

De chromosfeer: van prachtige kleur naar spannende fysica

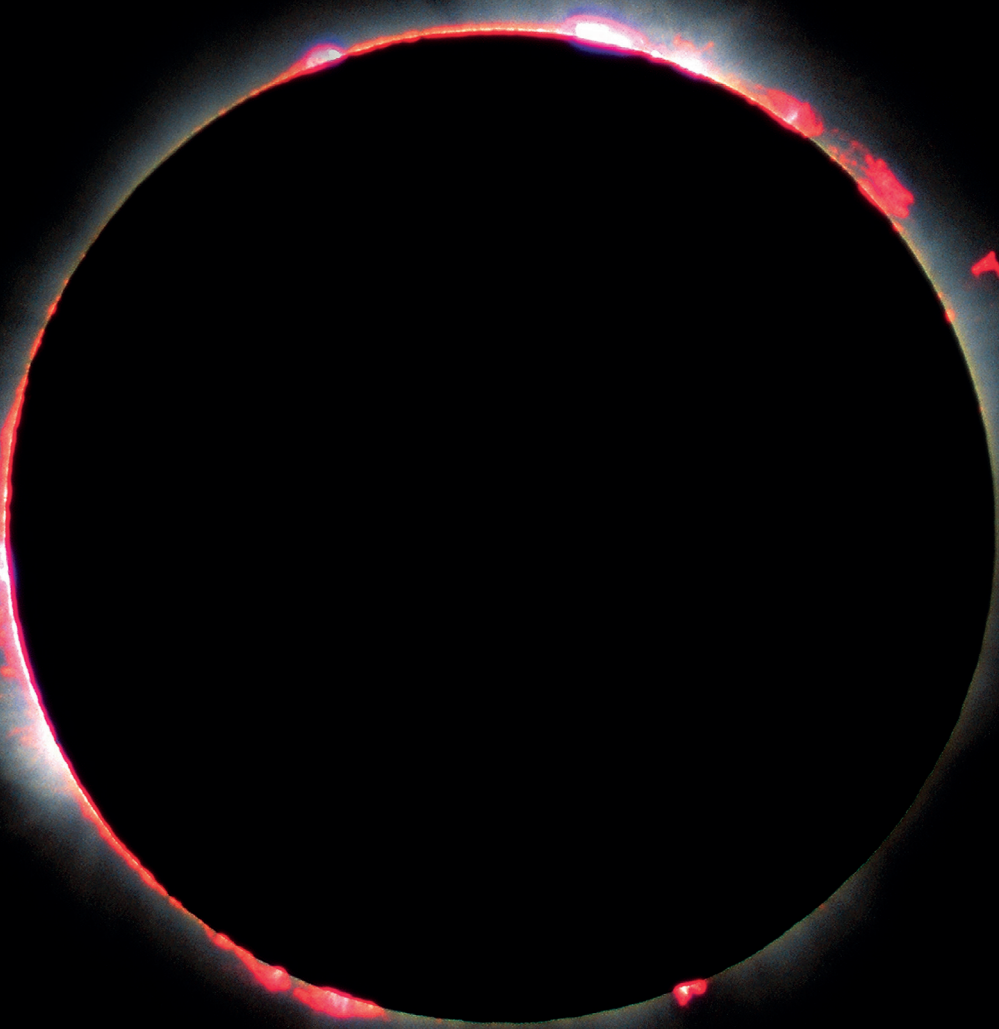


Foto: www.lucnix.be

De mooiste manier om de chromosfeer – de purperen zonneatmosfeer net boven het oppervlak - te zien is naar een zonsverduistering te reizen. Een absolute aanrader! Er zijn weinig natuurverschijnselen van zo'n wonderbaarlijke schoonheid.

