

# De atmosfeer van de zon

Syllabus voor cursusavond Stichting De Koepel, Sterrewacht Sonnenborgh, Utrecht

R.J. Rutten

Sterrekundig Instituut, Utrecht

28 oktober 1992

## Inhoudsopgave

1	Inleiding	2
2	Optische zonneteleskopen	2
3	Fotosfeer, chromosfeer en corona	4
4	Spectraallijnen	5
5	Chromosfeer en corona tijdens zonsverduisteringen	7
6	Fotosfeer	8
7	Magnetische activiteit	9
8	Chromosfeer en corona	10

# 1 Inleiding

Voor aardbewoners is de zon als centrum van ons zonnestelsel bepalend voor onze levensomstandigheden. Voor astronomen is de zon “onze meest nabije ster”. Juist deze nabijheid maakt haar heel belangrijk voor astrofysisch onderzoek. Enerzijds kunnen wij door studie van de zon onze kennis van opbouw en evolutie van sterren controleren en uitbreiden doordat wij:

- processen en structuren kunnen zien en onderzoeken die maar een klein deel van het oppervlak beslaan, iets wat we bij andere sterren niet kunnen.
- zwakke doch belangrijke stralingscomponenten, zoals röntgen, extreem ultraviolet, radiostraling en neutrino- emissie aan de zon nauwkeurig kunnen bestuderen, terwijl wij deze componenten uit de meeste andere sterren niet of moeilijk kunnen detecteren.

Anderzijds levert de naaste omgeving van de zon (vooral de corona) ons het dichtstbijzijnde “laboratorium” waarin de omstandigheden enigszins vergelijkbaar zijn met die op andere plaatsen in de kosmos, waar nog slecht begrepen energierijke processen plaatsgrijpen (kernen van melkwegstelsels, enz.), namelijk een zeer heet ( $10^5$  à  $10^7$  K), geïoniseerd zeer ijl ( $10^{-16}$  g/cm<sup>3</sup>) gas, doorweven met magnetische velden. In deze omgeving kunnen we “van nabij” processen bestuderen die door de hele kosmos heen belangrijk zijn.

Het huidige onderzoek van de zonneatmosfeer moet vooral binnen het laatste kader worden geplaatst. In deze cursusavond zal ik echter vooral een inleiding geven, op zonnekijkers, spectraallijnen, en de aard van het onderzoek. De meeste zonneverschijnselen die hier ter sprake komen worden uitvoeriger behandeld in de daar specifiek aan gewijde cursusavonden.

## 2 Optische zonneteleskopen

Zonneteleskopen zijn in principe gelijk aan sterretelskopen, 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 verhouding *diameter/brandpuntsafstand* kan worden volstaan. Zonneteleskopen zijn daarom meestal veel langer (tot 150 meter) maar tegelijk kleiner in diameter (40–80 cm) dan sterretelskopen.

Er zijn twee problemen die specifiek zijn voor zonneteleskopen. 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 zonneonderzoek ligt op zo groot mogelijke beeldscherpte. Dat is al moeilijk voor een “gewone” Cassegraintelekoop voor sterrewaarnemingen; bij het volgen van het object verandert de doorbuiging van de teleskoop enigszins zodat de uitlijning van hoofdspiegel en secundaire spiegel slechter wordt. In feite zijn er nauwelijks spiegelteleskopen op aarde die hun theoretisch scheidend vermogen halen. Dat is met name 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 teleskoop behept is, net als de Hubble Space Telescope, door het verkeerd positioneren van correctieapparatuur tijdens het slijpen van de hoofdspiegel.)

Bij zonneteleskopen 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 vertikaal gemaakt ongeacht de positie van de zon aan de hemel. De teleskoop kan dan zeer solide worden gekonstrueerd, binnen een zware toren.

Het tweede probleem is dat de zonnestraling veel warmte bevat en daarmee de lucht nabij de teleskoop verhit, bijvoorbeeld door het teleskoopgebouw 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 teleskoop zelf, met ernstige interne luchtontrust en slechte interne seeing tot gevolg. Voor de grootste zonneteleskoop ter wereld, op Kitt Peak in de USA, leggen deze omgevingsseeing en interne seeing zware beperkingen op aan de beeldkwaliteit; beter dan enkele boogseconden wordt daar vrijwel nooit gehaald.

