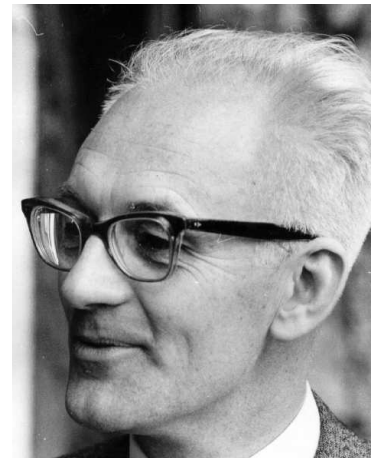


P1F1 — ZNSP

SPECTROGRAFISCHE BEPALING VAN DE ZONSROTATIE



R.J. Rutten
M.A. Brentjens
P.R. den Hartog
A.J.T. Poelarends
M.V. van der Sluys

Sterrekundig Instituut Utrecht

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Vorbereiding	3
2.1	Optiekschema	3
2.2	Formules	3
2.3	Telescoop	5
2.4	Spectrograaf	5
2.5	Meetplan	7
3	Waarnemen	7
3.1	De zon in beeld	7
3.2	Spectra opnemen	8
3.3	IJkingsopnamen	8
3.4	Extra waarnemingen	9
3.5	Afsluiting	9
3.6	Datatransport	9
4	Reductie en analyse	10
4.1	Beelden inlezen	10
4.2	Plaats van de zonsrand	11
4.3	Golfengtebepaling	11
4.4	Zonsrotatie	11
5	Verslag	11
5.1	Aandachtspunten	11
5.2	Uitbreidingen	13
A	Parameterwaardes	15
B	Literatuur	17
C	Achtergrond: de Fe I 6302 Å lijnen	19
D	Achtergrond: de Utrechtse zonneopstelling	21
	Referenties	28

1 Inleiding

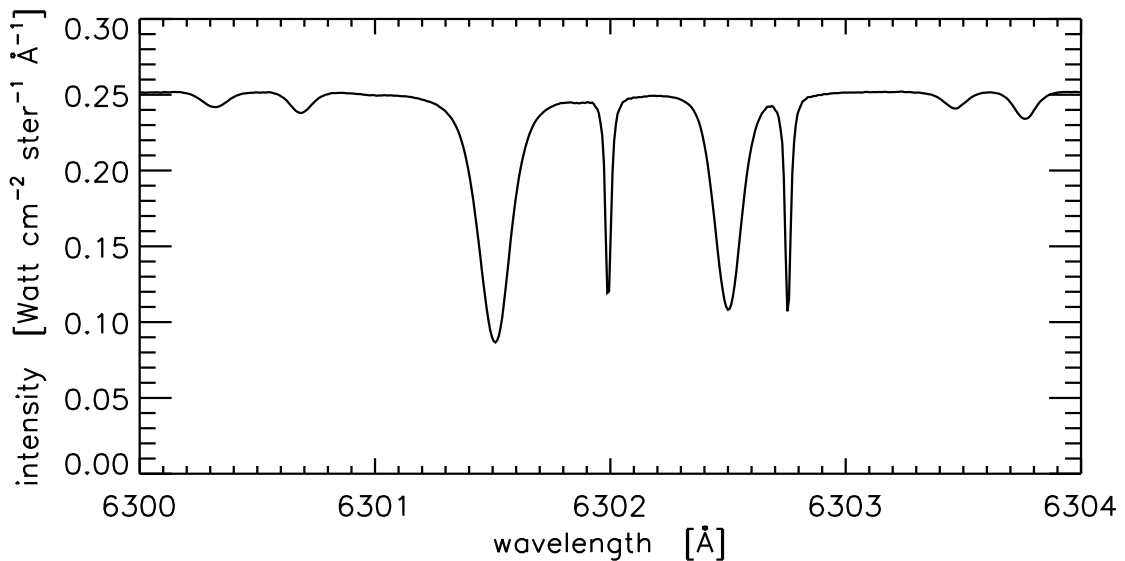
In deze proef gebruik je de zonneopstelling van Sterrenwacht Sonnenborgh om de zonsrotatie te bepalen uit het verschil in Dopplerverschuiving van spectraallijnen waargenomen van de oost- en westrand van de zonneschijf.

Je verdiept je in de optica van een telescoop en een spectrograaf, je leert spectra digitaal opnemen en calibreren, en je bepaalt Dopplerverschuivingen met een precisie beter dan de instrumentele resolutie.

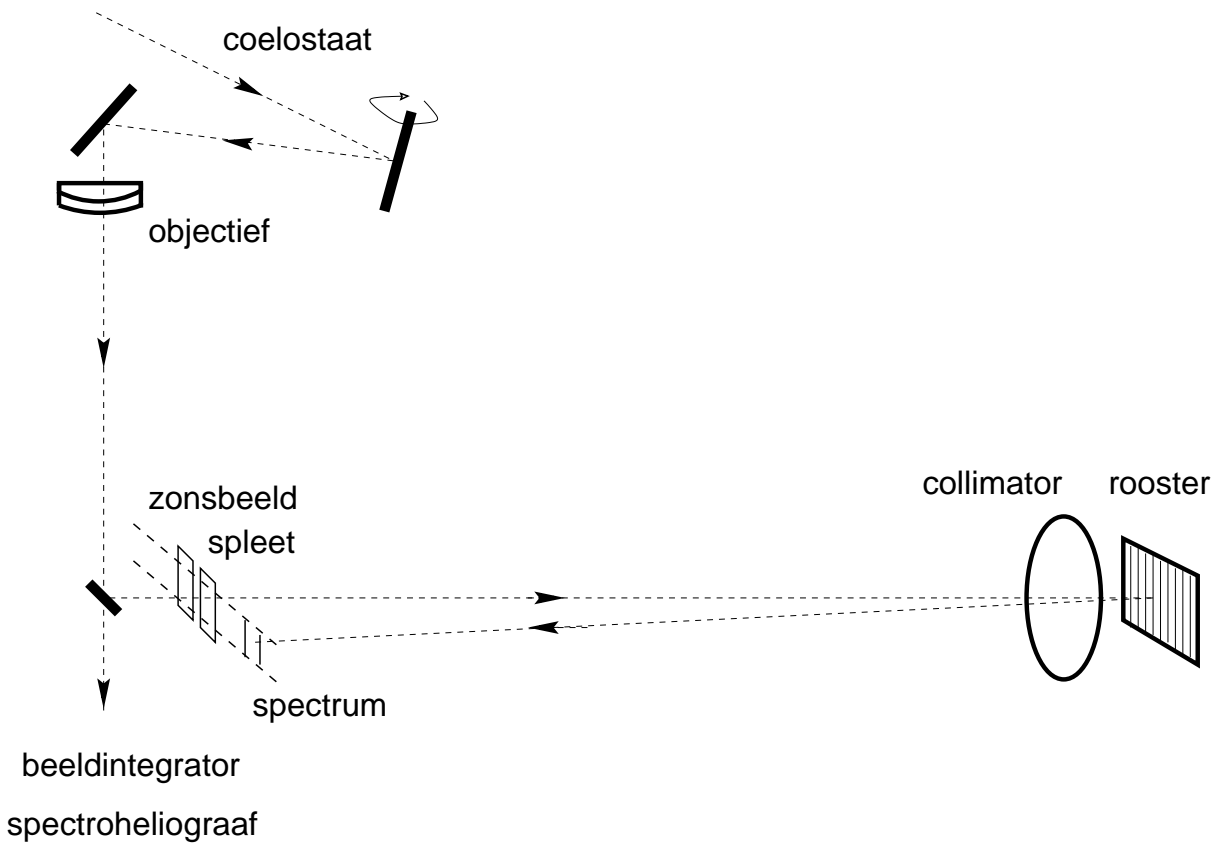
Je besteedt een middag aan data-acquisitie op Zonneburg. Daar treed je letterlijk in de voetsporen van beroemde Utrechtse zonnefysici (bladzij 27). De zon moet wel schijnen! Een tweede middag bewerk je je meetgegevens per computer.

De Utrechtse zonneopstelling is nu onderdeel van Museum Sterrenwacht Sonnenborgh. Je zult zien dat het instrument inderdaad museale trekken vertoont — het is de laatste jaren niet meer wetenschappelijk gebruikt. Niettemin verschilt de optiek niet wezenlijk van die in modernere telescopen; optische principes veranderen niet en blijven instructief.

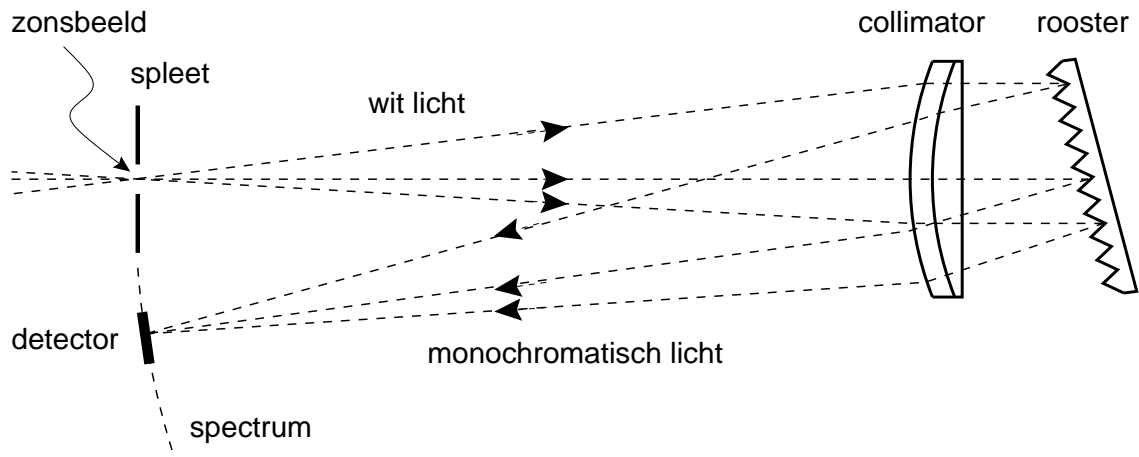
Wat wel significant veranderde zijn de stralingsdetectoren en de reductietechnieken. Voor deze proef is de zonneopstelling uitgerust met een digitale CCD camera en een computer met de beeldverwerkingstaal IDL. Daarmee is waarnemen met de zonneopstelling weer bij de tijd — en educatief correct.



Figuur 1: Het stukje zonnespectrum dat in deze proef wordt gebruikt. Golflengteschaal: 1 Ångstrom = 0.1 nm; deze golflengten liggen in het rood. Verticale schaal: intensiteit van het zonsmidden. De twee brede absorptielijnen worden veroorzaakt door ijzeratomen in de atmosfeer van de zon, de twee smalle door zuurstofmoleculen in de atmosfeer van de aarde. De ijzerlijnen worden door de draaiing van de zon aan de oostrand naar kortere golflengten verschoven, aan de westrand naar langere golflengten. De aardse zuurstoflijnen verschuiven niet en dienen voor de golflengtecalibratie. Er zijn nog duizenden andere lijnen in het zonnespectrum, maar deze twee ijzerlijnen horen tot de meest gebruikte. Meer daarover in Appendix C (bladzij 19).



Figuur 2: Optiekschema van de zonneopstelling, van opzij gezien, niet op schaal. De dimensies staan in Tabel 3 op bladzij 15. De coelostaat levert een stilstaande verticale bundel zonlicht. Het objectief vormt een zonsbeeld op de ingangsspleet van de horizontale spectrograaf. Het spectrum verschijnt ter weerszijden van de spleet. De beeldintegrator en spectroheliograaf (Appendix D) worden in deze proef niet gebruikt.



Figuur 3: Stralengang in de spectrograaf, van boven gezien, niet op schaal. De spleet en de roosterkrassen staan loodrecht op het vlak van tekening. In het spectrum wordt de door de spleet doorgelaten uitsnede van het zonsbeeld monochromatisch afgebeeld.

2 Voorbereiding

De proef begint met parameterbepalingen voor je meetplan, waaronder schattingen van de te verwachten beeldscherpte en spectrale resolutie. Hier eerst het optiekschema en de benodigde formules. De specificaties van de zonneopstelling staan in Appendix A op bladzij 15, van de CCD camera op bladzij 16.

Een selectie van literatuur en websites betreffende dit onderwerp staat in Appendix B; de literatuurverwijzingen in de tekst staan aan het eind van deze instructie. Er zijn ook bijlagen aangaande de hier gebruikte ijzerlijnen en de geschiedenis van de zonneopstelling (Appendices C en D).

2.1 Optiekschema

Figuur 2 toont de zonneopstelling schematisch. Het telescoopgedeelte bestaat uit een coelostaat, in de hut op het dak die weggereden kan worden. De coelostaat bestaat uit twee vlakke spiegels en dient om de vaste verticale telescoop met zonlicht te voeden terwijl de zon langs de hemel beweegt. Zonnetelescopen zijn doorgaans te groot om met de zon mee te draaien! De eerste spiegel draait om een as evenwijdig aan de aardas, in tegengestelde zin. De tweede spiegel kaatst de zo “stilgezette” bundel omlaag door het objectief. Een afbuigspiegel kaatst het licht naar de horizontale spectrograaf. Het door het objectief gevormde zonsbeeld valt op de ingangsspleet.

