

Twee zonsverduisteringen t

Op 11 juli 1991 werden alle inwoners van Mexico City tegelijk 'verdonkeremaand' tijdens de zonsverduistering. Voor hun voorvaderen, de Azteken, waren mensenoffers nodig om de dagelijkse zonsopkomst te garanderen – hoe onheilspellend zou het overdag uitdoven van de zon wel niet voor hen zijn geweest? Tegenwoordig is een zonsverduistering aanzienlijk minder dramatisch, een natuurverschijnsel zoals veel andere, mooi en interessant maar geen zaak van leven en dood, alleen voor wetenschappers van daadwerkelijk belang.

Rob Rutten

Ook wetenschappers zijn tegenwoordig wat minder geïnteresseerd in zonsverduisteringen dan vroeger. Er is al jaren geen eclipsexpeditie van Nederlandse beroepsastronomen geweest. De 'Eclipscommissie' van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen is opgeheven. Zonsverduisteringen zijn nu, net als maansverduisteringen, meer een aangelegenheid voor amateurs. De auteur heeft deze ontwikkeling van nabij ervaren. In 1970 nam hij deel aan de op één na laatste Nederlandse eclipsexpeditie, naar Mexico.

Afgelopen zomer jaar keerde hij terug om op bijna dezelfde plek de verduistering van 1991 te zien, maar dit keer als eclipsstoeier. Hier op beide eclipsen een terugblik.

Nederlandse eclipsexpedities

In de vorige eeuw en de eerste helft van onze eeuw waren eclipsexpedities belangrijke ondernemingen waaraan veel sterrenwachten aanzienlijke mankracht besteedden. De reden ligt voor de hand: dankzij het wonder-

baarlijke toeval dat aardbewoners de zon en de maan juist even groot zien, is tijdens een zonsverduistering de corona zichtbaar en is bij het begin en einde van de totaliteit kortstondig de chromosfeer te zien, als een purperen ringetje rond de verduisterde zon. In die tijd boden totale zonsverduisteringen de voornaamste mogelijkheid tot waarneming van deze hete en ijle buitenlagen van de zon. Ook was de zon de enige ster waarvoor het bestaan van zo'n omhulsel vast stond. De schaarse mogelijkheden tot het onderzoek daarvan werden daarom benut, hoewel de

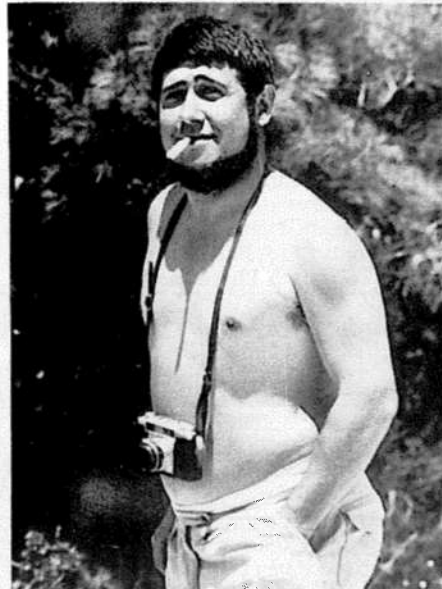
De eclipsopstelling van 11 juli 1991 bij Salina Cruz. Een zakkijkertje diende als telescoop, met plakband aan een stoelleuning bevestigd om een zonsbeeld op de grond te projecteren. De tenen van de auteur sieren het projectievlak en het hoofd van zijn zoon verhoogt het contrast. De maan overdekt de zon al voor een flink deel.

kans op welslagen van de expeditie gering was. De waarnemers moesten naar ver afgelegen oorden reizen, hun instrumenten opbouwen onder primitieve omstandigheden, alles op het juiste moment gereed hebben, en dan nog hopen op een onbewolkte hemel. Er zijn achttien Nederlandse eclipsexpedities geweest tussen 1901 en 1973. Daarbij ging het vooral om het verkrijgen van spectra van de chromosfeer en de uiterste zonsrand, een traditie ingeluid door M.G.J. Minnaert en A. Pannekoek in de jaren twintig. Zij waren de grondleggers van de beoefening van de astrofysica te Utrecht en Amsterdam, met nadruk op de spectroscopie volgens Pannekoeks uitspraak 'het spectrum is de schatkamer van de astronoom'. Deze pioniers smeedden spectraalanalyse tot een kwantitatieve wetenschap. Daarin worden de aanwezigheid en de vorm van spectraallijnen gebruikt om de fysische omstandigheden in sterrenkundige objecten te bepalen. Zulk natuurkundig onderzoek van verre objecten, *astrofysica*, vormt de hoofdschotel van de moderne sterrenkunde.

Toentertijd was er veel discussie over de aard van de chromosfeer. Het was onduide-



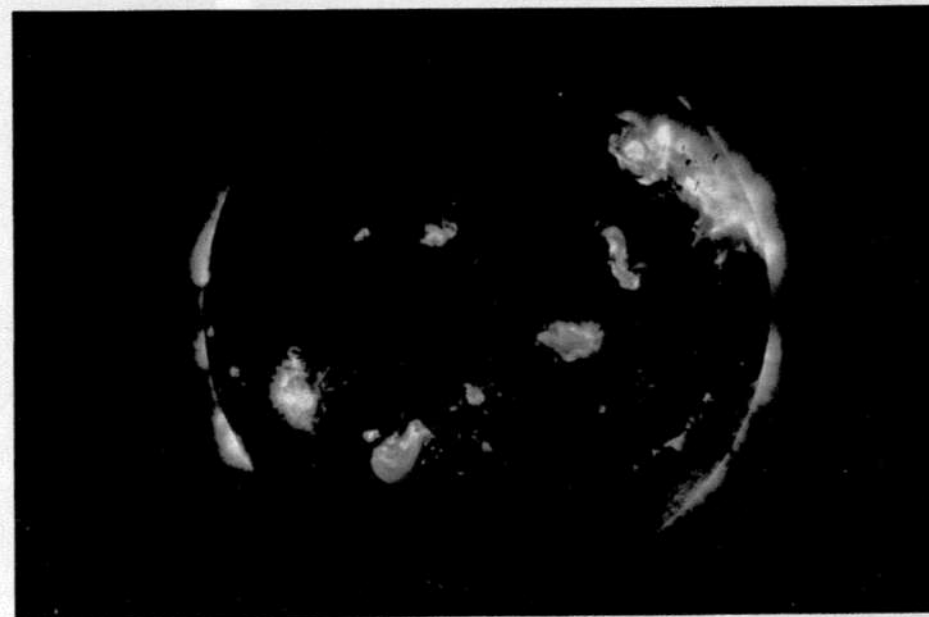
▲ Kampioen onder de Nederlandse eclipsgangers was J. Houtgast (1908 – 1982) van de Utrechtse Sterrewacht. Hij zag tien totale zonsverduisteringen. Hier werd hij door de auteur gefotografeerd tijdens de verduistering van 12 november 1966 te Brazilië, bij de ingangsspleet van de spectrograaf kort voor de totaliteitsfase.



▲ Chriet Titulaer begon zijn carrière als wetenschapspopularisator tijdens de ringvormige zonsverduistering te Griekenland in 1966. Als student sterrenkunde te Utrecht wist hij een reis naar Griekenland te versieren door op te treden als speciale verslaggever van het weekblad *De Spiegel*.

Een afbeelding van de zon in röntgenlicht, gemaakt met de NIXT-telescoop aan boord van een raket die op 11 juli 1991 werd gelanceerd te White Sands, New Mexico (V.S.). De vlucht duurde slechts enkele minuten. De lancering geschiedde op het moment dat de maanschaduw over Mauna Kea lag, ten einde de daar gemaakte opnamen van de corona naast de zon te kunnen vergelijken met de corona vóór de zon. De maan is dubbel afgebeeld, omdat het beeld is samengesteld uit twee opnamen. De foto toont de kleinschalige draderigheid waarin het coronale gas is gerangschikt langs de krachtlijnen van het magneetveld van de zon.

