

Wat zagen we NIET op 11 augustus?

Tijdens de eclips van 11 augustus was (vanaf een goede plek) veel te zien: de parelmoeren corona, de rode chromosfeer, de purperen protuberansen, planeten en sterren, de oranje horizon rondom, de briljante *Bailey's beads* bij tweede en derde contact, de vliegende schaduwen voor en na, de reacties van dier en mens. Veel te veel voor de luttele minuten, en helemaal te veel om je druk te maken over wat je op dat moment juist *niet* kon zien. Maar ook dat was spectaculair: het ontbreken van de Fraunhoferlijnen in het zonnenspectrum. De binnencorona is het enige object in het hele zonnestelsel dat ze niet toont! Dat gemis kenschetst een buitengewone eigenschap van de corona: zijn extreme temperatuur.

Rob Rutten
Sterrenkundig
Instituut (UU)

Als we het licht van de zon door een prisma of tralie met voldoende dispersie ('ontledend vermogen') laten gaan, verschijnt een regenboog van kleuren met tienduizenden donkere lijntjes. Deze regenboog met donkere spectraallijnen wordt - naar zijn ontdekker - het 'Fraunhoferspectrum' genoemd. Strikt genomen was het William Wollaston die in 1802 als eerste die spectraallijnen zag; hij nam aan dat het afscheidingen waren tussen de verschillende kleuren. Joseph Fraunhofer, een instrumentmaker die het zonnenspectrum gebruikte om zijn optische producten op kwaliteit te toetsen, herontdekte de lijnen in 1814.

Fraunhofer was niet op zoek naar donkere lijnen, maar juist naar heldere. Hij wist dat het licht van bepaalde lampen heldere emissie geven op een specifieke gele kleur en vroeg zich af of die extra emissie ook in zonlicht aanwezig zou zijn. Daarbij bleek de gezochte spectraallijn juist donker te zijn in plaats van helder, in tweeën gesplitst, en niet uniek maar één van honderden soortgenoten. Fraunhofer stelde een alfabetisch genummerde lijst op waarin hij de twee gele lijnen samen 'D' noemde. Naar we nu weten zijn de beide D-lijnen afkomstig van het element natrium (Na); ze zijn te zien in de figuren op blz. 473 en 474.

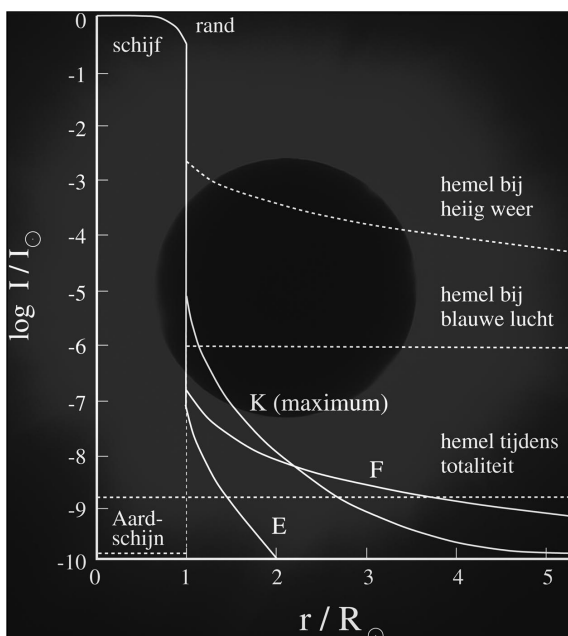
Fraunhofer mat de golflengtes van veel lijnen met een objectieftralie (een raamwerk van dunne draden voor de kijker) en deed dat ook voor planeten en sterren. Hij vond de donkere D-lijnen terug in het spectrum van Venus, en in 1823 ook tussen de vele lijnen in het spectrum van Betelgeuze, hoewel die rode reus een menigte lijnen toont 'op andere plaatsen' (golflengten) dan de zon. In hetzelfde jaar stelde William Herschel al dat zulke lijnidentificaties een prachtig middel vormen om nauwkeurig de chemische samenstelling van laboratoriumvlammen vast te stellen. Dat bleek echter lastig in de praktijk, omdat de stoffen die de spectroscopisten aan vlammen toevoegden altijd wat verontreiniging met natrium erin bevatten, zodat ze steeds de gele Na D-lijnen te zien kregen. Brewster onder anderen concludeerde daaruit dat de spectraallijnen niet op de zon worden aangemaakt. Die