De spectrograaf (Figuur 3) heeft de zogenaamde Littrow autocollimatie-opstelling: eenzelfde lens wordt gebruikt als “collimatorlens” om het licht evenwijdig op het reflectierooster te laten vallen, en dient na weerkaatsing als “cameralens” om het licht weer te focuseren in het vlak van de ingangsspleet. De verticale krassen van het rooster (“tralie”) dispergeren het licht zodat het door de Littrowlens teruggeprojecteerde beeld van de spleet naar golflengte is gerangschikt in horizontale kleurenwaaiers ter weerszijden van de spleet: zonnenspectra.

Elk stukje zonsbeeld dat door de spleet wordt doorgelaten levert een overeenkomstig spectrum. Loodrecht op de dispersierichting (loodrecht op het vlak van tekening in Figuur 3) wordt het doorgelaten stripje zon dus spectraal afgebeeld op de detector. Als de coelostaatspiegels zo worden ingesteld dat de zonsrand over het op de detector afgebeelde deel van de spleet valt worden spectra van de zonsrand verkregen (Figuur 6 op bladzij 6).

2.2 Formules

Afbeelding door een enkelvoudige lens:

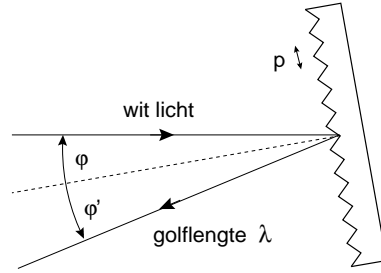
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} \quad (1)$$

met f de brandpuntsafstand, v de voorwerpsafstand en b de beeldsafstand.

Scheidend vermogen van afbeeldende optiek:

$$\sin \theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

met θ_0 de kleinste hoek tussen twee puntvormige objecten die nog gescheiden worden, λ de golflengte, en D de apertuurdiameter. Dit is het theoretisch scheidend vermogen bij ideale optiek. In lineaire maat in het beeldvlak: $f \sin \theta_0 \approx f \theta_0$ met f de brandpuntsafstand en θ_0 in radialen.



Figuur 4: Spectrale kleurscheiding door een reflectie-rooster. De evenwijdige krassen werken als evenzovele spleten en veroorzaken uitdoving behalve in die richtingen waarin het golflengteverschil tussen twee teruggekaatste stralen op onderlinge afstand p een heel aantal (de spectrale orde m) golflengten bedraagt. Omdat de krassen zijn aangebracht op een spiegel wordt het gedispergeerde licht teruggekaatst.

Dispersie door een rooster:

$$\zeta \equiv \frac{\Delta\varphi'}{\Delta\lambda} = \frac{m}{p \cos \varphi'} \quad (3)$$

drukt de hoekdispersie ζ (richtingsverandering per eenheid van golflengte) uit in de spectrale orde m waarin het rooster wordt gebruikt, de roosterconstante p (afstand tussen naastliggende roosterlijnen), en de hoek φ' tussen de normaal op het rooster en de weerkaatsingsrichting voor licht van deze golflengte gegeven door

$$\sin \varphi' = \frac{m\lambda}{p} - \sin \varphi \quad (4)$$

met φ de hoek tussen de inkomende bundel en de roosternormaal (Figuur 4). De lineaire dispersie ($\text{\AA}/\text{mm}$) in het spectrum is $f_{\text{coll}} \zeta$, met f_{coll} de brandpuntsafstand van de afbeeldende optiek (de collimatorlens bij autocollimatie zoals in de zonneopstelling).

Spectrale resolutie van een rooster:

$$R \equiv \frac{\lambda}{\Delta\lambda_0} = mN \quad (5)$$

met λ de golflengte, $\Delta\lambda_0$ de golflengteafstand van twee spectrale kenmerken die nog net gescheiden worden, m de spectrale orde en N het totaal aantal lijnen op het rooster. Dit is het theoretisch scheidend vermogen bij oneindig smalle spleetbreedte, ideale optiek en volmaakte evenwijdigheid en gelijkheid van de roosterlijnen.

Dopplerverschuiving:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \quad (6)$$

met $\Delta\lambda$ de golflengteverschuiving van elektromagnetische straling op golflengte λ ten gevolge van beweging langs de gezichtsrichting v , positief voor beweging van de waarnemer af (“roodverschuiving”), en met c de lichtsnelheid.

Zwaartekrachtsroodverschuiving aan het zonsoppervlak:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{grav}}}{\lambda_0} = \frac{GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}} \quad (7)$$

met M_{\odot} en R_{\odot} de massa en straal van de zon, respectievelijk, en λ_0 de golflengte bij verwaarloosbaar zwaartekrachtsveld.

Synodische en siderische rotatie:

$$\frac{1}{T_{\odot}^{\text{sid}}} = \frac{1}{T_{\odot}^{\text{syn}}} + \frac{1}{J} \quad (8)$$

met T_{\odot}^{sid} de omwentelingsduur van de zon in een niet-lokaal referentiestelsel (“de vaste sterren”, zeg een gemiddelde over sterren in de zonsomgeving), T_{\odot}^{syn} de zonsomwentelingsduur gezien vanuit het middelpunt van de aarde, en J het siderische jaar (momenteel 365.2564×86400 s). Voorbeeld: als je de zonsrotatie meet uit de verplaatsing van een zonnevlek gedurende een etmaal bepaal je T_{\odot}^{syn} omdat de aarde intussen ook is opgeschoven. Zie ook de schets links in Figuur 8 op bladzijde 12.

2.3 Telescoop

Bestudeer eerst de werking van de telescoop en de te verwachten beeldschaal en beeldscherpte. De laatste bepaalt hoe dicht je de zonsrand zult kunnen naderen.

- De coelostaatspiegels hebben een grotere diameter dan het objectief. Waarom?
- Op volgsnelheid draait de eerste coelostaatspiegel een halve slag per etmaal. Waarom niet een hele zoals de aarde zelf?
- De eerste coelostaatspiegel is gemonteerd op een in twee richtingen verschuifbare slede (zie de foto op bladzij 24). Waarom?
- Ga na dat voor zonnetelescopen de eenvoudige regel geldt dat de diameter van het zonsbeeld $1/100$ van de brandpuntsafstand bedraagt:

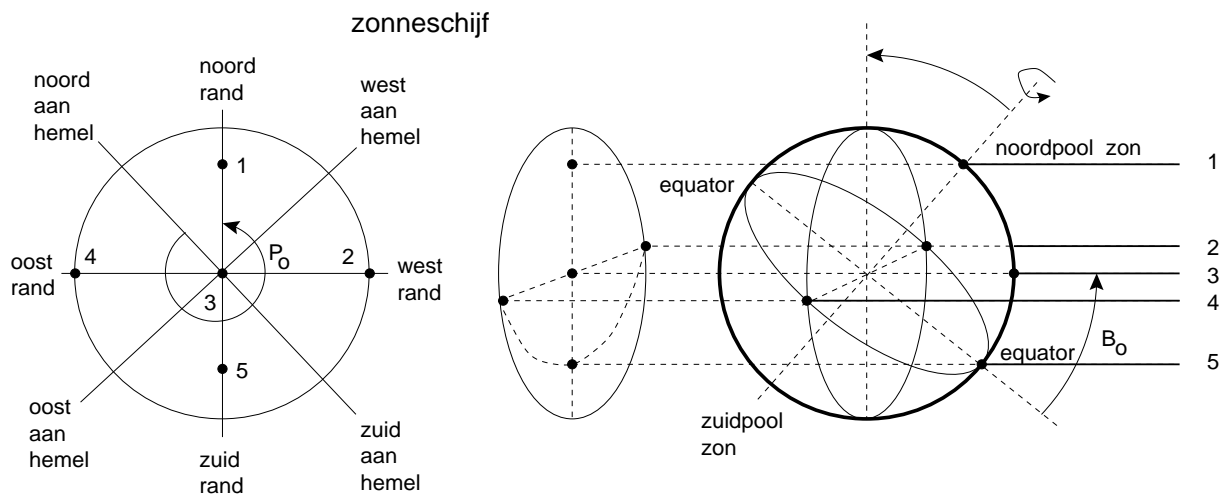
$$d \approx 0.01 f. \quad (9)$$

- Bereken voor $\lambda = 6302 \text{ \AA}$ het theoretisch scheidend vermogen van de telescoop in hoekmaat. Doorgaans is de atmosferische “seeing”, de beeldversmering tengevolge van luchtonrust, te Utrecht aanzienlijk slechter (zelfs op La Palma is die overdag zelden beter dan $0.5''$).

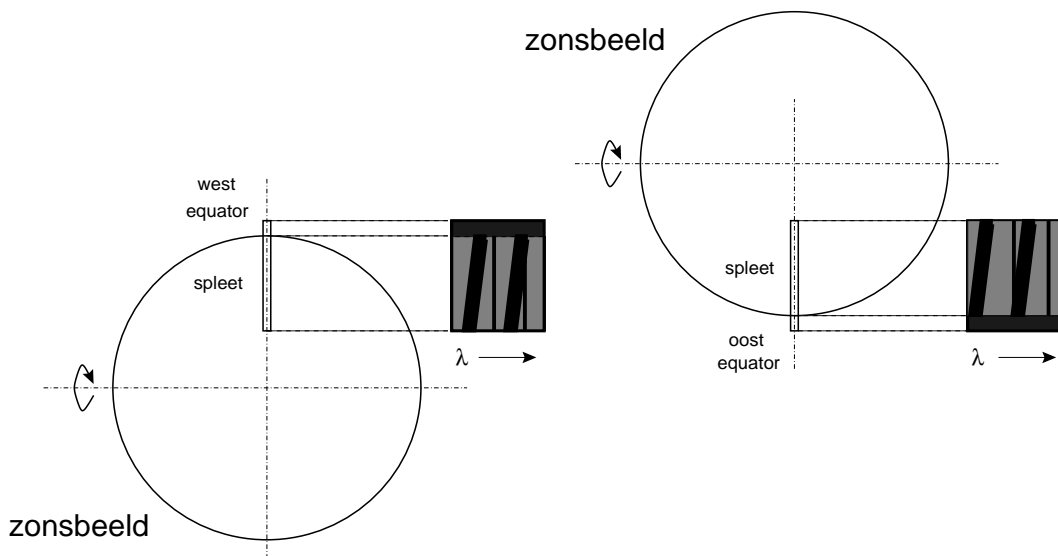
2.4 Spectrograaf

Bestudeer vervolgens de werking van de spectrograaf en schat de te verwachten spectrale dispersie en resolutie.

- De spectrograaf en telescoop horen “gematched” te zijn met gelijke openingsverhouding f/D , met f de brandpuntsafstand en D de apertuurdiameter van elk. Waarom moet dat? Is dit het geval bij de zonneopstelling?



Figuur 5: Geometrie en zonscoördinaten. De gezichtslijnen van de waarnemer rechts gaan (1) door de noordpool, (2) langs de equator aan de westrand, (3) naar het zonsmidden, (4) langs de equator aan de oostrand, (5) naar het dichtsbijzijnde punt op de equator. Het vlak van de tekening rechts bevat de draaiingsas van de zon en de gezichtslijnen 1, 3 en 5. Links is de waargenomen “zonnenschijf” geschetst, in het midden perspectivisch. Coördinaten: de plaats van de zonspolen wordt vastgelegd met twee hoeken, de “heliografische breedte” B_0 van het schijfmiddelpunt die (net zoals de geografische breedte op aarde, zie rechter schets) vanaf de equator wordt gemeten, noordwaarts positief, en de positiehoek P_0 van de noordpool die zoals in de linker tekening geschetst wordt gemeten vanaf de richting noord aan onze eigen hemel (langs een grote cirkel naar de poolster) rondom de zonnenschijf in de zin noord-oost-zuid-west-noord. Er is ook nog een heliografische lengte L_0 maar die is in deze proef niet nodig (en ook niet zo makkelijk te definiëren aangezien de zon niet star roteert en geen Greenwich op haar oppervlak bezit).



Figuur 6: Schets van de spectrale registratie in deze proef. De twee zuurstoflijnen ontstaan in de atmosfeer van de aarde, zijn scherper dan de spectraallijnen in het zonnenspectrum, en vertonen verwaarloosbare Dopplerverschuivingen. De twee ijzerlijnen ontstaan in de zon, zijn breder, en zijn Dopplerverschoven door de zonsrotatie, het meest nabij de zonstrand en in tegengestelde zin voor de oost- en westrand. De geschetste Dopplerverschuiving is overdreven.