De NIXT-telescoop is een instrument van het Smithsonian Astrophysical Observatory en IBM dat met de nieuwe *multi-layer techniek* röntgenafbeeldingen maakt. Hierbij wordt de spectrale bandbreedte beperkt door opdamping van een groot aantal dunne lagen op elkaar. Tussen de lagen treedt interferentie op. De opname is gemaakt in het licht van vijftien maal geïoniseerd ijzer en toont gassen met een temperatuur van 1 tot 2 miljoen kelvin. Het scheidend vermogen is ongeveer één boogseconde. (Met dank aan L. Golub, SAO, Cambridge, V.S.)



Mexico

lijkt hoe deze tot op duizenden kilometers boven het zonsoppervlak 'gedragen' wordt en welke processen bijdragen aan de hoge temperatuur ervan. Die vragen zijn toen niet opgelost. Pas later werd duidelijk dat het magnetisch veld van de zon een overheersende rol speelt in de structuur van de chromosfeer en de corona. Ze bestaan uit plasma's, gassen waarin ladingsscheiding optreedt tussen positief geladen ionen en negatief geladen elektronen. Magnetische velden en elektrische potentiaalverschillen spelen daarin een belangrijke rol. Astrofysisch zonneonderzoek heeft daarmee een sterk plasmafysische inslag gekregen, een tendens waarin andere delen van de sterrenkunde nu volgen – wat schoorvoetend omdat de plasmafysica een der moeilijker terreinen van de natuurkunde vormt.

Inmiddels, in de door J. Houtgast geleide expeditie na de Tweede Wereldoorlog, was het accent van het Nederlandse eclipsonderzoek verschoven naar de spectroscopie van de lage chromosfeer en de uiterste zonsrand. De vraag was hoe en waarom spectraallijnen overgaan van donkere absorptielijnen op de zonnenschijf naar heldere emissielijnen daarbuiten.

Eclips van 1970 – expeditielid

Op 7 maart 1970 werd de zon verduisterd langs een schaduwpad over het Mexicaanse bergland ten zuiden van Mexico City. Een Utrechtse eclipsexpeditie nam deze verduis-

tering waar vanuit Miahuatlan, een dorp halverwege de weg van Oaxaca naar de westkust.

Zoals in alle door Houtgast geleide expedities werden bij het begin en bij het einde van de verduistering spectra opgenomen van de uiterste zonsrand, het laatste sikkeltje fotosfeer dat niet achter de maan verdwenen is. Houtgast gebruikte daartoe spectrografen van toenemende complexiteit, ontworpen door de optici G.J. Beernink en W. Werner van de Technisch Fysische Dienst TNO-TH Delft. Dit waren technische hoogstandjes, de gangbare eclipsapparatuur verre overtreffend (met uitzondering van die van enkele Amerikaanse en Japanse expedities). In 1970 lag het accent op het verkrijgen van hoge spectrale oplossing, met gebruik van een ingangsspleet, een groot tralie met sterke dispersie (1200 lijnenparen per mm), lange brandpuntsafstanden van de afbeeldingspiegels in de spectrograaf en snelle registratie van de spectra.

In 1970 deed de elektronica zijn intrede in het eclipsonderzoek. Voor die tijd bestond de apparatuur alleen uit optiek en mechanische onderdelen. In Miahuatlan werd voor het eerst een laser gebruikt om de spectrograaf uit te lijnen en het 'apparaatprofiel' ervan te bepalen (de vorm van de door de spectrograaf enigszins verbrede laserlijn). We hadden zelfgemaakte kwartsklokken waar we heel trots op waren. De coelostaat werd er ook mee gestuurd, omschakelbaar tussen twee kristallen om respectievelijk de zon en de maan te volgen; het laatste werd tijdens de verduistering gebruikt.

De belichtingstijden van de 70-mm filmcamera's werden automatisch gestuurd. Tegenwoordig bevat zelfs het eenvoudigste fotocameraatje een automatische belichtingsregeling, maar in 1970 was zulke sturing nog nieuw. Voordien werden belichtingen gemaakt volgens een te voren berekend schema waarin gemakkelijk fouten slopen, bijvoorbeeld als de waarnemingsplaats niet exact bekend was. Die werden te Miahuatlan vermeden met belichtingsautomatiek bestaande uit een volumineuze fotomultiplier en een heel rek elektronica met hoogspanningsvoeding, stabilisator en integratiecircuits. Voor het eerst maakte daarom

een elektronicus deel uit van het expeditie-team, in de persoon van J. van Amerongen. Nog geavanceerder was de registratieapparatuur die het afstudeerproject van M.W.M. de Graauw vormde. Hierin werd geprobeerd het spectrum niet vast te leggen op fotografische film, maar op analoge magneetband.

De spectrograaf werd gevoed met een coelostaat en een groot objectief, een doublet van 25 cm doorsnede en 340 cm brandpuntsafstand. Dit projecteerde een zonsbeeld op de intredepheet van de spectrograaf. De laatste was opgesteld in een lichtdichte keet, met alle optische onderdelen gemonteerd op aparte stenen pilaren. Slechts kleine stukjes spectrum konden worden geregistreerd, omdat voor de gewenste spectrale oplossing de dispersie navenant groot moest zijn. Er waren twee 70-mm filmcamera's, die een stukje blauw zonnespectrum met golflengte rond $\lambda = 460$ nm registreerden.

De opbouw van het instrumentarium nam vijf weken. De eerste week ging op aan het opsporen van de ruim veertig kisten. Ze waren bij vergissing niet in Veracruz maar in

Tampico aan land gezet. In de tweede week metselden we de benodigde tien pilaren. De resterende weken besteedden we aan het installeren en uitlijnen van de optiek, het werkend krijgen van de elektronica, het maken van ijkopnamen, focusering, polarisatiemetingen etc.