Een rigoreuze methode om van de interne seeing af te komen is om de hele teleskoop vacuüm te zuigen. Dat is het geval met de Vakuüm Tower Teleskope 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 zonneteleskopen 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 vakuümteleskoop op La Palma opgelost door niet een spiegel als afbeeldend element te gebruiken maar een lens: zijn teleskoop is een refraktor waarin het objektief tegelijk ook de afsluiting van het vacuüm levert. Het objektief 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 teleskoop is gebaseerd op een nieuw concept: de “open” teleskoop waarin deze open en bloot in de wind wordt geplaatst (die op La Palma in tijden van goede seeing stevig waait). De wind blaast dan dwars door de teleskoop heen en voorkomt zo dat interne verhitting het beeld bederft; ook is de toren waarop de teleskoop wordt geplaatst van geheel open constructie opdat de heersende luchtstroming minimaal verstoord wordt. De toren heeft een hoogte van 15 m; de teleskoop een diameter van 45 cm. Hij zal volgend jaar op La Palma worden geplaatst. Blijkt het concept te voldoen en de verstoring van de lokale omstandigheden zo gering dat inderdaad een goede beeldscherpte wordt gehaald, dan zal de spiegel worden vervangen door een grotere, van 80 cm diameter.

Een veelbelovende techniek bij al deze telescopen is het toepassen van “spikkelinterferometrie” waarbij een enkele opname (tegenwoordig digitaal, met een CCD-chip) wordt opgesplitst in een honderdtal subopnamen met korte belichtingstijd, minder dan 0.01 s. Op zulke opnamen worden de verstoringen van de atmosfeer bevroren. Op elke opeenvolgende opname verschillen ze echter wel; uit een voldoende lange reeks kan het inmiddels niet veranderende zonsbeeld met verhoogde scherpte worden gereconstrueerd.

Nog mooier is het om de bobbel en hobbels die de atmosfeer aanbrengt in de aankomende golffronten *in real time* te corrigeren, met een flexibele spiegel waarvan het oppervlak

bliksemsnel van de juiste hobbels en bobbel (omgekeerd) wordt voorzien. Hiermee zijn in zonnewaarnemingen al goede resultaten bereikt. De verwachting is dat deze techniek de komende jaren nog sterk zal verbeteren.

Buiten de atmosfeer heeft men natuurlijk helemaal geen last van de atmosfeer, Het in de ruimte brengen van een forse zonnetelescoop is al lang een wens van de zonnefysici. Helaas is een groot projekt hiertoe, waaraan meer dan een deecenium is gewerkt, vorig jaar door de NASA wegens geldgebrek in de ijskast gezet. De ESA is bezig met een interferometrische zonnetelescoop, maar dat zal nog minstens tien jaar duren.

### 3 Fotosfeer, chromosfeer en corona

Het zonlicht komt uit de *fotosfeer*: een dun laagje van slechts enkele honderden kilometers dik, dun in vergelijking tot de diameter van de zon die 1,4 miljoen kilometer bedraagt, honderd maal zo groot als de aarde. Diep in het inwendige komt de zonne-energie vrij uit de kernfusiereacties waarmee de zon waterstof in helium omzet en zich zo vrijwaart van zwaartekrachts-ineenstorting — al vijf miljard jaar lang, en nog zo'n vijf miljard jaar in de toekomst. Die energie sijpelt door de zon heen naar buiten, aanvankelijk als gammastraling en meer naar buiten in de vorm van convectieve energie, te vergelijken met het borrelen van kokend water. In de fotosfeer treedt deze energie uit in de vorm van zichtbaar licht; dit is dus de laag die we normaal waarnemen. Hij wordt “het oppervlak” van de zon genoemd, ook al is hij net zo gasvormig als de rest van de zon. De temperatuur ervan is ongeveer 6 000 K.