gedachte verdween pas met het werk van Kirchhoff. Hij liet eerst zien dat donkere absorptielijnen en heldere emissielijnen op dezelfde golflengte door dezelfde substantie (zoals natrium in een vlam) worden veroorzaakt, en stelde later met Bunsen dat heldere lijnen in het laboratorium en de donkere Fraunhoferlijnen van de zon dus ook van gelijke oorsprong zijn. Het romantische verhaal gaat dat ze vanuit hun laboratorium in Heidelberg uit de sterkte van de Na D-lijnen een schatting maakten van de hoeveelheid natriumgas in een uitslaande brand in Mannheim, en dat ze 's avonds kuierend over het Heidelbergse professorenlaantje opperden dat net zulke analyse-op-afstand mogelijk is voor veel verder verwijderde objecten zoals de zon en de andere sterren. Dat was het begin van de astrofysica: natuurkunde op afstand.

Natriumlijnen alom

Alle objecten in het zonnestelsel worden verlicht door de zon en dus vertonen ze in het geflecteerde of verstrooide licht dat wij waarnemen de donkere Fraunhoferlijnen die de zon meegeeft aan haar straling. Dat geldt ook voor alle objecten op aarde bij daglicht.

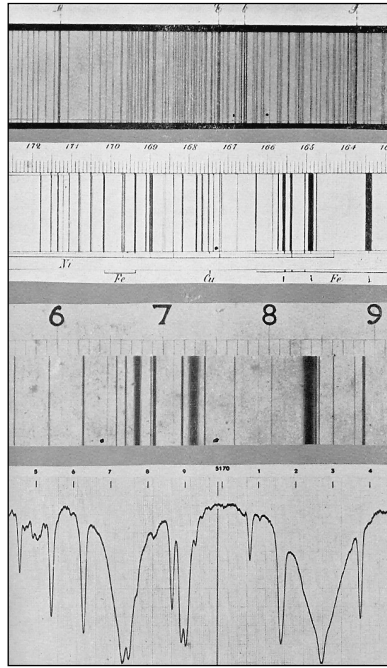
Zelfs als het licht via lange omwegen uw huiskamer binnenkomt zal een spectroscopische analyse van uw neus als object de Fraunhoferlijnen bevatten, inclusief de Na D-lijnen. Op weg naar uw neus wordt het zonlicht gereflecteerd, verstrooid en gebroken, maar daarbij verandert de golflengteverdeling niet of nauwelijks. Bij heldere hemel wordt de voornaamste bijdrage geleverd door Rayleighverstrooiing aan moleculen; het effect daarvan neemt naar het blauw sterk toe - dat maakt de hemel blauw en de ondergaande zon rood. Bij stoffige of bewolkte hemel hangen de verstrooiingskans en de



