

DOTtige lijnkernen van de zon

Rob Rutten

Sterrekundig Instituut Utrecht en
Institute for Theoretical Astrophysics Oslo

Sinds Joseph von Fraunhofer weten we dat het spectrum van de zon tjokvol spectraallijnen zit (Wollaston zag ze al twaalf jaar eerder, in 1802, maar dat bleef onopgemerkt). In het begin van de afgelopen eeuw werd spectraalanalyse “de schatkamer ban de astronoom” (Pannekoek) en de grondslag van de astrofysica. Hier in Utrecht werd analyse van het zonnenspectrum onder Julius (een neef van die van het Juliusinstituut) de grondslag van de afdeling Heliophysica van het Fysisch Laboratorium en later de hoofdschotel van het onderzoek van Minnaert en medewerkers. De zonneopstelling van Museum Sonnenborgh is daar nu nog tastbaar van over. De natuurkundepraktikumproef ZNSP laat je daar van deze traditie proeven.



Voor Minnaert was de grote vraag hoe de spectraallijnen in het zonnenspectrum ontstaan. Daarnaast mat hij duizenden in detail op, in de beroemde Utrechtse zonneatlas en de bijbehorende lijnentabel, een immense klus waar een sloot medewerkers (“computers” genoemd in het dankwoord, als vertaling van “rekenaars”) jarenlange noeste vlijt aan bijdroegen (“rekenaar” Ed van der Zalm en ik hebben een klein deel ervan in de tachtiger jaren als ijking overgedaan, wel per echte computer. Wees blij dat je niet als maar pas na de computer geboren bent!).

Hoe spectraallijnen ontstaan is inmiddels duidelijk. In mijn tweedejaarscollege AIST leg ik het uit op de manier die gold ten tijde van Minnaert’s pensionering in 1963: op de golflengte van een spectraallijn is het zonnegas minder doorzichtig, dus kijk je minder diep, daar is het koeler, dus je ziet een lagere Planckfunctie, dus een donkere lijn. Simpel nietwaar? Te simpel, de aanname van LTE (Planck) stond toen al op de helling. Maar toch al ondoorzichtig genoeg: “optisch dik stralingstransport” blijft een struikelblok, niet alleen voor studenten maar ook voor veel astronomen.

In mijn doctoraalcollege AFYC (dictaat op mijn website = rob rutten in Google) doe ik het netter: geen LTE en Planckfunctie meer, maar stralingsveldgevoelige bronfuncties met verstrooiing. Dat is inhoudelijk niet zo veel moeilijker maar wel problematisch om uit te

rekenen. Nog lastiger wordt het als de verstrooiing zelf moet worden berekend met inbegrip van incomplete herverdeling: als het verstrooide foton nog enige frequentiecorrelatie met het ingevangen foton heeft. De experts daarin zijn mijn oudpromovendi Han Uitenbroek en Jo Bruls, nu spectraalmodelleerders in de VS en Duitsland. Zij gieten de complete theorie van spectraallijnvorming, met partiële herverdeling, in magnetohydrodynamische simulaties van de zonneatmosfeer.

designation	λ (\AA)	width (\AA)	type	tuning
blue continuum	4320	6	interference	fixed
red continuum	6540	3	interference	tiltable
G band	4305	10	interference	fixed
Ca II H	3968	1.35	interference	tiltable
H α	6563	0.25	Lyot	tunable
Ba II	4554	0.08	Lyot	tunable

Table 1: De spectrale filters van de DOT. De eerste vier zijn klaar; de eerste synchrone kwartetfilms zijn al aanklikbaar op de DOT website. H α komt dit voorjaar, met de installatie van het Lyotfilter uit Canada. Het Ba II 4554 filter uit Irkutsk zal meer tijd nemen, en pas volgend voorjaar op de telescoop komen.