Net buiten de fotosfeer bevindt zich een ijlere bolschil van zo'n tweeduizend kilometer dikte die de *chromosfeer* wordt genoemd omdat hij tijdens een totale zonsverduistering te zien is als een briljant purperen ringetje rond de afgedekte fotosfeer. De kleur ontstaat uit een mengsel van spectraallijnen van het element waterstof dat in de zon het overgrote deel van de materie vormt (en feitelijk overal in het heelal behalve op stenige planeten zoals de aarde).

De chromosfeer is heter dan de van de fotosfeer, de temperatuur loopt er buitenwaarts op tot 20 000 K. Hoe dat komt is nog niet duidelijk. In die gebieden op de zon waar sterke magnetische velden aanwezig zijn hebben deze klaarblijkelijk met de temperatuursverhoging te maken; elders lijkt het alsof geluidsgolven (die overal in de zon aanwezig zijn, de zon broemt zachtjes in zichzelf) tot schokgolven vervormen en daarbij het chromosferische gas verhitten. De preciese processen zijn echter niet bekend; hieraan wordt veel onderzoek gewijd.

Buiten de chromosfeer bevindt zich de *corona*. Deze is veel uitgestrekter en zeer ijl. Hij heeft een temperatuur van maar liefst één tot enkele miljoenen Kelvin. Het staat inmiddels onomstotelijk vast dat de magnetische structuren op de zon aan deze hoge temperatuur ten grondslag liggen, maar ook van deze verhitting is het nog niet duidelijk hoe hij precies in zijn werk gaat. Er zijn “gesloten” gebieden waarin de magnetische veldlijnen in grote lussen naar het oppervlak terugbuigen, en “open” gebieden waarin de veldlijnen vanuit de zon uitwaaien, het planetenstelsel in. In de open gebieden worden de deeltjes uitgezonden die

in de zogenaamde “zonnwind” met grote snelheid van de zon wegvliegen. Tijdens grote uitbarstingen van magnetische activiteit op het zonsoppervlak (zonnevlammen) komen extra veel deeltjes vrij; op aarde zorgen zij voor poollicht en magnetische storingen, en wellicht hebben ze ook invloed op het klimaat.

De corona is slechts tijdens zonsverduisteringen te zien, als een wittige krans (“corona” is Latijn voor krans) rondom de donkere maan. Hij is smal en rond in tijden van geringe zonsactiviteit; bij veel activiteit, als er veel zonnevlekken en zonnevlammen zijn, toont de corona lange uitlopers.

## 4 Spectraallijnen

Als we de zonnestraling voldoende fijn in golflengte ontleden blijkt het spectrum ervan te bestaan uit een *continuum* dat de globale energieverdeling volgt van een zwart-gekleurd voorwerp met een temperatuur van ongeveer 5800 K, en daarin talloze *spectraallijnen*. Alleen al het zichtbare deel van het zonnenspectrum bevat meer dan 20.000 spectraallijnen. Elke lijn correspondeert precies met één van de diskrete energiesprongen die de valentie-elektronen van de atomen in het zonnegas kunnen maken.

De spectraallijnen in het zonnenspectrum zijn donkere *absorptielijnen*. Waarom? De sprong van een valentie-elektron naar een hogere baan (“aanslag” of “excitatie”) onder absorptie van een foton van de juiste golflengte biedt een extra mogelijkheid tot absorptie in vergelijking met het naastliggende continuum. Door de extra absorptie is het gas ondoorzichtiger op de golflengte van de spectraallijn dan in het continuum ernaast. Daardoor kijken we op die golflengte minder diep de zon in: *op de golflengte van een spectraallijn is de kijkdiepte geringer dan in het continuum*. In de fotosfeer neemt de temperatuur van het gas naar buiten af. De straling die we waarnemen komt daarom op de lijngolflengte uit een koelere laag en heeft een navenant lagere intensiteit. De lijnen in het zonnenspectrum zijn dus donker omdat de temperatuur in de fotosfeer naar buiten afneemt. In de chromosfeer neemt de temperatuur weer naar buiten toe; spectraallijnen die daar ontstaan (dat is het geval voor ultraviolette straling met golflengte  $\lambda < 160$  nm en ver-infrarode straling met golflengte  $\lambda > 160$   $\mu\text{m}$ ) zijn in emissie ten opzichte van het naastliggende continuum.