Schematische weergave van de intensiteit van de diverse onderdelen van de zon bij een totale zonsverduistering - een beroemde grafiek van H.C. van de Hulst die illustreert waarom men naar de totaliteitszone moet reizen om de corona te kunnen zien. Verticaal staat de intensiteit op logaritmische schaal, genormeerd door de intensiteit van het midden van de zonneschijf. Horizontaal staat de afstand tot het zonnemidden in zonstralen. De binnenste corona is minstens honderdduizend maal (-5) zwakker dan de zonneschijf en wordt dus absoluut niet zichtbaar bij een gedeeltelijke verduistering, ook al is de zon voor 99% (-2) afgedekt! De drie krommen betreffen verschillende coronale bijdragen: K(ontinuum) = het witte schijnsel zonder Fraunhoferlijnen dat ontstaat door verstrooiing van fotosferisch zonlicht aan elektronen, F(raunhofer) = het eveneens witte schijnsel, maar met Fraunhoferlijnen tengevolge van verstrooiing aan interplanetair stof (zodiakaal licht), E(mission) = de gezamenlijke bijdrage van de coronale emissielijnen. In de totaliteitszone vermindert de hemelhelderheid tot bijna een miljardste (-9) en daar komt de corona bovenuit tot wel drie zonstralen buiten de rand ($r/R = 4$). Alleen bij volmaakt heldere hemel (strakblauw tot op de zonstrand) kan men met coronografen de binnenste corona tot op $r/R = 1,3$ afbeelden in het licht van de emissielijnen; onder heuiger omstandigheden is de hemel veel te fel.

brekingskans (respectievelijk aan stofjes en druppeltjes) minder sterk af van de golflengte en blijft de hemel wit. In beide gevallen gebeurt er niets met de Fraunhoferlijnen in het zonlicht: de verstrooiing is per ontmoeting van een foton met een molecuul, stofje of druppeltje 'monochromatisch': het foton wordt wel van richting veranderd maar niet van energie (kleur, golflengte). Zelfs in de regenboog verandert elke lichtstraal alleen van richting, geordend naar kleur, maar niet van golflengte. De atmosfeer voegt alleen zelf nog spectraallijnen toe, bijvoorbeeld van waterdamp (dat op de zon alleen in zonnevlekken in geringe mate voorkomt).

Wat voor zonverlicht voorwerp u ook observeert: uw neus, het landschap, de maan, een andere planeet of maan, een komeet: altijd bevat het weerkaatste en verstrooide zonlicht de Fraunhoferlijnen. Alleen als u 's nachts spectrografie bedrijft met teveel snelwegverlichting nabij zult u wellicht in de donkere Na D-lijnen heldere emissiepieken aantref-



fen die niet van de zon afkomstig zijn. Objecten buiten ons zonnestelsel hebben al dan niet eigen Na D-lijnen – in emissie of absorptie naar gelang hun aard – maar in het zonnestelsel is de binnencorona het

Stukjes uit vier spectrumatlassen. Van boven naar beneden wordt het segment rond de groene Mg b-lijnen uitvergroot; het paar stippen in de strips geeft aan welk deel eronder te zien is. De bovenste atlas is de gravure die Fraunhofer in 1815 publiceerde. De Na D-lijnen zijn (net gescheiden!) linksboven te zien; de fraai gekalligrafeerde D is afgekapt in deze collage. De tweede strip is ontleend aan de veel nauwkeuriger ets van Kirchhoff uit 1861, de derde aan de fotografische atlas van Rowland (1897), de vierde aan de Utrechtse atlas van Minnaert, Mulders en Houtgast (1940). De laatste is een kwantitatieve registratie waarin de (zorgvuldig geijkte) intensiteit is uitgezet tegen de golflengte in ångström. (Ontleend aan De groei van ons wereldbeeld van A. Pannekoek, 1951)

enige zonverlichte object dat ze *niet* toont.

Geen Fraunhoferlijnen, maar waarom?

Al bij de eclips van 7 augustus 1869 is de corona spectroscopisch geobserveerd. Tot hun verbazing zagen de waarnemers het Fraunhoferspectrum met de scherpe donkere lijnen plaatsmaken voor een kleurencontinuüm ('regenboog') zonder details... op enkele heldere lijnen na dan, waarbij vooral een spectraallijn in het groen opviel. Wat was dat? De lijn bleek niet in aardse labora-

tonen wederom niet van kleur, alleen van richting.

Het flitspectrum waarnemen is bijzonder moeilijk; de lange reeks Utrechtse expedities onder leiding van J. Houtgast (tot 1973) had dit als doel. Dit onderzoeksterrein is nog niet afgerond maar er zijn geen expedities meer die zich hieraan wagen; het wachten is op een grote zonnespectrograaf in de ruimte.