Daar ligt nu het front van Minnaert's onderzoeksterrein. Intussen doen we in Utrecht geen zonn spectroscopie meer. Maar lijnkernen in het zonn spectrum worden wel weer uitermate belangrijk! Als tomografische diagnostiek op onze eigen Dutch Open Telescope op La Palma, de DOT. Het gaat om drie speciale lijnen, Ca II H, H α en Ba II 4554, naast de hele G band van CH lijnen. Nauwbandige spectrale filters in de veel-kanaals secundaire optiek in de kop van de DOT selecteren smalle bandjes uit het spectrum juist in deze drie lijnen. Alle drie zorgen ze voor extra ondoorzichtigheid van het zonnegas zodat we ondieper kijken - vandaar de tomografie. Maar omdat ze dat heel verschillend doen, leveren ze verschillende gevoeligheden voor de fysische omstandigheden, en dus verschillende diagnostieken. Die buiten we in de DOT uit. Kort door de bocht: de G band levert ons de magnetische topologie van de fotosfeer, Ca II H idem van de lage chromosfeer, H α van de hoge chromosfeer, en Ba II 4554 levert snelheidskaarten ("Dopplergrammen") en wellicht ook magneetveldkaarten (magnetogrammen en Stokes-vector polarimetrie). In dit artikeltje wat meer daar over.

Een spectraallijn is in principe niets anders dan een smal golflengtebereik waarin het gebonden valentie-electron van de betreffende atoom- of ionsoort aangeslagen kan worden naar een hogere quantumtoestand (een hogere "baan" in een Bohr-atoom). In eerste instantie extra extinctie op die specifieke golflengte, dus toename van de ondoorzichtigheid van het gas en dus een toename in de hoogte waarop het zonlicht

ontsnapt, de kijkdiepte. In een spectraallijn zie je dus hogere lagen. In de Ca II H lijn kom je zo 500 - 1000 km boven de fotosfeer, het “oppervlak” waar het meeste zonlicht ontsnapt.

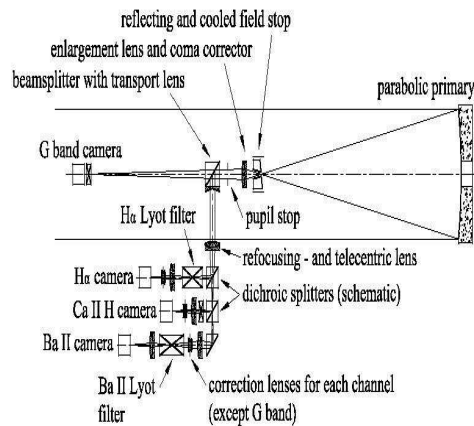


Figure 1: Schets van de veelkanaals secundaire optiek op de DOT. Rechts de 45 cm primaire spiegel. Het 2 cm grote zonsbeeld valt op een schief spiegeltje dat alleen door een 1.6 mm gaatje licht doorlaat, een veld van drie boogminuten. Het spiegelt de rest weg. Waterkoeling zorgt dat het niet smelt. Een beetje licht gaat rechtuit naar de G-band camera, de rest gaat opzij en wordt verdeeld over de andere vijf camera's. De beelden gaan per optische fiber naar het gebouw van de naburige Zweedse zonnetelescoop vanwaar de DOT wordt bediend.

Dat maakt een enorm verschil: je kijkt dan in de chromosfeer waarin het magnetisch veld van de zon de baas gaat spelen over de gasbewegingen - in de fotosfeer en daaronder is het juist andersom. In de corona is het veld helemaal de baas maar om die te zien moet je of naar een zonsverduistering of de ruimte in. In de calciumlijn is de ontsnappingshoogtetoename het minst gecompliceerd. De Ca II H en K lijnen zijn valentie-elektronsprongen vanuit het grondniveau van het ion naar de twee eerste aangeslagen niveaus. In de atmosfeer van de zon is vrijwel alle calcium geïoniseerd en zitten zowat al die ionen in de grondtoestand - dus is op iedere plaats de hoeveelheid lijnveroorzakende calciumdeeltjes een vaste fractie van de gasdichtheid. Wat bij de calciumlijnen moeilijk is, is de bronfunctie. Die wordt maar deels gegeven door de Planckfunctie, veel meer door het stralingsveld: verstrooiing speelt een belangrijke rol, en die lijdt bovendien aan incomplete herverdeling. Niettemin zijn deze kernen ongelofelijk belangrijke diagnostieken van een