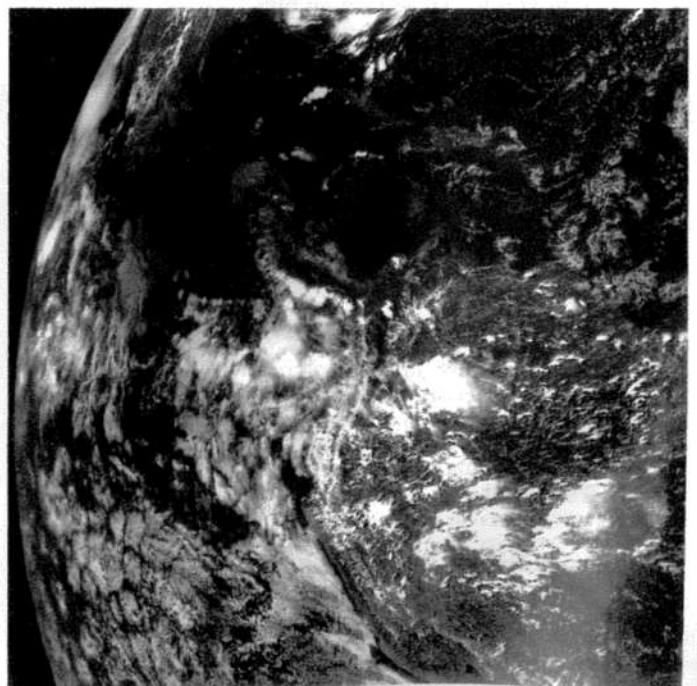
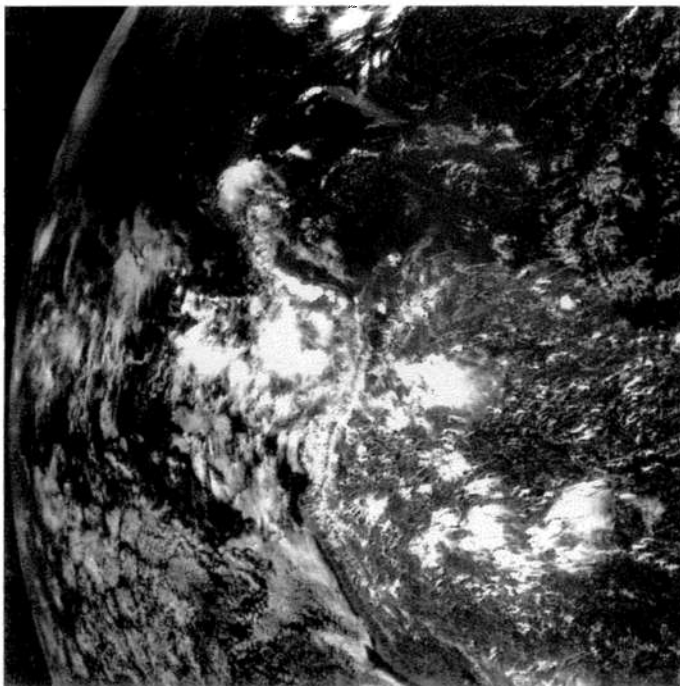
De expeditie vond onderdak in een pensionnetje in het dorp. Het was al eerder volgeboekt door een Amerikaanse expeditie, maar die had het verlaten wegens een overmaat aan kakkerlakken. Wij vonden het er heel gezellig. We werden verzorgd door een Indiaanse familie die op een houtvuur in een oliedrum eten voor ons kookte (meestal zwarte bonen) en douchewater verwarmde. De zoon des huizes trad tijdens ons verblijf in het huwelijk; 'Mateo' de Graauw (wiens voornaam de bejegening 'gringo' als soort-aanduiding van Hollandse expeditieleden had vervangen) was eerste getuige en naardiens dochter Jessica is naderhand de eerstgeborene vernoemd.

Op zeven maart was het dorp bomvol met Mexicaanse eclipsstoeristen, inclusief een bende zakkenrollers uit Mexico City die er

Op 11 juli werd Mexico City bedekt door de maanschaduw. Op deze opnamen van de weersatelliet Meteosat-3 is de schaduw met enige moeite te zien. Tijdens de eclips verkeerden zo'n twintig miljoen Mexicanen overdag in het duister, een groter aantal mensen dan ooit tevoren tegelijk een totale zonsverduistering heeft beleefd. Tegen alle verwachtingen in was het helder in Mexico City. Juli is regentijd in Mexico en in de enorme hoofdstad is het dan bijna altijd bewolkt, met tegen de middag samenpakkende buien.

De maanschaduw kwam van Hawaii, waar kort na zonsopkomst juist de top van Mauna Kea met de belangrijkste verzameling telescopen ter wereld werd verduisterd. Er was daar enige bewolking, maar niet tijdens de totaliteit; er zijn succesvolle waarnemingen verkregen met meerdere grote telescopen (waaronder de Brits-Nederlands-Canadese James Clerk Maxwell Telescope). De vele duizenden eclipsgangers op lagere hoogten op Hawaii troffen het slechter: daar was het zwaar bewolkt.

Van Hawaii scheerde de schaduw met ruim 600 m/s over de Stille Oceaan naar de tip van Baja California en de Mexicaanse kust nabij Mazatlan. Veel eclipsstoeristen troffen hier heldere hemel, maar nabij Mazatlan was er ook bewolking, onder meer boven een Belgische groep amateursterrenkundigen. Vandaar trok de schaduw over het centrale Mexicaanse bergland (met de enorme Piramide van de Zon te Teotihuacan juist onder een eenzame wolk) en de zuid-west kust van Centraal Amerika naar Zuid-Amerika. De auteur en zijn gezin zagen de totaliteit bij heldere hemel vanaf de kust ten zuiden van Oaxaca, niet ver van het dorp waar de Nederlandse eclipsexpeditie op 7 maart 1970 de voorlaatste Mexicaanse zonsverduistering had waargenomen.



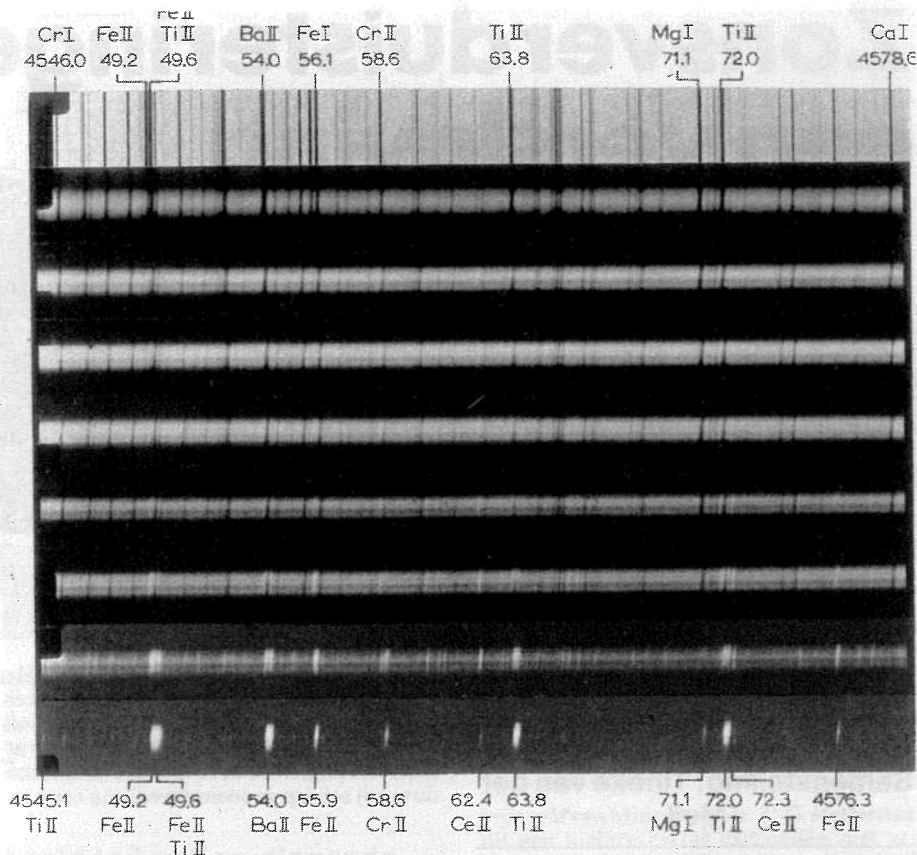
met Houtgasts portefeuille van door ging. Op de akker aan de rand van het dorp waar wij ons instrumentarium hadden opgebouwd was de staf van de Nederlandse ambassade te gast. Houtgast markeerde een grens ver van de spectrograafkeet en verbod hen nadrukkelijk daar ook maar een stap overheen te maken. Het weer was prachtig. De verduistering kwam zoals berekend. De waarnemingen verliepen vlot. Bandopnames laten horen hoe vol spanning wij waren bij de inzet van de totaliteit, en hoe opgelucht onmiddellijk erna. Overigens was pas na het ontwikkelen van de films in Nederland duidelijk dat inderdaad spectra van goede kwaliteit verkregen waren. Sommige daarvan zijn hierbij afgebeeld. Ze tonen dat de meeste spectraallijnen ten opzichte van het achtergrondcontinuüm omkeren van absorptie in emissie. Uiteindelijk blijven alleen lijnen van de geïoniseerde elementen over.