Door Rob Rutten

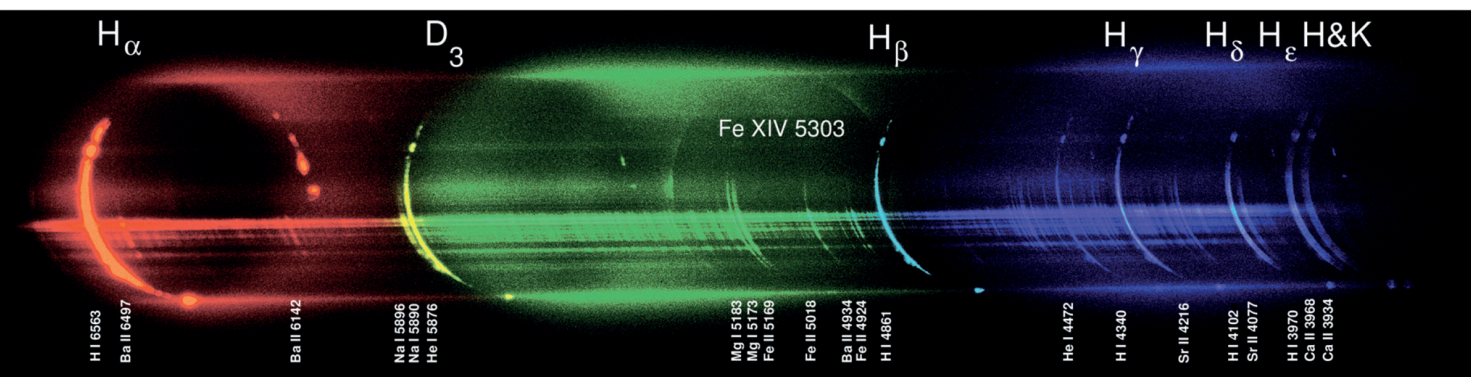
Denk vooral niet dat een 99% partiële verduistering al 99% van dit fraais biedt. Zo is het helemaal niet: de ijle buitenatmosfeer, de corona, is een miljard maal zwakker dan de zonneschijf, onze zonverlichte blauwe hemel maar een miljoen. Zolang er nog het minste stukje zonneschijf niet door de maan is afgedekt, blijft de dampkring door de ver-

strooiing van het resterende zonlicht nog steeds te helder om te kunnen zien wat er rondom de zon zit. Partieel of totaal is letterlijk een verschil van dag en nacht!

Tijdens de totale verduistering zie je de corona enkele minuten lang, een on-aards verschijnsel met een wit-parelmoeren glans. Misschien zie je ook één

of meerdere protuberansen vanachter de maanrand als rood-purperen sliertjes de corona insteken. En als je goed oplet¹ zie je gedurende luttele seconden net na tweede contact, als de maan de zonneschijf helemaal bedekt, en net voor derde contact aan het einde van de totaliteit, de chromosfeer: een dunne sikkkel met dezelfde fraaie purperkleur nabij het contactpunt.

De naam chromosfeer slaat natuurlijk op de fraaie purperkleur. Hij werd gegeven door Norman Lockyer in 1868. Die was niet de eerste die hem zag, dat was Jules Janssen die tijdens de zonsverduistering van 18 augustus 1868 in India opmerkte dat de spectrale emissielijnen van een protuberans zo helder waren dat ze ook zonder eclips waar-



Figuur 1. Chromosfeerspectrum opgenomen door Duitse amateurs op 11 augustus 1999. Het is maar zo kort te zien dat het 'flitspectrum' wordt genoemd. Het bestaat vooral uit sterke spectraallijnen van waterstof (Balmerlijnen), helium (D₃) en H & K van geïoniseerd calcium. Heel vaag is ook de corona te zien in de groene lijn van dertien maal geïoniseerd ijzer. De horizontale band is het spectrum van de laatste Bailey Beads. Naast D₃ maar veel zwakker zijn D₁ en D₂ van natrium zichtbaar (de kleur van snelwegverlichting), de hakkelige lijntjes net links van D₃.

Door de enorme inhomogeniteit van de chromosfeer zitten heel hete en koude plekken op zeer kleine schaal door elkaar.

neembaar zouden moeten zijn. Dat lukte hem al twee dagen later. De reden is dat het schijnsel van protuberansen wordt gedomineerd door maar een paar heldere emissielijnen, vooral de Balmerlijnen van waterstof (figuur 1). Met een spectrograaf (toen nog een spectroscop, de waarnemer keek zelf) selecteer je alleen zo'n heldere lijn (meestal de Balmer-alfa lijn op 6563 Ångström); bij voldoende dispersie van het spectrum krijg je dan alleen het smalle golflengtebandje met de felle lijn erin. Dan



Figuur 2. Lockyer's hoge-dispersie spectroscop. De buis linksonder begint met een in breedte verstelbare spleet waarop een zonsbeeld werd geprojecteerd. Het licht doorliep dan zeven achtereenvolgende prisma's om een grote dispersie (uitrekking in golflengte) te krijgen. De buis rechts bevat een kleine telescoop om het spectrum te bekijken, met een precisieschroef en een loep op de verdeling om golflengtes te bepalen.

heb je minder last van de daghemel, waarvan het spectrum het normale zonnecontinuüm is met donkere absorptielijnen.

