Elektromagnetische straling en materie

Zon en Sterren



VWO 5

Over deze lessenserie

De materiële wereld zoals we die met onze zintuigen waarnemen is de wereld van de meters, de kilogrammen en de seconden. Om de wereld van het hele grote (het heelal) of de wereld van het heel kleine (de microwereld) te kunnen begrijpen, hebben we niet genoeg aan onze directe waarnemingen, maar moeten we al onze techniek, inventiviteit en vernuft de ruimte geven.

Deze lessenserie laat zien hoe op deze manier een begrip is ontstaan van de atomaire structuur van de microwereld en hoe elektromagnetische straling de verbinding legt tussen de microwereld en onze directe waarneming. Het zijn o.a. de natuurkundigen Niels Bohr, Max Planck, Louis de Broglie en Albert Einstein geweest die in de 20ste eeuw onze ogen daartoe hebben geopend en ons de weg hebben gewezen. Deze nieuwe kennis speelt een belangrijke rol bij de bestudering van de eigenschappen van zon en sterren.

Colofon

Project	Nieuwe Natuurkunde , Domein E “Straling en Materie” Subdomein E2: Elektromagnetische straling en materie
Auteur	Paul Feldbrugge
M.m.v.	Peter Barthel, Onne Slooten
Vormgeving	Loran de Vries
NiNa Redactie	Harrie Eijkelhof, Koos Kortland, Guus Mulder, Maarten Pieters, Chris van Weert, Fleur Zeldenrust
Versie	16-2-2010

Copyright

©Stichting natuurkunde.nl, Enschede 16-2-2010

Alle rechten voorbehouden. Geen enkele openbaarmaking of verveelvoudiging is toegestaan, zoals verspreiden, verzenden, opnemen in een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertalen of bewerken of anderszins al of niet commercieel hergebruik.
Als uitzondering hierop is openbaarmaking of verveelvoudiging toegestaan

- voor eigen gebruik of voor gebruik in het eigen onderwijs aan leerlingen of studenten,
- als onderdeel van een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertaald en/of bewerkt, voor al of niet commercieel hergebruik, mits hierbij voldaan is aan de volgende condities:
- schriftelijke toestemming is verkregen van de Stichting natuurkunde.nl, voor dit materiaal vertegenwoordigd door de Universiteit van Amsterdam (via info@nieuwenatuurkunde.nl),
- bij hergebruik of verspreiding dient de gebruiker de bron correct te vermelden, en de licentievoorwaarden van dit werk kenbaar te maken.

Voor zover wij gebruik maken van extern materiaal proberen wij toestemming te verkrijgen van eventuele rechthebbenden. Mocht u desondanks van mening zijn dat u rechten kunt laten gelden op materiaal dat in deze reeks is gebruikt dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen: info@nieuwenatuurkunde.nl

De module is met zorg samengesteld en getest. De Stichting natuurkunde.nl, resp. Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs havo/vwo, Universiteit van Amsterdam en auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de module, noch enige aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit het gebruik van deze module.

INHOUDSOPGAVE

1 De zon 6

1.1 Betekenis van de zon als bron van energie 7

1.2 Kleur en oppervlaktetemperatuur van de zon 10

1.3 Lichtkracht van de zon 14

1.4 Vingerafdruk van de zon 19

1.5 Extra: De Planck formule 23

Opgaven 28

2 Straling en materie 36

2.1 Wat hebben materie en straling met elkaar? 37

2.2 Spectraallijnen van het waterstofatoom 45

2.3 Extra: Afleiding energieniveaus van het waterstofatoom 55

Opgaven 61

3 Onderzoek aan sterren 64

3.1 Temperatuur, helderheid en lichtkracht van sterren. 65

3.2 Spectra van sterren 70

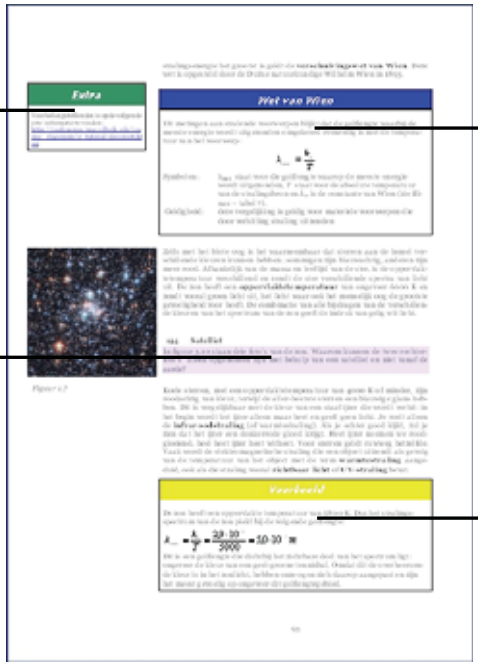
3.3 Waarneemtechnieken in het elektromagnetisch spectrum 78

3.4 Eigen onderzoek 83

Opgaven 87

GLOBALE OPBOUW VAN EEN PARAGRAAF

Hieronder is de betekenis van alle kleuren en stijlen weergegeven die worden gebruikt in dit lesmateriaal.

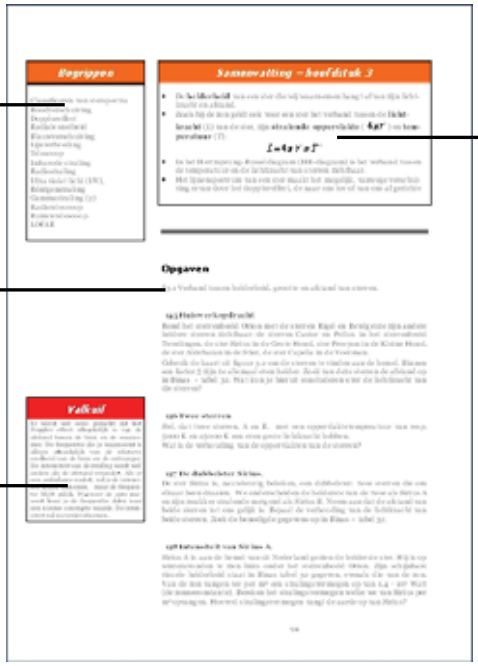


In **groene** tekstvakken vind je **extra** uitleg die je niet per se nodig hebt om de opgaven te kunnen maken, maar wel een interessante aanvulling op de tekst is.

In de **paarse** tekstvakken staan **theorieopdrachten** Deze opdrachten horen dus ook bij de tekst.

Belangrijke nieuwe **vergelijkingen** uit de natuurkunde zijn aangegeven in **blauwe** tekstvakken. Deze heb je nodig om rekenwerk mee te kunnen verrichten.

Een goed voorbeeld doet goed volgen! In de **gele** tekstvakken worden **voorbeelden** van berekeningen en redeneringen gegeven, zodat je ziet hoe je een opgave aan kunt pakken.



In het **oranje** tekstvak “**Begrippen**” staan belangrijkste termen uit de tekst

In het **oranje** tekstvak **“Samenvatting”** staat de minimale kennis die je paraat moet hebben.

Opgaven staan bij elkaar aan het einde van een hoofdstuk. De opgaven zijn gegroepeerd per paragraaf.

Pas op! Veel leerlingen voor jou hebben moeite gehad met onderwerpen die in **rode** tekstvakken nog eens extra aandacht krijgen. Zodat jij niet meer in deze **valkuilen** zult vallen!

STRALING EN MATERIE – ZON EN STERREN

Dankzij nauwkeurige metingen van de straling van de zon en de sterren en de interpretatie van deze metingen met behulp van natuurkundige modellen zijn we veel te weten gekomen over de samenstelling en structuur ervan. Ook is duidelijk geworden wat we zelf zijn: levende wezens op een planeet rond onze zon – een ster, zoals er vele andere zijn.

Voorkennis

De volgende begrippen worden bekend verondersteld:

- Licht, kleurschifting in een prisma, breking door lenzen
- Kinetische energie van een deeltje $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
- Kinetische gastheorie: $< E_{\text{kin}} >= \frac{3}{2} kT$
- Vermogen van energieomzettingen in een elektrische stroomkring:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R}$$

- Gravitatiekracht, gravitatie-energie
- Het oppervlak van een bol is $A = 4\pi r^2$
- Verband tussen golflengte, frequentie en voortplantingssnelheid van een golf: $v = \lambda \cdot f$
- Het verband tussen trillingtijd en frequentie: $T = \frac{1}{f}$
- Permanente magneten, stroomspoel
- Arbeid en energiebalans van een systeem

1 De zon

Een bron van licht, warmte en nog veel meer energie, maar vooral van ……. informatie!

Hoofdstukvraag	**Wat kunnen we te weten komen van de zon door haar straling te bestuderen?**

De zon is verreweg het grootse hemellichaam in het zonnestelsel. De massa van de zon is bijna duizend keer groter dan alle planeten, manen, kometen en andere kleine planetoïden samen. De zon is ook verreweg het helderste object aan de hemel. De zon is een ster, maar eigenlijk een die niet uitzonderlijk is qua massa, afmeting, oppervlak, temperatuur en chemische samenstelling.

Hoe weten we dat? De straling van de zon draagt - behalve energie - veel informatie met zich mee. Hierdoor kunnen we veel leren over de natuurkundige omstandigheden van de zon, waaronder de temperatuur aan de oppervlakte, het vermogen dat de zon uitstraalt en welke stoffen zich op de zon bevinden. In dit hoofdstuk zullen we leren hoe we uit de straling van de zon deze gegevens kunnen halen.

1.1 Betekenis van de zon als bron van energie

Ons bestaan op aarde danken we aan de zon

Paragraafvraag	Hoeveel vermogen straalt de zon uit? Wat vangen wij daarvan op?



Figuur 1.1 Deze foto komt uit het boek: Powers of Ten, About the relative size of things in the universe, Scientific American Library.



Figuur 1.2

De meeste mensen kunnen intens genieten van de zon. Zoals de jongen op de foto hiernaast. Tijdens een warme zomerdag (of een hittegolf) wordt duidelijk dat de zon behoorlijk veel energie uitstraalt. Het vermogen, oftewel de hoeveelheid energie die de zon per seconde uitstraalt is immens.

In de volgende opdrachten wordt het vermogen dat de zon uitstraalt zo goed mogelijk bepaald. Dit kan met gebruikmaking van een gewone gloeilamp.

1 Oriëntatieopdracht - warmtestraling van een gloeilamp

Materiaal: gloeilamp van 100 W, (eventueel: computer met Coach 6, Coachlab, lichtsensor 0142i).

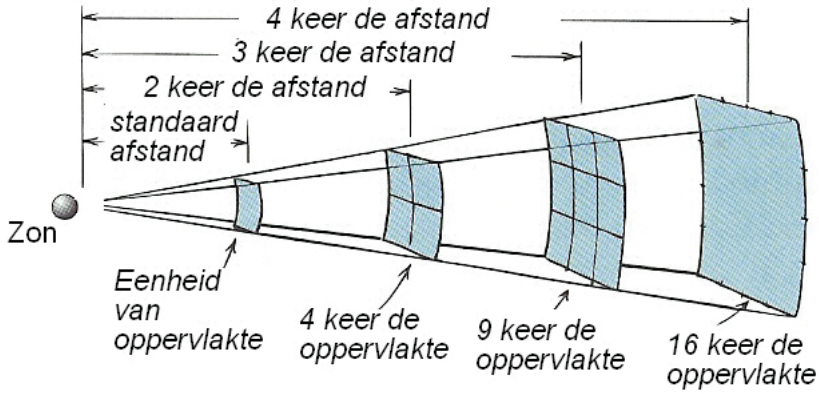
a. Een manier om het vermogen van de zon te bepalen is deze te vergelijken met de warmtestraling van een gloeilamp van 100W. Doe je ogen dicht. Stel je voor dat je lekker op het strand in de zon ligt te bakken en beweeg je pols naar de lamp toe, totdat je denkt: “nu voelt het precies zo als op het strand”. Noteer die afstand. Maak een zo nauwkeurig mogelijke schatting van de afstand van je pols tot de lamp. Neem het gemiddelde van meerdere schattingen.
b. Meet met de lichtsensor de lichtintensiteit op verschillende afstanden van de lamp en geef deze weer in een grafiek, waarin je de intensiteit I uitzet tegen de afstand r. Wat voor een vorm heeft de grafiek (lineair, parabool, etc.)? Hoe zou een formule die het verband tussen afstand en lichtintensiteit beschrijft er uit moeten zien?