Resultaten van de expeditie van 1970

De wijze waarop de spectraallijn van barium (BaII 4554,0 Å) van absorptie in emissie overgaat was een verrassing. Deze lijn houdt lang een donkere kern (tot op het één na onderste spectrum in de figuur) maar krijgt al eerder, nog binnen de zonsrand, heldere lijn vleugels ter weerszijden.

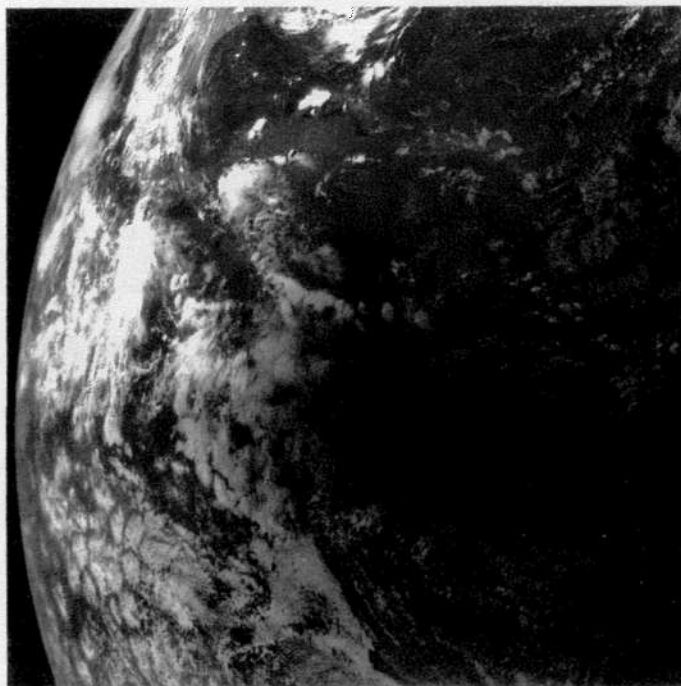
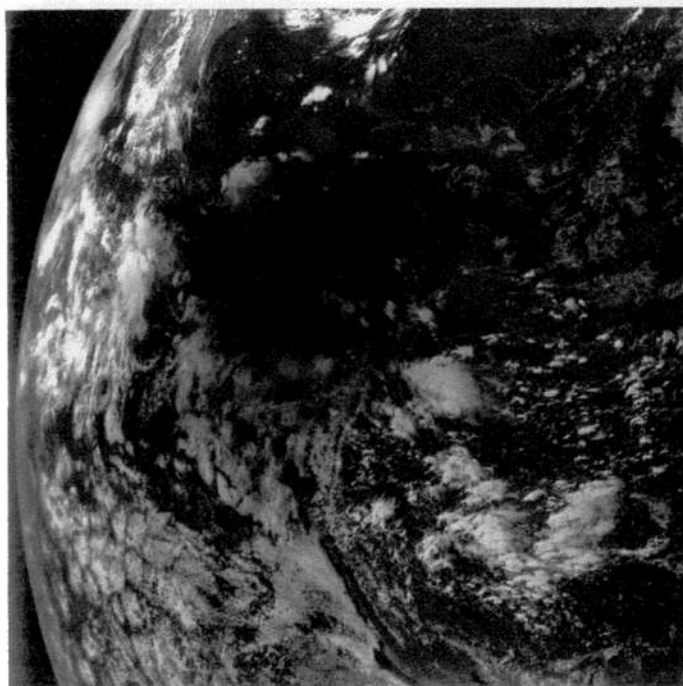
Dit onverwachte verschijnsel bleek naderhand een gevolg te zijn van *partiële frequentieredistributie*, een proces waarin verschillende delen van een spectraallijn op verschillende wijze verstrooiing ondergaan. Bij verstrooiing wordt een atoom eerst in een hogere energietoestand 'aangeslagen' door invangst van een foton; even later komt eenzelfde foton vrij als het atoom terugvalt naar de oorspronkelijke energietoestand (zie het kaderstuk over spectraallijnen). De mate van redistributie geeft antwoord op de vraag in hoeverre het atoom na zulke aanslag bij de her-uitzending nog 'weet' wat de precieze frequentie van het exciterende foton was. Houtgast had al in 1942 een beroemde dis-

Lees verder op pagina 291



▲ Spectrogrammen verkregen bij de zonsverduistering van 1970 te Miahuatlan. De brede band bovenaan is een stukje spectrum van het midden van de zon, opgenomen enkele dagen voor de verduistering. De golflengte verloopt van 4545 links Å tot 4579 Å rechts; $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$. De donkere verticale strepen zijn spectraallijnen. De belangrijkste zijn geïdentificeerd met element en ionisatiegraad (I voor neutraal, II voor eenmaal geïoniseerd).

De andere spectrogrammen zijn een reeks opnamen van de zonsrand, gemaakt van vlak voor tot vlak na het begin van de totaliteitsfase. Merk op dat de meeste spectraallijnen omkeren van donker (absorptielijn) naar helder (emissielijn). Tijdens de totale verduistering (onderste opname) zijn alleen nog emissielijnen over, allemaal afkomstig van ionen behalve de lijn van neutraal magnesium op $\lambda = 4571,1 \text{ \AA}$. Op het derde spectrum van onderen heeft de 4554,0 Å lijn van geïoniseerd barium een donkere kern met aan weerszijden emissie. Dit patroon is het gevolg van bijzondere verstrooiing binnen de lijn.



sertatie over dit onderwerp geschreven. Nog steeds vormt het stof voor onderzoek, onder meer in het proefschrift van Han Uitenbroek (Utrecht, 1990). In mijn eigen proefschrift verklaarde ik de emissievleugels van de BaII 4554,0 Å lijn in de Mexico-spectra door aannemelijk te maken dat het atomaire 'geheugen' in deze verstrooiingslijn beter is voor de lijnvleugels dan in de lijnkern. Recent hebben Uitenbroek (nu verbonden aan de Harvard-universiteit) en Jo Bruls (Utrecht) dit bevestigd met gedetailleerde numerieke berekeningen. Daaruit blijkt dat de barium-lijn de zwakste spectraallijn in het zonnespectrum is waarin zulke geheugeneffecten een waarneembare rol spelen. Ze veroorzaken de heldere emissievleugels nabij de zonsrand doordat er geen uitwisseling is met fotonen in de lijnkern in opeenvolgende verstrooiingsprocessen. Daardoor behouden de vleugels de hogere intensiteit die de straling in diepere lagen heeft.

