

# Werkplan voor het experiment zonnefysica

## Het bepalen van de oppervlaktetemperatuur van de zon

Arnau Helsloot & Kaydo Alders

17 december 2021

## 1 Introductie

De zon is een ster die voornamelijk bestaat uit waterstof en helium. In de kern van de zon is de dichtheid hoog genoeg om kernfusiereacties te veroorzaken, waarin waterstof wordt omgezet in helium. Kernfusie is de voornaamste bron van energie voor de zon. Deze energie wordt uitgestraald in de vorm van straling die onder andere de aarde bereikt. De fotosfeer van de zon zit op de buitenste laag van de bol en zorgt ervoor dat de zon voornamelijk zichtbaar licht uitstraalt. Met het stralingsspectrum van de ingevallen straling op aarde, kan de temperatuur in de fotosfeer van de zon herleid worden. Het herleiden van de temperatuur op de oppervlakte van de zon kan worden gedaan met behulp van de wet van Planck. Hiervoor wordt aangenomen dat de zon een zwarte straler is en deze een perfect ronde bol is met een bekende straal.

## 2 Theoretische achtergrond

In deze paragraaf worden gehanteerde definities en relevante theoretische achtergrond geïntroduceerd.

### 2.1 Zwarte stralers

Een zwarte straler is een lichaam dat al het licht vallend op het lichaam absorbeert [1, p.10]. Dit houdt in dat het niet uit maakt onder welke hoek het licht op het lichaam valt of wat de golflengte van het incidentele licht

is; een zwarte straler zal al het licht absorberen. Een ideale zwarte straler die zich in thermisch equilibrium bevindt, is een ideale wijdlopige straler; dit houdt in dat op elke golflengte het lichaam net zo veel thermische stralingsenergie uitzendt als elk ander lichaam met dezelfde temperatuur, en dat deze uitgezonden straling isotropisch is [2, p.568].

In de fotosfeer van een ster wordt licht gegenereerd dat zich bij benadering in thermisch equilibrium bevindt en het licht dat wordt uitgezonden is bij benadering de energie van een zwarte straler.

## 2.2 De wet van Planck

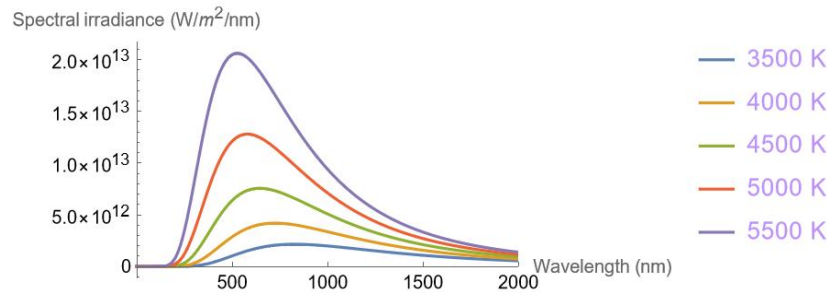
De wet van Planck beschrijft de straling van een zwarte straler. Het geeft de spectrale irradiatie als een verdeling over een spectrum van golflengtes. De spectrale stralingsverdeling  $S$  van een zwart lichaam wordt beschreven door de vergelijking

$$S(\lambda, T_{\text{eff}}) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\{\lambda kT_{\text{eff}}\}) - 1]}, \quad (1)$$

waarbij  $\lambda$  de golflengte in meters en  $T_{\text{eff}}$  de effectieve temperatuur van het lichaam in kelvin. Verder zijn de constanten  $h$  de constante van Planck,  $c$  de snelheid van het licht in vacuüm en  $k$  de constante van Boltzmann.  $S$  wordt ook wel de spectrale irradiatie genoemd, dat is het vermogen uitgezonden door de fotosfeer van de zon, per eenheid geprojecteerde oppervlakte van de fotosfeer per vaste hoek per nanometer (met golflengte in nanometer). Wanneer de spectrale irradiatie wordt uitgezet tegen de golflengte, is er een distributie van de straling te zien per golflengte. De distributie wordt de Planck curve genoemd. In Figuur 1 is een illustratie te zien van de planck curve op verschillende temperaturen. Opmerkelijk is dat deze rond het zichtbare licht (ongeveer van 400 tot 700 nm) een top toont. Een zwart lichaam straalt immers voornamelijk zichtbaar licht uit. Van de curve is een lagere top te zien naarmate de temperatuur daalt.

## 2.3 Effectieve temperatuur

De effectieve temperatuur is de temperatuur van een lichaam als dit lichaam gezien wordt als een zwarte straler met dezelfde uitstoot van stralingsenergie als het lichaam [3].