Lockyer was in Engeland op hetzelfde idee gekomen, ook al had hij toen nog nooit een zonsverduistering gezien. Hij bestelde een spectroscop met hoge dispersie (figuur 2) en zodra die binnen was, eind oktober 1968, zag hij ook de 'chromosfeer': straling in dezelfde lijnen als van een protuberans maar in een dunne schil rondom de hele zon. De lijnen geven samen de mooie purperkleur.

Hij mat de golflengten van de diverse lijnen precies, constateerde dat D₃ een nieuwe was en schreef hem toe aan een onbekend element dat hij de Griekse naam 'helios' gaf. Ook die lijn zag Janssen al na zijn eclips en ook in dit geval gaf Lockyer de naam. Het is helium geworden, het enige element dat niet op aarde is ontdekt ('coronium' en 'nebulium' werden soortgelijk geïntroduceerd maar bleken bijzondere spectraallijnen van bekende elementen).

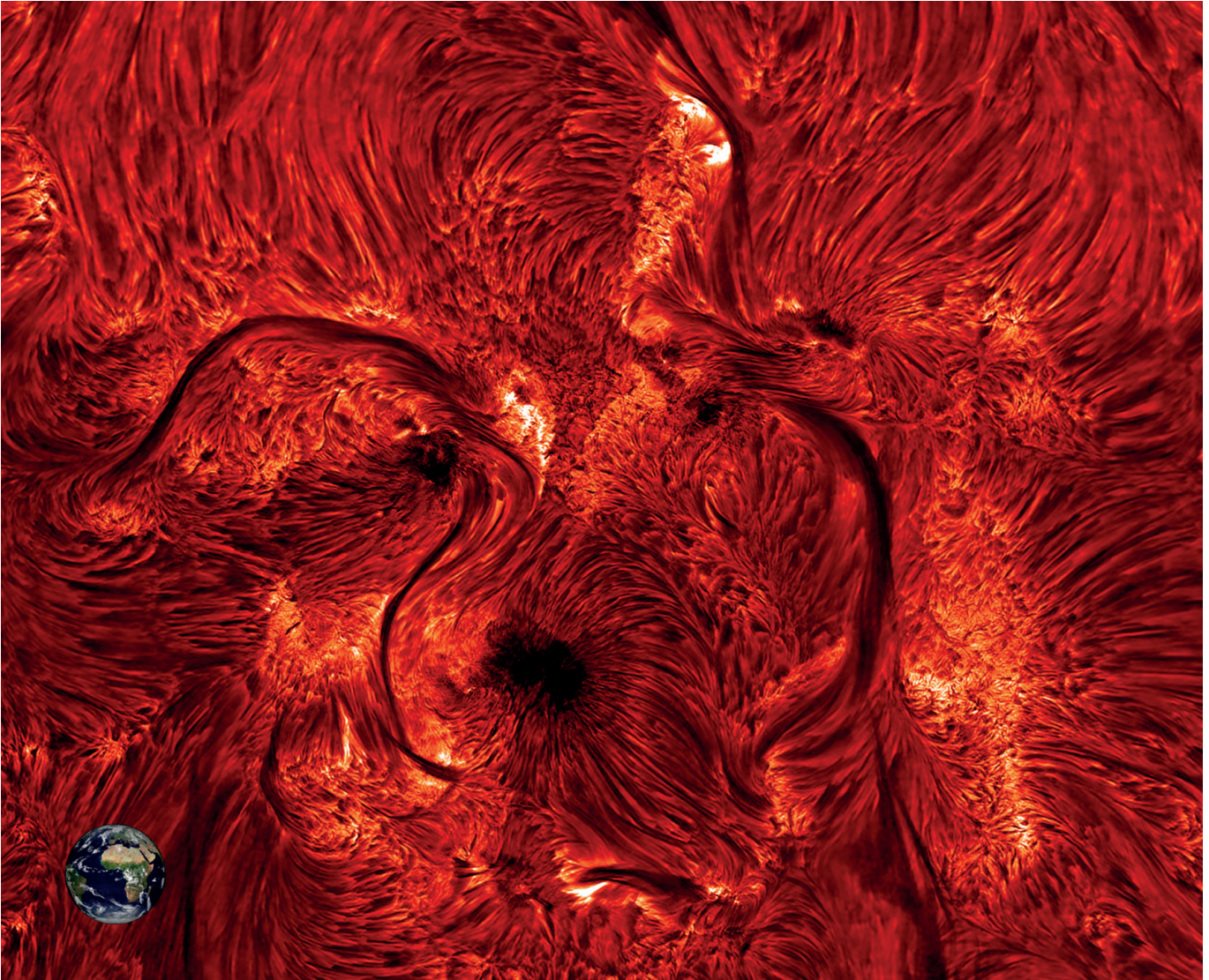
De prominente aanwezigheid van D₃ naast de zwakkere D₁ en D₂ van natrium en tussen de sterke Balmerlijnen definieert onmiddellijk het grote probleem van chromosfeerinterpretatie: ze passen helemaal niet bij elkaar! De natriumlijnen suggereren gas met een tempera-