Zonneonderzoek vanuit de ruimte

Het verdwijnen van het belang van eclipsexpedities hangt natuurlijk samen met de opkomst van de radio-astronomie en de ruimtevaart. Voor mensenogen levert een totale zonsverduistering de enige mogelijkheid om de corona te aanschouwen vanaf het aardoppervlak. Op andere golflengten dan de zichtbare is de zonnestraling echter zelf uit de corona afkomstig, in plaats van uit de onderliggende fotosfeer waaruit het zichtbare licht ontsnapt. De reden daarvoor is dat de doorzichtigheid van het zonnegas maximaal is op zichtbare golflengten. Dat is ook het geval met de aardse dampkring, die immers zowel de kortere golflengten (ultraviolette, röntgen- en gammastraling) tegenhoudt als de langere (infrarode en millimeterstraling). De aardatmosfeer is pas weer doorzichtig op radiogolflengten groter dan 1 cm. Bij toeval vertoont het zonnegas eenzelfde patroon: het is het doorzichtgste in het optische deel van het spectrum, terwijl de doorzichtigheid sterk afneemt naar kortere en langere golflengten. De overeenkomst is toevallig omdat de processen die het gas ondoorzichtig maken geheel verschillen. In de zonsatmosfeer gaat het vooral om ionisatie van waterstof en andere elementen, in de aardatmosfeer daarentegen om absorptie door moleculen en radicalen zoals ozon. Omdat de doorzichtigheid van het zonnegas afneemt naar kortere en langere golflengten, ontsnappen die soorten zonnestraling pas uit meer naar buiten gelegen lagen dan de fotosfeer. Zo komt de ultraviolette straling uit de chromosfeer, de röntgenstraling uit de corona; evenzo komt de infrarode straling uit de chromosfeer en de radiostraling uit de corona. Dus bestudeert men de chromosfeer en corona direct door de zon waar te nemen op deze golflengten; er is geen zonsverduistering voor nodig. Het onderzoek van de chromosfeer en corona kwam daarom pas goed op gang toen na de oorlog radiotelescopie voor zonsaanmerkingen werden ingezet (onder meer te Kootwijk en Dwingeloo), en tot wasdom toen de ruimtevaart het röntgendomein binnen bereik bracht. Vooral het laatste bleek vruchtbaar. Het röntgenonderzoek begon met raketwaarnemingen van de zon en kwam tot volle bloei met *Skylab*, het ruimte-

laboratorium met de *Apollo Telescope Mount* dat gelanceerd en bemand werd met overgebleven Saturnus V raketten van het Amerikaanse maanprogramma. Te Utrecht participeerde het door C. de Jager opgerichte Laboratorium voor Ruimteonderzoek in meerdere röntgenmissies voor zonneonderzoek, met als vlaggeschip de Utrechtse *HXIS röntgentelescoop* aan boord van de *Solar Maximum Mission*.

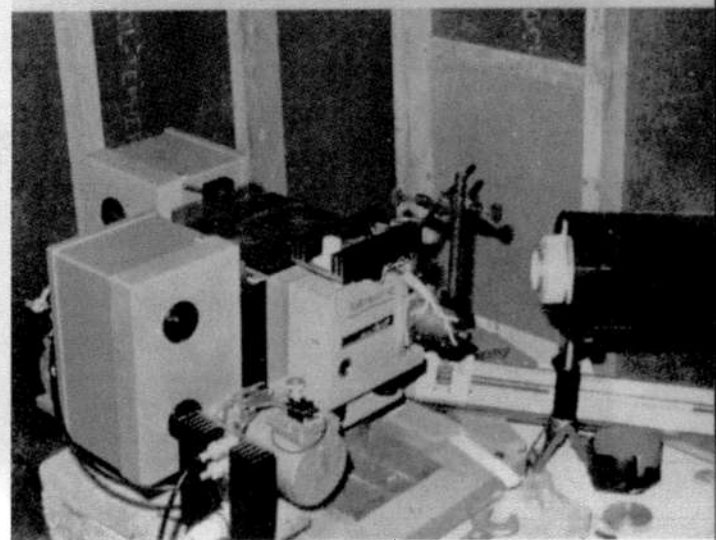
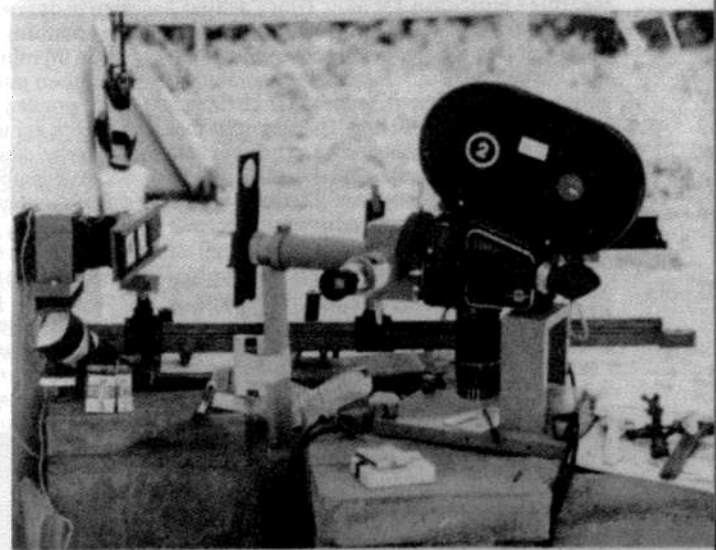
Continu de corona kunnen observeren, in energierijke straling die direct toont wat de ruimtelijke verdeling van de energiehuishouding in de corona is, brengt vanzelfsprekend veel meer informatie dan het slechts luttele minuten kunnen aanschouwen van

De eclipsopstelling van 3 maart 1970 te Miahuatlan. Het instrumentarium bestond uit een telescoop en een grote spectrograaf. De bovenste foto toont links de coelostaat welke tijdens de verduistering de maan aan de hemel volgde. In het midden, met J. Houtgast ernaast, het objectief. Dit was op een hellende slee gemonteerd, waarmee het tijdens de totaliteit werd verschoven om te wisselen tussen de twee tegenoverliggende randen van de maan waarachter de zon verdween c.q. vrijkwam. De auteur hurkt bij de spleet van de spectrograaf. De laatste was opgesteld in de lichtdichte keet erachter.

De middelste foto toont links de spiegelende intreespleet. Deze was gefabriceerd op het Utrechtse Laboratorium voor Ruimteonderzoek door aluminium op een glazen plaatje te dampen waarover eerst een dunne haar was gespannen. Verwijdering daarvan liet een transparante strook van 12 µm breedte achter. Het gereflecteerde beeld werd gefilmd met de cinemacamera rechts. De filmbeeldjes dienden later om de bergen en dalen langs de maansrand te identificeren en daarmee de precieze oriëntatie van de spleet over de zonsrand vast te leggen.

De onderste foto toont rechts de belichtingsmeter in de zwarte koker, links de twee 70-mm camera's. De camera's registreerden hetzelfde stukje spectrum, via een bundelsplitser opgedeeld om het spectrale contrast te overbruggen. De platte doos aan de voorkant bevatte een roterende spleetsluiters (die nu als object d'art de vensterbank van de auteur siert).

de corona tijdens een schaarse zonsverduistering. Daarmee viel de drang om voor coronaal onderzoek eclipsexpedities uit te rusten grotendeels weg, te meer omdat het slaagpercentage van de laatste altijd maar gering was geweest. Daar staat tegenover dat de beschikbaarheid van röntgenwaarnemingen ook te wensen laat. Het elan waarmee *Skylab* twintig jaar geleden een gegevensbestand verzamelde dat sindsdien in omvang niet is geëvenaard, steekt schril af bij de bureaucratie waarin NASA nu is weggezakt. De laatste jaren werd alleen de kleine NIXT-telescoop enkele keren per jaar gelanceerd, voor enkele minuten zonsaanmerking in röntgenlicht per raketvlucht. Gelukkig is er sinds kort ook weer een röntgen-



satelliet die de zon onafgebroken observeert, de in YOYKOH omgedoopte SOLAR-A van Japanse makelij.

Eclips van 1991 – toerist

Vorig jaar keerde ik terug naar Mexico voor een totale zonsverduistering, maar nu op vakantie met mijn gezin. Het pad van de maanschaduw stond in 1991 bijna haaks op dat van 1970; de twee kruisten elkaar niet ver van Miahuatlan. De seizoenen verschilden echter. De verduistering van 7 maart 1970 was in de droge tijd waarin het bergland ten zuiden van Oaxaca goede kans op heldere hemel geeft, terwijl 11 juli in de regentijd valt waarin het vasteland van Mexico dagelijks met stapelwolken en onweer wordt overdekt. De beste voorspellingen waren voor de zuidelijke tip van Baja California, maar ook de kusten nabij Mazatlan en van de golf van Tehuantepec gaven redelijke kans op heldere hemel. Mijn gezin en ik kozen de laatste kust, onder meer omdat het aantal Amerikaanse eclipsstoeristen daar vermoedelijk het kleinst zou zijn. We hebben er inderdaad geen enkele gezien.