Dat neemt niet weg dat er ook tegenwoordig nog flitspectra worden geregistreerd, verrassend genoeg ook door amateurs, zoals blijkt uit bijgaande opname van Klaas Bakker uit Amsterdam. Een paar jaar geleden kocht Bakker voor zijn 13 cm Newtonkijker een eenvoudige spectroscop, waarmee bijvoorbeeld absorptielijnen van sterren kunnen worden vastgelegd. Het is echter een spleetloze spectroscop, zodat alleen min of meer punt- of lijnvormige lichtbronnen kunnen worden bekeken – ook de bijna verduisterde zon dus!

De foto toont de verduisterde zon, met daarnaast de sikkelvormige emissielijnen van het flitspectrum, die goed te zien zijn tegen het door de maan afgedekte deel van de door de spectroscop ook verstrooide (en daardoor sterk overbelichte) corona.

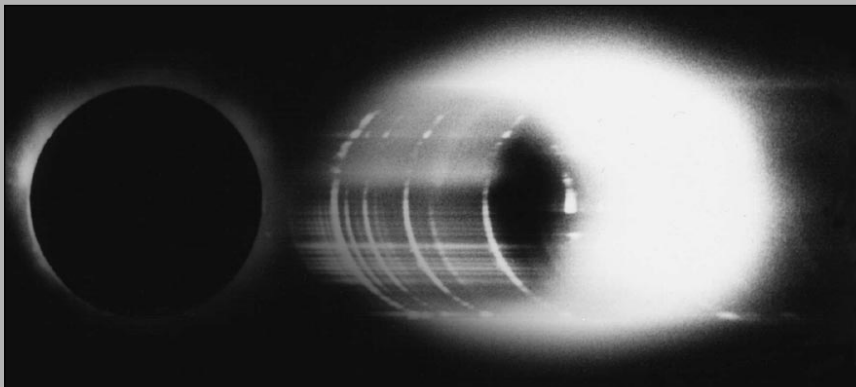
De identificatie van de afgebeelde emissielijnen valt, door de beperkte dispersie van de spectroscop, niet mee. Maar mede dankzij de inspanningen van sterrenkunde-student Peter den Hartog is het gelukt een aantal lijnen te identificeren (rechts).

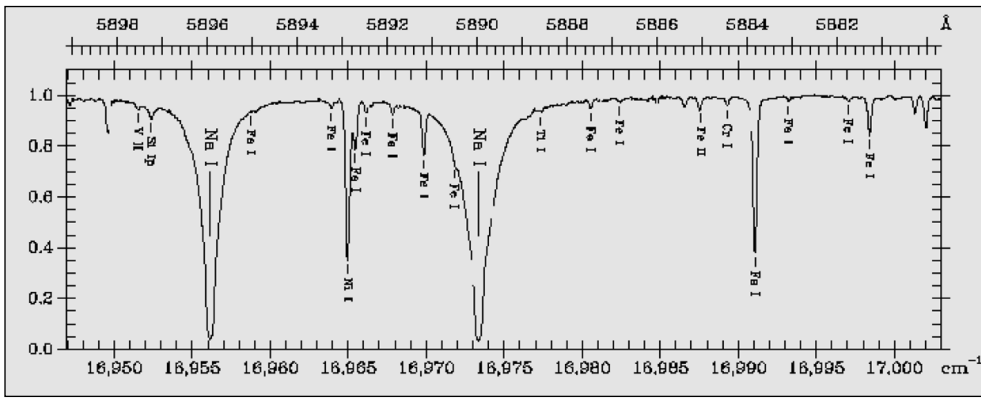
Flitspectrum

Behalve de spectra van binnen- en buitencorona is ook het spectrum van de (lagere) chromosfeer interessant. En tijdens elke totale zonsverduistering krijgen we de gelegenheid dit spectrum te zien – zij het maar heel eventjes. Vandaar ook dat sterrenkundigen spreken van het 'flitspectrum' van de chromosfeer.