Deze gegevens ga je in de volgende opdrachten gebruiken om een schatting te maken van het vermogen dat de zon uitstraalt.

N.B. Laat iemand van de groep erop letten, dat geen van de leerlingen met zijn ogen dicht zich brandt aan de lamp!

De kwadratenwet

De lamp zendt een vermogen van 100 watt uit in alle richtingen. Wat op je hand valt is maar een deel daarvan. Een zelfde situatie geldt voor de zon. Omdat de zon bij benadering een ronde bol is, nemen we aan dat de energie door de zon in alle richtingen in gelijke mate wordt uitgestraald. De hoeveelheid energie die wordt opgevangen door een gegeven oppervlak zal afnemen met de afstand tot de zon. Het verband met de afstand is dat de energie door een oppervlak afneemt met het kwadraat van de afstand; zie figuur 1.3. Dit wordt **de kwadratenwet** genoemd.



Figuur 1.3 De intensiteit van de straling (in Wm^{-2}) neemt af met het kwadraat van de afstand

Het is niet moeilijk de kwadratenwet te bewijzen. Stel P_{zon} is de door de zon uitgestraalde energie per tijdseenheid; we noemen dit het **stralingsvermogen** van de zon. Denk nu een grote bol met straal r om de zon. De hoeveelheid uitgezonden energie wordt verdeeld over het boloppervlak $A = 4\pi r^2$. Als we de opgevangen energie per oppervlakte-eenheid (dus per vierkante meter) en per tijdseenheid (dus per seconde) met de letter I aanduiden, dan geldt:

$$4\pi r^2 I = P_{zon}$$

Daarin is P_{zon} het stralingsvermogen van de zon in Watt (W). De opgevangen energie per vierkante meter en per seconde heet de **intensiteit** I. Bijvoorbeeld: op twee keer zo grote afstand van het middelpunt van de zon wordt de intensiteit vier keer zo klein. De intensiteit neemt dus kwadratisch af met toenemende afstand. Dat is logisch want de energie van de bron moet bij toenemende afstand over een groter (denkbeeldig) boloppervlak worden verdeeld.

Kwadratenwet

De kwadratenwet vertelt ons dat de intensiteit van de straling van een bron afneemt met het kwadraat van de afstand:

$$I = \frac{P_{bron}}{4\pi \cdot r^2}$$

Symbolen: de intensiteit I is het ontvangen vermogen per vierkante meter (in Wm^{-2}), P_{bron} staat voor het stralingsvermogen (in Js^{-1} of W), en r staat voor de afstand tot de bron.

Geldigheid: deze vergelijking is geldig voor een bolvormige stralingsbron, zoals de zon, voor grote afstanden van r, mits die bron evenveel straling naar alle richtingen uitzendt. De formule geldt niet alleen voor stralingsenergie, maar ook voor andere energiebronnen zoals geluid.

Stralingsvermogen van de zon

Het totale stralingsvermogen van de zon (en van sterren in het algemeen) wordt in de sterrenkunde ook wel de **lichtkracht** genoemd:

$$L = P_{zon} = 4\pi r^2 I$$

De eenheid van lichtkracht is dus W (Js^{-1}). Door de intensiteit van de straling van een gloeilamp te vergelijken met de warmte van de zon op een mooie zomerdag, en gebruik te maken van de kwadratenwet kunnen we nu het stralingsvermogen (lichtkracht) van de zon bepalen.

2 Stralingsvermogen van de zon

Bij de oriëntatie opdracht heb je kunnen bepalen op welke afstand de intensiteit van de lamp voelt als de intensiteit van de straling van de zon hier op Aarde. Bereken met gebruikmaking van dit resultaat het vermogen van de zon. Zoek hiertoe de afstand van de aarde tot de zon op.

Je kunt met deze gegevens ook bepalen hoeveel zonne-energie per jaar door de zon aan de aarde wordt geleverd. De hoeveelheid zonne-energie, die we per vierkante meter per seconde op aarde ontvangen heet de *zonneconstante*.

3 Zonneconstante

a. Bereken de zonneconstante
b. Bereken de hoeveelheid zonne-energie die per jaar op de aarde valt.
c. Maak met behulp van internet een schatting van onze gezamenlijke wereld energiebehoefte en vergelijk dit getal met je antwoord bij onderdeel b.

De zon is de enige ster die we overdag kunnen zien. Er bestaan sterren die ongeveer 10^5 maal zoveel als de zon stralen en sterren die 10^5 keer zo weinig als de zon stralen. Veel sterren zijn echter vergelijkbaar met de zon.

Wil je weten hoe de zon en de andere sterren deze enorme energieproductie kunnen opbrengen? Dat proces heeft kernfusie en wordt behandeld in de module over elementaire deeltjes.

Begrippen

Kwadratenwet
Stralingsvermogen
Intensiteit
Lichtkracht

Samenvatting – paragraaf 1.1

- De **intensiteit** van straling neemt af omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand. Dit heet de **kwadratenwet**:

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$$

Hierin is:
I de opgevangen stralingsintensiteit (Wm^{-2})
P het vermogen, door de bron uitgestraald (W)
r de afstand tot de bron (m)

- Het totale stralingsvermogen van een sterrenkundig object wordt in de sterrenkunde de **lichtkracht** genoemd.

1.2 Kleur en oppervlaktetemperatuur van de zon

De kleur van het zonlicht gebruiken als thermometer

Paragraafvraag	Wat bepaalt de kleur van de zon?



Figuur 1.4

De zon verwarmt de aarde, maar wat is de temperatuur van de zon? Voor het inwendige van de zon is die niet zo gemakkelijk te bepalen, maar de oppervlakte temperatuur van de zon valt af te leiden uit de kleur van het uitgezonden licht. De zon heeft een geelwitte kleur. We associëren geel licht dan ook met zonnige stemmingen. Voorjaarsfeesten worden vaak opgefleurd met gele versieringen: immers, de zon laat zich dan weer meer zien dan in de afgelopen winter. Met lamplicht in onze huiskamer proberen we het zonlicht te imiteren. We maken daarbij gebruik van het feit dat de kleur van de verhitte gloeidraad in de lamp een aantal natuurkundige wetmatigheden volgt die we in deze paragraaf verder zullen uitzoeken, en die ook voor zon en sterren gelden.

4 Oriëntatieopdracht - kleur van een gloeidraad van een lamp

Materiaal: lamp van 100 W met doorzichtig glas, regelbare transformator (variac), prisma. Bij voorkeur op tafel met wit vlak.

We regelen het vermogen van de lamp met de variac (dimmer). Het zal duidelijk zijn dat bij een groter vermogen de temperatuur van de gloeidraad hoger wordt. Let tijdens dit experiment op de kleur van de gloeidraad bij stijgende temperatuur (goed te zien aan het oppervlak van de tafel).

In figuur 1.6 is een kleurenlijn gegeven. Deze staat ook op de leerlingen ICT-disk onder de naam “Werkblad Kleurlijn” (in de map: Hoofdstuk 1 –De Zon) als word-bestand (.doc - om te printen) en als jpg-bestand.

a. Draai de variac met stappen van 25 Volt omhoog en geef in de kleurlijn aan welke kleur de gloeidraad van de lamp heeft.

b. Bekijk het licht van de lamp ook door een prisma bij verschillende temperaturen. Beschrijf, wat je door het prisma ziet.



Figuur 1.5



Figuur 1.6 Kleurlijn

De verschuivingswet van Wien

Het experiment laat zien dat er een verband is tussen de kleur van de gloeidraad en de temperatuur ervan. Het licht van de gloeidraad wordt witter, en de golflengte dus korter, naarmate de temperatuur stijgt. Dit geldt algemeen: welke straling een voorwerp uitzendt, hangt voornamelijk af van de (oppervlakte)temperatuur. Hoe hoger deze temperatuur, des te kleiner de golfleng-

te waarop energie wordt uitgestraald. Voor de golflengte waar de stralingsenergie het grootst is geldt de **verschuivingswet van Wien**. Deze wet is opgesteld door de Duitse natuurkundige Wilhelm Wien in 1893.

Verschuivingswet van Wien

Uit metingen aan stralende voorwerpen, zoals gloeilampen en de zon, blijkt dat de golflengte waarbij de meeste energie wordt uitgezonden omgekeerd evenredig is met de temperatuur van het voorwerp:

$$\lambda_{max} = \frac{k_w}{T}$$

Symbolen: λ_{max} staat voor die golflengte (in m) waarop de meeste energie wordt uitgezonden, T staat voor de absolute temperatuur (K) van de stralingsbron en k_w is de constante van Wien: $2{,}8987.10^{-3}$ mK (zie Binas – tabel 7).

Geldigheid: deze vergelijking is geldig voor materiële voorwerpen die door verhitting straling uitzenden en gekarakteriseerd kunnen worden als een Planckse straler (zie volgende paragraaf).



Figuur 1.7

Zelfs met het blote oog is het waarneembaar dat sterren aan de hemel verschillende kleuren kunnen hebben; sommigen zijn blauwachtig, anderen zijn meer rood. Afhankelijk van de massa en leeftijd van de ster, is de oppervlaktetemperatuur verschillend en zendt de ster verschillende spectra van licht uit. De zon heeft een **oppervlaktetemperatuur** van ongeveer 6000 K en zendt vooral groen licht uit, het licht waar ook het menselijk oog de grootste gevoeligheid voor heeft. De combinatie van alle bijdragen van de verschillende kleuren van het spectrum van de zon geeft de indruk van gelig wit licht.

Koele sterren, met een oppervlaktetemperatuur van 4000 K of minder, zijn roodachtig van kleur, terwijl de aller-heetste sterren een blauwige glans hebben. Dit is vergelijkbaar met de kleur van een staaf ijzer die wordt verhit: in het begin wordt het ijzer alleen maar heet en geeft geen licht. Je voelt alleen de **infraroodstraling** (of warmtestraling). Als je echter goed kijkt, zul je zien dat het ijzer een donkerrode gloed krijgt. Als je het ijzer verder verhit, wordt de gloed duidelijker en zal de staaf helder rood licht gaan uitstralen. Verhit je de staaf nog verder dan wordt het licht alsmaar feller, en de kleur verandert van rood naar oranje, geel, en ten slotte wit. Heet ijzer noemen we roodgloeiend, heel heet ijzer witheet. Voor sterren geldt ruwweg hetzelfde. Vaak wordt de elektromagnetische straling die een object uitzendt als gevolg van de temperatuur van het object met de term **warmtestraling** aangeduid, ook als die straling vooral **zichtbaar licht** of **UV-straling** bevat.

Voorbeeld

De zon heeft een oppervlakte temperatuur van $5{,}8.10^3$ K. Dus het stralingsspectrum van de zon piekt bij de volgende golflengte:

$$\lambda_{max} = \frac{k_w}{T} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{5800} = 5{,}0 \cdot 10^{-7}\, m$$

Dit is een golflengte die in het zichtbare deel van het spectrum ligt: ongeveer de kleur van een geel-groene tennisbal. Omdat dit de overheersende kleur is in het zonlicht, hebben onze ogen zich daarop aangepast en zijn zodoende het meest gevoelig op ongeveer dit golflengtegebied.