Figuur 1: Illustratie van de Planck curve op verschillende temperaturen.

De effectieve temperatuur kan gebruikt worden om een benadering te geven van de temperatuur van de fotosfeer van een ster en dus ook van de fotosfeer van de zon. Deze fotosferische temperatuur is wat in het experiment bedoeld wordt met de oppervlaktetemperatuur van de zon. Omdat in het experiment de zon gemodelleerd wordt als een zwarte straler zal echter in grotere maten de term effectieve temperatuur gebruikt worden dan oppervlaktetemperatuur.

## 2.4 Spectroscopie

In het onderzoek wordt verwezen naar een daglichtspectrum. Met een daglichtspectrum wordt een spectrum bedoeld dat verkregen is op een klaarlichte heldere wintermiddag zonder bewolking. De specificatie van een wintermiddag heeft als reden dat het experiment in de winter wordt uitgevoerd en er zich in de middag minder atmosferische effecten voordoen die het spectrum van de zon doen veranderen vergeleken met een spectrum zonder deze atmosferische effecten. Om de atmosferische effecten verder te verminderen is het daarom een vereiste dat het spectrum wordt verkregen op een dag zonder bewolking.

## 3 Onderzoeksvraag

De verkregen meting is een daglichtspectrum. Aan de hand van de wet van Planck kan er achterhaald worden wat de effectieve temperatuur is aangenomen dat de zon een zwarte straler is. Het doel van dit onderzoek is het bepalen van de oppervlaktetemperatuur met een gemeten daglichtspectrum,

oftewel de centrale vraag van dit onderzoek: Wat is de oppervlaktetemperatuur van de zon?

## 4 Verwachting

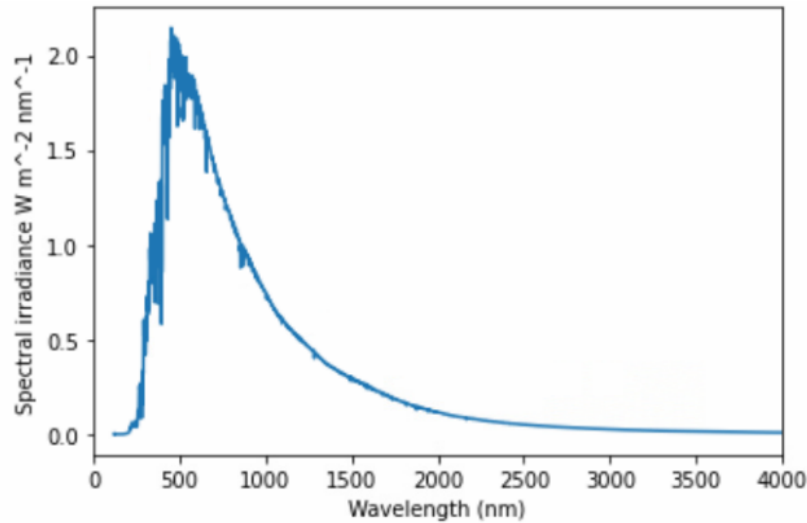
De American Society for Testing and Materials (ASTM) heeft een spectrum van de zon verkregen onder een luchtmassa van nul. Voor onze doeleinden houdt een luchtmassa van nul in dat de effecten van de atmosfeer van de aarde verwaarloosbaar zijn. Een gedetailleerde specificatie van de betekenis van een luchtmassa van nul en het referentie spectrum is te vinden op de website van het National Renewable Energy Laboratory (NREL) [4]. Het referentie spectrum is geplot in Figuur 2. Met een simpel python script is de piekgolflengte van het spectrum te bepalen. Dit komt uit op  $\lambda_{\text{peak}} = 451 \text{ nm}$ . Als dan met de Wet van Wiende bijbehorende effectieve temperatuur wordt bepaald, dan wordt de volgende waarde verkregen:  $T_{\text{eff}} = 6425 \text{ K}$ . Dit ligt ongeveer 11% boven de geaccepteerde waarde van [5]

$$T_{\text{accepted}} = 5772 \text{ K} \quad (2)$$

De reden voor de afwijking van 11% boven de geaccepteerde waarde heeft te maken met het feit dat het referentiespectrum niet beïnvloed is door de atmosfeer van de aarde. Er wordt dus verwacht dat de atmosfeer van de aarde ervoor zorgt dat de piek in Figuur 2 naar een hogere golflengte zal schuiven, en dus wordt verwacht dat de het spectrum dat zal worden gemeten in het experiment naar rechts verschoven zal zijn ten opzichte van het spectrum van Figuur 2. Deze verschuiving zorgt ervoor dat de effectieve temperatuur lager zal liggen dan de hiervoor berekende 6425 K. Er wordt verwacht dat de effectieve temperatuur die gemeten zal worden in het experiment een kleinere afwijking zal hebben dan die hiervoor benoemd.