Het flitspectrum werd in 1870 ontdekt door Andrew Young. Bij die roemruchte eclips (22 december 1870, Middellandse Zee, ook maar twee minuten) ontsnapte Janssen per ballon over de Pruisische belegering van Parijs, maar trof bewolking. Lockyer leed schipbreuk op weg naar Sicilië en zag de corona maar 1,5 seconde. Young had meer succes. Hij ontdekte dat de donkere absorptielijnen in het spectrum van de zonnescijf 'omfloepen' in heldere emissielijnen op het moment dat de maan de rand nét afdekt – gedurende slechts enkele seconden bij tweede en bij derde contact. Het witte continuüm verdwijnt en de lijnen zijn eventjes helder te zien – ook de Na D-lijnen.

Hoe komt dat? De natriumatomen in de atmosfeer van de zon, boven het 'oppervlak' dat we normaliter waarnemen, verstrooien licht op de golflengte van de Na D-lijnen: ze absorberen licht van beneden en stralen dit in alle richtingen weer uit. Zien we dit heruitgestraalde licht tegen de helderdere achtergrond van de zonnescijf dan levert het absorptie, dus donkere lijnen; zien we het heruitgestraalde licht echter net voorbij de zonnerand met de donkere hemel als achtergrond, dan steken ze daartegen helder af. Bij zulke verstrooiing veranderen de fo-





De Na D-lijnen in het zonnenspectrum. De intensiteit van het centrum van de zonneschijf staat verticaal, horizontaal het golfgetal (aantal golven per cm) langs de onderkant en de corresponderende golflengte in ångström langs de bovenkant. De Na D-lijnen zijn de twee diepste kuilen (donker). De zwakkere lijnen zijn van ijzer, nikkel, titanium en andere metalen. Opgenomen met een Fourierspectrometer achter de McMath-Pierce-zonnetelescoop op Kitt Peak, Arizona. Deel van een spectrumatlas die met andere atlasen verkrijgbaar is op <ftp://ftp.noao.edu/fts/>.

toriumvlammen na te maken, en werd dus aan een nieuw buitenaards element toegeschreven: *coronium*. Eerder was op vergelijkbare wijze het element helium aangetoond, dat tot dan toe op aarde niet was aangetroffen. Maar het coronium verliep het anders: de groene coronalijn is niet van een onbekend element, maar van een toen nog volkomen onbekende verschijningsvorm van ijzer. Het groene licht is afkomstig van maar liefst dertienvoudig geïoniseerde ijzeratomen – ijzer dat 13 van zijn 26 elektronen is kwijtgeraakt.

Geen Fraunhoferlijnen dus in het spectrum van de binnencorona. Maar waarom eigenlijk niet? De sleutel ligt bij de kleur van het parallelmoeren schijnsel van de binnencorona. Het schijnsel is wit, hetgeen betekent dat het 'gewoon' zonlicht moet zijn dat is verstrooid (van richting veranderd) zonder golflengtevoorkeur, net zoals bij verstrooiing en breking van zonlicht door stofjes en druppeltjes in onze dampkring. Nu zijn er in de binnencorona geen stofjes en druppeltjes, maar in 1906 stelde Karl Schwarzschild al voor dat het zonlicht wordt verstrooid door de talrijke vrije elektronen in de binnencorona.

Walter Grotrian stelde in 1931 voor dat dit verstrooiingsproces inderdaad het sterkste bijdraagt tot het schijnsel van de binnencorona, maar dat de elektronen zo snel bewegen dat de daarbij horende dopplerverschuivingen de Fraunhoferlijnen uitwissen. Hij had bij de zonsverduistering van 9 mei 1929 spectra opgenomen waaruit bleek dat alleen van de Ca II-, H- en K-lijnen in het violet, de sterkste Fraunhoferlijnen in het zichtbare zonnenspectrum, nog ondiepe kuilen overbleven. Daaruit leidde hij een dopplerversmering van 100 ångström af, overeenkomend met een gemiddelde snelheid van de elektronen van 8000 km/s. Dat bevreesde hem zeer, omdat bij de al