5 Rood, wit, blauw en temperatuur.

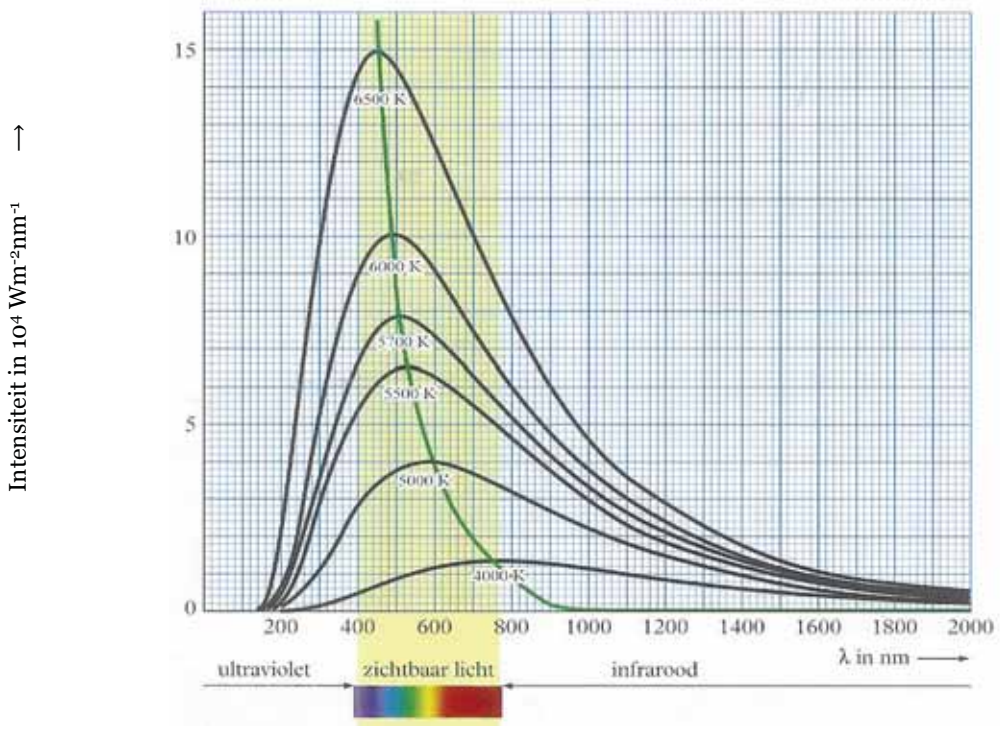
Bij wastafels tref je vaak op de kraan voor koud water een blauwe stip en op de kraan voor heet water een rode.

a. Klopt deze kleuraanduiding met de straling die hete en koude objecten uitzenden?
b. Wat is je commentaar op de uitdrukkingen 'roodgloeiend' en 'witheet'?

De Planck-kromme

Een heet lichaam zendt niet op één enkele golflengte straling uit. Met een fotometer kun je van een gloeilamp of van een andere gloeiende stralingsbron, zoals de zon, het opgevangen stralingsvermogen meten op elke golflengte. De samenstelling van het licht valt in kaart te brengen door in een diagram de intensiteit van het licht uit te zetten tegen de golflengte van het licht. Wanneer je de gemeten waarden uitzet in zo'n diagram, levert dat een grafiek die de intensiteit van de straling als functie van de golflengte weergeeft, het **stralingsspectrum**. In figuur 1.8 zijn grafieken te zien voor voorwerpen die stralen bij verschillende temperaturen.

De grafieken hebben een gepiekte vorm die bij lage en hoge golflengtes naar nul gaat, en ertussenin een maximum heeft. Deze typerende vorm wordt de **Planck-kromme** genoemd, als eerbetoon aan de natuurkundige Max Planck die in het jaar 1900 de formule voor deze grafiek wist af te leiden (zie de extra paragraaf 1.5). De piek van de verschillende Planck-krommen correspondeert met de λ_{max} in de wet van Wien. We zien dat het maximum inderdaad opschuift naar kortere golflengten bij hogere temperatuur.



Figuur 1.8 Een aantal Planck-krommes voor verschillende temperaturen. In de figuur is de stralingsintensiteit (in W m^{-2} nm^{-1}) uitgezet tegen de golflengte λ (in nm). De groene lijn geeft de maximale golflengten aan die in de wet van Wien gebruikt worden. Figuur ontleend aan Binas – tabel 23

De vorm van de Planck-kromme is universeel voor stralende voorwerpen. Elke voorwerp zendt straling uit, ook al is de temperatuur nauwelijks hoger dan het absolute nulpunt. Steeds heeft de stralingsverdeling in goede benadering de karakteristieke vorm van de Planck-kromme, hoewel er wel afwijkingen kunnen zijn afhankelijk van de materiële eigenschappen van het stralende voorwerp. Ook het spectrum van de meeste sterren heeft in goede benadering de Planck-vorm. Men spreekt dan van **Planckse straler**. De opmerkelijke eigenschap van een Planckse straler is dat de hoeveelheid straling bij elke golflengte alleen afhangt van de temperatuur en wordt gegeven door de Planck-kromme bij die temperatuur. De verschuivingswet van Wien is geldig voor Planckse stralers.

Begrippen

Elektromagnetisch spectrum
Infraroodstraling
Warmtestraling
Zichtbaar licht
Ultraviolet licht
Stralingsspectrum
Planck-kromme
Planckse straler
Oppervlaktetemperatuur
Verschuivingswet van Wien

Samenvatting – paragraaf 1.2

- De verdeling van de uitgestraalde energie over de golflengten in het **elektromagnetisch spectrum** van een bron zegt ons iets over de **temperatuur** van het stralende object.
- Voor een **Planckse straler** hangt de hoeveelheid straling bij elke golflengte alleen af van de temperatuur en volgt de verdeling een **Planck-kromme**; bij iedere temperatuur T behoort een Planck-kromme.
- Uit de Planck-kromme is de temperatuur van de stralingsbron direct af te leiden met de **verschuivingswet van Wien**:

$$\lambda_{max} \cdot T = k_w$$

Hierin is: λ_{max} de golflengte met maximale straling (m)
T de temperatuur van de stralingsbron (K)

1.3 Lichtkracht van de zon

Hoe de uitstraling per vierkante meter stralend oppervlak afhangt van de temperatuur.

Paragraafvraag	**Welk verband bestaat er tussen het stralingsvermogen en de oppervlaktetemperatuur van de zon?**

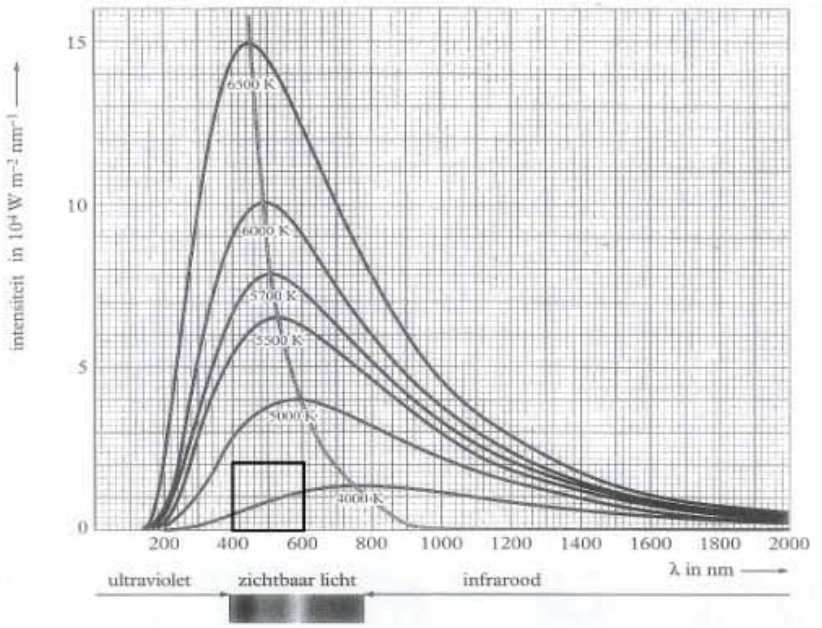
Niet alleen de kleur van de zon vertelt ons iets over haar temperatuur. We kunnen de temperatuur ook op een andere manier bepalen. In het vorige hoofdstuk hebben we de Planck-kromme - die de stralingsintensiteit per vierkante meter voor iedere golflengte vastlegt - leren kennen. Uit deze grafiek kunnen we óók te weten komen hoeveel vermogen een stralend lichaam in totaal per vierkante meter stralend oppervlak uitzendt bij een gegeven temperatuur.

Let op

De toevoeging per vierkante meter is belangrijk. De totale straling van een bron hangt natuurlijk ook af van de grootte van het stralend oppervlak. Een houtblok straalt meer energie uit dan een lucifer bij dezelfde temperatuur. Daarom bekijken we steeds de hoeveelheid straling per vierkante meter stralingsoppervlak.

Een denkbeeldige stralingsbron

Bekijk nog eens figuur 1.8. waar een aantal Planck-krommen staan afgebeeld. Een Planck-kromme voor een bepaalde temperatuur geeft aan hoeveel stralingsvermogen een lichaam per oppervlakte per golflengte uitzendt.
Stel nu eens dat we een denkbeeldige stralingsbron zien, die straalt met een stralingsintensiteit van $2.10^4\ \mathrm{Wm^{-2}nm^{-1}}$ over een golflengtegebied met een breedte van 200 nm, bijvoorbeeld van 400 tot 600 nm. Neem aan dat deze bron geen straling uitzendt buiten dit gebied. In figuur 1.9 is de stralingsintensiteit voor deze denkbeeldige stralingsbron ingetekend als een vierkant.



Figuur 1.9 Planck-krommen voor verschillende temperaturen. Het vierkant geeft de stralingsintensiteit van de denkbeeldige stralingsbron besproken in de tekst.

Omdat de stralingsintensiteit in het hele golflengtegebied hetzelfde is, wordt de grafiek een rechte lijn. De oppervlakte onder deze lijn stelt de stralingsintensiteit per vierkante meter voor het golflengtegebied tussen 400 en 600 nm voor.
Dit kun je als volgt begrijpen. Je weet uit de mechanica al dat de oppervlakte onder een *v(t)* grafiek de afgelegde weg voorstelt. (De analogie met het denkbeeldige stralingsdiagram is een *v(t)* grafiek met constante *v*). Je vermenigvuldigt snelheid (in m/s) met tijd (s). De oppervlakte is dan $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1} \cdot \mathrm{s} = \mathrm{m}$. Je krijgt een antwoord in meters; de afgelegde weg.

Voorbeeld

De denkbeeldige straler zendt $2 \cdot 10^4 W \cdot m^{-2} nm^{-1}$ uit bij golflengten tussen 400 en 600 nm. Bepaal de totale stralingsintensiteit van deze denkbeeldige stralingsbron in Watt per vierkante meter.

Antwoord:
Als je de oppervlakte van het vierkant in figuur 1.9 bepaalt, dan krijg je, wat de *eenheid* betreft:

$$W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot nm = W \cdot m^{-2}$$

Je antwoord levert dus een stralingsintensiteit op.

De numerieke waarde van de intensiteit van de straling uitgezonden door deze denkbeeldige straler is

$$2 \cdot 10^4 W \cdot m^{-2} nm^{-1} \cdot 200 nm = 4 \cdot 10^6 W \cdot m^{-2}$$

De totale stralingsintensiteit van de denkbeeldige bron is dus gelijk aan het oppervlak van het beschouwde vierkant. Je ziet ook dat de zo berekende stralingsintensiteit de juiste eenheid heeft.

Oppervlakte onder een Plankkromme

In het voorbeeld zijn we uitgegaan van een stralingsbron die in werkelijkheid niet bestaat. Echter, het voorbeeld maakt duidelijk dat met behulp van de oppervlakte onder de grafiek van een Planck-kromme het totale stralingsvermogen per vierkante meter van een stralingsbron kan worden bepaald.
In figuur 1.9 zijn de oppervlakten onder de krommen voor de verschillende temperaturen bepaald en staan in de tabel hieronder weergegeven:

T (K)	6500	6000	5800	5700	5500	5000	4000
Aantal cm²	25,4	18,4	16,0	15,0	13,0	8,9	3,6
I (Wm^{-2})							

6 Stralingsintensiteit en temperatuur

Beschouw de zon als een stralend lichaam met een temperatuur van 6000K.

a. Bepaal uit de bovenstaande tabel de stralingsintensiteit (dus het stralingsvermogen per m²) van de zon.
b. Bepaal de stralingsintensiteit bij elke temperatuur in de tabel en zet in een grafiek deze intensiteit *I* uit tegen de temperatuur *T*.

Wet van Stefan-Boltzmann

Opdracht 6 laat zien hoe met behulp van de oppervlakte onder de grafiek van de Planck-kromme het totale stralingsvermogen per vierkante meter kan worden bepaald van een stralend voorwerp met temperatuur *T*. We zien daaruit dat de totale hoeveelheid straling sterk toeneemt met de temperatuur. Het is mogelijk daarvoor een exact verband af te leiden, bekend als de **wet van Stefan-Boltzmann**. Dit verband kunnen we als volgt vinden:

7 Logaritmisch verband *I* en *T*

Zet met behulp van de uitkomsten van de vorige opdracht in een grafiek $\log I$ tegen $\log T$ uit.