veelvoud van stellaire verschijnselen, een hele Vakidoot waard. Ondermeer een gevoelige maat voor de magnetische activiteit van koele sterren, het laatste onderzoeksterrein waarop de zonneopstelling van Museum Sonnenborgh nog wetenschappelijke bijdragen heeft geleverd (in de tachtiger jaren). En ook een gevoelige maat voor de lichtkracht van koele sterren, eveneens op onbegrepen wijze. Maar ook met veel begrip, bijvoorbeeld als diagnostiek van geluidsgolven die in de chromosfeer tot schokken versteilen, een klinkend resultaat van Utrechts onderzoek uit de negentiger jaren. In onze DOT films tonen de Ca II H beelden de magnetische topologie en de dynamica van de magnetische structuren in de lage chromosfeer. Die prikken door de fotosfeer heen en waaiëren dan uit; dat is in de calcium lijnen goed te zien. Klik daartoe op de DOT website onder “showpieces” de morphs aan!

Hogerop komen we met het $H\alpha$ filter. Deze lijn is aanzienlijk zwakker en dus zou je geringere ontsnappingshoogte verwachten, maar omdat de aanslagenergie van het onderniveau zo groot is (10 eV), wordt deze lijn pas belangrijk bij voldoende hoge temperatuur in structuren die verhit worden door warmtegeleiding omlaag vanuit de veel hetere corona (1-2 miljoen K). Dat houdt in dat je in $H\alpha$ een heel andere zonneatmosfeer te zien krijgt, van boven in plaats van van onderen bepaald. Ik kan nog geen $H\alpha$ beelden bijvoegen, want het filter komt juist nu op de DOT, maar we hebben zeer hoge verwachtingen van wat ze zullen tonen. Met de fantastische DOT scherpte zullen ze er buitengewoon gedetailleerd uit zien - des te meer omdat veel van de hete structuren die je in $H\alpha$ te zien krijgt optisch dun zijn en dus inherent detail kunnen tonen kleiner dan de vrije weglengte van een foton. In optisch dikke omstandigheden kom je daar niet onder, zeker als verstrooiing een rol speelt. DOT $H\alpha$ wordt dus vast nog scherper dan Ca II H hoewel de buigingsgrens in het rood grover is.

Het filter dat we gaan gebruiken om de $H\alpha$ kern te isoleren is een Lyotfilter, een rij dubbelbrekende kristallen waarin door interferentie een smalle golflengteband wordt geselecteerd. Onder computerbesturing wordt de golflengte snel gewisseld tussen de rode en blauwe lijnvleugels in opeenvolgende beelden (speckle bursts, maar dat is een heel verhaal apart). Zulke profielbemonstering is nodig om onderscheid te kunnen maken tussen lokale variaties in de intensiteit (op en neer) en in de plaats van de lijn (heen en weer, Dopplerverschuiving). Op en neer kan dan nog liggen aan de extinctie, de hoeveelheid $H\alpha$ -veroorzakende waterstofatomen ter plekke, of aan de bronfunctie, bepaald door de temperatuur en door het stralingsveld. Het is absoluut noodzakelijk heen-en-weer van op-en-neer variaties te scheiden, en dan nog zijn de