- Bereken het theoretisch scheidend vermogen van het rooster voor orde $m = 1$ uit formule (5) en de gegevens in Tabel 3 (bladzijde 15). Wat is $\Delta\lambda_0^R$ voor $\lambda = 6302 \text{ \AA}$?
- Schat de te verwachten lineaire spectrale dispersie voor $m = 1$ en $\lambda = 6302 \text{ \AA}$ onder de aanname van loodrechte inval met $\varphi = 0$ in formules (3)–(4). Reken $\Delta\lambda_0^R$ daarmee om naar μm in het spectrum.
- Ook de collimatorlens draagt onscherpte $\Delta\lambda_0^C$ bij aan de spectrale afbeelding. Ga met formule (2) na hoe groot deze bijdrage is in μm in het spectrum. Waarom is dit een ondergrens?
- De kwadratische som $[(\Delta\lambda_0^R)^2 + (\Delta\lambda_0^C)^2]^{1/2}$ is je resulterende schatting voor de best haalbare spectrale resolutie. Vergelijk dit met de grootte van de CCD pixels (pagina 16). Spectra moeten bemonsterd worden met twee pixels per spectraal resolutie-element. Commentaar?
- De feitelijke spectrale resolutie wordt mede bepaald door de breedte van de ingangsspleet, waarom? De afbeelding daarvan moet ook twee keer passen binnen een spectraal resolutie-element. Hoe breed mag de spleet maximaal zijn?
- Passen de vier spectraallijnen in Figuur 1 samen op de CCD chip?

2.5 Meetplan

Stel nu een meetplan op. Zoek voor je naar Zonneburg vertrekt ook de coördinaten B_0 en P_0 op voor de betreffende dag (Figuur 5 en Appendix B). Neem een geodriehoek en een zonnebril mee.

3 Waarnemen

3.1 De zon in beeld

- Vergelijk het schema in Figuur 2 met de telescoop en spectrograaf zelf.
- Bekijk het zonsbeeld op het spleetvlak (gebruik een zonnebril!). Zijn er zonnevlekken? Gebruik ze dan voor de scherpstelling, anders de zonsrand.
- Meet de beelddiameter.
- Draai het rooster tot het te meten spectrale bereik in de waarnemingsleuf valt. Gebruik een atlas of de aanwezige plots om te controleren of je de juiste lijnen te pakken hebt. Je kunt het spectrum eerst op het matglas bekijken door de spleet open te draaien, en dan door het oculair.

In deze proef gaat het om een gebiedje van enkele Ångstrom rond $\lambda = 6302 \text{ \AA}$, afgebeeld in Figuur 1 op bladzij 1. Het bevat twee FeI lijnen veroorzaakt door ijzeratomen in de atmosfeer van de zon en twee O₂ lijnen veroorzaakt door zuurstofmoleculen in de atmosfeer van de aarde. De laatste twee vertonen geen Dopplerverschuivingen (winden verwaarlozend) en verwaarloosbare zwaartekrachtsroodverschuiving, zodat ze goed tot golflengtereferentie dienen. De lijngolflengten staan in Tabel 2 op bladzij 15.

- Controleer het spectrograaf focus aan de scherpte van de zuurstoffijnen. Waarom zijn deze lijnen scherper dan de ijzerlijnen?
- Controleer in het spectrum of de spleet loodrecht op de dispersierichting staat.
- Schuif de CCD camera op de plaats van het oculair. Verschuif de hele plaathouder om de camera scherp te stellen. Maak proefopnamen. Controleer de oriëntatie van de CCD chip (lange zijde verticaal in 1e orde, horizontaal in 2e orde).
- De geometrie van de zonscoördinaten staat in Figuur 5. Ga na dat het vlak van tekening rechts correspondeert met de verticale lijn links, en dat de noordpool zich voor positieve B_0 op het zichtbare halfrond bevindt. Laat zien dat de geprojecteerde afstand 3–5 in het zonsbeeld links in Figuur 5 gelijk is aan $R_\odot \sin B_0$ met R_\odot de zonsstraal, en dat de geprojecteerde afstand van de noordrand tot de noordpool (gezichtslijn 1) gelijk is aan $R_\odot(1 - \cos B_0)$.
- Gebruik de beeldrotator (“Dove-prisma”) om de zonsequator over de spleet te laten vallen. Je hebt de positiehoek P_0 van de rotatieas van de zon voor deze dag nodig, uit een almanak of van het web. Figuur 5 toont dat de geprojecteerde equator niet recht is voor $B_0 \neq 0$; benader deze met de verbindingslijn tussen de beide randpunten. Je vindt de projectie van de richting oost-west aan de hemel op het spleetvlak door de eerste coelostaatspiegel te draaien of (beter nog, waarom?) stil te zetten; gebruik een zonnevlek of een zonsrand om deze richting met de spleet te laten samenvallen. Bepaal de oriëntatie van het zonsbeeld (oost, west, noord en zuid; gespiegeld of niet?) en corrigeer dan met de beeldrotator voor de hoek P_0 .

3.2 Spectra opnemen

- Noteer bij elke opname het opnametijdstip, de belichtingstijd, de spleetbreedte, de diameter van het zonsbeeld, de afstand spleet—camera, de focus-, hoogte-, collimator- en roosterinstelling, en alle andere bijzonderheden die je denkt naderhand nodig te hebben.
- Neem nu aan beide randen spectra op zoals geschetst in Figuur 6. Optimaliseer de belichtingstijd zodat het continuum maximaal belicht wordt maar nergens overbelicht.

3.3 IJkingsopnamen

Elke astronomische registratie met een CCD camera vereist ook opnamen van “dark fields” en “flat fields” om de individuele CCD pixels te ijken. De “darks” geven aan wat de “donkerstroom” is (een ouderwetse term, een CCD meet geen stroom maar lading): de meetwaarde per pixel bij deze belichtingstijd als er géén licht op de chip valt. Deze donkervelden moeten van de meetspectra worden afgetrokken. De “flats” zijn opnamen van een effen voorwerp dat een structuurloos beeld levert. Deling van de meetspectra daardoor corrigeert voor gevoeligheidsverschillen per pixel (“witbalans” in videojargon) en voor ongewenste verschillen in de pixelbelichting.

Het is vaak een hele kunst goede spectrografische vlakveldopnamen te krijgen. Voor hemelopnamen wordt doorgaans de binnenkant van de telescoopkoepel onscherp opgenomen als vlak veld, maar bij spectrografie werkt dat niet omdat de “troep” in het beeld vooral wordt veroorzaakt door onregelmatigheden in de spleetbreedte (strepen in de dispersierichting) en door stofjes op

het beschermingsglaasje net voor de chip van de CCD camera (onscherpe vlekjes). De laatste worden in de spectrograaf met nauwe monochromatische bundels aangestraald en werpen geringde schaduwen op de detector die er bij diffuse witte verlichting heel anders uit zien. De vlakveldopnamen moeten dus ook spectrografisch gemaakt worden — maar dan wel zonder spectraallijnen.

- Bedek de spectrograafspleet en neem een donkerveld op met dezelfde belichtingstijd als je meetspectra.
- Neem een vlakveldopname van het midden van de zon door tijdens de opname het rooster snel te verdraaien zodat de spectraallijnen worden uitgesmeerd. Om zonsbeeldstructuur te vermijden kun je eerst de telescoop defocuseren.
- Inspecteer je beelden op de meet-PC met het CCD-programma, of met IDL. In IDL kun je makkelijk beelden laden en bekijken, bijvoorbeeld met:

```

a=read_tiff('west03.tif')
b=read_tiff('east01.tif')
f=read_tiff('flat02.tif')
d=read_tiff('dark01.tif')
tvsc1,a          ; toon spectrogram a als beeld
profiles,a      ; meet met de muis in het beeld. Rechter knop = exit
acorr=float(a-d)/float(f-d) ; corrigeer spectrogram a voor dark en flat
tvsc1,acorr     ; toon gecorrigeerd spectrogram
flicker,bytsc1(a),bytsc1(b) ; blink a tegen b; Dopplerverschuiving?
ratio=float(a)/b ; deling van spectrogrammen a en b
tvsc1,alog10(ratio) ; toon met laag contrast

```

3.4 Extra waarnemingen

Enkele uitbreidingen voor het geval je nog tijd en interesse over hebt:

- Als er een zonnevlek is, neem dan ook 6302 Å spectra daarvan op. Uit de Zeemansplitsing van de twee ijzerlijnen kan hieruit de magnetische veldsterkte in de donkere kern (“umbra”) van de zonnevlek worden bepaald.
- Neem enkele 6302 Å spectra van het zonsmidden met 2.5 min tijdsverloop tussen opeenvolgende opnamen. Hiermee kun je de “vijf-minuten oscillatie” van het zonsoppervlak detecteren.

3.5 Afsluiting

- Ruim alles op en controleer dat alles uit staat.
- Noteer je Sonnenborghse verrichtingen in het logboek van de zonneopstelling.

3.6 Datatransport

De meetcomputer is voorzien van een ZIP drive voor je datatransport naar de Uithof.

- Copieer al je opnamen naar een ZIP diskette (“removable disk”).
- Copieer op de Uithof je files van de ZIP diskette naar je werkdirectory (met de Minnaert-PC voor deze proef, of de PC van Rudi Borkus (MG 116), of de media-PC van sterrenkunde (BBL 713)).

4 Reductie en analyse

Voor de gegevensverwerking is een IDL programma `ZNSP.PRO` voorhanden. De nieuwste versie staat op <http://www.astro.uu.nl/~rutten>.

De op de Minnaert-PC's aanwezige IDL Student Version staat geen arrays toe van voldoende grootte; je hebt de volledige IDL versie nodig. Die is voor deze proef geïnstalleerd op één Minnaert-PC waarop je derhalve voorrang hebt. De ZNSP-assistent zal je helpen IDL te starten.

Je hoeft voor deze proef geen IDL te leren. Studenten sterrenkunde krijgen een IDL cursus in het tweedejaarspracticum DPST en gebruiken IDL daarna in alle sterrenkundep practica. Een eenvoudig kookboek staat in <http://www.astro.uu.nl/~rutten/ssa/idl-briefmanual.txt>. De IDL Help (type ? op de command line in het IDL werkblad) verschaft complete on-line manuals.

Het programma `ZNSP.PRO` maakt ook de plots die je nodig hebt voor je verslag, als PostScript files. Je kunt ze bekijken en afdrukken met Ghostview. Ook worden de numerieke resultaten in ASCII naar een file ‘filenaam’-out.txt geschreven voor verwerking met andere programma's.

4.1 Beelden inlezen

- Pas programma `ZNSP.PRO` aan voor jouw directory en filenamen.
- Draai `znsp.pro` door `.run znsp` op de IDL command line te typen (de eerste keer twee maal om paden goed te zetten). Als je `.rnew znsp` typt herstart je met een schone lei; de lei schoonwissen kan ook met `retall`.
- Ga na wat er allemaal in `ZNSP.PRO` gebeurt. Je kunt door de `STOP` commando's te activeren (géén ; ervoor) onderweg stoppen en met command-line opdrachten tests uitvoeren. Door `.con` te typen wordt de executie dan weer vervolgd.
- Naderhand kun je de `GOTO,PLOTSKIP` regels activeren om inmiddels overbodig geworden plotuitvoer over te slaan. Ook kun je de resultaten van verschillende beelden met elkaar vergelijken, bijvoorbeeld de lijnverschuivingen in na elkaar genomen spectra van elkaar aftrekken met:

```
.run znsp          ; met spectfile='filea' in znsp.pro
shifta=shiftline
.run znsp          ; met spectfile='fileb' in znsp.pro
shiftb=shiftline
for iline=0,3 do plot,shifta(*,iline)-shiftb(*,iline)
```

4.2 Plaats van de zonsrand

- Selecteer meetspectra voor de oost- en westrand.
- Draai en/of spiegel je beelden tot hun oriëntatie overeenkomt met de visuele waarneming: golflengte naar rechts toenemend.
- Maak grafieken van het intensiteitsverloop per kolomrij voor enkele pixelkolommen in je meetspectra.
- Definieer de zonsrand als het buigpunt in de buitenwaartse intensiteitsafval. Bepaal in je meetspectra per pixelkolom de plaats van de rand $y_{R_{\odot}}$.
- Herschaal per pixelkolom de afstand van elke pixel tot het schijfcentrum in eenheden $r/R_{\odot} = \sin \vartheta$ (Figuur 7).

4.3 Golflengtebepaling

- Bepaal de x -waarde van de lijncentra per pixelrij in je meetspectra.
- Bepaal de golflengteschaal per pixelrij in je meetspectra uit de O_2 lijnen.
- Bepaal per pixelrij de golflengteverschuiving van de Fe I lijnen ten opzichte van hun laboratoriumgolflengte.