Aanwijzing:

Er zijn verschillende manieren om dit verband te bepalen:

- De eenvoudigste, handmatige methode, is van *I* en *T* de logaritme te nemen, deze in een tabel te zetten en vervolgens op grafiekenpapier de waarden van $\log I$ en $\log T$ tegen elkaar uit te zetten. (Een alternatief is om de waarden van *I* en *T* direct op dubbel-logaritmisch grafiekenpapier tegen elkaar uit te zetten, zodat je niet eerst voor elke waarde van *I* en *T* de logaritme hoeft te berekenen.)
- Je kunt voor de bepaling van het verband tussen *I* en *T* gebruik maken van de grafische rekenmachine. Vraag de docent naar een handleiding voor de benodigde stappen daartoe.
- Er kan ook gebruik gemaakt worden van de modelomgeving van Coach. Van de gegenereerde functies kun je het maximum en de oppervlakte onder de grafiek bepalen.

Als je deze opdracht hebt uitgevoerd zul je zien dat er rechte evenredigheid bestaat tussen $\log I$ en $\log T$ met een helling

$$\frac{\Delta \log I}{\Delta \log T} = 4$$

Met de wiskundige eigenschap

$$4 \log T = \log T^4$$

valt hier uit af te leiden dat de intensiteit *I* evenredig is met de vierde macht van de temperatuur *T*. Dat wil zeggen dat het oppervlak onder een Planck-kromme gegeven wordt door het verband:

$$I = \text{constante } T^4$$

De constante hangt verder niet af van de temperatuur of andere eigenschappen van de stralingsbron. Het is gebruikelijk de constante weer te geven met de Griekse letter σ. Deze wordt de *constante van Stefan-Boltzmann* genoemd. Van een stralend voorwerp met temperatuur *T* kan dus met behulp van dit verband direct het totale stralingsvermogen per vierkante meter worden bepaald.

8 Constante van Stefan-Boltzmann

Bereken de constante van Stefan-Boltzmann met behulp van je resultaten uit opdracht 6 en 7. Geef de juiste eenheid. Vergelijk je antwoord met die in Binas tabel 7.

Wet van Stefan-Boltzmann

Voor het uitgestraalde vermogen per vierkante meter van een stralend lichaam geldt het verband:

$$I = \sigma \cdot T^4$$

Met behulp van dit verband kan van een stralend voorwerp met temperatuur T direct het totale stralingsvermogen per vierkante meter worden bepaald.

Symbolen: I staat voor de intensiteit (in W/m^2), T staat voor de absolute temperatuur (in K) , en σ staat voor de constante van Stefan-Boltzmann (zie Binas – tabel 7).

Geldigheid: deze vergelijking is geldig voor lichamen die (al of niet door verhitting) straling uitzenden en een Planckse straler zijn.

De **wet van Stefan-Boltzmann** laat zien dat het stralingsvermogen van een gloeiend voorwerp snel toeneemt met de temperatuur. Dat is natuurlijk ook te zien aan de Planck-krommen in figuur 1.7. Neem als voorbeeld twee even grote spijkers. We houden beide spijkers in een gasvlam. Zodra ze beginnen te gloeien halen we de ene spijker uit de gasvlam weg. Deze spijker heeft een temperatuur van 600 K. De andere verwarmen we nog even verder totdat die een felle oranje-geelachtig gloed geeft. De temperatuur is dan ongeveer 1200 K.

9 Verhouding van intensiteiten

Bereken de verhouding van het uitgestraalde vermogen tussen beide spijkers.

Lichtkracht van de zon

We hebben in de paragrafen 1.2 en 1.3 twee manieren leren kennen om van een stralend object de temperatuur (in K) te weten te komen, als we de Planck-kromme van het stralende object -, zoals de zon - kennen:

- Met de wet van Wien, uit de piek van de Planck-kromme
- Met de wet van Stefan-Boltzmann, uit het oppervlak onder de Planck-kromme.

Als tevens het totale stralende oppervlak A bekend is, kunnen we het totale vermogen van de zon bepalen. Dit wordt ook wel aangeduid als de lichtkracht L van de zon; zie paragraaf 1.1:

$$L = A \cdot I$$

We weten immers dankzij de verschuivingswet van Wien hoeveel straling er per oppervlakte-eenheid wordt uitgezonden. Door de wet van Stefan-Boltzmann in te vullen krijgen we een verband tussen de lichtkracht, het stralende oppervlak en de temperatuur.

Lichtkracht van de zon

Er is een verband tussen de lichtkracht, de oppervlakte en de absolute temperatuur van de zon:

$$L = A \cdot I = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4$$

Symbolen: L staat voor de lichtkracht (in W), R staat voor de straal van de zon (in m) , T voor de absolute temperatuur (in K) en σ staat voor de constante van Stefan-Boltzmann (zie Binas – tabel 7).

Geldigheid: deze vergelijking is geldig voor Planckse stralers. Deze formule kan ook gebruikt worden bij sterren.

Dit verband kunnen we gebruiken om de straal te berekenen als de lichtkracht en de temperatuur bekend zijn.

10 Straal van de zon

We hebben in hoofdstuk 1 het totaal uitgestraalde vermogen van de zon bepaald. Bereken met behulp van het antwoord de straal van de zon. Vergelijk deze uitkomst met de waarde in Binas tabel 31.

Begrippen

Oppervlak Planck kromme
Wet van Stefan-Boltzmann
Lichtktracht

Samenvatting – paragraaf 1.3

- De **wet van Stefan-Boltzmann** geeft voor elke vierkante meter stralend oppervlak van een **Planckse straler** het totale uitgestraalde vermogen:

$$I = \sigma \cdot T^4$$

Hierin is: I het uitgestraald vermogen per m² (Wm^{-2})
σ de constante van Stefan-Boltzmann ($Wm^{-2}K^{-4}$)
T de temperatuur van de stralingsbron (K)

- De totale **lichtkracht** van een bolvormige Planckse straler zoals de zon, d.w.z het **totale stralingsvermogen**, wordt gegeven door:

$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4$$

Hierin is: L de lichtkracht van de stralingsbron (W)
R de straal van de bolvormige bron (m)
σ de constante van Stefan-Boltzmann ($Wm^{-2}K^{-4}$)
T de temperatuur van de stralingsbron (K)

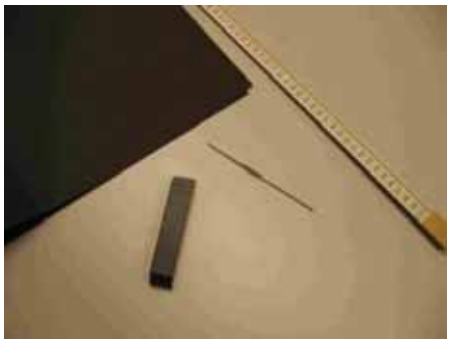


Figuur 1.10

1.4 Vingerafdruk van de zon

Spectraallijnen als vingerafdruk van elementen in de zon.

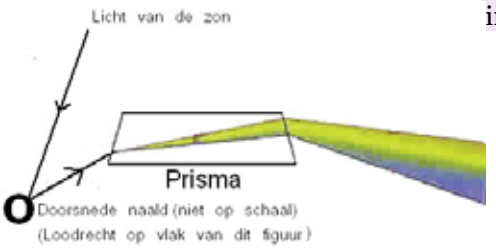
Paragraafvraag	**Hoe komen we te weten waaruit de zon en de sterren bestaan?**



Figuur 1.11 Met een haak- of breinaald en een prisma kun je al mooie absorptiespectra van de zon bekijken.



Figuur 1.12 De zon, gereflecteerd door een haaknaald. Voor de donkere achtergrond is gebruik gemaakt van een zwarte huisvuilcontainer. Door de zwarte achtergrond zie je alleen het gereflecteerde zonlicht en geen andere verlichte voorwerpen er doorheen.



Figuur 1.13

In de voorgaande paragrafen hebben we enkele eigenschappen van de zon leren kennen. Het uitgestraald vermogen, de temperatuur en omvang van de zon hebben we met behulp van o.a. de Planck-kromme kunnen bepalen. We weten echter nog niets over de chemische samenstelling van de zon. Het bepalen van deze samenstelling is niet zo eenvoudig. De zon staat tè ver weg om ervan een stukje materiaal naar het laboratorium te halen. Bovendien, vind maar eens een manier om dicht bij de zon te komen. Voordat je er ook maar bij in de buurt kunt komen ben je al verdampt! Maar er zijn slimmere manieren om elementen in de zon en sterren te identificeren. Elke element blijkt namelijk zijn eigen vingerafdruk te hebben.

Absorptielijnen

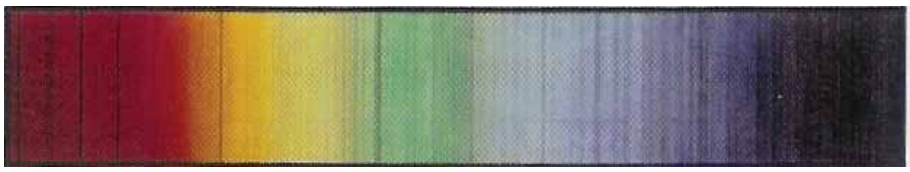
Zoals we in de vorige hoofdstukken hebben gezien levert het spectrum van een gloeiende bron, zoals de zon, een continue verdeling van licht over alle (zichtbare) golflengten volgens de Planck-kromme. Dit licht is afkomstig van de 'oppervlakte' van de zon: *de fotosfeer*.

Dit zonlicht kan nog nauwkeuriger onderzocht worden als we het via een smalle lijnvormige opening door een prisma bekijken. Immers: vanuit deze lijnvormige lichtbron wordt elke golflengte door het prisma in zijn eigen richting afgebogen – we zien voor elke golflengte een afzonderlijke afbeelding van die lichtspleet: m.a.w. we zien het **spectrum** van de zon - een kleurenband met alle kleuren van de regenboog, waarin ieder golflengte (kleur) zijn eigen plek heeft.

Er zijn verschillende manieren om een lijnvormige lichtbron van het zonlicht te maken.

11 Oriëntatieopdracht - het licht van de zon nader onderzocht

Materiaal: glimmende verchroomde breipen of haaknaald, prisma, evt. camera. Bekijk de reflectie van de zon via een glimmende verchroomde breipen of haaknaald. Dan zie je het spiegelbeeld van de zon als een felle smalle lijn. Richt je prisma op deze smalle lijn en bekijk deze lijn door het prisma. Zorg ervoor dat de dispersierichting (zie figuur 1.13) van het prisma loodrecht op de haaknaald staat. Geef beschrijving van wat je door het prisma ziet. Maak, indien mogelijk, met een camera een foto van het spectrum.



Figuur 1.14 Het spectrum van de zon zoals Joseph von Fraunhofer dat in 1813 voor het eerst heeft gezien.

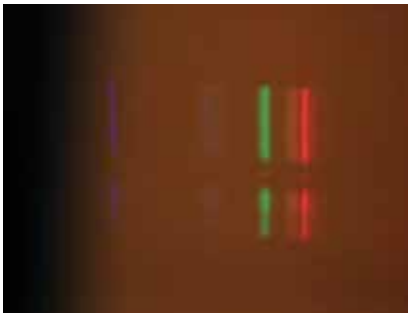
In het spectrum dat we met behulp van het smalle spleetvormige beeld van de zon hebben gemaakt, zien we de Planck-kromme: het licht dat door de fotosfeer op elke golflengte wordt uitgezonden. Echter, wanneer die spleetvormige bron smal genoeg is zien we in het spectrum ook op veel plaatsen donkere lijnen. Deze lijnen werden door Joseph von Fraunhofer in 1813 voor het eerst waargenomen en worden daarom **fraunhoferlijnen** genoemd. Licht met golflengten die horen bij de plaatsen van die donkere lijnen is kennelijk niet aanwezig of ondervertegenwoordigd in het licht dat van de zon in het prisma komt.