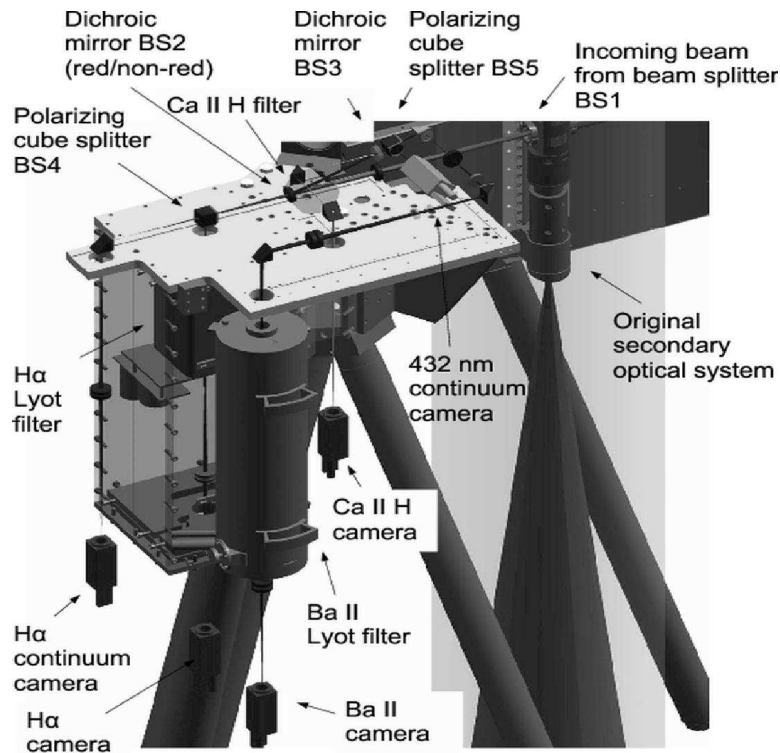


Figure 2: Het feitelijk ontwerp van de DOT veelkanaals optiek bezijden de inkomende bundel. Het Ba II 4554 filter is het grootste onderdeel. Op slimme manier wordt het licht met minimaal verlies over de verschillende golflengtes verdeeld en worden optische fouten voor elke golflengte apart gecompenseerd, met telecentrische filterplaatsing waarin elk deel van het beeldveld dezelfde filterwerking krijgt. Ontwerptekening van Aswin Jägers (IGF).

laatste niet simpelweg te vertalen naar temperatuur en/of dichtheid. Quantitative interpretatie vraagt daarom diepgaande modellering met computersimulaties. Postdoc Kostas Tziotziou is daar ervaren in, en AIO Jorrit Leenaarts begint eraan.

Ons H α Lyotfilter is door Zeiss gebouwd en hebben we cadeau uit Canada. Voor de Ba II 4554 lijn hebben we een nog veel groter Lyot filter dat is gebouwd in Irkutsk in de zeventiger jaren door een Rus, Valeri Skomorovsky, die de benodigde calciëtkristallen zelf uit een Siberische mijn ging halen.

Ik kwam via een Hongaarse collega achter het bestaan ervan (en schreef daar drie jaar geleden een Vakidootartikel over dat je op mijn website kunt aanklikken). Het filter staat nu nog ter bewondering in het lab van Felix Bettonvil (BBL 707) en zal, met hulp van Skomorovsky, volgende winter op de DOT komen. Dan zal het dienen om scherpe snelheidskaarten, “Dopplergrammen”, van de fotosfeer te maken, alweer door snelle golflengteverstemming tussen beide vleugels om de heen-en-weer beweging te isoleren. De Ba II 4554 lijn is daar bij uitstek geschikt voor omdat barium - what’s in a name - zo’n zwaar element is: de thermische Dopplerverbreiding is daardoor klein, en de niet-thermische gasbewegingen zijn beter meetbaar. Ook is de lijn waarschijnlijk heel geschikt voor polarimetrie om de sterkte van magneetvelden te meten. We hopen zo’n uitbreiding naderhand te installeren, gebruikmakend van vloeikristallen als polarisatie-codeerders. TUE student Frans Snik onderzoekt alvast hoe dat zal moeten. Het Irkutskse filter is bovendien ook nog geschikt om naar H β verstemd te worden, de tweede lijn van de Balmerreeks, en die is ook bijzonder geschikt voor polarimetrie.