De vorming van de spectraallijnen in het zonnenspectrum verschilt van die in laboratoriumproeven zoals u zich die wellicht van het natuurkundepraktikum op school herinnert. In een bekend proefje wordt natrium (als keukenzout) in een vlam gestrooid; het spectrum daarvan bevat dan de heldere gele natriumlijn die we ook kennen van de gele verlichting langs de snelwegen (eigenlijk zijn het twee lijnen, vlak naast elkaar). In de vlam is de lijn in emissie. Hoe komt dat? Daartoe moeten we ons verdiepen in de preciese atomaire processen die zich in de vlam afspelen. Het valentie-elektron kan op twee manieren worden aangeslagen, niet alleen door absorptie van een foton van de juiste energie (volgens  $E = hf = hc/\lambda$ , met  $E$  de aanslagenergie,  $h$  de konstante van Planck,  $f$  de frekwentie,  $c$  de lichtsnelheid en  $\lambda$  de golflengte), maar ook in een botsing waarbij de benodigde aanslagenergie  $E$  wordt ontleend aan de kinetische energie van het onderhavige natriumatoom en een passerend ander deeltje. In de vlam is de temperatuur voldoende hoog dat zulke bewegingsenergie rijkelijk voorhanden is. De zo per *botsingsaanslag* geëxciteerde natrium-

atomen vallen na verloop van tijd (van de orde van een miljardste seconde) terug, onder uitzending van een foton met de golflengte van de gele natriumlijn. Op deze wijze is een foton *gecreëerd* uit de thermische energie waarmee de deeltjes in de vlam bewegen. Het is een extra foton, gesuperponeerd op het zwakke continuüm van de vlam. Tezamen leveren de zo gecreëerde extra fotonen de heldere emissielijn.

In de natriumlampen langs de wegen wordt de aanslagenergie ook ontleend aan botsingen, echter niet middels thermische bewegingsenergie maar met deeltjesversnelling geleverd door een elektrisch potentiaalverschil. Zulke straling is *niet-thermisch*.

In een volgend praktikumproefje straalt men de vlam aan met een helder achtergrondcontinuüm. Als men dan met een spectroscop door de vlam heen naar de achtergrondbron kijkt, verschijnt de natriumlijn als donkere absorptielijn in dat continuüm. Hoe zit dat? De aanslag van de valentie-elektronen naar de hogere baan in de natriumatomen wordt nu veel vaker geleverd door invang van een passend foton uit de achtergrondbron dan door een botsing; nu zijn zulke fotonen immers volop voorhanden. Na een miljardste seconde valt zo'n aangeslagen elektron weer terug, waarbij net zo'n foton wordt uitgezonden als bij de aanslag werd ingevangen. Er is dus niets gebeurd, behalve dat doorgaans richtingsverandering optreedt omdat de her-uitzending van de fotonen gelijkelijk over alle richtingen is verdeeld. Dit proces heet verstrooiing. In de richting van de spectroscop zijn er minder fotonen overgebleven dan wanneer er geen vlam met verstrooiende natriumatomen in de bundel had gezeten. Op de golflengte van de natriumlijn zie je daarom minder fotonen dan in het continuüm aan weerszijden. De verstrooiing levert een absorptielijn.

Hoe zit het nu met de zon? In veel schoolboeken wordt de tweede proef aangehaald als verklaring dat de zon absorptielijnen toont, maar dat is voor de meeste zonnelijnen onjuist. In tegenstelling tot de laboratoriumvlam is de zon niet "optisch dun" maar "optisch dik". De zon is ondoorzichtig; fotonen komen er niet doorheen. De zijdelings weggestrooide fotonen waren in het geval van de vlam definitief uit de bundel naar de spectroscop verloren, maar in de zon worden ze hoogstwaarschijnlijk weer opnieuw ingevangen. Ook kunnen fotonen uit allerlei andere richtingen juist de richting naar de waarnemer in worden verstrooid. Het is dus niet op voorhand duidelijk hoe verstrooiing uitpakt in de uiteindelijke som over alle processen.