Figuur 2 toont een benadering van een Planck curve. Zwarte stralers volgen de wet van Planck, waarvan de vergelijking is gegeven in Paragraaf 2. De meetdata zal niet perfect overeenkomen met een Planck curve. Gebaseerd op voorgaande experimentengroepen is vernomen dat veel werk verricht dient te worden in het kiezen van goede fitparameters, omdat in de eerder experimentengroepen de meetdata significant verschilde van de curve van de wet.

De absorptielijnen, zichtbaar als dallen in de grafiek van Figuur 2, komen overeen met de Fraunhofer lines. Er wordt verwacht dat in het spectrum dat



Figuur 2: ASTM referentiespectrum van de zon onder invloed van atmosferische effecten. Beschikbaar op: [4]

zal worden gemeten in dit experiment de Fraunhofer lines ook zichtbaar zullen zijn. De Fraunhofer lines zijn nuttig omdat deze gebruikt kunnen worden in de kalibratie van het gemeten spectrum; het is namelijk zo dat het gemeten spectrum een grafiek zal opleveren van intensiteit tegen pixelwaarde. Het proces van kalibratie zorgt ervoor dat de pixelwaardes geconverteerd wordt naar golflengtewaardes. Deze conversie is van belang omdat de golflengtewaardes als data dienen om met behulp van de wet van Planck de effectieve temperatuur te bepalen. Het gebruik van de wet van Planck in dit proces wordt nader beschreven in Paragraaf 6. Er wordt verwacht dat in het spectrum dat gemeten zal worden in dit experiment de Fraunhofer lines ook aanwezig zullen zijn.

Ook is er data aanwezig van een neon-lamp in de database van het Anton Pannekoek instituut. Deze data kan gebruik worden als blijkt dat de Fraunhofer lines niet genoeg datapunten voorzien voor een accurate kalibratie.

## 5 Opstelling

### 5.1 Verwerven van data in de zonnekoepel

De studenten zijn nog over deze paragraaf na aan het denken.

### 5.2 Gebruik van software

Als programmeertaal zal gebruikt worden gemaakt van python versie 3.9.7 in de vorm van scripts en Jupyter notebooks voor het verwerken en fitten van data. Er zal van de volgende softwarebibliotheken gebruik worden gemaakt:

- **numpy** voor het doen van wiskundige berekeningen.
- **matplotlib** voor het plotten van data en fits.
- **pandas** voor het importeren en exporteren van data.
- **lmfit** voor het fitten van data.
- **astropy** voor het verwerken van `fit` files en het gebruik van astronomische constanten.
- **scipy** voor het gebruik van fysische constanten.

## 6 Methode

In deze paragraaf wordt de methode die gehanteerd zal worden om de effectieve temperatuur van de zon te bepalen toegelicht.

### 6.1 Kalibratie

Allereerst zal aan de hand van de Fraunhofer lines en aan de hand van een neon-lamp spectrum het gemeten spectrum gekalibreerd worden. Dit houdt in dat we de pixelwaardes behorende bij een bepaalde intensiteit omzetten naar een golflengte. Voor deze kalibratie zal met python een fit uitgevoerd worden die het verband zal leggen tussen de pixelwaarde en de golflengte. Als de Fraunhofer lines genoeg data geven om een redelijke fit uit te voeren, dan zal de neon-lamp kalibratie slechts dienen als een check op deze fit. Het

is echter mogelijk dat meer datapunten worden vereist dan de Fraunhofer lines kunnen bieden voor de fit, en in dat geval zal de neon-lamp als enige kalibratie dienen.

## 6.2 Fitten aan de planck curve

Wanneer door middel van de kalibratie een spectrum verkregen is met spectrale irradiatie op de y-as en golflengte op de x-as, kan er worden gefit aan de curve van de wet van Planck. De wet van Planck wordt gegeven door Vergelijking 1 [6, p.58], gegeven in Paragraaf 2.2

Het vermogen op een orbitale afstand van de aarde  $r_{\oplus}$  vanaf de zon is minder dan het vermogen op een afstand  $R_{\odot}$ , daarom dienen we Vergelijking 1 te schalen met een factor die dit in rekening brengt. Irradiatie op een afstand  $r_{\oplus}$  wordt gegeven door Vergelijking 3

$$I = \frac{P}{4\pi r_{\oplus}^2} = \frac{4\pi R_{\odot}^2 F_{\odot}}{4\pi r_{\oplus}^2} \quad (3)$$

volgens de wet van Stefan-Boltzmann [7, p.81]. Omdat de spectrale straling proportioneel is aan de afgeleide van het vermogen,

$$S \propto \frac{dP}{d\lambda},$$

volgt dat de spectrale straling wordt geschaald met [8]

$$S = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\{\lambda k T_{\text{eff}}\}) - 1]} \left( \frac{R_{\odot}}{r_{\oplus}} \right)^2. \quad (4)$$

