te maken van de harde wind die doorgaans waait over de bergkam op La Palma waar ook deze telescoop terecht moet komen. De telescoop is geheel open van constructie zodat de wind er dwars doorheen zal blazen. Lokale wervels ontstaan dan in veel geringere mate. De telescoop zal worden opgesteld op een 15 m hoge toren die eveneens geheel open is. Op de tekening is de bovenkant ervan zichtbaar. Toren en telescoop zijn bestendig tegen de wind omdat bij hun bouw grote aandacht is besteed aan de mechanische stijfheid. Dit komt tot uiting in de grote afmetingen van de tandwielen en de bijbehorende overbrengingen en in het totale gewicht van de telescoop (12 ton!). De toren en de telescoop zijn grotendeels gereed en zullen waarschijnlijk binnenkort naar La Palma verhuizen. Ze staan nu respectievelijk te Westerbork en in de Centrale Werkplaats van de TU Delft.



De Utrechtse zonnetelescoop in aanbouw in de Centrale Werkplaats van de TU Delft. Het grote uurhoekwiel, waarvan de vertanding goed zichtbaar is, draait om een horizontale as die aan de linkerzijde wordt ondersteund. Rechts ziet men het halve declinatie wiel. De hoofdspiegel komt aan de voet van de pijpconstructie waarmee de secundaire optiek wordt ondersteund.



Een schematische voorstelling van het effect van de granulatie op de vorm van spectraallijnen, gemiddeld over het steroppervlak. Het honingraatpatroon geeft schematisch de oppervlaktestructuur weer met heldere granulen en donkere intergranulaire lanen. Ernaast staan spectraallijnen, waarbij de intensiteit verticaal is uitgezet tegen de golflengte, gemeten in de vorm van roodverschuiving. De granulen geven het bovenste lijnprofiel in de middelste figuur; de hoge intensiteit en de blauwverschuiving ontstaan doordat de hete materie naar ons toe beweegt. De lanen zijn koel en bewegen van ons af; hun spectrum heeft geringere intensiteit en roodverschuiving. In het over de hele ster gemiddelde spectrum ontstaat een asymmetrisch lijnprofiel waarvan de kern enigszins is blauwverschoven. Het gestippelde lijnprofiel is wat zou worden waargenomen in de afwezigheid van granulatie. De zwaartekromme, die op elke hoogte in het profiel de middelwaarde tussen de beide flanken toont, is een maat voor de door de granulatie geleverde vervorming.

reikt. Als er veel fluxbuizen aanwezig zijn, wordt deze grootte nooit bereikt.

De kleinste afmetingen van granulen worden ook door straling bepaald. Voor kleinere diameters dan ongeveer 200 km is de uitwisseling van energie tussen hete en koude structuren door horizontale straling heel efficiënt, omdat fotonen een vrije weglengte van ongeveer 100 km bezitten; op deze schaal wordt eventueel temperatuurcontrast door stralingsuitwisseling gladgestreken. (Uit de waarnemingen valt dit nog niet op te maken, aangezien de instrumenten het benodigde oplossend vermogen -100 km op de zon komt overeen met 0,14"- nog niet halen.) De stromingspatronen bezitten echter kleinere schaalgroottes, vooral in de neerwaartse vingers die veel draaiing bezitten -zoals de draaikolk in de afvoer van een badkuip.

De simulaties verschaffen ook inzicht in de energiebalans in de fotosfeer. De dunne laag granulaire pannekoekjes ligt juist daar waar de meeste straling de zon verlaat, tengevolge van de afkoeling door de stralingsverliezen; daarboven treedt echter stralingsverhitting op. Granulen schieten nog enkele honderden kilometers door en vangen daarbij straling in van beneden. Daarbij gaat het vooral om de miljoenen spectraallijnen van neutraal en éénmaal geïoniseerd ijzer in het nabije ultraviolet, op golflengten tussen 300 en 400 nm. In deze lijnen zijn de ijzerdeeltjes in het gas sterke absorberders; ze hebben tot gevolg dat de doorschietende granulen veel minder afkoelen dan ze anders gedaan zouden hebben.

Tenslotte voorspellen de simulaties een verschijnsel dat nog niet is waargenomen: het optreden van schokken waar de horizontale stromingen in twee expanderende granulen op elkaar botsen. Deze stromingen worden in de simulaties soms supersoon (sneller dan

de lokale geluidssnelheid van ongeveer 10 km/sec). In de schokken wordt het stromende gas sterk samengeperst.