De verklaring is dat de zon, evenals andere sterren, boven zijn stralende fotosfeer een atmosfeer heeft die bestaat uit gassen met lage dichtheid. Wanneer het licht van de zon via zijn atmosfeer de ruimte in gaat, worden kennelijk niet alle golflengten evenveel door de gassen in de zonneatmosfeer doorgelaten: licht van bepaalde golflengten wordt door de steratmosfeer **geabsorbeerd**.

Emissieslijnen

12 Oriëntatieopdracht – TL licht

Materiaal: TL-lamp, glimmende verchroomde breipen of haaknaald, prisma, evt. camera. Bekijk het beeld van een TL-lamp via de breipen of haaknaald. Beschrijf zo nauwkeurig mogelijk de vorm van het gespiegelde TL-licht. Richt je prisma op deze cilindervormige spiegel en bekijk het gespiegelde TL-licht door het prisma. Geef beschrijving van wat je door het prisma ziet. Maak, indien mogelijk, met een camera een foto van het spectrum.



Figuur 1.15

Het spectrum van het TL-licht laat een aantal lichte lijnen op specifieke golflengten zien – de rest van het spectrum is donker. Kennelijk zendt de fluorescerende laag van de TL-buis alleen op bepaalde golflengten licht uit en op andere golflengten niet.

Ook van andere lichtbronnen, zoals natriumlampen (oranje licht), hogedruk-natriumlampen (warme kleur wit geel-wit licht), kwiklampen en spaarlampen kunnen we een spectrum bekijken: ze vertonen allen hun eigen patroon van **spectraallijnen**. Kennelijk passen de spectraallijnenpatronen bij het materiaal dat licht geeft, of met andere woorden, de lichtgevende materialen zenden alleen maar licht met specifieke golflengten uit.

Elk element dat licht uitstraalt geeft - door een prisma bekeken - zijn lijnenpatroon bloot. Andersom: zie je door een prisma een bepaald lijnenpatroon, dan kun je opzoeken bij welk element dit patroon hoort!

Drie soorten spectra

We hebben nu drie soorten spectra besproken:

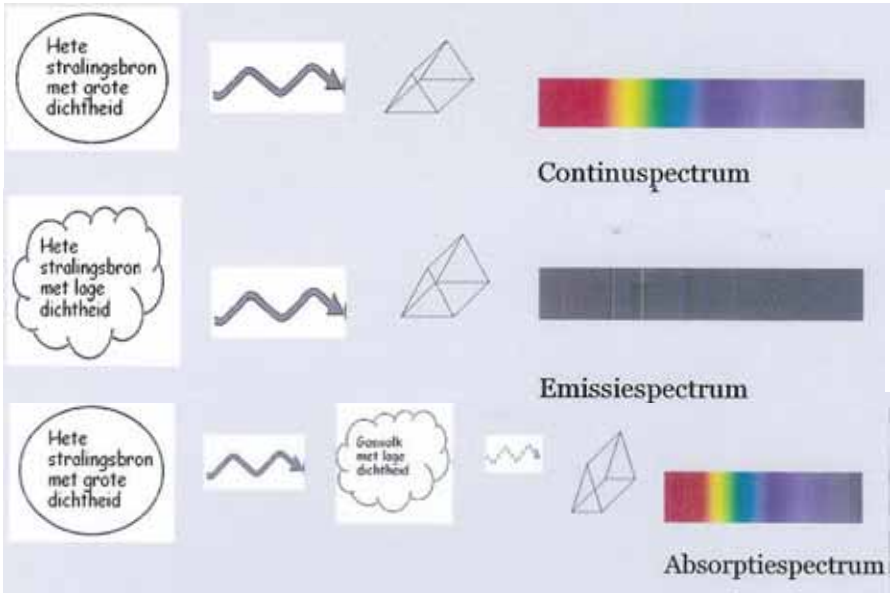
Lichtbronnen als de zon of een gloeilamp zenden voor elke golflengte een andere intensiteit licht uit. De verdeling van intensiteiten wordt gegeven door de Planck-kromme. Dit wordt het **continu spectrum** genoemd. De gedaante van het continu spectrum wordt voornamelijk bepaald door de temperatuur. Een continu spectrum komt van hete stralingsbronnen met een grote dichtheid.

Nauwkeurige waarneming van het continu spectrum van de zon levert op dat bepaalde golflengten erin ondervertegenwoordigd zijn of geheel ontbreken: kennelijk zijn deze golflengten onderweg naar het prisma door iets geabsorbeerd: we spreken in dat geval van een **absorptiespectrum**.

Oplichtend fluorescerend materiaal of gloeiend gas met een lage dichtheid (zoals bij een natriumlamp of kwiklamp) zendt licht uit op specifieke golflengten – op andere golflengten niet; de zichtbare heldere lijnen noemen we

het **emissiespectrum**. Een emissiespectrum komt van bronnen met een lage dichtheid.
Het lijnenpatroon dat we zien in emissie- en absorptiespectra, wordt bepaald door de stoffen, die het licht uitzenden of absorberen. Met andere woorden, de lijnen vormen vingerafdrukken van die stoffen.

In beeld:



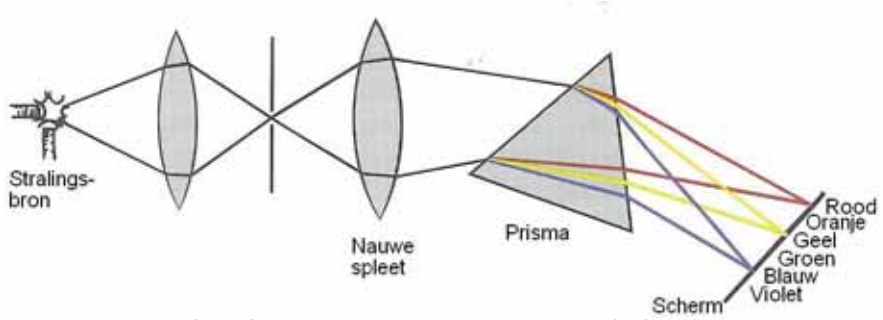
Figuur 1.16

13 Soorten spectra

Leg uit wat voor spectrum je ziet van:

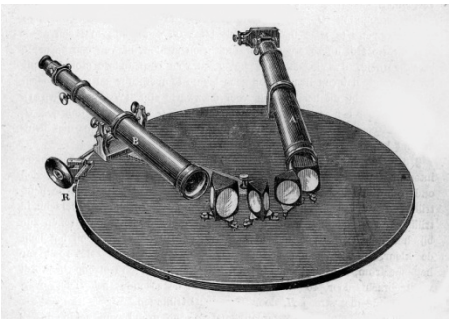
a. Een pas gevormde, nog vloeibare, planeet zonder atmosfeer;
b. Een gaswolk die wordt verhit door een ster; de wolk zit niet tussen ons en de ster in;
c. Een ster

We kunnen in het laboratorium, continu-, emissie- en absorptiespectra maken door de volgende opstellingen:

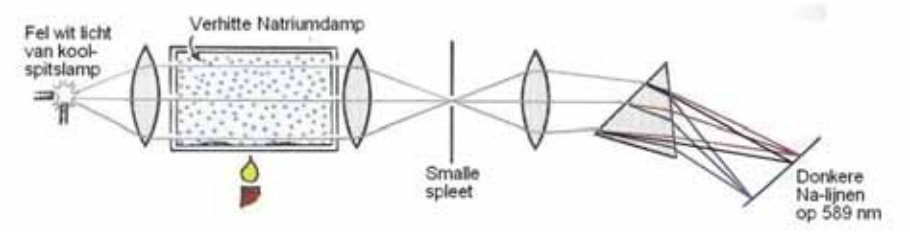


Figuur 1.17 ontleend aan: Hewitt, P.G., Conceptual Physics, p.585, ISBN 0-321-31532-4, bewerkt. Met twee lenzen wordt licht door een dunne spleet gestuurd. Het prisma ontleedt licht in een spectrum op het scherm.

- Continu spectrum: dit verkrijgen we met een hete stralingsbron, zoals een koolspitslamp, die een fel wit licht uitstraalt. Het witte licht van deze lamp vertoont de karakteristiek van een Plank-kromme. Als het licht door een prisma gebroken wordt, verspreidt het zich op het scherm in een continu kleurenband: iedere golflengte heeft zijn eigen plaats op het scherm.
- Emissiespectrum: Kiezen we als stralingsbron een heet gas van lage dichtheid, dan zal alleen licht van bepaalde golflengten - die behoren bij het gas - via het prisma het scherm bereiken - iedere golflengte op zijn eigen plaats.
- Absorptiespectrum**:** Voordat het witte licht van de koolspitslamp via de lenzen het prisma bereikt, gaat dit licht eerst door een container met een verhit gas, bijvoorbeeld natriumdamp. Deze damp absorbeert bepaalde golflengten uit het witte licht – die bij het soort gas horen – de andere golflengten van het witte licht gaan door het gas heen.



Figuur 1.19



Figuur 1.18 ontleend aan: Hewitt, P.G., Conceptual Physics, p.588, ISBN 0-321-31532-4, bewerkt.

Voor een nauwkeurige bepaling van de positie van de lijnen in het spectrum wordt gebruik gemaakt van een spectroscoop. Dit is een opstelling waarmee door een prisma de verschillende golflengten op een geijkte schaalverdeling wordt afgebeeld.

Van bijna alle elementen zijn in het laboratorium de lijnenspectra bepaald. Je zou kunnen zeggen: elk element is zijn eigen "barcode" (streepjescode) toegekend. In het volgende hoofdstuk zullen we zien dat deze barcodes kenmerkend zijn voor de atoomsoorten waaruit stoffen bestaan.

Begrippen

Spectraallijnen
Continu spectrum
Absorptiespectrum
Emissiespectrum

Samenvatting – paragraaf 1.3

Er bestaan drie soorten spectra:

- **Continue spectra**: de intensiteitverdeling van de straling op elke golf lengte heeft in goede benadering de vorm van een Planck-kromme
- **Emissiespectra:** alleen bij bepaalde golflengten is een stralingsintensiteit waarneembaar, afhankelijk van het materiaal dat straalt.
- **Absorptiespectra:** een spectrum, waaruit bepaalde golflengten zijn verdwenen.

- Aan de hand van het **lijnenpatroon** van **emissiespectra** of **absorptiespectra** valt een stof te identificeren ("vingerafdruk" of "barcode" van een stof).

1.5 Extra: De Planck formule

Paragraafvraag	Wat is de formule voor de Planck kromme?



Figuur 1.20

Waarnemingen van de hoeveelheid straling bij verschillende golflengten aan lichtbronnen en sterren kunnen vaak heel goed weergegeven worden door een grafiek die de vorm heeft van een Planck kromme; zie figuur 1.8. Ook blijkt de totale hoeveelheid uitgezonden energie alleen af te hangen van de temperatuur. Maar waarom is dat zo?

Veel natuurkundigen hebben in de 19e eeuw daarop een antwoord gezocht. De natuurkundige Max Planck heeft uiteindelijk in 1900 een afleiding gegeven voor de formule die de Planck-kromme beschrijft. Deze formule geeft het verband tussen de hoeveelheid stralingsvermogen per vierkante meter van een stralend oppervlak voor een gegeven golflengte. Dit vermogen is alleen afhankelijk van de absolute temperatuur *T*.

De Planck-formule is van groot belang want daarmee kunnen we veel te weten komen over de eigenschappen van stralingsbronnen zoals sterren en de zon. De formule is ook van fundamenteel belang omdat Planck bij de afleiding veronderstelde dat licht uit kleine golf-energiepakketjes bestond, die we nu fotonen noemen. Dit was het begin van een nieuwe theorie die de quantummechanica heet.

Wil je meer weten over de gedachtegang die bij verschillende natuurkundigen tot de ontwikkeling van de quantummechanica hebben geleid lees: "Quantummechanica voor beginners" van J.P Envoy en Oscar Zarate, uitg. Elmar BV., Rijswijk, ISBN 90389-05483. (Nevenstaande illustratie is aan dit boek ontleend.)



Figuur 1.21
Max Planck (1858 – 1947)
bron:nl.wikipedia.org/wiki/
Afbeelding:Max_planck.jpg

Quanta

We zullen hier niet de afleiding van Planck volgen, maar toch enigszins een verduidelijking geven via welke gedachtegang Planck op het idee van zijn stralingsfunctie gekomen is.