## 6.3 Bepaling effectieve temperatuur

De enige onbekende variabele in Vergelijking 4 is de temperatuur, en dit is de vergelijking waar aan gefit wordt. Door middel van de python package `lmfit` met als model Vergelijking 4 wordt de effectieve temperatuur  $T_{\text{eff}}$  verkregen als fitparameter.

## 7 Foutendiscussie

### 7.1 Fouten in het verworven spectrum

Het is mogelijk dat de spectrometer een bias heeft tot zeker pixelwaardes over anderen. Zo een soort bias zou geëlimineerd moeten worden met een kalibratie zoals beschreven in Paragraaf 4. De onzekerheden die zich kunnen voordoen in een kalibratie zijn beschreven in Paragraaf 7.2.

### 7.2 Onzekerheden in kalibratie

De kalibratie resulteert in een conversie van pixelwaardes naar golflengtes, maar er kunnen zich onzekerheden voordoen in dit proces. In de kalibratie met de Fraunhofer lines wordt met python de locale minima van het spectrum bepaald om zo de pixelwaarde behorende bij de absorptielijnen te bepalen. Echter is het mogelijk dat de relatieve minima niet de daadwerkelijke pixelwaarde zijn waar zich de absorptielijn bevindt. Voor een nauwkeuriger resultaat zouden Gaussian curves gefit kunnen worden aan de minima en zal het minimum van de fits gebruikt kunnen worden om te bepalen bij welke pixelwaarde zich een absorptielijn bevindt. Het voordeel van deze methode is dat de fout gemakkelijker gekwantificeerd kan worden, namelijk aan de hand van de bepaalde fitparameters en hun residuals. Als in het experiment deze nauwkeurigheid is vereist zal over worden gestapt naar deze methode.

### 7.3 Atmosferische effecten

Er kunnen zich atmosferische effecten voordoen die het verworven spectrum beïnvloeden, des ondanks dat de metingen verricht worden op een klaarlichte heldere wintermiddag. Sommige golflengtes worden meer geabsorbeerd door de atmosfeer dan andere golflengtes, en sommige golflengtes worden meer verstrooid door de atmosfeer dan andere golflengtes. Daarnaast kunnen er zich lokale variaties in de atmosfeer voordoen, zoals de aanwezigheid van meer water damp en vervuiling op de ene locatie dan op de andere locatie [9]. naast een algehele shift van het spectrum dat de effectieve temperatuur lager zal laten uitvallen dan de daadwerkelijke effectieve temperatuur, zullen de atmosferische effecten voornamelijk er voor zorgen dat het fitten aan de Planck curve moeilijker zal zijn, omdat de atmosferische effecten ervoor zorgen dat de data meer zal afwijken van de ideale Planck curve.



## 7.4 Foutenpropagatie

Voor alle grootheden die van andere grootheden met een fout afhangen, wordt de fout gepropageerd middels Vergelijking 5.

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial z} \Delta z\right)^2 + \dots}, \quad (5)$$

## Referenties

- [1] M. Planck, The theory of heat radiation, *Entropie* **144**, 164 (1900).
- [2] M. Massoud, Engineering thermofluids. thermodynamics, fluid mechanics, and heat transfer; 2007. isbn 10 3-540-22292-8.
- [3] A. Roy, D. Clarke, *Astronomy: Principles and Practice*, (PBK) (CRC Press, 2003).
- [4] Reference air mass 0 spectra. Beschikbaar op: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>, geraadpleegd op 4 december 2021.
- [5] Sun fact sheet. Beschikbaar op: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>, geraadpleegd op 4 december 2021.
- [6] D. G. Andrews, *An Introduction to Atmospheric Physics* (Cambridge University Press, 2010), second edn.
- [7] B. W. Carroll, D. A. Ostlie, *An introduction to modern astrophysics* (Cambridge University Press, 2017).
- [8] A. B. Kerlin, L. A. DeSilva, S. Rose, J. E. Hasbun, Calculating the sun's photospheric temperature, an undergraduate physics laboratory, *Georgia Journal of Science* **74** (2016).
- [9] C.B.Honsberg, S.G.Bowden, Atmospheric effects. Beschikbaar op: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/atmospheric-effects>, geraadpleegd op 4 december 2021.