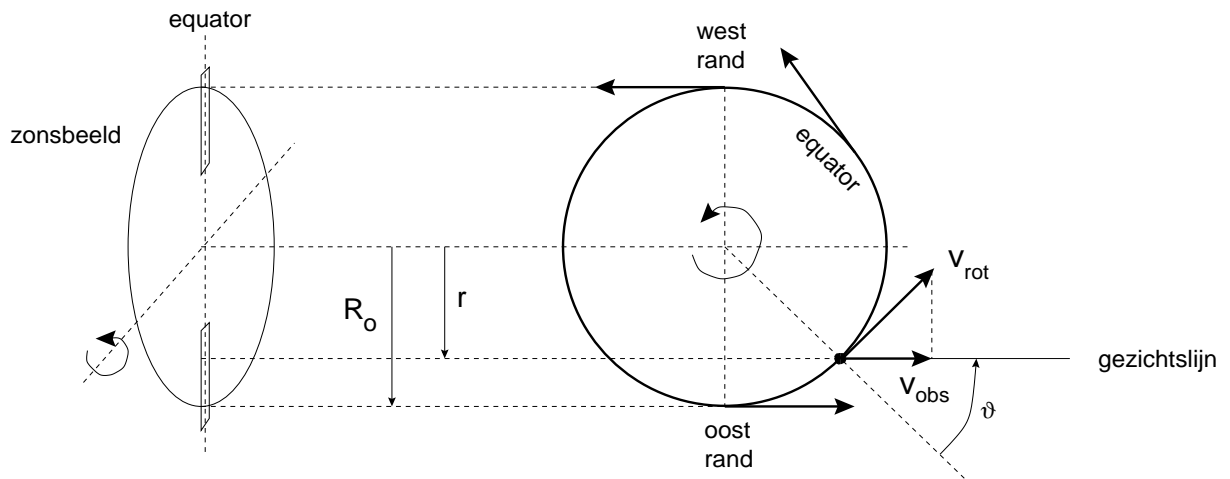
4.4 Zonsrotatie

- Corrigeer de Fe I golflengteverschuivingen voor zwaartekrachtsroodverschuiving.
- De resulterende Fe I verschuivingen zijn Dopplerverschuivingen ten gevolge van beweging in de gezichtsrichting. Converteer deze naar v_{Doppler} in km/s.
- Maak grafieken van v_{Doppler} tegen $\sin \vartheta$, bereken kleinste-kwadratenaanpassingen daaraan, en bepaal daaruit v_{Doppler} langs gezichtslijnen naar de oost- en westrand ($r = R_{\odot}$, $\sin \vartheta = 1$).
- Bepaal de rotatiesnelheid van de zon uit v_{Doppler} aan oost- en westrand.

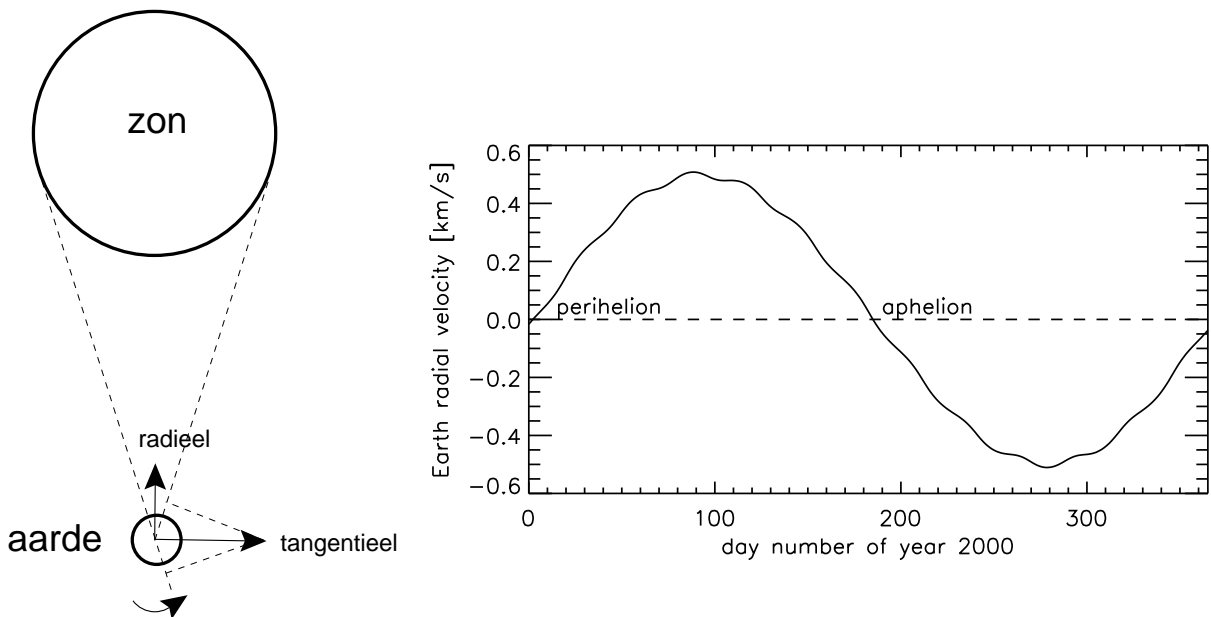
5 Verslag

5.1 Aandachtspunten

- Moet de hoek B_0 tussen zonsequatorvlak en ecliptica (Figuur 5) in rekening worden gebracht?
- Je hebt een rechte spleet gebruikt maar de projectie van van de zonsequator in het zonsbeeld is krom tenzij $B_0 = 0$ (Figuur 5). Bediscussieer deze fout.
- Bediscussieer de volgende mogelijke instellingsfouten:
 - spleet niet op de juiste positiehoek langs de zonsrand;



Figuur 7: Geometrie van de zonsrotatie. Links: zonsbeeld met spectrograafspleet. Rechts: doorsnede door het equatorvlak, met een gezichtslijn in het vlak van tekening onder de aanname $B_0 = 0$. Een gezichtslijn naar de zonsequator die een “gezichtshoek” ϑ maakt met de normaal op het zonsoppervlak heeft op de geprojecteerde zonneschijf $r = R_\odot \sin \vartheta$. De component van de rotatiesnelheid v_{rot} in de gezichtsrichting is daar $|v_{\text{obs}}| = v_{\text{rot}} \sin \vartheta$. Teken: kies de roodverschuiving $\Delta\lambda/\lambda = v_{\text{obs}}/c$ positief, dus $v_{\text{obs}} > 0$ voor beweging van ons af (westelijk halfmond). In de schets links is de spleet tussen beide randen verschoven maar in werkelijkheid wordt het zonsbeeld over de spleet geschoven.



Figuur 8: Aardse bijdragen tot de Dopplerverschuiving v_{Doppler} langs gezichtslijnen naar de oost- en westrand van de zon. De rotatie van de aarde draagt bij tenzij de betreffende rand tijdens de waarneming op de meridiaan staat (uurhoek 0). Deze bijdrage is voor beide zonsranden bij benadering even groot. De radiële component van de baanbeweging draagt ook bij omdat de aardbaan licht elliptisch is. De grafiek rechts toont de grootte van deze component voor het jaar 2000; de maan levert een kleine extra modulatie. De tangentiële component van de baanbeweging wisselt van teken tussen gezichtslijnen naar oost- en westrand en valt niet weg bij aftrekking van de Dopplersnelheden op beide randen.

- spleet niet loodrecht op de dispersierichting;
- pixelrijen niet evenwijdig aan de dispersierichting.
- Bediscussieer de aardse bijdrage tot de zwaartekrachtsverschuiving.
- Bediscussieer de aardse bewegingsbijdragen die links in Figuur 8 zijn geschetst:
 - de aardrotatie (op de evenaar 0.465 km/s);
 - de tangentiële component van de aardse baanbeweging (29.8 km/s);
 - de radiële component van de baanbeweging van de aarde, gegeven in Figuur 8.
- Bediscussieer het verschil tussen synodische en siderische rotatiesnelheid.
- Geef je eindwaarden voor de siderische equatoriale rotatiesnelheid en rotatieduur van de zon, met nauwkeurigheidsschatting. Vergelijk deze met de waarden in Allen (1976).
- Archiveer een selectie van je data files (donkerveld, vlakveld, beide randen, extra opnames) met jouw versie van `znsp.pro` en een `Readme` samenvatting in een subdir van `/f3-usr2/rutten/znsp`.
- Tactvolle hint: bedank de medewerkers van Sterrenwacht Sonnenborgh.

5.2 Uitbreidingen

Gasbewegingen in de zon. Naast haar draaiing draagt de zon ook andere bewegingen bij aan de gemeten Dopplerverschuivingen:

- de *granulatie*, een patroon van convectiecellen met groottes tussen 300 en 1000 km en levensduren tussen 5 en 10 min. De convectieve bewegingen hebben radiële snelheden tot enkele km/s; over tijd en richting gemiddeld leveren ze blauwverschuivingen van 0.0–0.6 km/s voor het midden van de schijf omdat het opwellende hete gas meer straling afgeeft. De preciese waarde varieert per spectraallijn afhankelijk van vormingshoogte en vormingswijze, en hangt er ook van af hoe de lijngolflengte gemeten wordt: alleen de lijnkern, of een groter/ander deel van het profiel. Naar de rand verdwijnt deze bijdrage. De granulatie werd in 1801 door Herschel ontdekt en is inmiddels goed begrepen dankzij gedetailleerde numerieke simulaties (zie Spruit et al. 1990, Rutten 1991). De granulatie is te kleinschalig om in Utrecht scherp in beeld te krijgen, maar de gemiddelde convectieve blauwverschuiving doet mee in de Dopplerverschuiving van zwakke spectraallijnen op de schijf (zie Figuur 2 van Allende Prieto en García López 1998b, beschikbaar in `/f3-usr2/rutten/linetables`). Zie je convectieve blauwverschuiving in je spectra van het zonsmidden?
- de *supergranulatie*, eveneens een patroon van convectiecellen maar met celdoorsnedes tussen 20 000 en 40 000 km. Per spectroheliograaf ontdekt door Leighton et al. (1962) als een patroon van horizontale uitstroming met 0.2–0.4 km/s uit het celcentrum naar de celrand, met in de celranden neerwaartse stromingen van 0.1 km/s of minder. Nog niet simuleerbaar en nog onbegrepen. Je kunt de supergranulaire uitstromingen proberen te herkennen in je randdata door de gemeten horizontale snelheden $v_{\text{Doppler}}/\sin\vartheta$ uit te zetten tegen ϑR_{\odot} (lengte langs zonsoppervlak).
- de *vijf-minuten oscillatie*, een golfpatroon van periodieke op- en neerbeweging van het zonsoppervlak met vijf minuten periode, verticale snelheidsamplitude 0.2 km/s, horizontale coherentielengte 5 000–15 000 km, coherentieduur van een golfrein 20–40 min. Eveneens

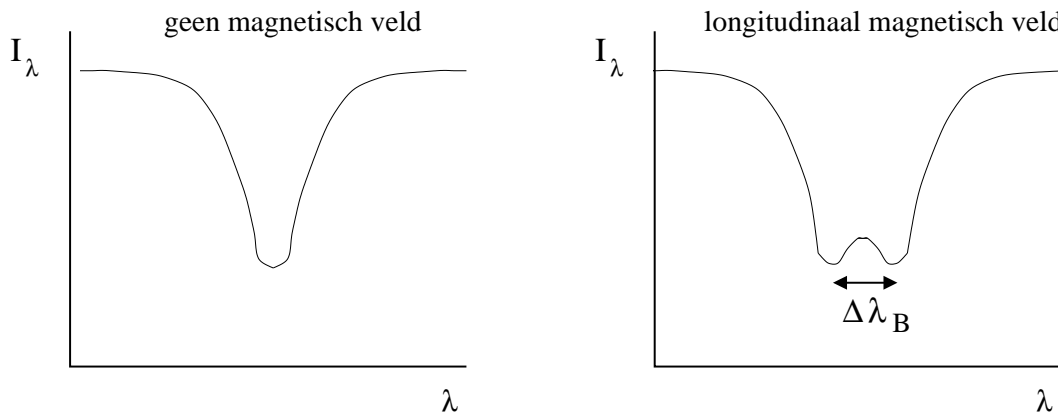
door Leighton et al. (1962) per spectroheliograaf ontdekt. De verklaring (voorgesteld door Ulrich 1970, bevestigd door Deubner 1975) is dat de zon permanent vibreert in zo'n 100 000 eigentrillingen waarvan de vijf-minuten oscillatie het interferentiepatroon aan het oppervlak is. Inmiddels is hieruit de *helioseismologie* ontstaan waarin de inwendige structuur van de zon in detail wordt afgeleid uit dit trillingspatroon (zie Rutten 1989, 1993). De vijf-minuten oscillatie is wellicht in je metingen te herkennen door lijnverschuivingen die met 2.5 min tijdsverschil voor het zonsmidden zijn bepaald van elkaar af te trekken. (Door ze op te tellen komt de convectieve blauwverschuiving wellicht beter naar voren.)

Magnetische velden in de zon. Naast Dopplerverschuiving kunnen spectraallijnen ook worden vervormd door magnetische velden langs de gezichtslijn. In de meest eenvoudige vorm levert een magnetisch veld met veldlijnen evenwijdig aan de gezichtsrichting “klassieke Zeemansplitsing” zoals getoond in Figuur 9 en gegeven door

$$\Delta\lambda_B = 4.67 \times 10^{-9} \lambda^2 g B \quad (10)$$

met $\Delta\lambda_B$ en λ in \AA , de veldsterkte B in Tesla en de Landé-factor g een dimensieloos getal dat per overgang verschilt, met $g = 1.67$ voor Fe I 6301.5 \AA en $g = 2.50$ voor Fe I 6302.5 \AA .