Bovendien zijn de temperatuur en de deeltjesdichtheid in de zon voldoende hoog dat er ook veel fotoncreatie optreedt, zoals in de eerste proef hierboven. Omdat de fotonen de zon niet direkt verlaten is ook het omgekeerde proces, fotonvernietiging, belangrijk. Daarin wordt na aanslag door fotonvangst de aanslagenergie omgezet in kinetische energie, middels deëxcitatie in een botsing. Fotoncreatie en fotonvernietiging tezamen koppelen de straling in de zon, ook op de lijngolflengte, aan de lokale temperatuur. De temperatuur is immers een maat voor de snelheden waarmee de deeltjes bewegen, dus voor de beschikbare kinetische energie. Daarmee wordt de straling van de zon in eerste instantie beschreven door de lokale temperatuur. De reden dat de zon absorptielijnen toont is dat de temperatuurafval naar buiten wordt bemonsterd door de geringere kijkdiepte op de lijngolflengte. Als de temperatuur naar buiten toeneemt krijg je emissielijnen. Is de temperatuur niet met de hoogte in de zonsatmosfeer zou veranderen zouden er helemaal geen spectraallijnen zijn.

De situatie in de zon is dus heel anders dan in de laboratoriumproef. Alleen voor de allersterkste resonantielijnen in het zonnenspectrum gaat de tweede proef gedeeltelijk op als analogon. De verblijftijd in de aangeslagen toestand is voor zulke overgangen zó kort is dat er relatief weinig kans is op fotonvernietiging door botsingsdeëxcitatie. De aangeslagen atomen krijgen de tijd niet om een botsing te ondergaan. In dat geval overheerst verstrooiing.

Buiten de zonsrand, zoals waargenomen tijdens een zonsverduistering, gaat de eerste proef beter op als analogon. Kijkend langs de zon is er geen achtergrondbron, en langs de gezichtslijn is de zon dan optisch dun in plaats van optisch dik. Boven de zonsrand worden alle spectraallijnen daarom emissielijnen, net zoals in de eerste proef. De preciese overgang van absorptielijn naar emissielijn hangt af van de preciese aard van de verstrooiingsprocessen binnen de spectraallijn. Meting van de omslag tijdens een zonsverduistering levert daarom een gevoelige maat voor deze processen.

Meer in het algemeen bevatten spectraallijnen een schat aan informatie. Ze vertellen ons welke atomen in het zonnegas aanwezig zijn, hoeveel van elk element, wat de ionisatiegraad is, en wat de lokale aanslag- en ionisatiekondities zijn. Uit de laatste volgen de temperatuur en de druk van het gas ter plaatse. Met het Dopplereffekt en het Zeeman-effekt leveren spectraallijnen daarnaast gevoelige snelheidsmeters en magnetometers. *Spectraallijnen coderen de fysische omstandigheden ter plekke op atomaire schaal.* Bovendien is deze codering onafhankelijk van de afstand waar het licht over reist. Spectrale analyse gaat even goed voor de zon als voor een quasar aan de andere kant van het heelal — mits we een voldoende grote teleskoop benutten om het spectrum ervan uitéén te rafelen.

## 5 Chromosfeer en corona tijdens zonsverduisteringen

De chromosfeer en de corona van de zon zijn van gas, met zo'n lage dichtheid dat je er dwars doorheen kijkt. De hele zon is van gas, maar daar kijk je niet doorheen; de dichtheid neemt binnenwaarts zo snel toe dat het gas al in de *fotosfeer* ondoorzichtig is. In die laag blijft onze blik steken (ofwel: daaruit ontsnapt de zonnestraling). Deze laag is slechts honderd kilometer dik. In vergelijking met de zonsdiameter (anderhalf miljoen km) is dat zo'n dun schilletje dat we van "zonsoppervlak" spreken, ook al is dat niet een korst waar je op zou kunnen staan.