Op weg naar de kust passeerden we Miahuatlan. Het dorp bleek weinig veranderd. Men heeft een mooi monument gebouwd als aandenken aan de eclips van 1970, en de weg door de bergen naar de kust is inmiddels gasafgeleerd. Wel was er veel veranderd in de familie waarbij de expeditie van 1970 had gebivakkeerd. De meeste gezinsleden zijn inmiddels overleden. Dochter Idalia, die indertijd de inkopen verzorgde, ziet er nu uit zoals haar moeder indertijd, een eerbiedwaardige indiaanse. De naar Thijs ('Mateo') de Graauws dochter vernoemde Yessica heeft zelf ook al weer een dochter. Tezamen maakte dat mij duidelijk hoeveel sneller de generaties wisselen in een ontwikkelingsland dan in onze welvaartsstaat; hunnerzijds constateerden ze verbaasd dat ikzelf niet bijster veranderd ben.

We namen Idalia mee naar Salina Cruz in de golf van Tehuantepec, voor wat haar tweede

Het dorpsplein van Miahuatlan in 1991. De beeldengroep herinnert aan de talrijke expedities en eclipsstoeristen die hier de totale zonsverduistering van 7 maart 1970 aanschouwden.



en mijn vierde zonsverduistering zou worden, op het strand van de Stille Oceaan. We troffen prachtig weer. Ik had de betreffende pagina uit de Sterrengids meegenomen en legde met tekeningen in het zand uit aan mijn gezin, Idalia en de enkele andere eclipsgangers ter plekke (allemaal Nederlanders, hoe kan het anders) dat er een drietal planeten ten oosten van de zon te zien zou zijn, dus links van de zon aan de hemel, dat er vermoedelijk grote uitlopers links en rechts aan de corona zouden zitten en dat we, als we boften, wellicht een protuberans zouden zien in de vorm van een purper uitstulpinkje. De spanning was veel minder dan ik had ervaren bij mijn voorgaande expeditie deelnames, toen jaren werk door een enkel wolkje kon worden bedorven. Toch werd ik behoorlijk zenuwachtig. Het licht verloor zijn helderheid en werd onnatuurlijk; de laatste sikkels kropen snel ineen; de vliegende schaduwen joegen over het zand; plots was daar de totaliteit, even onwezenlijk en schitterend tegelijk als ik me herinnerde van eenentwintig jaar tevoren.

Van mijn professionele voorspellingen klopte niet veel. Mijn vrouw zei al direct dat ze geen planeten ter linkerzijde van de zon kon vinden, maar wel enige heldere sterren rechts; welke waren dat dan? Dat waren de

Een afdak van palmladeren op het strand bij Salina Cruz had kleine openingen die als camera obscura fungeerden, sikkeltjes projecterend op het zand.

planeten. Ik had me niet gerealiseerd dat de zon in juli in Zuid-Mexico ten noorden van het zenit staat, en dat oostwaarts dus rechts van de zon was in plaats van links. Pas later merkte ik dat de zon ook naar links langs de hemel trok, en niet naar rechts zoals we dat hier gewend zijn. Een rare ervaring op het noordelijk halfrond! Ook de coronale uitlopers zaten verkeerd, aan de boven- en onderkant in plaats van opzij. Alleen de aanwezigheid van twee fraaie protuberansen herstelde mijn gezag enigszins.

Meteen na de totaliteit vroeg Idalia op schuchtere toon wanneer de grote aardbeving zou komen. Al die tijd waren alle Mexicanen in de strandcafé's binnen gebleven. Zij volgden de zonsverduistering op de televisie, gehoor zingend aan de dringende adviezen van de Mexicaanse regering dat waarneming van de totaliteit per televisie veel minder riskant zou zijn dan met eigen ogen.

Resultaten van de verduistering van 1991

De eclips van 1991 paste niet in het patroon dat zonsverduisteringen tegenwoordig geen beroepsastronomen meer trekken. Dit keer trok de maanschaduw bij toeval over de top van Mauna Kea (Hawaii), waar het laatste decennium een grote verzameling telescopen is verrezen. Het lag voor de hand deze telescopen voor zover mogelijk in te schakelen voor zonneonderzoek tijdens de verduistering. Het was immers een unieke kans om met grote moderne telescopen de chromosfeer en corona te observeren.

De aandacht ging daarbij vooral uit naar het infrarode deel van het spectrum, dat tot dusver nogal stiefmoederlijk bedeed is gebleven door gebrek aan goede detectoren. Juist de laatste jaren zijn er echter veel betere detectoren beschikbaar gekomen. Veel telescopen op Mauna Kea, onder meer de grote Brits-Nederlands-Canadese James Clerk Maxwell telescoop zijn speciaal voor infrarode waarnemingen gebouwd, gebruikmakend van de grote hoogte van Mauna Kea

(4200 m). Daarmee werd verkenning van het infrarode spectrum van de chromosfeer en corona het hoofdthema van onderzoek tijdens deze eclips.

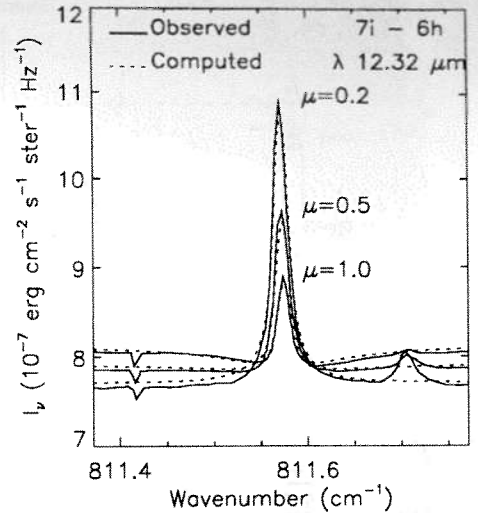
Al jaren tevoren was men met de planning van de eclipswaarnemingen begonnen. Voor de meeste telescopen is zulk gebruik niet eenvoudig, omdat de zonnestraling vlak voor en vlak na de verduistering al sterker is dan de spiegels en detectoren verdragen kunnen. De telescopen zijn gebouwd voor optische en infrarode waarneming van stellaire en interstellaire objecten die vele malen zwakker stralen dan zelfs het kleinste sikkeltje zonnenschijf. Voor de James Clerk Maxwell telescoop bijvoorbeeld werd een speciaal scherm geconstrueerd dat de gewenste infrarode straling doorlaat maar het zichtbare licht tegenhoudt.

Er werd een tiental experimenten uitgevoerd. Van sommige zijn de resultaten al binnen (zie George Beekmans artikel over de niet gevonden stofschil rond de zon, elders in dit nummer), maar voor de meeste is de gegevensanalyse nog niet voltooid. Met de Canada-France-Hawaii telescoop, een optische kijker van 3,6 m middellijn van uitzonderlijk goede kwaliteit, werden bijvoorbeeld vele duizenden digitale videobeelden verkregen. S. Koutchmy en J.B. Zirker van het National Solar Observatory onderzoeken daarmee het polarisatiegedrag in de corona, op zoek naar magnetische velden. De meeste interesse ging tevoren uit naar het experiment van de Amerikaan D. Deming. Hij gebruikte een infrarode telescoop van

NASA om straling te meten op de golflengte van een spectraallijn van neutraal magnesium (MgI) bij 12 m. Deze lijn staat sterk in de belangstelling omdat het een potentieel veelbelovende lijn is om de sterkte van zonnemagneetvelden te meten. Hij is in emissie ten opzichte van het achtergrondcontinuüm, niet alleen aan de zonsrand maar ook gezien op het midden van de zonnenschijf. De lijn heeft daar een smalle hoge emissiepiek met brede absorptievleugels, net omgekeerd aan de hierboven besproken BaII 4554,0 Å lijn aan de zonsrand.