Magnetische velden komen in de zon in allerlei verschijningsvormen voor. Figuur 11 op bladzij 20 toont een klein magnetisch gebiedje dat deel uitmaakt van het “magnetische netwerk”. Het veld daarin is te zwak om zonder polarisatieoptiek te kunnen worden gemeten. In de umbrae van zonnevlekken is het veld echter zo sterk dat klassieke Zeemansplitsing direct waarneembaar wordt. Als je spectra hebt opgenomen van een zonnevlek kun je met formule (10) de veldsterkte daarin bepalen. Het veld in een umbra is verticaal, dus voor zonnevlekken nabij het zonsmidden kun je (10) direct gebruiken. Hale (1908) ontdekte op deze wijze dat zonnevlekken magnetisch zijn.



Figuur 9: Klassieke Zeemansplitsing bij een longitudinaal magnetisch veld, dat wil zeggen met veldlijnen evenwijdig aan de gezichtslijn door het medium. De spectraallijn splitst in twee componenten. Elke component bestaat uit circulair gepolariseerde straling, respectievelijk linksom en rechtsom georiënteerd.

A Parameterwaardes

Tabel 1: Enkele fundamentele grootheden.

golflengte	$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-8} \text{ cm}$
lichtsnelheid	$c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
constante van Planck	$h = 6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}$
gravitatieconstante	$G = 6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
massa zon	$M_{\odot} = 1.9891 \times 10^{30} \text{ kg}$
straal zon	$R_{\odot} = 6.9599 \times 10^8 \text{ m}$
astronomische eenheid (afstand zon—aarde)	$\text{AE} = 1.49598 \times 10^{11} \text{ m}$
excentriciteit aardbaan	$e = 0.01672$
massa aarde	$M_{\oplus} = 5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$
straal aarde	$R_{\oplus} = 6.3710 \times 10^6 \text{ m}$

Tabel 2: De in deze proef gebruikte spectraallijnen. Lijnsterkten (equivalente breedte) uit Moore et al. (1966), FeI laboratoriumgolflengten uit Nave et al. (1994), O₂ laboratoriumgolflengten uit Babcock en Herzberg (1948), solaire golflengten uit Allende Prieto en García López (1998a).

spectrum	lijnsterkte W_{λ}	λ centrum zonneschijf	λ schijfgemiddelde	λ laboratorium
FeI	127 mÅ	6301.5115 Å	6301.5108 Å	6301.5012 Å
O ₂	21 mÅ	—	—	6302.000 Å
FeI	83 mÅ	6302.5026 Å	6302.5012 Å	6302.4936 Å
O ₂	23 mÅ	—	—	6302.764 Å

Tabel 3: Gegevens van de zonneopstelling, ontleend aan Oranje (1982, 1985).

coelostaat	twee vlakke spiegels, diameter 30 cm
volgsysteem	synchroonmotoren, 4-sensor randvolger in hulpbeeld
objectief	doublet, diameter $d = 14.5 \text{ cm}$, brandpuntsafstand $f = 734 \text{ cm}$
zonsbeeld	diameter 69 mm
spectrograaf	horizontaal, Littrow autocollimatie, single-pass
spleet	verticaal, 20 mm lengte, breedte instelbaar
collimator	Steinheil doublet ^a , brandpuntsafstand $f = 1260 \text{ cm}$
rooster	Bausch & Lomb, vlak, $206 \times 154 \text{ mm}^2$, 1200 lijnen/mm
dispersie	0.295 \AA/mm in 2e orde bij $\lambda = 3950 \text{ \AA}$
scheidend vermogen	$\lambda/\Delta\lambda \approx 100\,000$

^aVolgens Oranje fabricaat Steinheil, maar dit is niet een van de twee 26 cm objectieven die door Steinheil voor de “grote kijker” op Zonneburg zijn geleverd (daar zit echter een doublet van Merz in waar de kijker nu naar heet). Deze Steinheil was oorspronkelijk het objectief van Julius’ zonneopstelling in het voormalige Fysisch Laboratorium aan de Bijlhouwerstraat.

Tabel 4: Specificaties van de CCD camera, van <http://www.starlight-xpress.co.uk/>

The MX916 is designed to offer an exceptionally high sensitivity across the entire visible spectrum and into the near UV. The latest in 'microlens' technology from Sony has almost eliminated the 'dead area' from this CCD and has increased the quantum efficiency to more than 60% over much of the visible spectrum. This compares very favourably with the low values (< 40%) offered by many commonly used full-frame CCDs in astronomical cameras. In addition, the exceptionally low dark signal of less than 0.1 electrons per pixel per second, gives a very flat background on even long exposure images.

CCD type: Sony ICX083AL SuperHAD CCD with ultra low dark current and vertical anti-blooming.

CCD pixel data: Pixel size: 23.2 x 22.4 μ m,

Image format: 376 x 290 pixels (unbinned).

CCD size: Imaging area: 8.7mm (horizontal) x 6.5mm (vertical).

Spectral response: Peak response at 520nm (Green), 50% at 400nm (Violet) and 670nm (Near infra-red).

Quantum efficiency: Approx. 65% peak at 520nm.

Readout noise: Less than 15 electrons RMS.

Full-well capacity: Greater than 300,000 e⁻.

Anti-blooming: Overload margin greater than 800x

Dark current: Dark frame saturation time greater than 100 hours.

Less than 0.1 electrons/ second at +10C ambient.

Data format: Full 16 bits.

Computer interface: 8 bit unidirectional parallel port with bi-directional status lines (Standard Centronics interface).

25 pin 'D' style plug for LPT1, 2 or 3, via a 5 metre x 6mm diameter cable.

Image download time: Typically 6 seconds with a 200MHz PC.

Cooling system: Regulated constant-current cooling supply built-in.

Single-stage thermoelectric cooler to give a CCD temperature of approximately -30C below ambient.

B Literatuur

Boeken. Goede studieboeken over de zon zijn die van Foukal (BBL bibliotheeknummer FYS+ST 4F00 S010) en Stix (4F00 S008). Het goed leesbare “*Discovering the secrets of the Sun*” van Kippenhahn (4F00 S012) vat ook de romantische geschiedenis van de zonnephysica samen. Het Utrechtse aandeel daarin wordt beschreven in “*Bolwerk van de Sterren*” (4A40 601) door De Jager *et al.* en maakt ook deel uit van Hearnshaw’s informatieve “*The analysis of starlight*” (4A20 606).

De standaardreferentie voor allerlei astrofysische en sterrenkundige getallen is het boek “*Astrophysical Quantities*” van C.W. Allen (4E00 B040) dat voorhanden is bij de zonneopstelling.

Artikel. Een aardig populair-wetenschappelijk artikel over het zonnenspectrum, met ondermeer deze proef met de Fe I 6302 Å lijnen, is geschreven door Janssen en Kneer (1999).

Zonscoördinaten. Je zult de hoekdiameter van de zon en de positiehoek P_0 van de draaiingsas van de zon voor je waarneemdatum moeten weten. Ze staan ondermeer in “*De Sterrenrijds*” en “*The Nautical Almanac*” (beide in de bibliotheek van Stichting de Koepel op Zonneburg voorhanden) en op diverse websites. Bijvoorbeeld leverde zoeken in november 1999 in

<http://www.google.com/>

naar “solar ephemeris” de volgende sites met dagelijkse zonsgegevens:

<http://www.lpl.arizona.edu/~rhill/alpo/solstuff/ephem99.html>,

<http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/TYPE/sun1.html#su1999>.

Zonsactiviteit. Daarnaast is het interessant te weten wat je aan zonsactiviteit mag verwachten. Een schets van actieve gebieden en hun codering staat dagelijks op

<http://sohodb.nascom.nasa.gov/synoptic/.targets/today.gif>,

en recente zonsbeelden van diverse snit vind je onder “Today’s Solar Weather” op

<http://solar-center.stanford.edu>

en ook op

<http://umbra.nascom.nasa.gov/images/latest.html>.

Spectraalatlassen. Je kunt het stuk zonnenspectrum dat je gaat meten (enkele Ångstrom rond $\lambda = 6302$ Å, figuur 10 op bladzij 19) bekijken in de Utrechtse Zonneatlas van Minnaert, Houtgast & Mulders (1940, 4F10 L004 (1a 4-1) EX). Het beroemde boekwerk is bij de zonneopstelling aanwezig.

Nauwkeuriger atlassen van het zonnenspectrum zijn sindsdien opgenomen met de Fourier Transform Spectrometer achter de McMath-Pierce Telescope op Kitt Peak. Neckel (1999) heeft deze verwerkt tot een gecombineerde flux- plus intensiteitsatlas in absolute eenheden, beschikbaar per anonymous ftp van:

<ftp://hs.uni-hamburg.de>, cd /pub/outgoing/FTS-Atlas

en op RUUNAT met IDL plotprogramma’s in directory

/f3-usr2/rutten/neckelatlas.

Bij de zonneopstelling ligt een daarmee gemaakte compacte atlas van het zichtbare deel van het zonnenspectrum.

Lijntabellen. Spectraallijnen in het zonnenspectrum identificeren kan met de eveneens beroemde lijntabel van Moore, Minnaert & Houtgast (1966, 4F10 T014), product van noeste arbeid van vele Utrechters. Ook deze tabel is bij de zonneopstelling aanwezig, daarnaast inmiddels aanklikbaar op

<ftp://ftp.noao.edu/fts/linelist/Moore>
en beschikbaar in RUUNAT directory
</f3-usr2/rutten/linetables>.

Dit Utrechtse handboek is inmiddels gedeeltematig opgevolgd door de nauwkeuriger maar aanzienlijk kleinere lijst van Allende Prieto en García López (1998a) in *Astron. Astrophys. Suppl.* Dit Europese tijdschrift is wegens bibliotheekbezuiniging niet meer in Utrecht aanwezig; ook de elektronische versie is daarom voor Utrechters ontoegankelijk. De lijst is echter aanklikbaar op

<http://hebe.as.utexas.edu/>
en beschikbaar in RUUNAT directory
</f3-usr2/rutten/linetables>.

Voor omvangrijke lijnidentificaties wordt een prima database service per email geboden door
<http://www.astro.uu.se/~vald/>.

Natuurconstanten. Nauwkeurige waarden van allerlei natuurkundige constanten vind je op
<http://physics.nist.gov/cuu/Constants>.

Wetenschappelijke literatuur. Zeer veel astrofysische artikelen zijn te achterhalen via de uitstekende literatuurservice op

http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html.

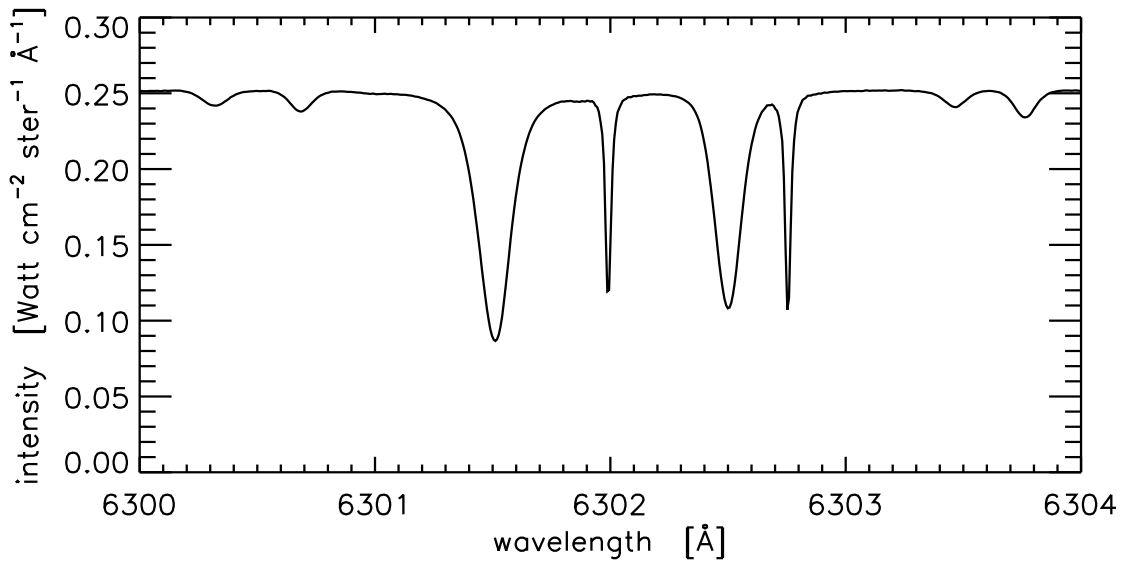
Voorbeeld: als je Hale, G. in de zoekbox typt krijg je de vrijwel complete bibliografie van de belangrijkste zonnefysicus een eeuw geleden. Daarin kun je dan doorklikken en Hale (1908) lezen of afdrukken.