Granulatie op andere sterren

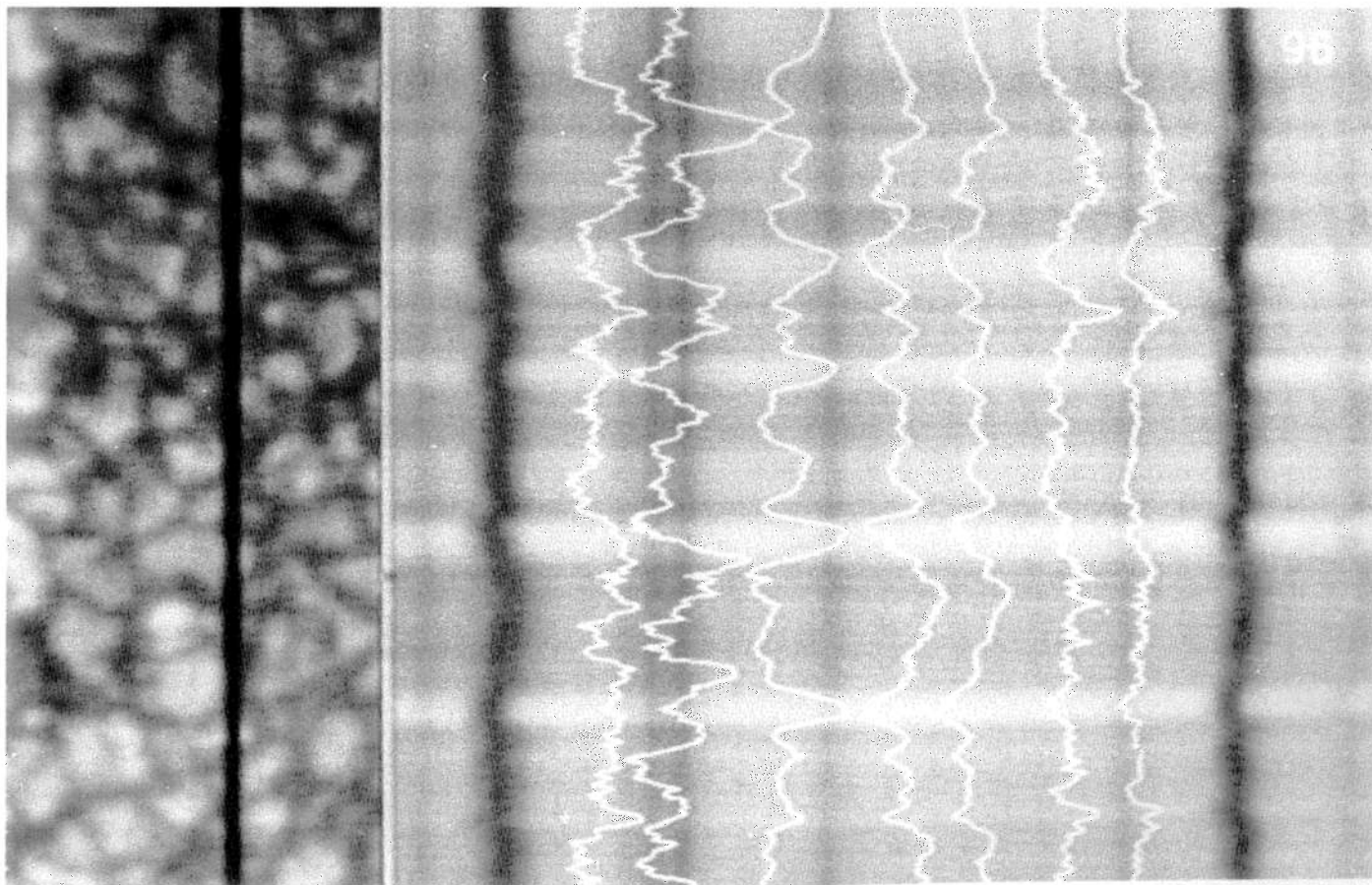
Er zijn ook al numerieke simulaties voor overeenkomstige oppervlaktepatronen op andere sterren. Hieraan werkte Å. Nordlund samen met D. Dravins. Zij zijn beide Zweden, maar Nordlund woont en werkt in Kopenhagen, hetgeen hun samenwerking bemoeilijkt. Zij gebruikten namelijk de CRAY-supercomputer van Saab-Scania te Linköping, maar omdat daar allerlei militaire projecten op draaien, werd het Nordlund