Hij baseerde zich in eerste instantie op het idee van bewegende moleculen in een gas. Als het aantal moleculen met een bepaalde de kinetische energie wordt uitgezet tegen de kinetische energie, dan blijkt dat er weinig moleculen zijn met kleine energie, meer met hogere energie, een maximale hoeveelheid bij de gemiddelde energie en dan weer een steeds meer afnemend aantal bij nog hogere energieën.

Zoals bij een gas de kinetische energieën over de gasdeeltjes zijn verdeeld, zo moet - dacht Plank - ook de stralingsenergie die atomen uitstralen bij hoge temperatuur zijn verdeeld. Je kunt atomen met een bepaalde energie "tellen", maar kun je ook de hoeveelheid straling "tellen"? Dit kan alleen als de straling wordt uitgezonden in afzonderlijke golf-pakketjes met elk een eigen energie-inhoud. Voor licht had Planck het idee uitgewerkt, door aan te nemen dat de energie-inhoud van die pakketjes evenredig moest zijn met de frequentie:

$$E = hf$$

Hierin is *f* de frequentie van het licht en *h* een constante die Planck nog moest bepalen. Deze kleine 'golf-energiepakketjes' werden door Planck *quanta* **(***kwanta***)** genoemd, meervoud van het Latijnse *quantum*. We noemen deze golf-energiepakketjes nu *fotonen*. *E* is dus de fotonenergie.

Planck verdeling



Figuur 1.22 Max Planck in het jaar 1918 toen hij de Nobelprijs ontving voor zijn werk aan de quantumtheorie. Bron: en.wikipedia.org/wiki/File:Planck-Nobel.jpg

Planck ging vervolgens op zoek naar een passende functie waarin de energieverdeling van de stralingspakketjes als functie van de frequentie *f* met de waarnemingen overeenkwam. Beschouw de wiskundige functie:

$$f(x) = \frac{Ax^3}{e^{Bx} - 1}$$

Als hiervan een grafiek wordt getekend neemt deze in zeer goede benadering de vorm van de Planck-kromme aan. Je kunt dat gemakkelijk zien op je grafische rekenmachine. Begin met *A*=1 en *B*=1 en experimenteer vervolgens met enige verschillende waarden van *A* en *B*.

Planck veronderstelde nu dat de stralingsenergie bij frequentie *f* door deze functie werd gegeven, dus:

$$E(f) = \frac{Af^3}{e^{Bf} - 1}$$

Planck heeft met een geduld en een doorzettingsvermogen, waar menig Groningse trekpaard jaloers op mag zijn (in die tijd bestonden nog geen grafische rekenmachines!), de constanten en de juiste exponenten in de functie bepaald die het beste overeenkwamen met de waargenomen frequentieverdeling:

$$A = \frac{2\pi h}{c^2} \qquad B = \frac{h}{k_B T}$$

Hierin is *h* de constante van Planck, *c* de lichtsnelheid, k_B de constante van Boltzmann, en *T* de temperatuur. De waarden van de lichtsnelheid en de constante van Boltzmann waren al bekend. Planck kon op deze wijze uit de waarnemingen de (zeer kleine) waarde van de constante *h* bepalen. De energieverdeling met deze waarden voor de parameters A en B staat bekend als de *Planck-verdeling*.

De parameter *B* blijkt dus omgekeerd evenredig met de temperatuur. Als we dit invullen krijgen we voor de exponent van de e-macht:

$$Bf = \frac{E}{k_B T}$$

Dus de exponent wordt bepaald door de verhouding van de fotonenergie *E* tot de gemiddelde energie van de warmtebeweging ($k_B T$). Voor Planck was het verband $E = h.f$ echter nog niet meer dan een wiskundig hulpmiddel om de juiste formule voor de stralingsverdeling te vinden.

Omdat we van licht makkelijker de golflengte kunnen meten dan de frequentie, wordt de Planck-verdeling vaak weergegeven in de golflengte λ i.p.v. in *f,* waarbij λ en *f* samenhangen via de relatie $\lambda f = c$ (de lichtsnelheid).

Formule voor de Planck verdeling

De Planck-verdeling weergegeven in de golflengte:

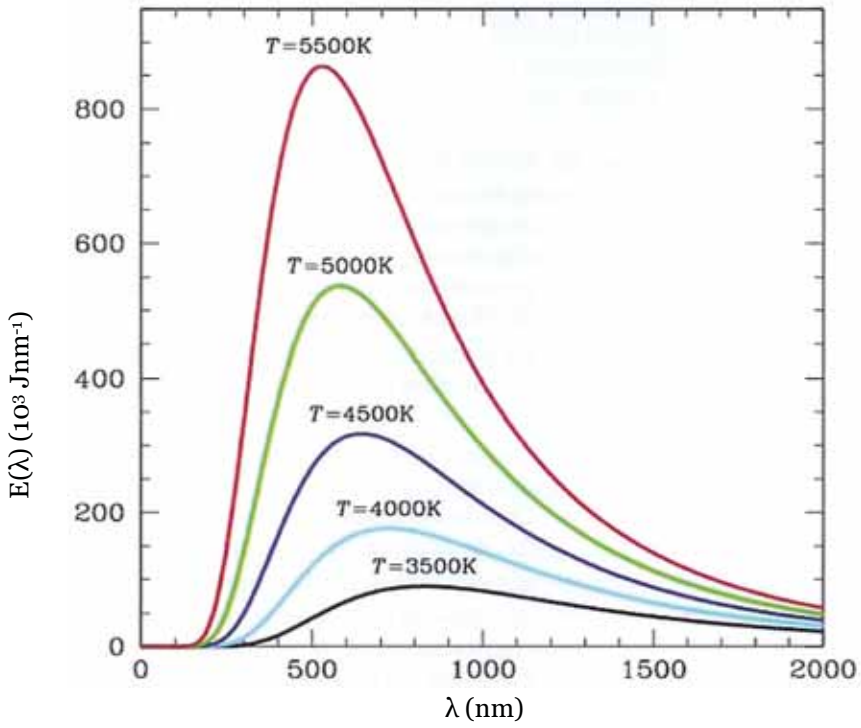
$$E(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Symbolen: $E(\lambda)$ staat voor uitgezonden energie bij golflengte λ (in m), T voor de absolute temperatuur (in K). De constanten zijn de Boltzmann constante k, de lichtsnelheid c en de constante van Planck h (Binas – tabel 7).

Geldigheid: deze formule is zeer algemeen geldig voor lichamen, die door hun temperatuur straling uitzenden.

Deze formule lijkt moeilijk, maar als we er goed naar kijken zien we dat er maar twee veranderlijke grootheden in zitten: namelijk de golflengte λ en de temperatuur *T*. De uitgestraalde energie hangt dus af van zowel de golflengte λ als van de temperatuur *T*. Alle andere symbolen in deze formule zijn z.g. 'natuurconstanten' en staan vermeld in tabel 7 van Binas.

Hoe werk je met deze formule? Neem je een bepaalde temperatuur, dan heeft $E(\lambda)$ uitgezet tegen λ de gedaante van een kromme, die de Planck-kromme heet. $E(\lambda)$ is de hoeveelheid uitgezonden straling op een golflengte λ binnen een bandbreedte van 1 nm. Verschillende temperaturen geven ons verschillende krommen die overeenkomen met de gemeten krommen in figuur 1.13.



Figuur 1.23 Bron: en.wikipedia.org/wiki/Image:Wiens_law.svg

Kosmische achtergrondstraling

In 1965 vonden Arno Penzias en Robert Wilson geheel per toeval met een radiotelescoop een achtergrond signaal uit de ruimte dat niet uit een bepaalde richting kwam en kennelijk niet werd uitgezonden door een lokaliseerbare bron in het heelal. (Het ruissignaal op de TV bestaat voor ongeveer 1% uit deze achtergrondstraling.) Uit verder onderzoek bleek het energiespectrum van dit signaal precies de Planckse vorm te hebben met een temperatuur van T= 2,73 K.

De verklaring voor dit signaal wordt gegeven door de kosmologie: de achtergrondstraling is het restant van straling van het heelal die veel heter was, ongeveer 400.000 jaar na de oerknal. Door de uitzetting van het heelal zijn de golflengten van deze straling die toen een temperatuur aangaf van ca. 3000 K zoveel naar het rood verschoven, dat deze straling nu behoort bij een temperatuur van 2,73 K.

Na Penzias en Wilson is veel onderzoek gedaan aan de kosmische achtergrondstraling onder andere door ballonnen die men tot grote hoogte vanaf het aardoppervlak liet opstijgen. Men was vooral op zoek naar de relatie tussen de uitgezonden golflengten en de intensiteit van de straling. De theorie voorspelde dat de straling gelijk aan die van een Planckse straler moest zijn, een voorspelling die is uitgekomen met een niet-te-geloven nauwkeurigheid! In figuur 1.14 zijn de gemeten data weergegeven. In deze figuur zie je eveneens de voorspelde Planck-kromme. De foutenmarge van de metingen is zo klein dat die allen binnen deze Planck-kromme vallen.

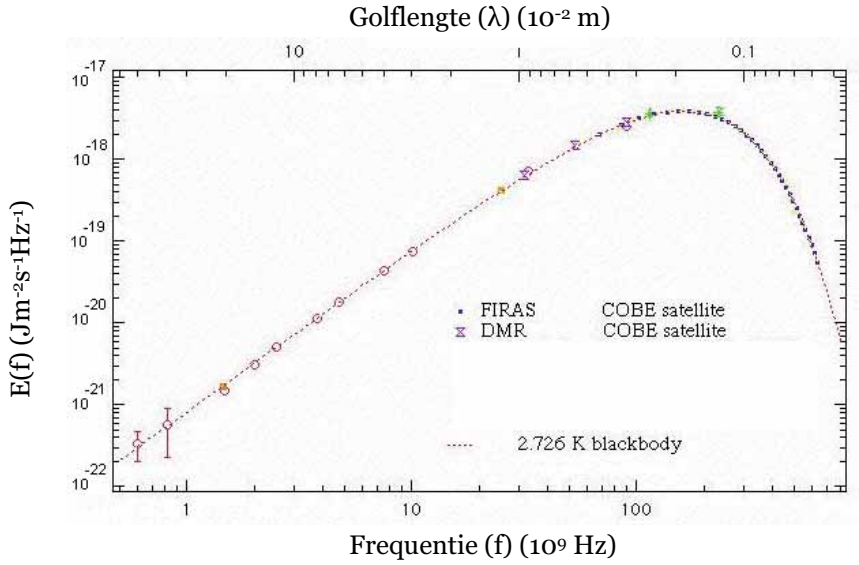
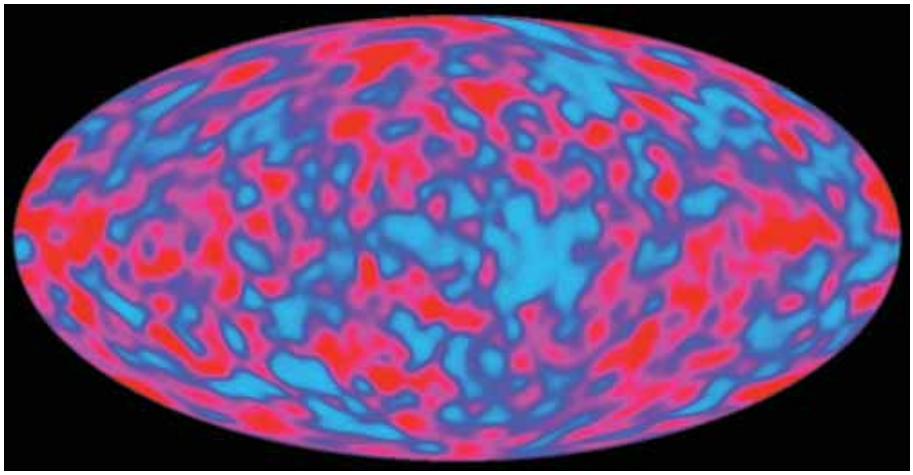


Fig. 1.24 De kosmische achtergrondstraling, zoals gemeten door twee instrumenten van de COBE satelliet en enkele andere waarneeminstrumenten op grote hoogte, zoals waarneemballonnen en sondeerraketten. De gemeten waarden door de instrumenten van COBE staan in de figuur aangegeven. Merk op, dat de intensiteit hier is weergegeven als afhankelijk van de stralingsfrequentie – de overeenkomstige golflengten staan boven het diagram aangegeven. (Bron: NASA)

De waarnemingen in 1992 van de COBE satelliet (Cosmic Background Explorer) bevestigden dit. Cobe bracht ook de temperatuurverschillen in kaart. Het bleek toen dat de achtergrondstraling zeer gelijkmatig was, met slechts minimale fluctuaties. Het zijn, echter, wel déze fluctuaties waaraan we sterren, planeten en ons eigen bestaan aan te danken hebben!