De straling die uit dit laagje komt passeert de chromosfeer en de corona ongehinderd. Alleen de sterkste spectraallijnen in het visuele spectrum (zoals de  $H\alpha$  lijn van waterstof en de Ca II H & K lijnen van geïoniseerd calcium) bevatten een bijdrage uit de chromosfeer. Het zonnegas is minder doorzichtig op de golflengten van deze overgangen doordat de waterstofatomen en calciumionen in de zon extra kunnen absorberen op de lijngolflengten; deze straling ontsnapt daarom pas verder naar buiten. Dat is de reden dat zonsopnamen in het licht van deze sterke lijnen chromosferische structuren tonen, zoals protuberansen en fakkels.

In gewoon ("wit") licht naar de zon kijkend zien we dus de fotosfeer, dwars door chromosfeer en corona heen. Náást de zon kijkend zouden we de corona wel kunnen zien, ware

het niet dat het schijnsel van dit ijle gas bijna een miljard maal zwakker is dan dat van de zonneshijf aan onze hemel. Het licht van de schijf wordt in de aardse dampkring verstrooid, resulterend in een hemelhelderheid die veel groter is, minstens een miljoenste van de schijfhelderheid en dus duizend maal helderder dan de corona. De verstrooiing wordt veroorzaakt door molekulen en stofdeeltjes in onze dampkring. De molekulen verstrooien het sterkst op blauwe golflengten; licht dat ons oog niet direkt van de zon bereikt maar pas via enkele verstrooiingen aan dampkringmolekulen is daarom wat blauwer van tint dan het witte zonlicht zelf. Daarom is onze hemel blauw. Om dezelfde reden is de ondergaande zon rood. Een overmaat aan rood licht blijft bij laagstaande zon over in de direkte zonnestraling, aangezien de vele molekulen langs de kijkrichting het blauw grotendeels naar andere richtingen verstrooid hebben.

Stof in de dampkring geeft wittige verstrooiing. Als je je duim op armlengte voor de zon houdt en dan blauw ziet tot op je duim is de hemel uitzonderlijk schoon. Dat is in Nederland niet vaak het geval; de kans is groter in het hooggebergte, vooral als men zich boven de inversielaag bevindt. Met speciale telescopen (“coronagrafen”) kan de corona daar zichtbaar worden gemaakt, althans het binnenste en helderste deel ervan. Maar om de hele corona te zien moet men in de ruimte vertoeven, of in de maanschaduw tijdens een totale zonsverduistering. De maan schermt dan het direkte zonlicht af over een groot oppervlak op aarde, voldoende groot dat het in de dampkring verstrooide licht van de gebieden buiten de maanschaduw (van over de horizon bij een totale verduistering) veel zwakker is dan het eigen schijnsel van de corona.

## 6 Fotosfeer

Wie het oppervlak van de zon bekijkt met hoog scheidend vermogen, 1" of beter, ziet de *granulatie*, bestaande uit heldere *granulen* en smalle donkere *intergranulaire* lanen. Deze gekorreldeheid 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. Pas recent is het echter preciese hoe en waarom van de granulatie 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. Dat valt met geen enkele teleskoop te zien; niettemin zijn er waarnemingen die de computervoorspellingen bevestigen.

Een uitvoerig artikel over de zonnegrnulatie en over de numerieke simulaties van sterrengranulatie van mijn hand vind u op mijn website (verschenen in Zenit in 1991).

Granulatie vindt men overal op het zonsoppervlak behalve in de gebieden waar sterk magnetisch veld door het oppervlak naar buiten breekt. Dat zijn de actieve gebieden. Erbuiten vindt men ook een ander verschijnsel dat net als de granulatie van hydrodynamische aard is (niet van magnetohydrodynamische aard): de vijf-minuten oscillatie. Het is een golfpatroon bestaande uit interferentie van miljoenen eigentrillingen van de zon; meer hierover is te vinden in de syllabus van R. van Oss.



## 7 Magnetische activiteit

Magnetische velden op de zon kan men meten doordat veel spectraallijnen in zo'n veld een splitsing vertonen (het Zeeman-effekt). Met behulp van dit effect worden zogenaamde magnetogrammen gemaakt: plaatjes van de zon waarbij de kleur het magneetveld aangeeft. In witte gebieden is het veld naar ons toegekeerd, in zwarte gebieden van ons af, de intensiteit is evenredig met de veldsterkten. In deze plaatjes is goed te zien dat het veld zeer grillig over de fotosfeer verdeeld is: plaatselijk zijn er zeer sterke velden, elders bijna geen. De sterke velden concentreren zich vooral in de zogenaamde actieve gebieden waar de vlekken in zitten, en verder in de kleine vlokken van het chromosferisch netwerk. Meer hierover is door C.J. Schrijver behandeld in de aan dit onderwerp gewijde cursusavond.