verboden vanuit Kopenhagen per telefoon 'in te loggen' en zo de computer op afstand te gebruiken, hetgeen elders algemeen gebruikelijk is. Tijdens het lunchuur van de militairen is deze computer vrij voor civiele wetenschappers, maar dan moeten ze ter plekke aanwezig zijn. Lange tijd moest Nordlund derhalve tussen Kopenhagen en Linköping pendelen voor een uurtje werk in luchtijd. Zij voerden granulatiesimulaties uit voor de sterren Procyon (een ster met spectraal type F5 IV-V; Procyons oppervlaktetemperatuur bedraagt 6600 K), α Cen A (een G2 V-ster met een oppervlaktetemperatuur van 5800 K), α Cen B (K1 V; $T = 5200$ K) en β Hyi (G2 IV; $T = 5800$ K). Deze vier voorbeelden betreffen kleine, zon-achtige sterren met ver-

De invloed van de granulatie op spectraallijnen in het zonnenspectrum. Het linkerdeel is een videobeeld dat werd opgenomen met de Zweedse zonnetelescoop op La Palma. De donkere verticale balk is de ingangsspleet van de spectrograaf. Het daardoor doorgelaten zonlicht leidt tot het spectrum in het rechter gedeelte van de foto. Beide opnamen zijn gemaakt met CCD-camera's waarvan het videosignaal is gesynchroniseerd. De eerste filmde het spleetvlak dat spiegelend is gemaakt; de tweede het spectrum. De effectieve belichtingstijd was slechts 1/50e seconde. De synchronisatie zorgt ervoor dat de beide beelden volstrekt simultaan (gelijktijdig) zijn en dus precies dezelfde seining-verstoring door de dampkring ondervinden.

In het rechterdeel verloopt de golflengte horizontaal; verticaal verandert het spectrum naar gelang een ander deel van het zonsoppervlak door de spleet werd doorgelaten. De heldere horizontale banden corresponderen dus met granulen die in het linkerdeel juist onder de donkere balk zitten. De twee zwarte, kronkelige verticale banden links en rechts in het rechterdeel zijn twee spectraallijnen, respectievelijk van geïoniseerd ijzer (Fe II) en van neutraal ijzer (Fe I). Ze kronkelen al naar gelang hun dopplerverschuiving: naar het rood (naar links) voor intergranulaire lanen, die van ons af bewegen, naar het blauw (naar rechts) voor opkomende granulen. Ook wisselt de helderheid en de breedte van de lijnen met de plaats op het zonsoppervlak.

De witte lijnen zijn grafische voorstellingen van metingen aan dit spectrum. De linker twee geven de helderheid in de kernen van de twee ijzerlijnen. Deze variëren niet synchroon, omdat geïoniseerd ijzer en neutraal ijzer verschillend reageren op temperatuurveranderingen in de atmosfeer van de zon. De derde kromme van links geeft de helderheid in het continuüm tussen de spectraallijnen. Deze is groot (uitwijking naar rechts) voor granulen en klein (uitwijking naar links) voor de donkere intergranulaire lanen. De beide volgende witte lijnen tonen de dopplerverschuiving; deze twee variëren samen en zijn duidelijk anti-gecorrleerd ('uit fase') met de helderheid. De twee rechter krommen tonen de lijnbreedte; deze is het grootst op de flank van granulen, waar grote gradiënten optreden in snelheid en temperatuur. (Opname van de auteur.)