bekende temperatuur van de fotosfeer (6000 K) de elektronensnelheid maar 550 km/s bedraagt. Hij had hier direct uit kunnen concluderen dat de temperatuur van de corona 1,2 miljoen graden bedraagt, maar hij durfde deze stap niet aan! Op grond van de tweede hoofdwet van de thermodynamica (energie vloeit altijd van warm naar koud) zou dat immers volstrekt onmogelijk zijn. De fout in deze stelling is echter dat de zonnestraling zonder uitwisseling door de corona verdwijnt: sommige fotonen worden wel bij de verstrooiing van richting veranderd, maar de materie 'voelt' niets van de stralingstemperatuur van 'maar' 6000 K, omdat de straling ongehinderd ontsnapt. (Dit heeft een aards equivalent: wolken zijn ook wit, met een 'kleurtemperatuur' van 6000 K, maar worden niet door het zonlicht tot die waarde opgewarmd.)

Pas nadat Grotrian enkele jaren later op grond van atoomfysische analyses van Edlén enkele coronale lijnen kon toeschrijven aan hooggeïoniseerde ijzer, en Edlén zelf de groene coronalijn identificeerde als eentje van 13-voudig geïoniseerd ijzer, kwam onomstotelijk vast te staan dat de corona een miljoen graden heet is. Waarom de corona zo heet is, blijft één van de 'grote vragen' van de zonnephysica. Zonneklaar is dat het gaat om een magnetisch verhittingsproces: in de corona komt energie vrij die via magnetische velden aan het inwendige van de zon is ontleend. Dat is echter weer een verhaal apart.

Buitencorona

Grotrian wist ook te verklaren waarom verder van de maanrand tijdens een zonsverduistering wel weer Fraunhoferlijnen te zien zijn. Zijn eigen eclipsspectra van 1929 reikten

Walter Grotrian (1890-1954). Foto: Archief Astrofysisch Instituut Potsdam/Zonneobservatorium Einsteinurm.

niet zo ver, maar eerdere waarnemingen van Ludendorff (10 september 1923) wel. Daaruit bleek dat vanaf twee zonstralen van de maanrand dezelfde Fraunhoferlijnen aanwezig zijn als in het normale fotosferische zonlicht. Ze zijn wel zwakker (relatief ten opzichte van het continuüm), maar niet breder. Het moet hierbij dus om verstrooiing gaan aan niet zo snel bewegende deeltjes. Ook blijft het schijnsel wit, zonder spectrale herverdeling; als de verstrooiing door moleculen zou worden veroorzaakt zou de buiten-corona helder blauw zijn. Grotrians oplossing (1934) is dat elektronenverstrooiing een 'witte' bijdrage aan het continuüm verzorgt die de lijnen afzwakt, terwijl de lijnen komen door verstrooiing van zonlicht aan interplanetair stof – net zoals het zodiakale licht ontstaat. En ook dat licht bevat de Na D-lijnen van de zon!

Conclusie: kijkend naar de binnencorona tijdens de zonsverduistering zagen we zonlicht zonder Na D-lijnen – u hebt ze vermoedelijk niet gemist, maar dat gemis is heel opmerkelijk want alle overige zonverlichte objecten tonen ze wel, óók de buitencorona. Hun afwezigheid in het schijnsel van de binnencorona is een direct gevolg van de buitengewoon hoge coronale temperatuur. Wat een prachtig gemis in een prachtig schijnsel!

Literatuur

- H.C. van de Hulst: 'The Chromosphere and the Corona', in *The Sun* (Ed. G.P. Kuiper), 1953
- R. Kippenhahn: *Discovering the Secrets of the Sun*, Wiley & Sons, 1994
- W. Mattig: 'Walter Grotrians fundamentele Beiträge zur Physik der Sonnencorona', *Sterne und Weltraum* 6-7, 557, 1999