In een volledig ontwikkeld *actief gebied* met vlekken en fakkels zien wij ook de *protuberansen* (*filamenten*) tussen de gebieden met tegengestelde magnetische veldrichting. Tegen de achtergrond van de zon is een filament een donkere, dus koele sliert. Ze zijn zo'n paar honderdduizend km lang en ongeveer 5 000 km dik.

Aan de rand van de zon echter kijken we er van opzij tegen aan en dan blijkt dat filamenten purperrode (chromosfeer-achtige) wolken zijn die tot 10 000 km hoogte in de corona kunnen reiken: protuberansen. Het spectrum wijst op een temperatuur van 10 000 K (corona 1 000 000 K) en de dichtheid blijkt 100 maal die van de corona te zijn, zodat de wolk in drukevenwicht is met zijn omgeving.

Het aantal vlekken, fakkels en andere verschijnselen op de zon varieert met een periode van 11 jaar. Tijdens zo'n periode hebben de magnetische veldstructuren op de noordhelft van de zon precies de tegengestelde richting vergeleken met die op de zuidkant. Wijst tijdens een periode van 11 jaar het veld van de leidende vlekken op de noordhelft naar ons toe dan wijst het veld van de leidende vlekken op de zuidhelft van ons af. Bij de volgende periode van elf jaar blijken deze veldpolariteiten te zijn omgeklapt. De eigenlijke activiteitscyclus duurt dus 22 jaar!

Recent is herontdekt dat de zonneactiviteit soms ook verstek laat gaan, bijvoorbeeld in het Maunder-minimum (1645 – 1715). Aan het begin van elke elf-jarige periode zien wij de vlekken optreden op hoge heliografische breedte, en naarmate de periode vordert blijken ze op steeds lagere breedtes voor te komen. Dit leidt tot het zogenaamde vlinderdiagram, dat het optreden van zonnevlekken als functie van de tijd beschrijft.

Komen vlekken, fakkels, vlammen enz.) óók voor in (alle) andere sterren die convectieve mantels bezitten, dus in sterren van spectrale typen F, G, K en M? Het antwoord op deze vraag is niet direct te geven: op de sterstipjes kun je geen individuele vlekken en fakkels onderscheiden, en de methode om de polarisatie in de lijncomponenten bij Zeeman-splitsing te gebruiken, faalt bij de zon-achtige sterren, omdat over de hele sterschijf opgeteld de tegengestelde polariteiten elkaar opheffen. Zoals C.J. Schrijver echter heeft laten zien werken indirecte methoden heel succesvol; een bijzonder succesrijke is het kijken naar (en meten van) de emissieknobbels in de kernen van de  $\text{Ca}^+$ , H en K lijnen. Bij heel actieve sterren ziet men – met conventionele sterfotometers – helderheidswisselingen die goed te verklaren zijn met door rotatie over de sterschijf trekkende “stervlekken”; bovendien treden ook sterke “stervlammen” op.

De sterrotatie wordt geleidelijk geremd door het uitstromen van de sterrewind langs het magnetische veld. Met het afnemen van de rotatiesnelheid neemt de dynamowerking echter ook af. In vergelijking met veel andere sterren is de al 5 miljard jaar oude zon een langzaam roterende en weinig actieve ster geworden.

## 8 Chromosfeer en corona

De ijle buitenlagen van de zon vormen een bron van veel astrofysisch onderzoek. Dat komt omdat chromosfeer en corona de dichtstbijzijnde plaats vormen waar zich allerlei fysische processen afspelen die in aardse laboratoria niet kunnen worden gemeten, maar die in allerlei verder verwijderde objecten in het heelal wel belangrijk zijn. De zon vormt een unieke mogelijkheid tot bestudering van zulke processen, het is immers de enige ster die in detail kan worden waargenomen.