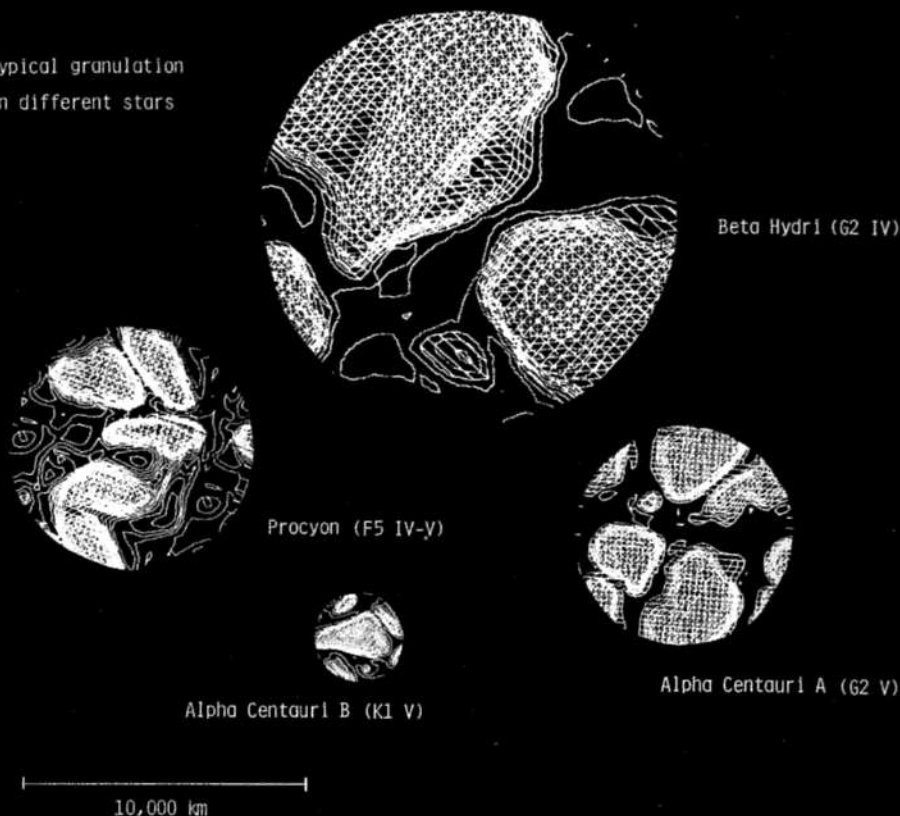
schillende temperaturen en zwaartekrachtsversnellingen aan het oppervlak. Voor α Cen A is de zwaartekracht de helft van die van de zon, voor β Hyi een kwart; beide sterren hebben echter dezelfde effectieve temperatuur als de zon. Procyon is heter dan de zon en α Cen B koeler, maar deze sterren hebben dezelfde zwaartekrachtsversnelling aan het oppervlak als de zon.

Alle vier de sterren vertonen simulatie-granulen, die echter van karakter verschillen. Voor de zon en de twee sterren met dezelfde effectieve temperatuur ligt de laag waarin het temperatuurcontrast tussen granulen en intergranulaire lanen het grootst is net onder het zichtbare oppervlak. In deze sterren is het temperatuurcontrast van de granulatie nog aanwezig in de fotosfeer, maar het is aanzienlijk kleiner dan wat zich net onder het oppervlak afspeelt. De bijbehorende intensiteitsvariatie is dan nog weer een stuk kleiner. Dat komt omdat we in hete en koude elementen niet tot op dezelfde diepte kijken. In de hete granulen dringt onze blik minder diep door als gevolg van de grotere ondoorzichtigheid van heet gas. Hun contrast met de omringende materie lijkt minder dan het in werkelijkheid is (op dezelfde geometrische diepte), omdat alle temperaturen, de granulaire en de intergranulaire, naar buiten afnemen.

Procyon is heter en hier is deze versluiering minder sterk: in deze ster liggen de granulen 'bloot' aan het oppervlak, met groot contrast. Voor de koude zon-achtige ster α Cen B is dit juist andersom: daarin liggen de granulen geheel onder het oppervlak verstopt en ziet men slechts gering contrast, veroorzaakt door de indirecte invloed van de granulen op de hogere atmosfeer.

De sterren met kleinere zwaartekrachtsversnelling tonen veel grotere granulen dan de

Typical granulation
in different stars



Resultaten van de numerieke simulaties door Dravins en Nordlund voor granulatie op andere sterren dan de zon. Dit zijn vier stukjes oppervlak van vier verschillende sterren. De mate van arcering neemt toe met de berekende oppervlaktehelderheid. α Cen B heeft de kleinste granulen en β Hydri de grootste.

zon. (In de verre toekomst zal ook de zon naar een kleinere oppervlaktezwaartekracht evolueren. Toekomstige zonnear-

nemers krijgen het wellicht makkelijker om granulen voldoende scherp af te beelden.) Wellicht hebben reuzensterren zelfs reuzengranulen, maar dat valt zonder precieze simulatie nog niet te zeggen.

