

# SPECTRA VAN STERREN, PLANETEN EN DE ZON

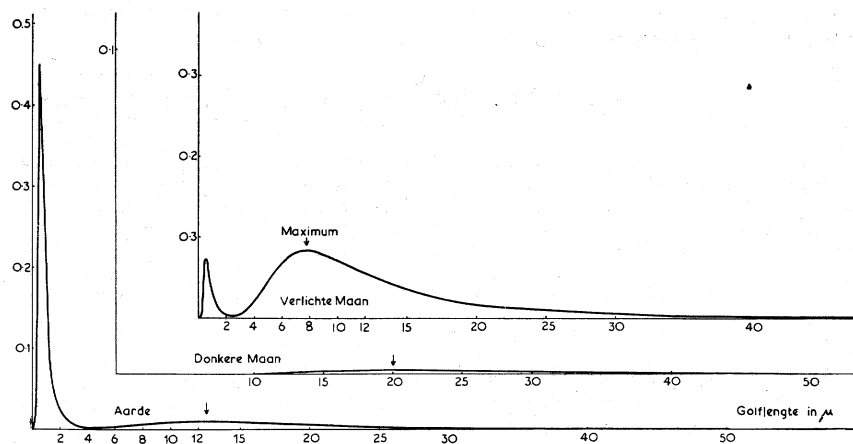
Robert J. Rutten

Sterrekundig Insituut Utrecht & Institute of Theoretical Astrophysis Oslo

## ANTWOORDEN

### 1. Sterspectra

- De bredere lijnen komen door snellere aswenteling: Dopplerverschuiving. Het licht van de kant van de ster die op je af komt wordt naar kortere golflengte verschoven, het meest bij de rand. Voor de kant die van je weg draait verschuift het licht naar langere golflengte. Opgeteld over de hele ster worden de absorptielijnen in het spectrum verbreed.
- Dit ordenen is precies wat Annie Cannon deed, al doende ook haar criteria aanscherpend. Uiteindelijk classificeerde ze zo ruim 200 000 sterspectra, maar zonder te weten wat haar "spectrale reeks" voor fysieke betekenis had.
- Annie Cannon's volgorde (van weinig naar meer lijnen) is: HD 46149, HD 39129, HD 36936, HD 36865,  $\gamma$  Uma, Coma T 183, Coma T 60, 78 Uma, 48 Boo,  $\beta$  Vir,  $\beta$  Com, 16 Cyg A, 61 Uma,  $\sigma$  Dra, HD 109011, 61 Cyg A, 61 Cyg B, HD 95735. Ze staan in volgorde op de laatste pagina. Zij dacht dat sterren meer lijnen krijgen als ze ouder worden, als rimpels. Pas veel later toonde Cecilia Payne aan dat al deze sterren ongeveer dezelfde samenstelling hebben (vooral waterstof) maar dat het voorkomen van de lijnen wordt bepaald door de oppervlaktetemperatuur van de ster. Annie Cannon's reeks bleek een rangschikking van heet naar koel te zijn.



Figuur 1: Spectra van aarde en maan (J.J. Boersma, *Hemel en Dampkring*, band 44, pagina 209, 1946). Horizontaal: golflengte in micrometer. Verticaal: stralingssterkte per golflengte uitgedrukt in de albedo (de oppervlakte van de linker piek gedeeld door de totale hoeveelheid opvallend zichtbaar zonlicht). De "donkere maan" betreft de nachtzijde.

### 2. Planetenspectra

- De linker piek is gereflecteerd licht van de zon. Het zonnenspectrum komt ruwweg overeen met een Planck-kromme voor 6000 K.
- De rechter piek is de thermische straling die de planeet zelf uitzendt: infrarode straling die overeenkomt met de temperatuur van het oppervlak of het wolkendek van de planeet.

- c) Venus heeft een dicht wolkendek dat veel licht reflecteert. De albedo is hoog, de eigen stralingstemperatuur relatief laag (van de koude wolkentop; het harde oppervlak eronder is veel heter). Mercurius heeft geen noemenswaardige dampkring en een heel donker oppervlak, net zols de maan.
- d) Zie figuur 1. Voor de aarde ligt de rechter piek op ongeveer dezelfde golflengte als voor Venus en Mars. De reflectie van de aarde is veel groter dan voor de maan: de aarde lijkt meer op Venus, de maan op Mercurius. De donkere kant van de maan is veel kouder dan de zonverlichte kant.