Tot slot de G band. Die komt uit de diepe fotosfeer en toont de uiterst kleine magnetische elementjes in de lanen tussen de granulen die de bovenlaag van de zonconvectiezone vormen. De G band toont deze “fluxbuisjes” met groter contrast dan enig ander spectraal bereik, en is daarmee de beste diagnostiek om deze fundamentele bouwstenen van het zonnemagnetisme in kaart te brengen. Waarom dat zo is, is echter een open vraag.

Ik heb daar uitgesproken ideeën over (stralingsevenwicht in een lekkend vergiet van fluxbuisgaatjes). Maar die zijn nu nog controversieel, en om ze uit te leggen moet ik het collegedictaat AFYC inlassen. Dat gaat hier wat te ver.

De conclusie is dat je de DOT website <http://dot.astro.uu.nl> in de gaten moet houden. Er staan nu al spectaculaire films op, en

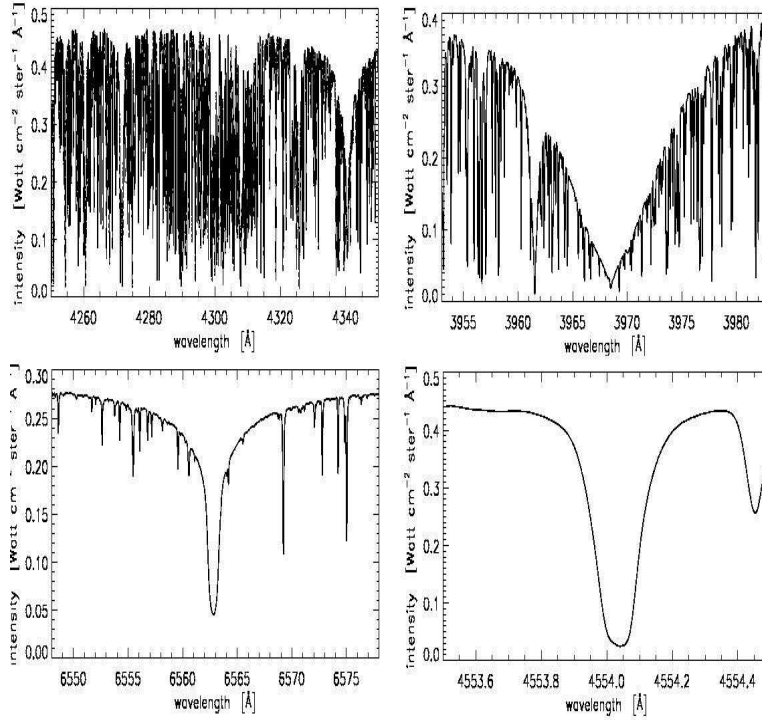


Figure 3: De vier speciale DOT diagnostieken in het zonnenspectrum. De blauwe G band (zo genoemd door Fraunhofer in 1814, linksboven) bevat veel lijnen van het CH molecuul. De violette Ca II H lijn in de tweede grafiek, rechtsboven (de H is ook van Fraunhofer) van geïoniseerd calcium is met z'n broer, de Ca II K lijn, de sterkste spectraallijn in het zichtbare deel van het zonnenspectrum. De meeste kleinere op de uitgebreide vleugels gesuperponeerde andere lijnen zijn van ijzer. De H α lijn van waterstof (grafiek linksonder) ligt in het rood. Hoewel de zon voor 90% uit waterstof bestaat is deze lijn veel minder sterk omdat hij grote aanslagenergie vereist. De Ba II lijn van geïoniseerd barium (rechtsonder) is atoomfysisch analoog aan de Ca II K lijn maar veel minder sterk omdat barium veel minder voorkomt. Deze lijn heeft een brede asymmetrisch kern omdat hij een conglomeraat is van een aantal verschillende isotopen en hyperfijnstructuurcomponenten.