Granulen op andere sterren

Kunnen we granulen op andere sterren zien? Niet met de huidige telescopen, en ook niet met de Hubble Space Telescope als hij onbedorven was geweest of na zijn toekomstige reparatie. Dit valt eenvoudig in te zien met de formule voor het hoekscheidend vermogen van een telescoop volgens het Rayleigh-criterium: $\Delta = 1,22\lambda/D$ rad met λ de golflengte en D de diameter van de apertuur, of in boogseconden: $\Delta'' = 0,13/D_m$ met D_m in meter voor een golflengte van 520 nm (die prettig in uw oog past).

Het dubbelsterpaar α Cen A en α Cen B bevat de dichtstbijzijnde sterren na de zon. Ze staan op 1,3 parsec (= 4,2 lichtjaar = 270 000 AE) en ze zijn beide ongeveer even groot als de zon. Dus is hun diameter in hoekmaat 270 000 maal kleiner dan die van de zon; dat is slechts 0,007". Met zo'n tweeduizend granulen per diameter is derhalve een scheidend vermogen van een miljoenste boogseconde noodzakelijk, ofwel een telescoop met een diameter van tientallen kilometers.

In de verre toekomst is zo'n scheidend vermogen op optische golflengten wellicht realiseerbaar met een optische interferometer op de maan. Onlangs is onder leiding van J. Noordam (Radiosterrewacht Dwingeloo) een verkennend ESA-rapport geschreven over zulke interferometrie vanaf de maan. Daarin wordt beklemtoond dat een basislijn van enkele honderden meters al moeilijk genoeg zal zijn, en tientallen jaren ontwikkelingsduur vereist. Nog even wachten dus!

Niettemin zijn er al metingen aan de granulen op andere sterren beschikbaar, verkregen door D. Dravins met de nauwkeurige Coudé Echelle Spectrometer van ESO te Chili. Voor alle vier de sterren waarvoor hij met Nordlund granulatiesimulaties berekende, heeft hij ook bijpassende waarnemingen. Dit zijn metingen van de asymmetrie van de profielen van spectraallijnen in het sterlicht. Zulke asymmetrie wordt veroorzaakt doordat de granulen omhoog bewegen en middels het Dopplereffect een blauwverschuiving meegeven aan hun bijdrage aan de van de hele ster gemeten spectraallijn. Tegelijk zijn ze ook heter, zodat hun straling intenser is. De intergranulaire lanen daarentegen zijn donkerder en bewegen van ons af, hetgeen in roodverschuiving resulteert. In het spectrum van de hele ster, middelend over pakweg een miljoen granulen, is deze signatuur meetbaar als een kleine maar significante asymmetrie en verschuiving van spectraallijnen. Deze verschillen een beetje tussen verschillende spectraallijnen, al naar gelang de lijnen hoger of dieper in de atmosfeer worden gevormd. De overeenkomst van de metingen met de oppervlakte-gemiddelde asymmetrieën en verschuivingen, die uit de simulaties volgen door gedetailleerde berekening van de spectraallijnen te verrichten, is over het algemeen uitstekend. Dit bemoedigende resultaat geeft aan dat de numerieke simulaties een betrouwbaar beeld verschaffen van granulen op andere sterren.

Conclusie

De granulatie van de zon is nu een begrepen verschijnsel. Daarmee vormt de granulatie het tweede grote succes van de moderne zonnephysica, na het begrijpen van de vijf-minuten oscillatie en de daaruit voortspruitende helioseismologie. De reden van dit succes is het samengaan van goede waarnemingen en realistische computerberekening; dat was overigens ook bij de identificatie van de zonne-trillingen als eigentrillingen van de hele zon het geval. In beide gevallen leidt het voor de zon verkregen begrip ook tot stellaire toepassingen.

Wat valt er te verwachten? Op dit moment wordt veel aandacht besteed aan de magnetische fijnstructuur van de zon, de aard en de gedragspatronen van de magnetische fluxbuizen. De Lockheed-groep concentreert zich nu daarop in hun waarnemingen met de SOUP en de Zweedse telescoop op La Palma; hier zijn ook onderzoekers van de Rijksuniversiteit Utrecht bij betrokken. Daarnaast worden deze instrumenten ook gebruikt voor het bestuderen van niet-magnetische schokverschijnselen in de hogere zonne-atmosfeer; dit is een project van ondergetekende. Aan beide onderwerpen wordt tevens uitvoerige simulatiearbeid verricht. Als alles goed gaat zal het samenvoegen van waarnemingen van voldoende kwaliteit en numerieke simulaties met voldoende realisme ook op deze onderzoeksterreinen voor een doorbraak zorgen. □