### 3. Lijnen in het zonnenspectrum

- a) De zonnelijnen zijn breder door het Dopplereffect. Omdat de zon heter is hebben de deeltjes in het zonnegas grotere warmtebeweging dan in de dampkring van de aarde.
- b)  $R_{\text{zon}} = 6,96 \times 10^8$  m, dus  $v_{\text{rot}} = 2\pi R_{\text{zon}}/P_{\text{rot}} = 2$  km s<sup>-1</sup>. De éne rand van de zon beweegt met deze snelheid op ons af, de andere van ons weg. Hun straling verschilt in golflengte:  $\Delta\lambda/\lambda = \Delta v/c = 4/(3 \times 10^5) = 1,3 \times 10^{-5}$ . Voor  $\lambda = 630$  nm is de verschuiving  $\Delta\lambda = 8,4 \times 10^{-3}$  nm.
- c) Meet de golflengte van de smalle lijnen voor de op ons af en van ons weg draaiende zonsranden. Vergelijk zonnenspectra opgenomen met de zon hoog aan de hemel en nabij de horizon. Vergelijk zonnenspectra opgenomen op zeeniveau en op een hoge bergtop. Lanceer een raket of satelliet met een zonnenspectrograaf. Vergelijk het zonnenspectrum met spectra van hetere of koudere sterren. Meet de golflengten in het spectrum van een komeet die snel op ons afkomt. Vraag een collega op Mars of in de *Enterprise* of die ze ziet.

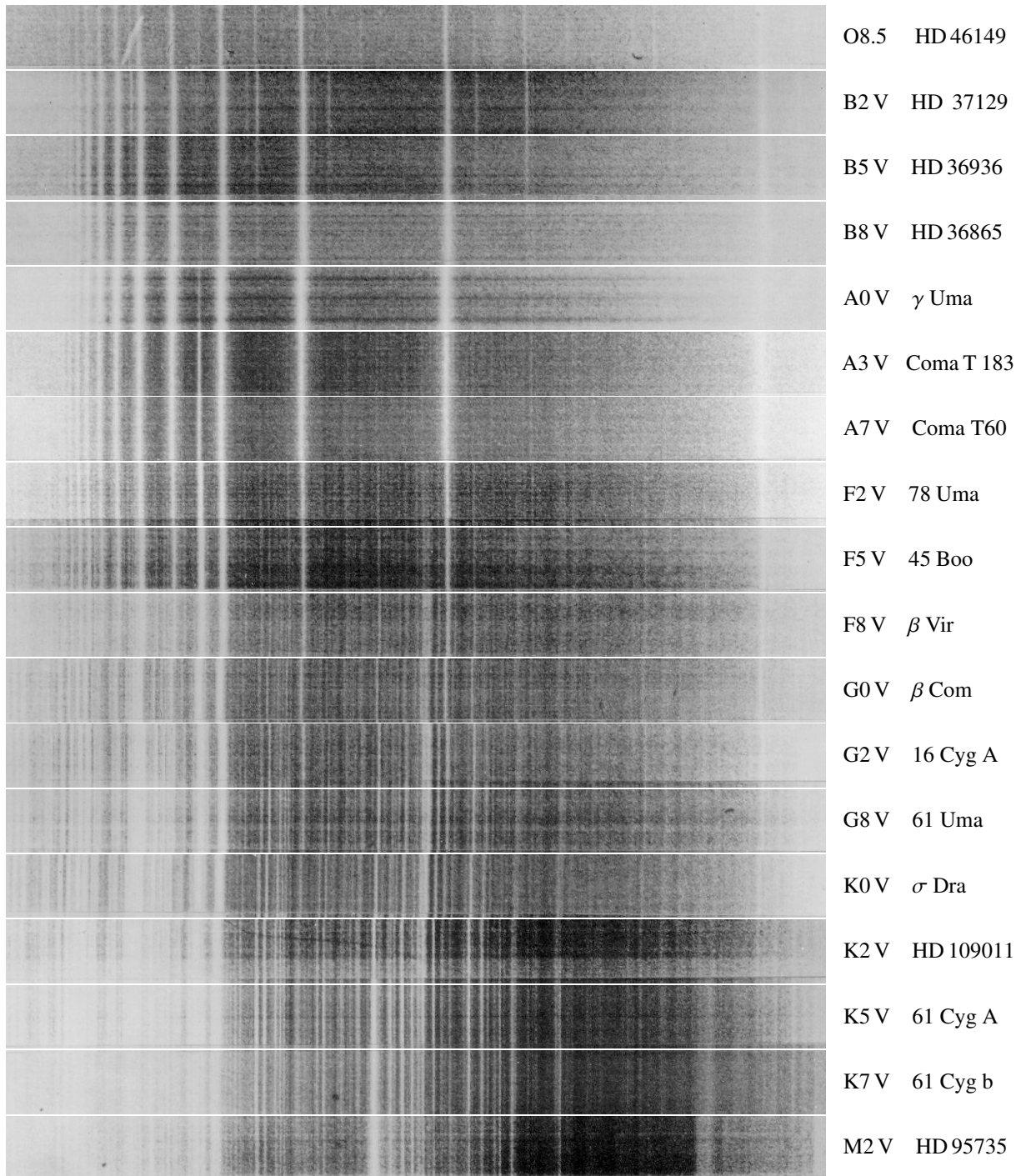
### 4. Sterkteverhouding Ca<sup>+</sup> K en H $\alpha$