tuur onder 5000 K, de Balmerlijnen onder 10 000 K, maar D₃ wel 50 000 K of nog veel meer. Die lijn is dan ook in het gewone zonnenspectrum helemaal niet te zien. Hoe kan hij hier zo sterk zijn?

Het antwoord is intussen duidelijk: de enorme inhomogeniteit van de chromosfeer. Er zitten heel hete en koude plekken op zeer kleine schaal door elkaar.

In deze laag net boven het zichtbare zonsoppervlak worden de magnetische velden van de zon de baas over het lokale gas. Onder het oppervlak en in de granulatie – de korrelige structuur van het zonsoppervlak – worden magnetische velden overal door het gas meegeleurd, in heftige turbulente stromingen die deel zijn van de convectie en die ook de granulatie produceren. Het magnetisch veld wordt door de granulen opzij gedrukt en samengeperst tot geconcentreerde 'fluxbuizen' ertussen. Het magnetisch veld is hier wel 1000-2000 Gauss sterk (het aardmagnetisme meet maar 0,6 Gauss bij de polen). Die dunne veldbuisjes steken omhoog (of omlaag, de polariteit wisselt op kleine schaal) en in de chromosfeer worden ze de baas over het gas omdat dat geïoniseerd en geladen raakt. Magnetische reconnectie en opwekking van magnetische golven maken het gas heet en leiden uiteindelijk tot de superhete corona (1-2 miljoen K) en de supersone zonnewind. Beide wortelen in de chromosfeer; zo ook het 'ruimteweer' bij de aarde, geleverd door zonnevlammen en exploderende filamenten.

Deze magnetische basisprocessen zijn moeilijk te onderzoeken omdat de intrinsieke schalen, aan de basis bepaald



Figuur 3. DOT mosaïc van zonsbeelden in Halpa genomen door P. S. Ütterlin op 8 juli 2005. De wirwar van 'fibrillen' tekent het magnetisch veld uit zoals ijzervijlsel rond een staafmagneet en laat zien hoe ingewikkeld de velden op de zon zijn. De lange donkere slierten zijn filamenten. De resolutie in dit beeld is 0,3 boogseconde. De DOT staat helaas op non-actief sinds de sluiting van het Utrechts Sterrekundig Instituut.

door de convectieve bewegingen in de granulatie, zo klein zijn: hooguit enkele tientallen kilometers en nog kleiner voor bijvoorbeeld draaiing binnen de fluxbuisjes (als in de kolk van de waterafvoer in een badkuip). Bedenk dat een boogseconde op de zon zo'n 720 km draagt. De beste telescopen halen nu 0,1 boogseconde, nog niet goed genoeg.