C Achtergrond: de Fe I 6302 Å lijnen

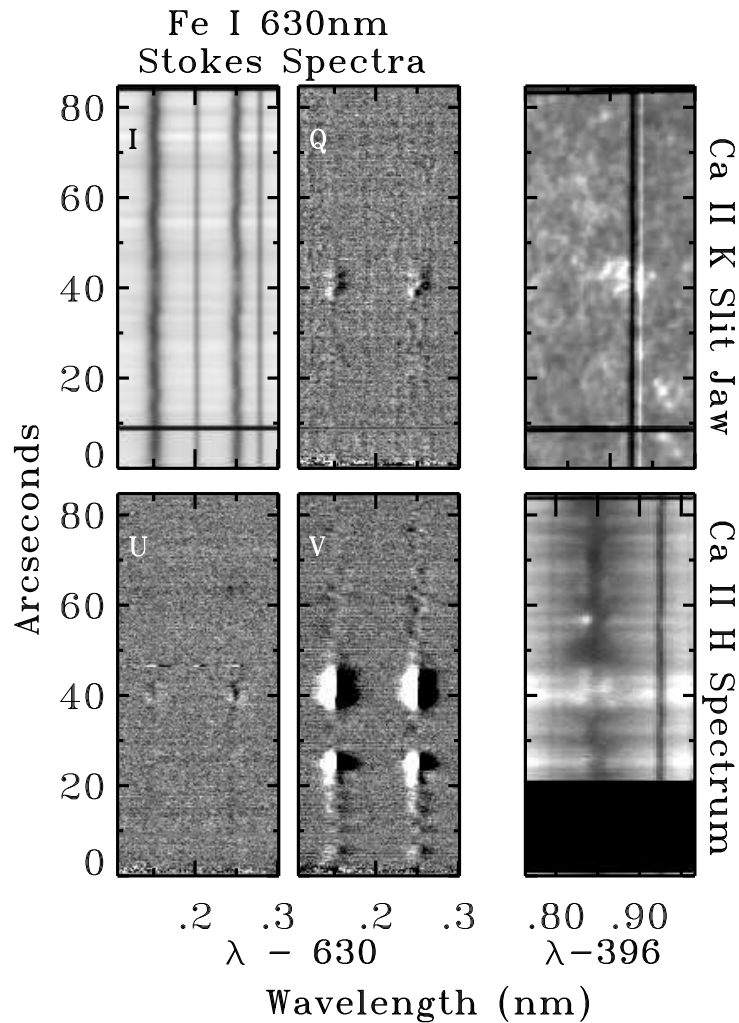
Het zichtbare deel van het zonnenspectrum bevat vele duizenden spectraallijnen, 24 000 in de lijnentabel van Moore, Minnaert & Houtgast (1966). Veel daarvan zijn afkomstig van Fe I, een bijzonder rijk atoomspectrum. Daarnaast is ijzer ook een goede leverancier van diagnostisch waardevolle spectraallijnen omdat de hyperfijnstructuur van ijzer (lijnsplitsing tengevolge van interactie tussen het magnetische moment van de atoomkern en het impulsmoment van de elektronen) verwaarloosbaar is, en de lijnsplitsing tengevolge van verschillende ijzerisotopen eveneens. IJzerlijnen zijn relatief “schoon”.

In deze proef worden de twee Fe I lijnen bij $\lambda = 6302 \text{ \AA}$ gebruikt omdat er twee aardse zuurstoflijnen naast zitten die dienen als golflengtereferentie. Dit koppel ijzerlijnen heeft echter nog een ander voordeel waarom het veel gebruikt wordt in de zonnefysica: enerzijds lijken de twee lijnen erg op elkaar in hun vorming (het zijn allebei lijnen van Fe I multiplet 816, met excitatie-energie van het ondernivo $\chi_{\text{exc}} = 3.64 \text{ eV}$) maar anderzijds verschillen ze in hun magnetische gevoeligheid. Daarmee zijn ze bijzonder geschikt voor nauwkeurige differentiële metingen van het magnetisch veld van de zon door middel van polarimetrie. Figuur 11 toont een voorbeeld.

De spectraallijnen in het visueel waarneembare deel van het zonnenspectrum zijn donker (“absorptielijnen”) omdat de temperatuur in de fotosfeer (de bolschil waar het licht ontsnapt) naar buiten afneemt. Op de golflengte van een spectraallijn ontsnapt het licht verder naar buiten omdat daarop het gas ondoorzichtiger is dan in het continuum aan weerszijden. De lagere temperatuur resulteert in lagere intensiteit volgens de Planckfunctie $B_{\lambda}(T)$. Deze lijnvorming wordt behandeld in het tweedejaarscollege AIST. Hogerop, waar de sterkste waarneembare lijnen worden gevormd (kampioen zijn Ca II K 3933.7 Å en Ca II H 3968.5 Å) is de lijnvorming ingewikkelder en toont de intensiteit niet alleen de temperatuur (derdejaarscollege ASSA).



Figuur 10: Het spectrum van het centrum van de zonnenschijf rond $\lambda = 6302 \text{ \AA}$. Opgenomen met de Fourier Transform Spectrometer van de Pierce-McMath zonnetelescoop op Kitt Peak (USA), met spectrale resolutie $\lambda/\Delta\lambda = 10^6$. Zulke scherpte is niet echt nodig voor de zonnelijnen, maar de aardse zuurstoflijnen worden er wel smaller van dan in de zonneopstelling ($\lambda/\Delta\lambda \approx 10^5$ bij optimale scherpstelling). Ze zijn minder diep omdat de telescoop én de zon in Arizona hoger staan dan hier. Ontleend aan Neckel (1999).



Figuur 11: Voorbeeld van Stokes polarimetrie met de FeI 6302 Å lijnen. De linker vier spectra tonen de vier Stokes componenten I , Q , U en V , met I de intensiteit, Q en U de lineaire polarisatie in twee richtingen, en V het verschil tussen de linksom en de rechtsom georiënteerde circulaire polarisatie. Het beeld rechtsboven is een opname van het (spiegelende) spleetvlak van de spectrograaf, gemaakt door een nauwbandig filter dat alleen licht in de kern van de sterke CaII K 3933.7 Å lijn doorlaat. In dit licht gezien kijk je in de chromosfeer van de zon, waarin magnetische gebieden helder afsteken. De donkere verticale streep is de spectrograafspleet. De witte streep ernaast is de plaats van de spectrograafspleet gezien in licht met $\lambda = 6302$ Å; ze vallen niet precies samen omdat de breking in de aardse dampkring met de golflengte varieert. De horizontale streep onderaan is de schaduw van een hoofdhaar die over de spleet was geplakt als positiemarkering. Het deel van de zon dat door de spleet wordt bemonsterd is relatief klein (de zon heeft een diameter van 1919"). In het midden doorsnijdt de spleet een plek "chromosferisch netwerk" met sterk magneetveld. Het beeld rechtsonder is een gelijktijdige spectraalopname van de kern van CaII H 3968.5 Å, het broertje van CaII K en even sterk. Rechts ervan zit de fotosferische FeI 3969.27 Å lijn. Het magnetische gebiedje levert een witte band in het CaII H specrum, een sterk en asymmetrisch signaal in Stokes V , en een klein asymmetrisch signaal in Stokes Q . Deze polarisatie toont dat het magnetisch veld voornamelijk langs de gezichtslijn ligt: de veldlijnen steken radieel de zon uit. In het CaII H 3968.5 Å spectrum zit ook een helder "puntje" net links van de donkere lijnkern bij $y = 57''$; dit is niet magnetisch maar markeert een supersone schokgolf. Deze opnamen zijn gemaakt met de Advanced Stokes Polarimeter aan de Dunn Solar Telescope van het US National Solar Observatory te Sacramento Peak (New Mexico), een telescoop van 76 cm doorsnee en 100 m lengte die lange tijd de scherpste zonnetelescoop ter wereld was — maar die eer komt nu toe aan de Zweedse zonnetelescoop en onze eigen Dutch Open Telescope op La Palma. Met de DOT is polarimetrie echter wegens geldgebrek vooralsnog niet mogelijk. Ontleend aan Lites et al. (1999).

D Achtergrond: de Utrechtse zonneopstelling

Museum Sterrenwacht Sonnenborgh. Op het bolwerk Zonneburg werd in 1855 door toedoen van C.H.D. Buys Ballot “Sterrenwacht Sonnenborgh” gevestigd. De universitaire astronomen verruilden het bolwerk in 1987 voor een minder sfeervolle étage van het Buys Ballotlaboratorium. Het beheer van de instrumenten werd overgenomen door amateursterrenkundigen van de Nederlandse Vereniging voor Weer- en Sterrekunde die zich hiertoe verenigden in de werkgroep Volkssterrenwacht Sonnenborgh. Inmiddels wordt Sterrenwacht Sonnenborgh gerestaureerd en getransformeerd tot museum.

Adres. Sterrenwacht Sonnenborgh, Zonneburg 2, 3512 NL Utrecht (het bolwerk aan het zuidoosteinde van de Nieuwe Gracht)

WWW: <http://www.astro.uu.nl/~sonborgh/>

Tel: 030-2311360 (maandag t/m vrijdag van 9.30 tot 16.00 uur)

Geschiedenis van de zonneopstelling. De zonneopstelling werd oorspronkelijk in 1919 gebouwd in het toenmalige Fysisch Laboratorium door de directeur ervan, W.H. Julius, die een “heliophysische” afdeling oprichtte en zich bezig hield met de verklaring van de randverzwakking van de zon (net als de donkere lijnen het gevolg van de naar buiten afnemende temperatuur) en de verklaring van de spectraallijnen (waarbij hij het volledig mis had, zoals uitvoerig beschreven door Hentschel 1991 maar dat boek is niet in Utrecht voorhanden). Julius’ zonneopstelling was de derde ter wereld, na die te Mount Wilson en Arcetri.

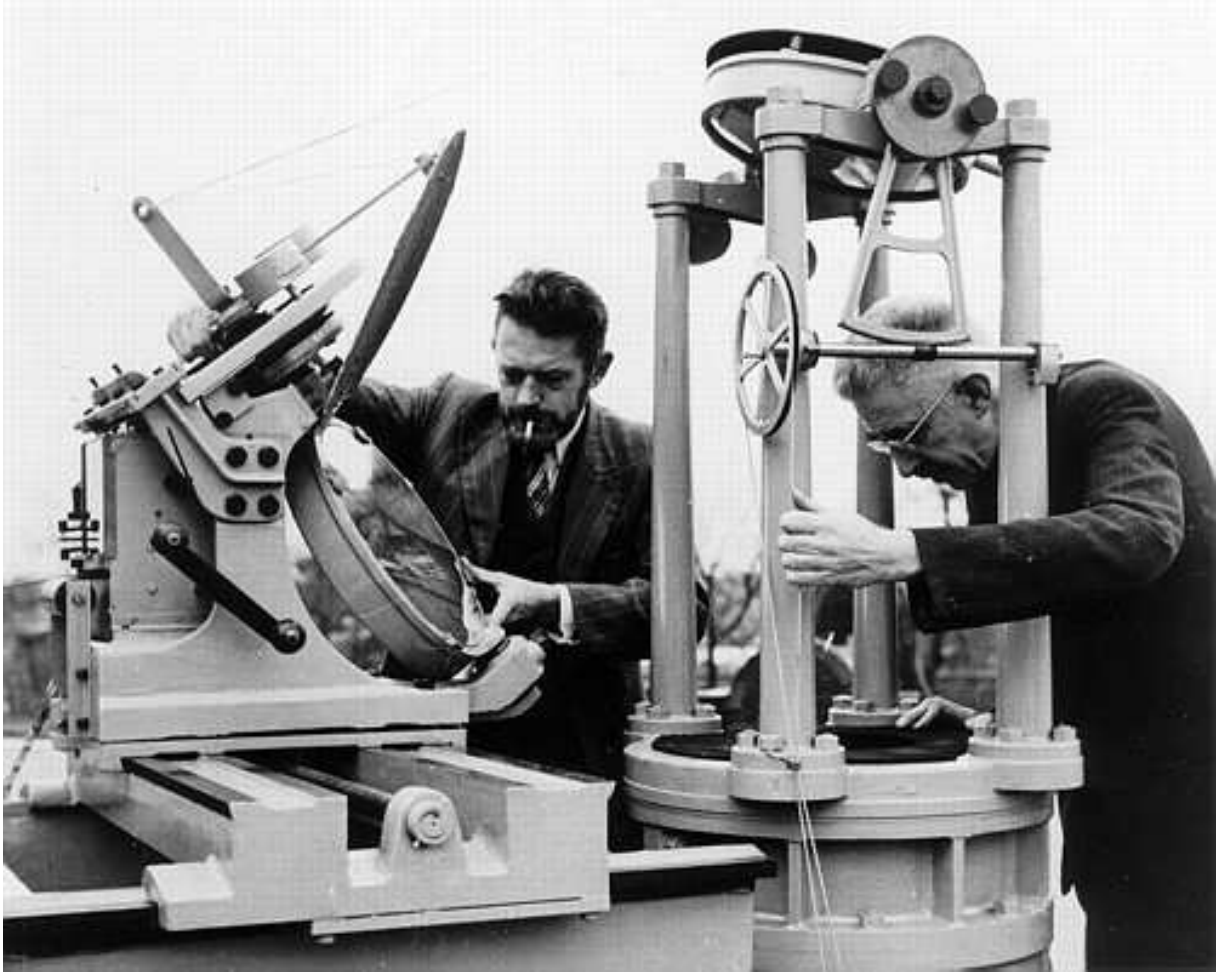
Minnaert was na zijn voorafgaande carrière als bioloog en natuurkundige onder Julius ook heliofysicus geworden, en nam de hele afdeling mee naar Zonneburg toen hij in 1937 directeur van de Sterrenwacht werd. Zo ook de zonneopstelling, die verkleind moest worden omdat het Fysisch Laboratorium aan de Bijlhouwerstraat drie verdiepingen had en Sterrenwacht Sonnenborgh maar twee. In 1940 kwam de zonneopstelling daar in gebruik, vooreerst zonder horizontale spectrograaf die in de vijftiger jaren werd toegevoegd.