De ijle buitenlagen van de zon bestaan, zoals de meeste materie in het heelal, uit *plasma*, een materiestoestand die verschilt van de vaste, vloeibare en neutrale gasvormige fasen die wij op aarde gewend zijn. Een plasma is een gas waarin de atomen zijn geïoniseerd: de buitenste electronen zijn eruit verwijderd, vaak in grote getale; in de corona komt bijvoorbeeld 25 maal geïoniseerd ijzer voor ( $\text{Fe}^{25+}$ ). Deze sterke ionisatie is het gevolg van de hoge temperatuur en kleine dichtheid. De ladingsscheiding die er door ontstaat tussen positief geladen ionen en negatief geladen electronen heeft belangrijke gevolgen: deze deeltjes kunnen onafhankelijk van elkaar bewegen. Allerlei soorten magnetische en elektrische instabiliteiten spruiten daar uit voort. Daarmee zijn chromosfeer en corona vooral een terrein van plasmafysisch onderzoek.

Dit onderzoek begon met waarnemingen van de corona tijdens zonsverduisteringen, maar het zou niet ver gekomen zijn als die de enige onderzoeksmogelijkheid waren gebleven. Er zijn ruwweg twee totale zonsverduisteringen per drie jaar, meestal met een duur van slechts zo'n drie minuten. Een onderzoeker die vijftig jaar lang alle zonsverduisteringen zou waarnemen en daarbij het geluk zou hebben altijd en onbewolkte hemel te treffen zou in totaal slechts twee uur waarnemingstijd hebben vergaard.

Gelukkig helpen andere technieken een veel completer beeld van de corona te verschaffen, met name waarneming van straling op vaak kortere en veel langere golflengten dan zichtbaar licht. De radiostraling en de Röntgenstraling die de zon uitzendt komen namelijk uit de corona terwijl de ultraviolette straling en de straling in het verre infrarood en op sub-mm golflengten (tussen infrarood en radiogolven) uit de chromosfeer afkomstig zijn. Op deze golflengten ligt het waargenomen "zonneoppervlak" daarom zelf al in de corona, respectievelijk de chromosfeer; beelden van de zon die in deze stralingssoorten worden gemaakt tonen chromosfeer en corona direct. Met de opkomst van de radioastronomie en de ruimtevaart (die ultraviolette en Röntgenobservatie mogelijk maakte vanuit raketten en satellieten buiten de aardatmosfeer) kwam het onderzoek van chromosfeer en corona tot bloei. Hoogtepunten waren de ultraviolet- en Röntgentelescopen aan boord van Skylab in de vroege jaren zeventig en de Solar Maximum Mission in de jaren tachtig. Beide zijn inmiddels op aarde teruggevallen; momenteel bereidt de European Space Agency een nieuwe ruimtemissie voor, SOHO geheten, die de zon ondermeer zal waarnemen in ultraviolette

en Röntgengolven.

Het onderzoek van infrarode en sub-mm straling is hierbij wat achtergebleven. Waarnemen in het infrarood vereist grote telescopen, net zoals in het radiogebied; dat gaat lastig vanuit de ruimte. Op de grond is er veel absorptie door de aardatmosfeer; daarom vindt men de nieuwe generatie infrarood en (sub-)mm telescopen op hoge bergtoppen zoals die van Hawaii. Ook de ontvangertechnologie stelt problemen maar hierin worden nu goede vorderingen gemaakt. Net zoals de overige sterrenkunde richt het zonneonderzoek zich nu meer op het infrarood; er zijn vergevorderde plannen om de grootste zonnetelescoop ter wereld (de McMath telescoop van het National Solar Observatory te Kitt Peak in de V.S.) aanzienlijk te vergroten ("Big Mac") ten behoeve van infraroodwaarnemingen.

Het accent van het onderzoek ligt op de magnetohydrodynamica en de plasmafysica. De twee hoofdschotels hierin vormen de spectaculaire zonnevlammen en de zonnwind. Hierover meer in de desbetreffende cursusavonden van G.H.J. van den Oord en W. de Graaff.