Sinds de ontdekking van de magnesium-lijn, al een decennium geleden, is het duidelijk dat de smalle emissiepiek een goede magneetveldmeter vormt. Hij vertoont duidelijke Zeemansplitsing voor relatief zwakke magnetische velden omdat hij zo scherp is. Het bleef echter de vraag hoe en waar de lijn wordt gevormd, en dus ook op welke hoogte in de zonsatmosfeer het magneetveld er mee gemeten kan worden. Daarover is de afgelopen jaren veel discussie geweest. De meeste onderzoekers meenden dat de emissiepiek afkomstig is uit de chromosfeer, omdat de temperatuur daarin naar buiten oploopt. Er waren echter ook tegenstemmen die fotosferische vorming betoogden.

Deming beoogde met zijn eclipsexperiment te bepalen waar precies de 12 µm spectraallijn gevormd wordt, in de fotosfeer dan wel de chromosfeer. De geleidelijke afdekking die de maanrand levert terwijl hij over de zon trekt zou dat mogelijk maken. Als de lijn fotosferisch is zou hij met het laatste restje sik-



De MgI 12 µm lijn in het zonnenspectrum. Verticaal staat de intensiteit, horizontaal het golfgetal (gelijk aan $1/\lambda$, met de golflengte). De lijn heeft in het midden een emissiepiek die hoger en breder wordt wanneer de lijn dichter bij de zonsrand wordt waargenomen ($\mu = 1$ is het zonsmidden, $\mu = 0,5$ ligt op 0,13 zonsstraal van de rand, $\mu = 0,2$ op 0,02 zonsstraal). De voluit getrokken krommes zijn de waargenomen lijnprofielen, de gestippelde krommes zijn berekende profielen. De goede overeenkomst impliceert dat deze spectraallijn, inclusief de emissiepiek, in de fotosfeer van de zon wordt gevormd.

Chromosfeer en corona tijdens zonsverduisteringen

De chromosfeer en de corona van de zon zijn van gas met dermate lage dichtheid dat je er dwars doorheen kijkt. De hele zon is van gas, maar daar kijk je niet doorheen; de dichtheid neemt naar binnen 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 schillete dat we van het '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 α -lijn van waterstof en de CaII 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. Naast 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 zonnenschijf 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 moleculen en stofdeeltjes in onze dampkring. De moleculen verstrooien het sterkst op blauwe golflengten; licht dat ons oog niet direct van de zon bereikt maar pas via enkele verstrooiingen aan dampkringmoleculen 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 directe zonnestraling, aangezien de vele moleculen 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 directe 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.

kel verdwijnen, anders niet.

Het is echter anders gegaan dan Deming verwachtte. De vorming van de magnesium-lijn werd kort voor de verduistering al vastgesteld, in analyses door een groep van de Harvard-universiteit en door mijzelf met M. Carlsson (Oslo) en N.G. Shchukina (Kiev). De magnesium-lijn komt helemaal uit de fotosfeer; de emissiepiek heeft geen enkele bijdrage uit de chromosfeer. Deming heeft daarna met zijn eclipswaarnemingen het vormingsmechanisme alleen nog maar kunnen bevestigen. Op een recent symposium van de Internationale Astronomische Unie presenteerde ik onze berekeningen, Deming zijn metingen; ze kloppen precies.

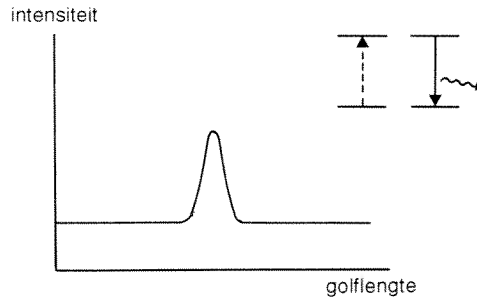
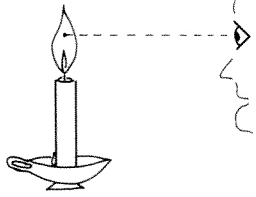
Met de identificatie van het emissieproces hebben wij de weg vrijgemaakt voor toepassing van de 12 µm magnesium-lijn als zonnemagnetometer. Het National Solar Observatory te Tucson is van plan om de McMath-telescoop op Kitt Peak, nu al de grootste zonnetelescoop ter wereld, in apertuur te verdubbelen tot een diameter van 4 m ten einde er zulke 12 µm-magnetografie mee te bedrijven. □

Literatuur

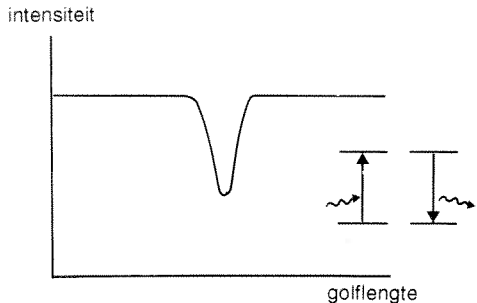
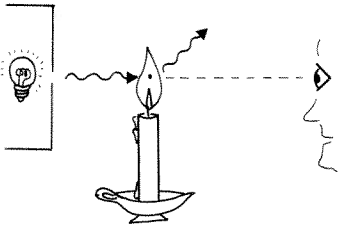
Carlsson, M., Rutten, R. J., and Shchukina, N. G.: 'The formation of the Mg I emission features near 12 µm', *Astron. Astrophys.* 253 (1992), p. 567-585

Rutten, R. J., 'Het pad van de schaduw - Zonsverduistering - 11 juli 1991', *Natuur en Techniek* 59 (1991), p. 500-511

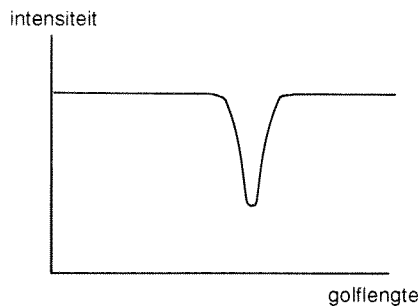
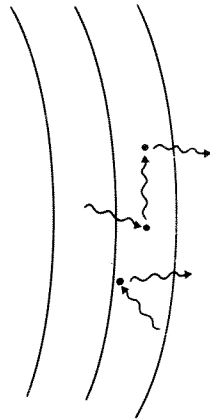
Uitenbroek, H. and Bruls, J. H. M. J., 'The formation of helioseismology lines. III. Partial redistribution effects in weak solar resonance lines', *Astron. Astrophys.* in press.



◀ **Schoolproef met natrium in vlam.** Je ziet heldere natriumlijnen omdat botsingsaanslag wordt gevolgd door stralingsdeëxcitatie. Zo wordt per fotoncreatie thermische bewegingsenergie omgezet in stralingsenergie. De sprong van het valentie-elektron van natrium tussen de rusttoestand en de aangeslagen toestand levert een extra mogelijkheid tot zulke omzetting. De natriumlijn is daarom in emissie boven het continuüm dat de vlam uitstraalt. De lijn wordt een beetje verbreed doordat de natriumatomen in allerlei richtingen door elkaar bewegen (Dopplereffect).