- a) De relatieve sterkte wordt bepaald door de verhouding van het aantal calciumionen in de grondtoestand van Ca<sup>+</sup> en het aantal neutrale waterstofatomen in de  $n = 2$  aangeslagen toestand van H. Het feit dat alle H-atomen neutraal zijn betekent dat er te weinig energie is om ze te ioniseren (13,6 eV). Het verschil met de excitatie-energie die nodig is voor  $n = 2$  is klein (10,2/13,6 = 0,75). Er zullen dus maar heel weinig waterstofatomen in  $n = 2$  zitten. Daarentegen zitten de meeste calciumdeeltjes in het grondniveau van Ca<sup>+</sup>.
- b) Schatting sterkteverhouding Ca<sup>+</sup> K en H $\alpha$ : voor de bezettingsverhouding  $(n_2/n_1)_H$  van waterstof geldt:

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)_H \approx e^{-10,2 \times 1,602 \cdot 10^{-19} / (1,381 \cdot 10^{-23} T)} = 2,73 \cdot 10^{-9}.$$

Voor de Ca<sup>+</sup>-lijn geldt dat het betreffende onderniveau het grondniveau van Ca<sup>+</sup> is. De Boltzmann-verdeling laat zien dat alle hogere niveau's samen een veel kleinere bezetting hebben; zeg ruwweg dat alle calciumdeeltjes in het betreffende onderniveau zitten. De verhouding calcium/waterstof in de zon is  $1/(5 \cdot 10^5)$ , dus wordt de sterkteverhouding Ca<sup>+</sup> K/H $\alpha$  ongeveer:  $(1/(5 \cdot 10^5)) / 2,73 \cdot 10^{-9} \approx 700$ .

Het ligt voor de hand het onderniveau te nemen omdat de lijnen in het zonnenspectrum absorptielijnen zijn; fotonabsorptie gebeurt door aanslag vanuit het onderniveau. Voor een doorzichtig gas (zoals een vlam met natrium er in) is dat inderdaad juist. Echter, voor ondoorzichtige gasvormige voorwerpen zoals sterren ligt het ingewikkelder. Daarin regelt absorptie niet of een lijn donker of helder is maar waar het licht ontsnapt, namelijk verder naar buiten als het gas ondoorzichtiger is. Op de golflengte van een spectraallijn treedt extra absorptie op, vergeleken met de golflengten er vlak naast in het spectrum, als atomen/ionen door opname van straling worden aangeslagen naar een hoger energieniveau. De mate waarin dat gebeurt is evenredig met de hoeveelheid atomen/ionen in het onderniveau. Die bepalen zo mede de ondoorzichtigheid van het gas. Hoe ondoorzichtiger het gas, hoe minder diep je de ster in kijkt. In een spectraallijn kijk je dus altijd minder diep de ster in dan op de golflengtes er vlak naast. Absorptielijnen in een sterspectrum ontstaan als de temperatuur naar buiten afneemt, zodat je in een spectraallijn koeler gas waarneemt. De donkerte van de spectraallijn is dus niet een direct gevolg van fotonabsorptie maar van minder uitstraling door de lagere temperatuur op de kleinere kijkdiepte die hoort bij grotere absorptie. Zie ook <http://www.staff.science.uu.nl/~rutte101/web/rjr-edu/onderwijs/voordrachten/zonnenspectrum.pdf>.



*Stellar spectrograms covering the Harvard sequence. The wavelength increases to the right. From H. A. Abt, A. B. Meinel, W. W. Morgan and J. W. Tapscott, "An Atlas of Low-Dispersion Grating Stellar Spectra", Kitt Peak National Observatory, 1968.*