Figuur 1.25 De temperatuur van de achtergrondstraling zoals gemeten door de COBE satelliet. (Bron: apod.nasa.gov/apod/ap061007.htm). Zeer kleine temeperatuurvariaties zijn zichtbaar. De rode gebieden geven een iets hogere temperatuur aan dan de blauwe gebieden.

Het bestaan van de achtergrondstraling wordt beschouwd als het belangrijkste bewijs voor de oerknaltheorie. De achtergrondstraling is ook de bevestiging van het zeer universele karakter van de formule van Planck.

In juni 2001 werd de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) gelanceerd. De eerste gegevens kwamen in februari 2003 binnen en toonden in veel groter detail de temperatuurfluctuaties van de kosmische achtergrondstraling. De bestudering van de achtergrondstraling heeft veel nieuwe inzichten opgeleverd, zoals een precieze datering van de oerknal op 13,7 miljard jaar geleden en het ontstaan van de eerste sterren zo'n 200 miljoen jaar na de oerknal.

Opgaven

§1.1 Betekenis van de zon als bron van energie.

14 Zonneconstante op andere planeten.

Bereken de zonneconstante op Mercurius en op Neptunus. Zoek de benodigde gegevens op in Binas.

15 Bakken in de zon.

Bereken hoeveel energie van de zon je gezicht treft wanneer je een uur in de zon ligt te bakken. Maak daartoe een redelijke schatting van de oppervlakte van je gezicht. Hoeveel water kun je met deze energie aan de kook brengen? Neem aan dat het aan de kook brengen van 1 liter water met een begintemperatuur van 20° C aan energie ongeveer $3{,}3.10^5$ J kost. Wat is je conclusie na deze berekening over de tijdsduur dat je in het volle zonlicht kunt zonnebaden?

16 Opgevangen zonne-energie door onze aarde.

Stel we kunnen de volledige zonne-energie, die op de aarde valt, gedurende één seconde aftappen om aan onze energiebehoefte te voldoen. We verbruiken wereldwijd ongeveer $4{,}6 \cdot 10^{20}$ J per jaar (gegevens 2006).

Bereken, hoelang we deze opgevangen zonne-energie kunnen gebruiken. Zoek de benodigde gegevens op in Binas.

Extra

Met het licht van een felle lamp, bijvoorbeeld van een overheadprojector of een beamer kun je met een bol een schaduw op een muur laten zien. Doe dat. Het licht dat op de bol valt, komt niet op de muur terecht. Kun je misschien op deze manier beredeneren, wie in opgave 17 gelijk heeft: Ahmed of Fleur.

17 Plat of rond

Twee leerlingen, Ahmed en Fleur, hebben een meningsverschil over het berekenen van het totale hoeveelheid energie die de aarde per seconde van de zon ontvangt. Ahmed heeft die berekend, door de zonneconstante te vermenigvuldigen met πR^2, waarbij R de straal van de aarde is. Fleur werpt tegen, dat we niet op een schijf leven, zoals we in de middeleeuwen dachten maar op een bol! Volgens haar moeten we de zonneconstante met $4\pi R^2$ vermenigvuldigen.

Geef je mening over wie van de twee gelijk heeft en bereken de energie van de zon, dat we jaarlijks op de aarde opvangen.

18 Warmtestraling

Dezelfde twee leerlingen uit de vorige opgave verschillen ook nog van mening, of ze de eerste proef met de lamp (oriëntatieopdracht 1) wel mogen gebruiken om de totale hoeveelheid energie van de zon te bepalen. Ahmed is van mening, dat dit niet kan, omdat je immers alleen de warmtestraling van de zon voelt, terwijl de zon ook nog andere soorten straling uitzendt, zoals radiostraling, UV-straling en zichtbaar licht. Fleur brengt daartegen in, dat ze weliswaar alleen de warmte hebben gevoeld, maar dat de lamp net zo'n witgeel licht als de zon uitstraalt. Fleur: "De lamp van 100 W zal dus ook wel niet alleen licht en warmte uitstralen! Het zal niet helemaal precies gelijk zijn aan de zon, maar de proef geeft toch wel een redelijke indruk!"

Geef je eigen argumentatie over dit gesprek tussen Ahmed en Fleur.

19 Extra

Dankzij Newton's inzicht dat de gravitatiekracht tussen twee lichamen dient als middelpuntzoekende kracht, kunnen we de massa van de zon berekenen. We weten immers nauwkeurig de omlooptijd van de aarde.

a. Bereken de massa van de zon: M_{zon}. Stel hiertoe de gravitatiekracht van de zon op de aarde gelijk aan de middelpuntzoekende kracht.

De zon is (zoals ook andere sterren) in de ruimte ontstaan uit de samenklontering van grote wolken waterstofgas met een massa van de zon. Door de onderlinge gravitatiekracht zijn de atomen naar elkaar toe 'gevallen'. Zodoende is tijdens de vorming van de zon 'zwaarte'-energie omgezet in kinetische energie. Al deze energie zit uiteindelijk opgeslagen in het volume van de gasbol, die we de zon noemen. Waar is deze energie gebleven en wat merken we daarvan?

Om een indruk te krijgen hoeveel gravitatie-energie bij het samentrekken van waterstofwolken tot de zon is vrijgekomen, gaan we uit van de volgende vergelijking:

$$E_G = G \cdot \frac{M_{zon}^2}{R_{zon}}$$

Hierin is: G de gravitatieconstante, M_{zon} de massa van de zon en R_{zon} de straal van de zon.

b. Bereken hiermee de totale gravitatie-energie, die bij de vorming van de zon in de zon is samengetrokken.

Helmholtz en Kelvin dachten dat de in de vorige opgave berekende gravitatie-energie als bron diende voor de straling, die door de zon wordt uitgezonden.

c. Bereken hoelang de zon met behulp van deze energie vooruit kan, voordat hij is uitgestraald?
d. Oordeel aan de hand van de uitkomst van je berekening of Helmholtz en Kelvin het bij het rechte eind hadden.
e. Kun je zelf nog andere mogelijke verklaringen vinden voor de straling, die de zon uitzendt?

§1.2 Kleur en oppervlaktetemperatuur van de zon.

20 Planck-kromme van de zon.

In de Planck-kromme van de zon is de golflengte, waarop de stralingsintensiteit het grootste is, λ_{max}, 500 nm. Bereken T_{eff} van de zon.

21 Zonnevlekken op de zon.

Regelmatig treffen we op het oppervlak van de zon gebieden aan, de z.g. zonnevlekken, waarvan in het spectrum λ_{max} 750 nm bedraagt.

Bereken de effectieve temperatuur van zo'n zonnevlek.

Leg uit dat een zonnevlek 'zwart' lijkt.

22 Wat is je eigen maximale golflengte?.

Beschouw jezelf als stralend lichaam (in de natuurkundige betekenis). Bereken met gebruikmaking van de wet van Wien, op welke golflengte jouw uitgestraalde vermogen maximaal is. In welk gebied van het elektromagnetisch spectrum bevindt zich deze golflengte?

23 Bellatrix

De heldere ster Bellatrix in het sterrenbeeld Orion heeft een oppervlakte temperatuur 21500 K.

a. Bij welke golflengte straalt deze ster maximaal?
b. Welke kleur heeft deze ster?

24 Betelgeuze

De heldere ster Betelgeuze in hetzelfde sterrenbeeld Orion zendt de meeste straling uit met een golflengte van 853 nm.

a. Wat is de oppervlaktetemperatuur van Betelgeuze?
b. Welke kleur heeft deze ster?

25 Gloeilamp

Het experiment uit oriëntatieopdracht 2 suggereert een verband tussen de kleur van het licht en de temperatuur van de gloeidraad. We kunnen de temperatuur van de gloeidraad berekenen met behulp van de weerstands-temperatuurcoëfficënt α, als de lamp van 100 W brandt op een spanning van 230 Volt. De weerstands-temperatuurcoëfficënt geeft aan, hoeveel de weerstand ervan per graad temperatuurstijging verandert. We nemen aan dat α constant is voor wolfraam. Dit metaal gebruikt men tegenwoordig voor gloeidraden in een lamp. Voor de toename van de weerstand bij een temperatuurverandering ΔT mogen we uitgaan van het volgende verband:

$$\Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta T$$

met:

- ΔR de weerstandstoename van de lamp: R_T-R_o (in Ω)
- R_0 de weerstand bij kamertemperatuur (in Ω)

  Neem voor de gebruikte lamp: $R_0 = 38\Omega$

  (of meet eerst de weerstand van de gebruikte lamp bij kamertemperatuur)
- α de weerstands-temperatuurcoëfficënt (in K^{-1})

  $\alpha_{\text{wolfraam}} = 4{,}9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$
- ΔT de temperatuurverandering (in K)

a. Meet R_o, de weerstand van de gloeidraad van de lamp bij kamertemperatuur en bereken met deze gegevens de temperatuur van de gloeidraad van deze lamp, als deze voluit brandt op 230 V. Meet tevens de omgevingstemperatuur ("kamer"temperatuur).
b. De weerstand van de lamp wanneer die brandt op 230 V, R_T, kun je berekenen uit het vermogen van de lamp
c. Bereken de temperatuur T van de brandende lamp met de hierboven gegeven formule en de antwoorden van de vragen a en b.
d. Open het bestand Planck-kromme (2) op de leerlingen ICT-disk en stel de temperatuur in op de onder vraag c berekende waarde. Vergelijk de kleur die je ziet met de kleur van de lamp. Zie je verschillen? Leg deze uit!

(N.B. een soortgelijk appletprogramma is ook te gebruiken via de website: virtueelpracticumlokaal.nl → Quantumfysica → Verschuivingswet van Wien: Je kunt hierin echter niet alle temperaturen invoeren)

26 Opdracht (internet of applet):

a. Open het bestand: Planck-kromme(1) op de leerlingen ICT-disk (dubbelklik op Planck-kromme(1).htm) en voer de opdrachten daarin uit.

b. Bepaal m.b.v. het bestand Planck-kromme(1) bij verschillende temperaturen (T), op welke golflengte (λ_{max}) zich de piek van de Planck-kromme bevindt. Maak twee grafieken:

- T uitgezet tegen λ_{max}
- 1/T uitgezet tegen λ_{max}

Deze opdracht kan uiteraard ook op de grafische rekenmachine worden uitgevoerd.

In het diagram, waarin T tegen λ_{max} is uitgezet, valt te zien dat T omgekeerd evenredig is met λ_{max}. In het diagram waarin 1/T tegen λ_{max} is uitgezet, blijkt het verband lineair te zijn. M.a.w.: $1/T = \text{constante} \cdot \lambda_{max}$!

Deze constante is door Wien bepaald en is daarom naar hem genoemd: de constante van Wien: k_w.

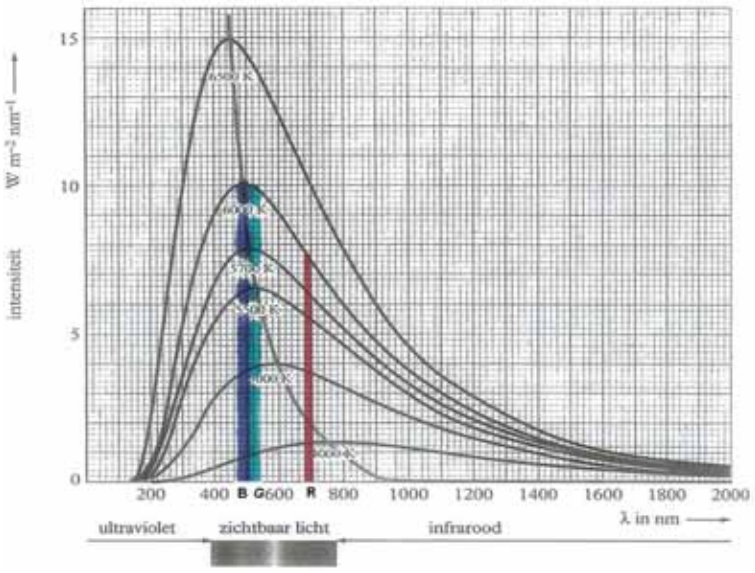
c. Bepaal uit het diagram in de vorige opdracht de constante van Wien: k_w. Vergelijk deze met de waarde in Binas.