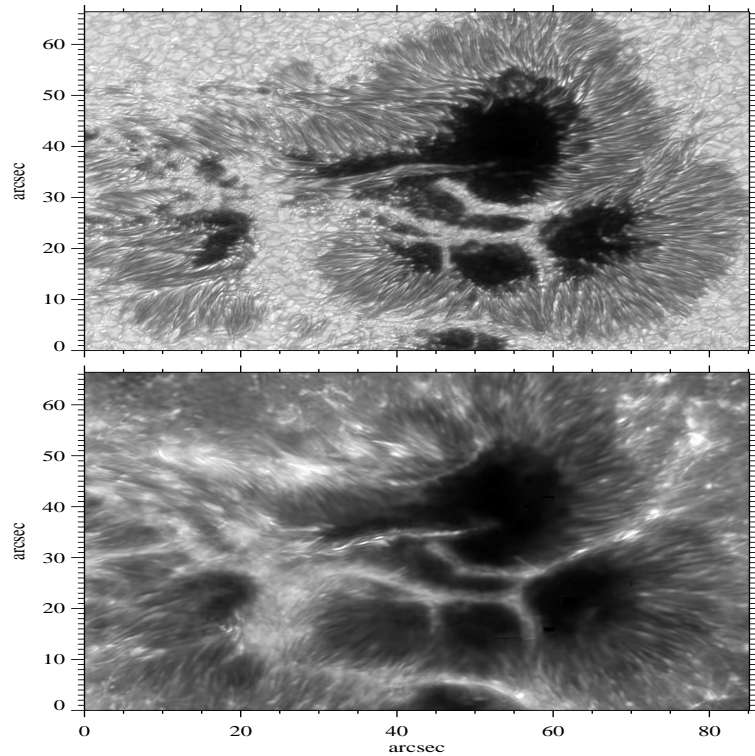


Figure 4: Twee beelden van een actief gebied op de zon, gelijktijdig opgenomen met de DOT op 1 mei 2003. Schaal: 1 boogseconde is 725 km op de zon. Boven: fotosfeer in de G band. Onder: chromosfeer in Ca II H. De grote verschillen tonen de met de hoogte toenemende rol van het magnetisch veld. De DOT maakt zulke beelden met ongeëvenaarde kwaliteit, in de vorm van langdurige films waarin de dynamische veranderingen van de magnetische structuren prachtig te volgen zijn.

met deze zomer $H\alpha$ erbij en volgend jaar $Ba\ II\ 4554$ zul je er de zon in uiteenlopende lijnkernen zien pronken.

Dit jaar gaat de DOT ‘open’: vanaf de zomer komt waarneemtijd beschikbaar voor externe gebruikers. Momenteel wordt complexe secundaire optiek voltooid voor synchrone waarnemingen op diverse golflengten waarmee de magnetische structuur van de fotosfeer, lage chromosfeer en hoge chromosfeer tegelijkertijd in kaart worden gebracht. Ook wordt door Pit Sütterlin, Alfred de Wijn en Felix Bettonvil momenteel een grote parallel-rekenende computercluster gerealiseerd waarmee de spikkelreconstructie honderd maal sneller zal gaan. De spikkelmachine (70 watergekoelde Xeon processoren die tot 1.8 Terabyte per dag aankunnen) maakt het dan mogelijk om vaak waar te nemen. Om voldoende bemensing te krijgen willen we ook een ‘studenten naar La Palma’ onderwijsprogramma starten, waarin paren studenten twee weken komen helpen waarnemen en een zonnefysisch onderzoeksproject uitvoeren. Met nog twee weken Utrechtse uitwerking en rapportage erbij goed voor 7.5 ects. Of als 15 ects bacheloronderzoek. Kom praten als je interesse hebt! Voorbehoud: enerzijds is de financiering nog niet rond, anderzijds is er voor dit jaar al een flinke lijst gegadigden.