◀ **Schoolproef met een achtergrondbron.** Nu overheerst verstrooiing: stralingsaanslag wordt meestal gevolgd door stralingsdeëxcitatie. De ingevangen fotonen komen weer vrij, maar worden in willekeurige richtingen gestuurd. Er blijven er minder over in de richting naar de spectroscop. De natriumlijnen zijn daarom in absorptie.



◀ **De zon als verstrooiende natriumvlam.** In tegenstelling tot een laboratoriumvlam is de zon ondoorzichtig ('optisch dik'). Zijdelings verstrooide fotonen gaan daarom niet direct verloren. Ook kunnen fotonen uit andere richtingen naar de waarnemer toe worden verstrooid. Er is geen directe analogie met de beide schoolproeven. De meeste spectraallijnen van de zon zijn in absorptie omdat de temperatuur in de fotosfeer naar buiten toe afneemt.

Spectraallijnen: informatie op atomaire schaal

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

De spectraallijnen in het zonnespectrum 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 continuüm. Door de extra absorptie is het gas ondoorzichtiger op de golflengte van de spectraallijn dan in het continuüm 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 continuüm*. 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 *kleiner* lagere intensiteit.

De lijnen in het zonnespectrum 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 golflengten groter dan 160 nm en ver-infrarode straling met golflengten groter dan 160 μm) zijn in emissie ten opzichte van het naastliggende continuüm.

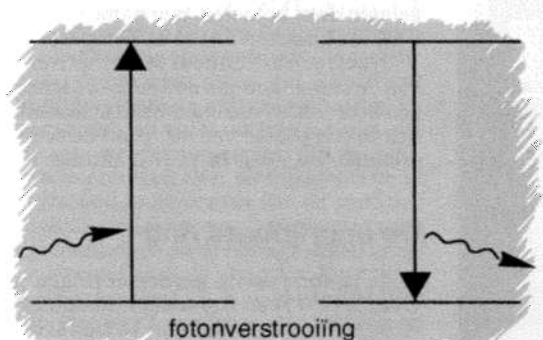
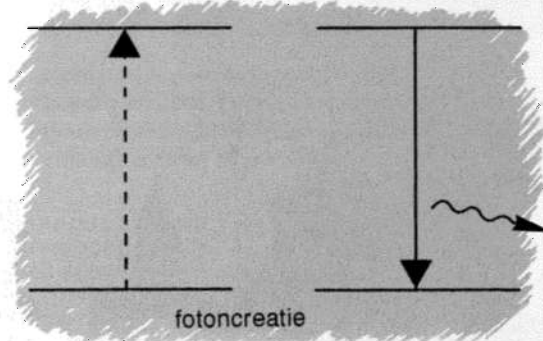
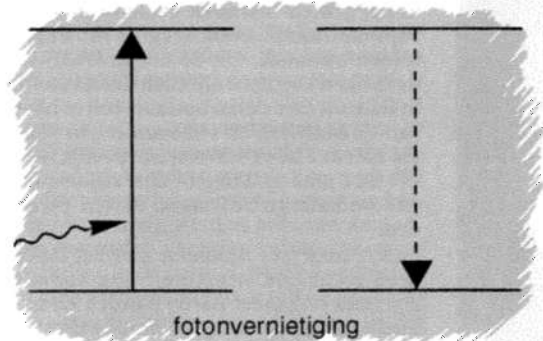
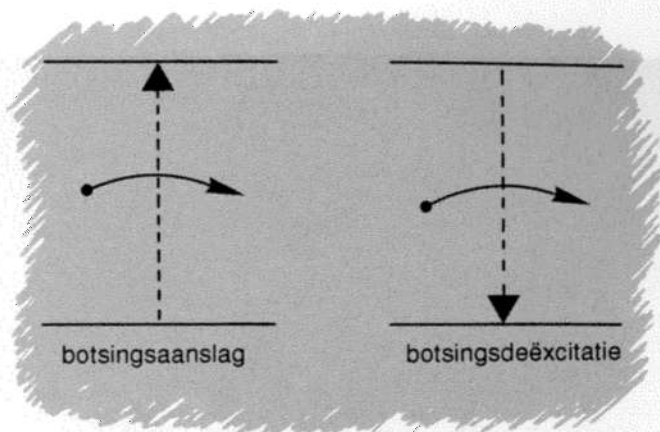
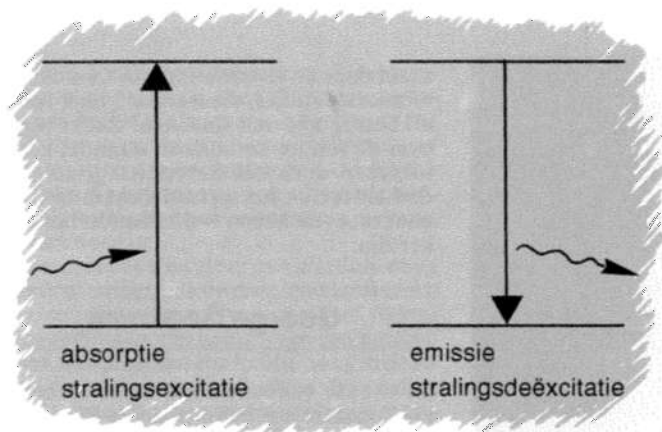
De vorming van de spectraallijnen in het zonnespectrum verschilt van die in laboratoriumproeven zoals u zich die wellicht van het natuurkundepracticum op school herinnert. In een bekend proefje wordt natrium (als keukenzout) in een vlam gestrooid; het spectrum daarvan bevat dan de heldere gele natriumlijn 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 precieze 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 constante van Planck, f de frekwentie, c de lichtsnelheid en λ 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 natriumatomen 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 practicumproefje 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 invanging 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 om-



Aanslag en deëxcitatie van atomen, schematisch. Een elektron in een atoom kan op en neer springen tussen twee energietoestanden. Elke spectraallijn correspondeert met een specifieke sprong van een specifiek elektron in een specifieke ionisatietrap van een specifiek element (of molecuul, of atoomkern). Voor de gele natriumlijn is dat de sprong tussen de rusttoestand en de eerste aangeslagen toestand van een neutraal natriumatoom (NaI). Aanslag omhoog kan onder absorptie van een foton met de juiste golflengte, of door opname van bewegingsenergie in een botsing. Deëxcitatie omlaag gaat evenzo of door uitzending van zo'n foton of door afgifte van kinetische energie in een botsing. (Bovenste vier).

Combinaties van stralingsprocessen. Stralingsaanslag gevolgd door botsingsdeëxcitatie levert fotonvernietiging. De omgekeerde combinatie (botsingsaanslag gevolgd door stralingsdeëxcitatie) levert fotoncreatie. Verstrooiing is stralingsaanslag gevolgd door stralingsdeëxcitatie. (Onderste drie).

dat 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 direct 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, zoals hierboven vermeld. Als 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 zo 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 precieze overgang van absorptielijn naar emissielijn hangt af van de precieze aard van de verstrooiingsprocessen binnen de spectraallijn. Meting van de omslag tijdens een zonsverduistering levert daarom een gevoelige maat voor deze processen.

Voor de emissiepiek van de MgI 12 μ m lijn gaat geen van beide processen op als analogon. Die emissie is het gevolg van processen die meer lijken op wat zich in een laser afspeelt. In een laser treedt *populatie-inversie* op, wat wil zeggen dat er meer atomen in de hogere energie-toestand zitten dan in de lagere. Dat is bij de magnesium-lijn in de zon nog niet het geval, maar er is wel een voldoende grote overmaat aan extra atomen in de hogere toestand voor emissie boven de continue achtergrondintensiteit.

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 ionisatiecondities zijn. Uit de laatste volgen de temperatuur en de druk van het gas ter plaatse. Met het Dopplereffect en het Zeemaneffect 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 telescoop benutten om het spectrum ervan uiteen te rafelen.