In de jaren zestig werd de zonneopstelling onder leiding van C. de Jager uitgebreid gerenoveerd; daarna is er nog een fotoelectrische scanner bij gekomen en voegde B.J. Oranje de zonsintegrator toe. De plaatsing door het Julius Instituut van een CCD camera met computer voor deze proef is de eerste uitbreiding sindsdien.

Spectroheliograaf. De zonneopstelling bevatte oorspronkelijk alleen een verticale spectrograaf die ook als spectroheliograaf kon worden gebruikt. Dit was ook een roosterspectrograaf, in principe gelijksoortig aan de horizontale, maar kantelbaar gemonteerd om een draaipunt onder het rooster zodat de meekantelende ingangsspleet het zonsbeeld kon aftasten. Het spectrum werd dan bemonsterd door een eveneens meekantelende uitgangsspleet, die slechts één spectraallijn doorliet tot de fotografische plaat. De laatste bewoog niet mee met de kanteling, zodat daarop een opname van de zon spleet-voor-spleet werd opgebouwd, genomen in het licht van de geselecteerde spectraallijn.

De techniek was oorspronkelijk rond 1900 door G.E. Hale op Mount Wilson tot grote bloei gebracht. Later, in 1960, ontdekten R. Leighton en medewerkers daar met een verfijning ervan¹ de

¹Een interessante fotografische beeldverwerkingstechniek waarin periodieke variaties van de zonsintensiteit over



Figuur 12: J. Houtgast en M.G.J. Minnaert bij de coelostaat, 1952

solaire vijf-minutenoscillatie (waarvan de verklaring in 1974 inmiddels tot het bloeiende vakgebied helioseismologie heeft geleid) en de supergranulatie (die nog steeds niet begrepen is). Beide verschijnselen zul je in je metingen tegenkomen. De Zonneburgse spectroheliograaf is sinds ongeveer 1970 buiten gebruik.

Horizontale spectrograaf. In de vijftiger jaren van de afgelopen eeuw werd de zonneopstelling uitgebreid met de horizontale spectrograaf die je in deze proef gebruikt. Minnaert kreeg tijdens een bezoek aan de VS het rooster kadoo. Toen hij daarmee terug kwam bedacht Houtgast dat het oorspronkelijk telescoopobjectief uit de de zonneopstelling in het Fysisch Laboratorium nog voorhanden was. De brandpuntsafstand bleek net te passen in het zonnelaboratorium. Later werd een koker aangebracht om turbulentie in de lichtweg te vermijden.

Detectoren. De zonneopstelling was gebouwd voor fotografische platen; die hebben tot einde jaren zestig als detector stand gehouden. De plaathouder waarin nu de CCD camera is gemon-

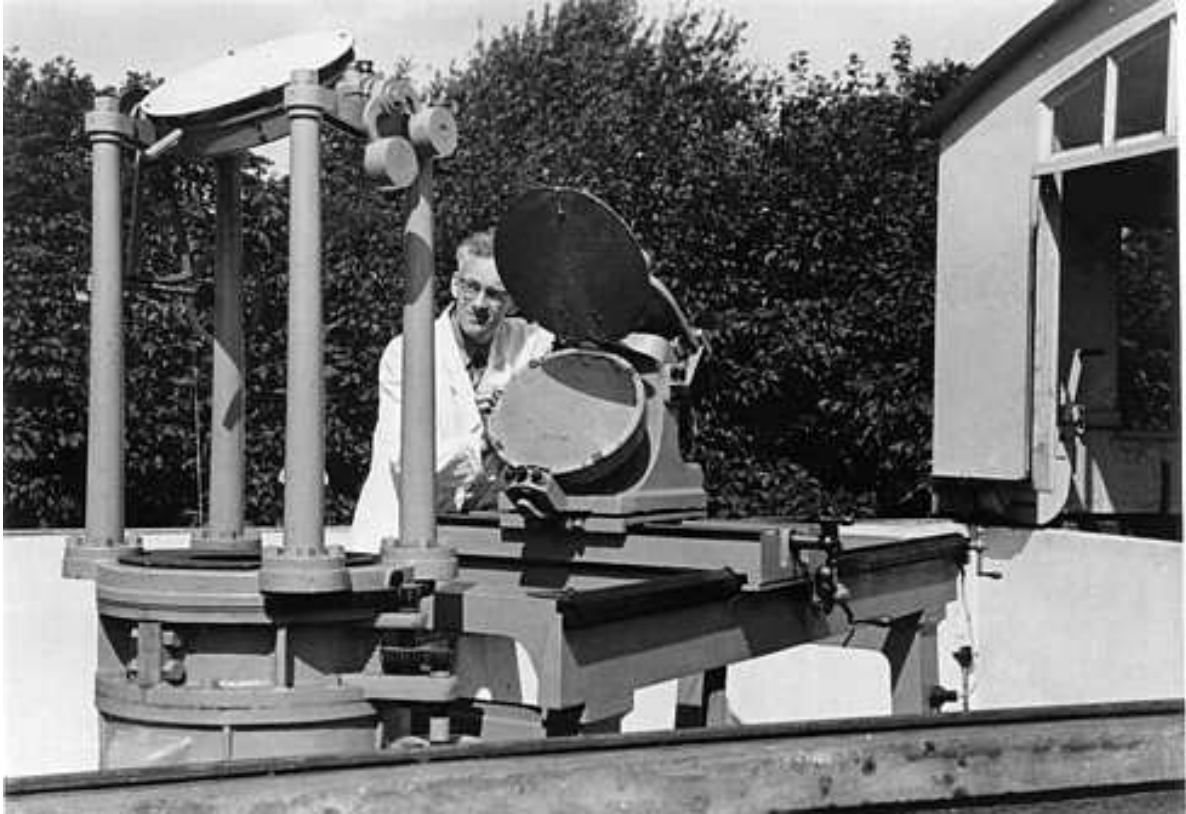
het hele zonsoppervlak werden gemeten door positieve en negatieve spectroheliogrammen middels contactbelichting "af te trekken". Uitvoerig beschreven in Rutten (1989), in te zien bij A-ESkwadraat.



Figuur 13: C. de Jager bij de spectroheliograaf, 1944. De heliograafbuis kantelde om een draaipunt beneden in de kelder, zodat de ingangsspleet het zonsbeeld aftast. De Jager, toen nog zwartharig en met andere studenten ondergedoken op Zonneburg, verdraait de tweede coelostaatspiegel in azimut. Het touw met katrol en zandzak diende voor de elevatie-instelling met een worm en wormwiel die, met Minnaertse handbediening, te zien zijn in Figuur 12.

teerd stamt uit die tijd. De platen (emulsie op glas) werden uitgemeten met microfotometers, apparaten die op het Fysisch Laboratorium door Moll waren ontwikkeld en door Houtgast uitgebreid met een ingenieuze analoge ijkingscorrectie (zie het schema in het voorwoord van de Zonneatlas van Minnaert, Houtgast & Mulders 1940). Zo'n microfotometer was tot rond 1980 druk in gebruik in het kamertje naast het zonnelaboratorium, vanaf 1971 met digitale uitvoer op ponsband.

Rond 1974 kwam er een (nog steeds aanwezige) fotoelectrische scanner, waarin één "photomul-

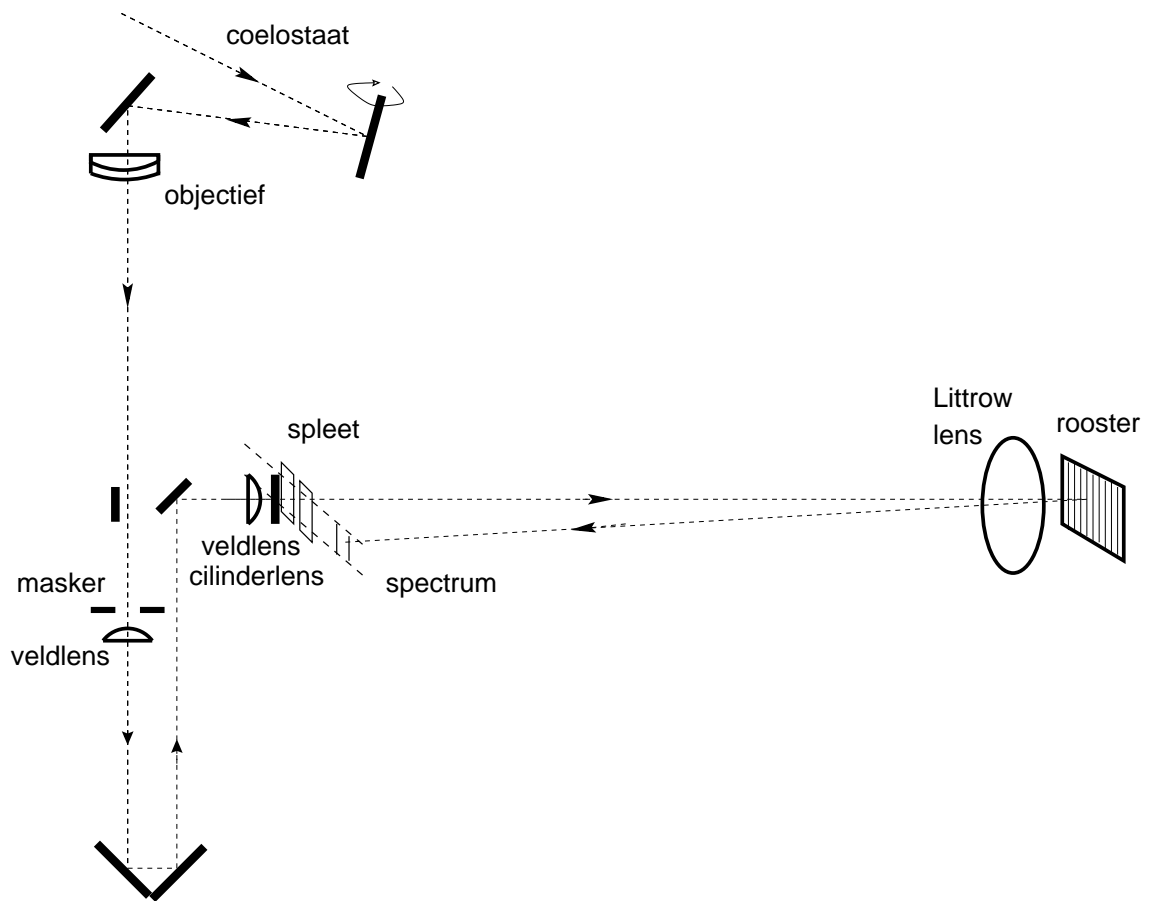


Figuur 14: C. de Jager bij de coelostaat in 1957.

tiplier” (kathodestraalbuis met inwendige versterking) werd heen en weer bewogen, achter een uittredespleet, om het spectrum af te tasten terwijl een tweede stilstaande fotomultiplier diende om gelijktijdige wisselingen in de hemeloorlating te meten. De beide signalen werden elektronisch op elkaar gedeeld, gedigitiseerd met een eigenbouw analoog-digitaal converter, en ook uitgevoerd op acht-gats ponsband, 1 byte per meting, 100 metingen per seconde. De ponsbanden gingen voor verwerking naar de universitaire computer op de Uithof; de voornaamste stap was het optellen van een groot aantal scans om de signaal/ruisverhouding te verbeteren. Later werd de ponsbanduitvoer vervangen door een Apple II computer waarin de scans ter plekke werden opgeteld.

De spectrograaf werd hierbij meestal in tweede orde gebruikt; zowel de fotografische korrelgrootte als de uitgangsspleet van de scanner eisten grootschalige afbeelding. De pixelgrootte van de CCD camera ($23 \mu\text{m}$) is kleiner en noopt tot gebruik van de eerste orde in deze proef. In feite zijn dat nog relatief grote pixels; modernere CCD chips hebben pixels van $7\text{-}12 \mu\text{m}$. Spectrografen worden daarom nu veel compacter gebouwd dan voorheen.