De chromosferische complexiteit is direct zichtbaar in H-alfa filtergrammen (waarvan ik steeds mooiere van Nederlandse amateurs onder ogen krijg, zie Amateurs Actief elders in dit nummer). Natuurlijk zie je in H-alfa de chromosfeer ook op de zonnenschijf omdat die lijn immers het flitsspectrum domineert. Het is een rijstebrij van dunne sliertjes die het magnetisch veld uittekenen (figuur 3). De complexiteit straalt eraf!

Voor zonnetelescopen op de grond was onze eigen Dutch Open Telescope een doorbraak.

De combinatie van uiterst kleine schalen en enorme dynamica op heel korte tijdschalen plus de complicatie dat de vorming van spectraallijnen in de chromosfeer erg ingewikkeld is, vormen een belemmering voor het chromosferisch onderzoek. Daarom wordt er pas sinds kort wezenlijke vooruitgang geboekt. Waarom nu dan wel? Op drie gebieden voltrekt zich een grote technologische vooruitgang: de zon scherp waarnemen vanaf de grond, de zon waarnemen vanuit de ruimte, en de zon bestuderen middels numerieke simulatie in een computer. In alle drie

ontwikkelingen spelen uit Utrecht afkomstige onderzoekers een belangrijke rol.

Voor zonnetelescopen op de grond was onze eigen Dutch Open Telescope een doorbraak: die liet zien dat het niet nodig is de telescoopbuis vacuüm te zuigen om interne seeing nabij het focus te vermijden. Voorheen deden de zonnetelescopen dat wel, maar op straffe van beperking van de apertuur. De grootste is de Zweedse vacuümtelescoop op La Palma met een intredelens (tevens vacuümvenster) van 1 meter doorsnee,



Figuur 4. Dr. Jaap Houtgast aan de ingangsspleet van de spectrograaf, 12 november 1966, Bagé, Brazilië. Het is nog ruim voor het tweede contact. Hij heeft zijn handen aan een kantelbaar glasplaatje dat dient om de laatste zonnepijp precies langs de spleet van de spectrograaf te zetten. Het licht ging verder een lichtdichte keet in waarin de spectrograaf was opgesteld op aparte pilaren (collimatorspiegel, tralie, afbeeldingsspiegel, eigen-fabriek camera's voor 70 mm film met een losse bladsluiter en snel filmtransport). Houtgast was een markant persoon die opbloeide in zijn expedities.

ongeveer het maximum haalbare. Het succes van onze open telescoop heeft sindsdien geleid tot een nieuwe Duitse telescoop (GREGOR, diameter 1.5 m, Tenerife) en de grote Amerikaanse (DKIST, 4 m) die nu in aanbouw is op Hawaï. Ook in India, Europa en China zijn er zulke plannen (telescopen van 2 m, 4 m en 8 m respectievelijk). Deze instrumenten maken gebruik van adaptieve optiek waarmee de beeldonrust, tweeweggebracht door onze dampkring, voor een flink deel wordt gecompenseerd met daarna nog uitvoerige numerieke beeldrestauratie om de beelden nog verder aan te scherpen.

In de ruimte hebben we sinds kort een ultravioletspectrometer (IRIS, NASA) die speciaal is gelanceerd om het spectrum van de chromosfeer te registreren. En de Japanse, Europese, en Amerikaanse zonnepijp stellen momenteel een grotere ruimtemissie voor (Solar-C, de derde Japanse zonnepijp) met de chromosfeer als voornaamste onderzoeksdoel.

De numerieke simulaties vormen misschien wel de grootste doorbraak in de chromosfeerfysica. Het idee is eenvoudig: stop in de computer wat je denkt van zonnepijp te weten, laat hem sudderen, en kijk of het resultaat op de zon lijkt. In de praktijk vergt dit de grootste supercomputers en dan ook nog maanden rekentijd. Maar de resultaten worden steeds beter. De granulatie en de flux buisjes in de fotosfeer zijn zo al goed begrepen. Momenteel richt men zich op grotere structuren zoals zonnevlekken en op de chromosfeer.

Met deze ontwikkelingen zal de chromosfeer steeds beter begrepen worden. Zonsverduisteringen zijn nog maar zelden reden voor een wetenschappelijke expeditie, maar blijven wel zowat het mooiste dat er is!