Zon-als-een-ster integrator. Rond 1980 kreeg de zonneopstelling nieuw wetenschappelijk leven ingeblazen door conversie tot “zon-als-een-ster” spectrograaf waarmee het stellare gebruik van de emissiekernen in de sterke Ca II K 3933.7 \AA lijn als magnetometer werd geijkt (proefschrift Oranje 1985).



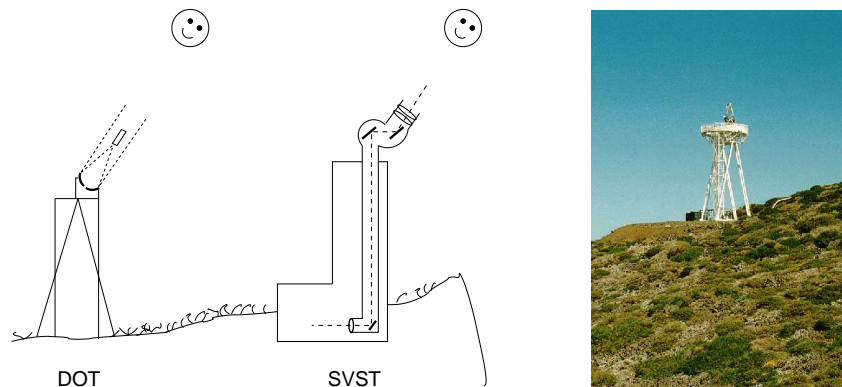
Figuur 15: Schema van de zonneopstelling met de beeldintegrator van B.J. Oranje. De buis van de spectroheliograaf werd gebruikt om een “optical delay line” (“lichttrombone”) te installeren tussen telescoop en spectrograaf, zodat deze effectief uit elkaar worden geschoven. De lengte ervan is instelbaar door de twee 45°-spiegels onderin op en neer te hijsen. Een veldlens in het primaire zonsbeeld en een cilinderlens plus veldlens bij de spleet persen het hele zonsbeeld of een deel ervan door de spectrograafspleet; de cilinderlens (as evenwijdig aan de spleet) dient om een deel van het licht dat anders naast het rooster zou vallen er naar terug te buigen. Met een masker in het primaire focus kan een deel van de zon, bijvoorbeeld een groot actief gebied, worden geselecteerd voor optische integratie. Zo wordt het licht van de zon gemiddeld over dat deel, of over de hele schijf net zoals dat bij de waarneming van een puntvormige ster gebeurt.

Het schema staat in Figuur 15. Het lijkt misschien gemakkelijk om de zon als een ster waar te nemen maar dat is het helemaal niet. Van de zon krijg je intensiteit, energie per eenheid van ruimtehoek (steradiaal), maar sterren worden niet opgelost in telescopen zodat je daarvan slechts de “irradiantie” of “flux” ontvangt, zonder meting per eenheid van ruimtehoek. Je kunt niet simpelweg een microscoopobjectief voor de spleet zetten om het zonsbeeld tot een puntje te reduceren dat als een ster geheel binnen de spleet valt (waarvan de breedte wordt gedicteerd door de gewenste spectrale resolutie) omdat de bundel dan na de spleet zo breed wordt dat er nauwelijks licht op het rooster terecht komt. Oranje’s integrator gebruikt een cilinderlens in plaats van een microscoopobjectief, en schuift de telescoop en spectrograaf uitéén om richtingsmiddeling te bereiken. Een voordeel van deze opstelling is dat er ook over willekeurige delen van de zonneschijf gemiddeld kan worden, bijvoorbeeld over een enkel groot actief gebied. Daarmee kon op de zon getoetst worden hoe spectra van sterren tot stand komen. In het werk van Oranje (en ook

van F. Middelkoop en R.G.M. Rutten) met de zonneopstelling werd dit onder leiding van C. Zwaan gedaan met de Ca II K 3933.7 Å lijn omdat dat de beste indicator is voor de magnetische activiteit van koele sterren (spectraaltipe F, G en K).

Moderne zonnetelescopen. De zonneopstelling is nu onderdeel van een museum maar blijft instructief; zoals in de inleiding gezegd veranderen optische principes niet. Voorbeeld: de zeer succesvolle Zweedse zonnetelescoop op het eiland La Palma is eveneens een door twee vlakke spiegels gevoede verticale refractor. Anders is daar dat het zonlicht eerst door de lens valt, dan pas op de vlakke spiegels (en die zijn daar alt-azimut gemonteerd in plaats van parallactisch). De lens dient daarbij tevens als vacuümvenster; de verdere telescoop is leeggezogen om interne turbulentie te vermijden. De spectrograaf erachter is precies zo'n Littrow als die op Sonnenborgh, maar kleiner in overeenstemming met de maat van moderne CCD detectoren. Deze telescoop wordt momenteel verdubbeld ("New Swedish Solar Telescope", apertuur van 48 cm naar 96 cm lensdiameter) maar het optische schema blijft in principe gelijk.

De "Dutch Open Telescope" die naast de Zweedse op La Palma staat is een Utrechts product van geheel andere snit: een spiegeltelescoop zonder gebouw er omheen. Hij wordt door de lokale passaatwind verschoond van interne turbulentie. Deze twee zonnetelescopen zijn de scherpste ter wereld. Voor beide telescopen worden technieken ontwikkeld om de resterende beeldverslechtering door de aardatmosfeer weg te werken, respectievelijk adaptieve optiek en spikkelinterferometrie. Daar is veel aan en mee te doen; je hulp is welkom!



Figuur 16: Schema en foto van de Utrechtse (DOT) en de Zweedse (SVST) zonnetelescopen op La Palma. De SVST lijkt op de Utrechtse zonneopstelling, de DOT niet. In de SVST komt de lens eerst en dient tegelijk als vacuümvenster. De Littrow-spectrograaf is hier op z'n kant geschetst; de spleet staat in werkelijkheid verticaal net als in de zonneopstelling. De DOT is een open spiegeltelescoop op open stelten, niet luchtledig maar door de (op La Palma meestal harde) passaatwind vrijgehouden van interne turbulentie. Het primaire zonsbeeld wordt bovendien door een watergekoeld spiegelkje grotendeels weggekaatst, zodat het gebundelde zonlicht de telescoop niet opwarmt. De DOT heeft geen spectrograaf maar wordt gebruikt voor afbeelding door smalbandige filters. De DOT wordt bediend vanuit het Zweedse gebouw, met beeldtransport per fiber. De struiken (Codeso, een alleen op La Palma voorkomende brem) dragen bij aan de goede waarnemingsomstandigheden door de grondverhitting door de zon te verminderen. Rechts de 2000m diepe Caldeira de Taburiente, waar alle andere caldeiras hun naam aan danken. Websites: <http://dot.astro.uu.nl> en <http://www.astro.su.se/groups/solar/solar.html>



Figuur 17: Drie Utrechtse zonnefysici. Foto's gemaakt in 1967 tijdens de Bilderberg Study Week en de Nederlandse Astronomenconferentie.

Marcel G.J. Minnaert (Brugge 1893 — Utrecht 1970) was een Vlaamse bioloog die na de Eerste Wereldoorlog in Utrecht natuurkundige werd en in 1937 directeur van de Utrechtse Sterrenwacht. Hij deed die uitgroeien tot een spectroscopisch-georiënteerd instituut van wereldfaam. Ook zijn drie boeken “De natuurkunde van het vrije veld” zijn wereldberoemd. Minnaert eiste bij zijn benoeming dat de “zonneopstelling” van het Fysisch Laboratorium aan de Bijlhouwerstraat met hem mee verhuisde naar Sterrenwacht Sonnenborgh.

Jacob (“Jaap”) Houtgast (Assen 1908 — Utrecht 1982) werkte bij Minnaert op het Fysisch Laboratorium en verhuisde mee naar de Sterrenwacht. Hij baseerde een beroemd proefschrift over de mate van herverdeling over frequentie binnen spectraallijnen van de zon op waarnemingen met de zonneopstelling, was co-auteur van de Utrechtse zonneatlas en de daaruit voortvloeiende lijnentabel, en concentreerde zich naderhand op de vorming van het chromosferische “flitspectrum” tijdens totale zonsverduisteringen, waarvan hij er tien meemaakte.

Cornelis (“Kees”) de Jager (Den Burg, Texel 1921) gebruikte de zonneopstelling voor zijn promotieonderzoek over de waterstoflijnen van de zon. Hij was in de zestiger jaren de motor achter de expansie van de Utrechtse Sterrenwacht en het nationale ruimteonderzoek (nu SRON), deed veel pioniersonderzoek aan de zon (van infrarood tot Röntgenstraling en van fotosfeer tot zonnewind), en legt zich sinds zijn pensionering vooral toe op superreuzen. Daarnaast heeft hij hoge functies in internationale organisaties bekleed, Stichting “De Koepel” opgericht, helpt hij Museum Sterrenwacht Sonnenborgh op poten zetten, en draagt hij in woord en geschrift actief bij aan de popularisatie van de sterrenkunde. Een uittreksel van zijn lange wetenschappelijke publicatielijst staat op <http://www.astro.uu.nl/~rutten/rrtex/bibfiles/ads/publists/>.

Referenties

- Allen, C. W.: 1976, *Astrophysical Quantities*, Athlone Press, Univ. London
- Allende Prieto, C. en García López, R. J.: 1998a, “A catalogue of accurate wavelengths in the optical spectrum of the Sun”, *Astron. Astrophys. Suppl.* **131**, 431–433
- Allende Prieto, C. en García López, R. J.: 1998b, “Fe I line shifts in the optical spectrum of the Sun”, *Astron. Astrophys. Suppl.* **129**, 41–44
- Babcock, H. D. en Herzberg, L.: 1948, “Fine Structure of the Red System of Atmospheric Oxygen Bands”, *Astrophys. J.* **108**, 167–192
- de Jager, C., van Bueren, H. G., en Kuperus, M.: 1993, *Bolwerk van de sterren*, Beking, Amersfoort
- Deubner, F.-L.: 1975, “Observations of Low Wavenumber Nonradial Eigenmodes of the Sun”, *Astron. Astrophys.* **44**, 371–375
- Foukal, P.: 1990, *Solar Astrophysics*, Wiley and Sons, New York
- Hale, G. E.: 1908, “On the Probable Existence of a Magnetic Field in Sun-Spots”, *Astrophys. J.* **28**, 315–339
- Hearnshaw, J. B.: 1986, *The analysis of starlight. One hundred and fifty years of astronomical spectroscopy*, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK
- Hentschel, K.: 1991, *Julius und die anomale Dispersion: Facetten der Geschichte eines gescheiterten Forschungsprogramms*, Studien aus dem Philosophischen Seminar 3, Heft 6, Universität Hamburg
- Janssen, K. en Kneer, F.: 1999, “Sonnenspektren für den Unterricht”, *Sterne und Weltraum* **38/5**, 454–458
- Kippenhahn, R.: 1994, *Discovering the secrets of the Sun*, Wiley & Sons, Chichester, UK
- Leighton, R. B., Simon, G. W., en Noyes, R. W.: 1962, “??”, *Astrophys. J.* **135**, 474
- Lites, B. W., Rutten, R. J., en Berger, T. E.: 1999, “Dynamics of the Solar Chromosphere. II. Ca II H₂v and K₂v Grains versus Internetwork Fields”, *Astrophys. J.* **517**, 1013–1033
- Minnaert, M. G. J., Mulders, G. F. W., en Houtgast, J.: 1940, *Photometric Atlas of the Solar Spectrum 3332 Å to 8771 Å*, Schnabel, Amsterdam
- Moore, C. E., Minnaert, M. G. J., en Houtgast, J.: 1966, *The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å. Second Revision of Rowland’s Preliminary Table of Solar Spectrum Wavelengths*, NBS Monograph 61, National Bureau of Standards, Washington
- Nave, G., Johansson, S., Learner, R. C. M., Thorne, A. P., en Brault, J. W.: 1994, “A new multiplet table for Fe I”, *Astrophys. J. Suppl.* **94**, 221–459
- Neckel, H.: 1999, “Announcement”, *Solar Phys.* **184**, 421–422
- Oranje, B. J.: 1982, “A Selective Solar Irradiance Spectrometer”, *Astron. Astrophys.* **109**, 32–36
- Oranje, B. J.: 1985, *Solar-type Stellar Chromospheres*, PhD thesis, Utrecht University
- Rutten, R. J.: 1989, “De zon zingt”, *Vakidoot* **88/89-3**, 17–25
- Rutten, R. J.: 1991, “Granulatie van zon en sterren”, *Zenit* **18**, 146–156
- Rutten, R. J.: 1993, “Zingen in de zon - Helioseismologie”, *Natuur & Techniek* **61**, 696–707
- Spruit, H. C., Nordlund, Å., en Title, A. M.: 1990, “Solar Convection”, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **28**, 263–301
- Stix, M.: 1989, *The Sun. An Introduction*, Springer, Berlin
- Ulrich, R. K.: 1970, “The five-minute oscillations on the solar surface”, *Astrophys. J.* **162**, 933–1002