Utrechtse eclipsexpedities

Tussen 1901 en 1973 ondernamen onderzoekers van het Sterrenkundig Instituut Utrecht 18 eclipsexpedities. Een overzicht staat op http://www.staff.science.uu.nl/~rutte101/Utrecht_eclipse.html.

Met Minnaert en Houtgast als leiders lag het accent al snel op het flitspectrum van de chromosfeer. Weken tevoren arriveren op de beoogde locatie, dan een spectrograaf bouwen op ter plekke gemetselde pilaren en dan luttele seconden waarneming bij tweede en derde contact!

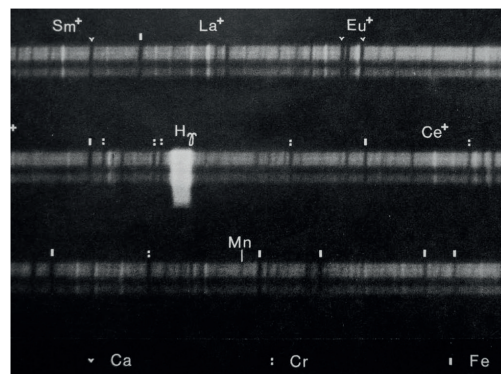
Ik ging mee in 1966 en 1970. Daarmee raakte ik verslingerd aan de chromosfeer en dat is zo gebleven. Mijn proefschrift ging over de vorming van chromosferische spectraallijnen (spectra van 1970); mijn nieuwste manuscript, zojuist ingeleverd bij de *Astrophysical Journal*, idem dito (spectra van de IRIS satelliet).

De laatste Utrechtse expeditie was in 1973. Het was toen al duidelijk dat chromosfeerspectroscopie beter gedaan kan worden vanuit de ruimte, maar dat het zolang zou duren had ik niet verwacht. In de decennia ertussen lag het accent op chromosfeeronderzoek op de schijf aan de hand van beeldreeksen, vooral in H-alfa.

Intussen was ik natuurlijk ook verslingerd geraakt aan zonsverduisteringen; sindsdien ga ik als eclipsstoeër. Ik hoop op 20 maart nabij de Faeroër-eilanden mijn elfde te zien.

'Bij mijn laatste eclipsreizen naar Mongolië (2008), China (2009) en Australië (2012) heb ik me aangewend mijn kijker klaar te houden en één oog zo'n tien minuten voor de totaliteit af te dekken. Ook de allerlaatste felle Bailey Bead (het laatste bergdal in de maansrand waar de zon nog doorheen piept) moet je niet met een verrekijker bekijken, maar op het moment dat die verdwijnt is het wel veilig en zeer de moeite waard (net als de groene straal-waarneming bij zonsopgang). Of het afdekken echt helpt voor tijdige adaptatie weet ik niet, maar ik ga er wel mee door. De totaliteit duurt maar zo kort dat je ogen nog niet zijn aangepast als hij al weer voorbij is. Dat merk je al in de laatste minuten voor de totaliteit: dan houden ze de versnelde lichtafname niet meer bij en zie je het zienderogen donkerder worden.

Het uur er voor, gedurende de gedeeltelijke fase van de eclips, wordt het ook steeds donkerder maar dan passen je ogen zich nog wel aan en ziet de omgevingsverlichting er alleen maar steeds vreemder uit – killer licht, steeds scherpere schaduwen, mooie sikkelbeeldjes. Die krijgt u op 20 maart in Nederland wel te zien.



Figuur 5. Spectrum van de laatste expeditie (Atar 1973). Nog uit het fotografische tijdperk maar er was wel een elektronische beeldversterker gebruikt. Het was een hele puzzel uit te zoeken waarom sommige donkere lijnen duidelijk scheef staan, met variaties. Houtgast en Namba kwamen er niet uit (*Procs. Royal Neth. Acad. Arts Sciences*, 82, 223, 1979), voor elk het laatste wetenschappelijke artikel (Houtgast overleed in 1982, Namba in 2013). Hij schreef nog wel 20 artikelen over planeten in Zenit. Het antwoord kwam pas recent (Rutten, *Astron. Soc. Pacific Conf. Series*, 470, 49, 2013): de scheefheid wordt veroorzaakt door magnetische torsiegolven in de spiculen waaruit de chromosfeer voorbij de zonnerrand vooral bestaat.