Extra

In de Planck-kromme van een stralend oppervlak, zoals die van de zon, heeft elke golflengte zijn eigen intensiteit. Door het zonlicht via drie filters op te vangen: een roodfilter (rond λ = 685 nm), een groenfilter (rond λ = 525 nm) en een blauwfilter (rond λ = 485 nm) kan de onderlinge verhouding van de hoeveelheid opgevangen vermogen in elk van de drie kleuren (De RGB-kleuren) worden bepaald. De verhouding wordt bepaald door het verloop van de Plank-kromme. Zie de figuur, waarin de drie kleurenbanden op hun bijbehorende golflengten staan weergegeven. We spreken van kleurenbanden, omdat de filters niet precies één golflengte doorlaten, maar ook de naburige golflengtes, m.a.w. een golflengtebied. Uiteraard hangt het van het soort filter af, hoe groot dat golflengtegebied is.

27 Temperatuur van de zon

De intensiteit van de zonnestraling is met een fotometer gemeten en 'piekt' in het gele gebied - bij een golflengte van 500 nm. Bereken de temperatuur aan het stralende oppervlak van de zon. Bekijk in het bestand Planck-kromme (1) of dit met de piek in de Planck-kromme overeenstemt!



Figuur 1.26

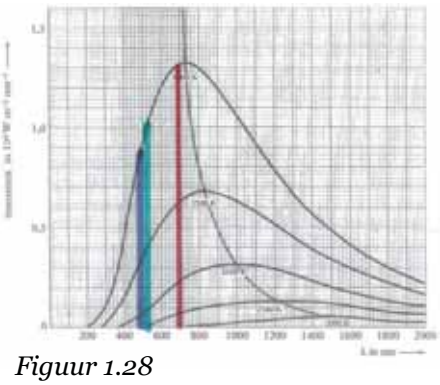


Figuur 1.27

28 Extra - De rode ondergaande zon

Op een mooie zomeravond, vlak voordat de zon ondergaat, heeft die een mooie rode kleur.

Aannemende dat deze kleurverandering niet het gevolg van een dagelijkse temperatuursverandering op de zon in de avonduren is, wat kan een verklaring hiervoor zijn? Maak, indien mogelijk, van de zon op verschillende hoogten opnamen met een digitale camera en laat zien, dat de opkomen of ondergaande zon roder van kleur is.



Figuur 1.28

Extra

De intensiteitsverhoudingen in RGB als maat voor de Planck-kromme

We hebben geconstateerd:

- Bij elke Planck-kromme hoort een vaste verhouding van de intensiteiten in elk van de RGB-kleurenbanden.
- Bij elke Planck-kromme van een stralend voorwerp hoort een temperatuur ervan (verschuivingswet van Wien)

Dus: als van een stralend voorwerp de verhoudingen van de intensiteiten in de RGB-banden kunnen worden bepaald, dan kan ervan de totale kleur, de Planck-kromme en dus de temperatuur worden bepaald.



Figuur 1.29

29 Extra – RGB-kleurenbanden

In het programma Planckkromme(2) kun je de plankkromme zien in samenhang met de intensiteit van de straling in de RGB-kleurenbanden.

Open het bestand: Planck-kromme(2) op de Leerlingen ICT-disk (dubbelklik op Plank-kromme(2).htm) en bekijk, wat voor invloed de temperatuur heeft op de planck-kromme en op de intensiteit in de rode, groene en blauwe kleurenbanden. In het display staat ook een indruk van de totale kleur van het stralende object weergegeven. Doe dit voor 10000 K, 7500 K 5000 K en 2500 K . Klopt dit met de kleur van de zon?

30 Extra – Bepaling temperatuur uit RGB-verhoudingen

De verhoudingen van de intensiteiten van de kleuren RGB kun je invoeren in het via internet op te starten programma CIE Color Calculator: http://brucelindbloom.com/index.html?ColorCalculator.html. Dit programma berekent de kleurtemperatuur van een stralend object uit de verhouding van de lichtintensiteit in de kleurenbanden RGB met de bijpassende Planck-kromme.

Na het opstarten van het programma zie je een groot aantal velden – we gebruiken alleen de drie velden rechts van het vakje RGB. Naast het vakje RGB Model staat ingevuld sRGB (standaard RGB). Dit laten we onveranderd. In figuur 1.20 zijn de verhoudingen tussen RGB af te lezen. Vul deze verhoudingen in op de daarvoor bestemde vakjes. Klik vervolgens op RGB en de temperatuur wordt vervolgens weergegeven rechts van het vakje Color Temp. Vind je dit een nauwkeurige methode?

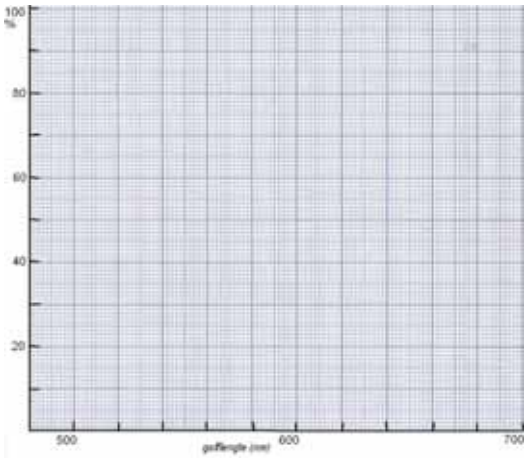
31 Extra – Plankkromme uit verhoudingen RGB

Zoals op beeldschermen (TV, LCD) is te zien, is met een variatie in intensiteit van de kleuren van RGB, elke kleur te maken.

Op de Leerlingen ICT-disk staat het programma RGB.exe (*zie opmerking aan eind van de opgave). Start het programma op en druk nog een keer op ENTER. Dan zie je links op het scherm drie verticale kleurenbalken RGB. Je kunt de met de horizontale pijltjestoetsen een van de kleurenbalken activeren en vervolgens met de verticale pijltjestoetsen de bijdrage (in procenten) van die kleur aan het middelste (overlappende) gedeelte van drie kleurencirkels instellen. Bekijk de kleur in het middelste gedeelte van de drie kleurencirkels voor verschillende percentages van de kleuren RGB.

We nemen vervolgens aan dat van een stralend object de bijdrage van de kleur R (rood) 50% is, van G (groen) 80% en van B (blauw) 35%.

a. Teken deze punten in een diagram in, zoals in de figuur is weergegeven. Zet de percentages uit tegen de golflengte. Neem voor R 685 nm, voor G 525 nm en voor B 485 nm. Teken door de punten zo nauwkeurige mogelijk een Planck-kromme en bepaal uit het maximum ervan de temperatuur van het stralende object. Je zult merken dat dit niet eenvoudig is!



Figuur 1.30

b. Om het eenvoudiger te maken kun je met programma CIE Color Calculator beter eerst de temperatuur bepalen, waardoor je te weten kunt komen bij welke golflengte de maximale stralingsintensiteit wordt bereikt. Hoe bepaal je die? Maak hierna een schets van de Planck-kromme

*Als alternatief programma kun je ook gebruiken: www.virtueel-practicumlokaal, kies: Optica⟶Kleurmenging⟶Intensiteit van kleuren.

Lees eerst de aanwijzingen voor de animatie.

Extra

*) Enige opmerkingen over het maken van opnamen van lichtgevende objecten:

- Het licht dat op het grijskarton valt, is in feite een mix van direct zonlicht (welke een iets rodere kleur heeft) dan 5800 K en het strooilicht dat via de blauwe lucht op het grijskarton valt (heeft een hogere kleurtemperatuur). Ook de hoogte van de zon boven de horizon en eventuele bewolking is bepalend voor de uiteindelijk te meten T_{kleur}. Om de invloed van de zonshoogte boven de horizon te bepalen is het aan te bevelen, de opnamen op verschillende tijdstippen van de dag te doen.
- De meeste camera's hebben een automatische witbalansinstelling, waardoor de RGB-verhouding wordt aangepast aan de helderheid en soort licht, waarin de opname wordt gemaakt. Het is daarom noodzakelijk de automatische witbalans van de camera uit te zetten en deze op 'daglicht' in te stellen.

32 Extra – Fotografische bepaling RGB van de zon

Je kunt zelf met een (eenvoudige) digitale fotocamera opnamen maken van gereflecteerd zonlicht op fotografisch grijskarton (grey-card van bijv. het merk Jessops), welke door professionele fotografen wordt gebruikt om de kleurzuiverheid van hun foto's te kunnen bepalen. Het door het grijskarton gereflecteerde zonlicht wordt in een bepaalde RGB-verhouding door de camera opgenomen. De opname kan vervolgens met een beeldverwerkingsprogramma (zoals AIP of ArcSoft Photostudio5 worden bekeken).

De RGB-waarden van alle pixels staan weergegeven en kunnen vervolgens worden ingevoerd in het bovengenoemde programma CIE Color Calculator. Dit programma berekent dan de kleurtemperatuur van het gereflecteerde zonlicht, dus eigenlijk de temperatuur van de zon! *) zie ook de opmerkingen hiernaast.

Maak ook eens een opnamen van de maan, en analyseer deze opname als in de vorige opdracht. Alhoewel het resultaat nogal zal afhangen van de omstandigheden - kun je van te voren inschatten welke temperatuur het programma CIE Color Calculator in principe voor je van het maanlicht zal berekenen?

§1.3 Lichtkracht van de zon.

33 Op twee manieren de temperatuur bepalen.

Geef in eigen bewoordingen weer hoe we uit de stralingskromme van de zon op twee verschillende manieren de temperatuur van het oppervlak van de zon kunnen bepalen.

34

Een gloeiend object zendt licht uit. Gebruik de wet van Wien en Stefan-Boltzmann om uit te leggen waarom de kleur en intensiteit van het licht veranderen, als we de temperatuur verhogen.

35 Uitgestraalde vermogen van de zon.

Zoek de effectieve temperatuur van het oppervlak van de zon op in BINAS tabel 32B. Hoe groot is het uitgestraalde vermogen per m^2 zonoppervlak? Vergelijk dit met het vermogen van de Eemscentrale in Noord Groningen, welke een vermogen van 1700 MW levert.

Hoe groot is het totale vermogen dat de zon uitstraalt?

36

We kunnen van een ster de stralingskromme bepalen.

a. Leg uit wat we van die ster nog meer moeten weten, voordat de lichtkracht ervan kan worden bepaald.
b. Bereken met behulp van gegevens uit BINAS tabel 32B de lichtkracht van de sterren Sirius A, Sirius B en Betelgeuze.

37 Een huiveringwekkend toekomstscenario.

Over ongeveer 5 miljard jaar, als de nucleaire 'brandstof' van de zon begint op te raken, zal de zon opzwellen en veranderen in een z.g. "Rode Reus". De straal van de zon zal dan zo groot zijn als die van de baan van de planeet Mars! De oppervlaktetemperatuur van de zon zal tegelijkertijd dalen tot ongeveer $3{,}5 \cdot 10^3$ K. Bereken in deze toestand de lichtkracht van de zon.

Vergelijk die met de huidige lichtkracht.

38

De ster Alpha Lupi heeft een oppervlakte temperatuur van 21 600 K. Hoe groot is het verschil in de hoeveelheid uitgezonden energie per vierkante meter tussen Alpha Lupi en onze zon?

39

Io is een maan van de planeet Jupiter. Op Io bevindt zich een actieve vulkaan, genaamd Pele. Deze vulkaan kan temperaturen bereiken tot wel 320°C.

a. Wat is de golflengte waarbij deze vulkaan het meeste licht uitzendt?
b. In welk deel van het elektromagnetisch spectrum ligt deze golflengte?
c. De gemiddelde temperatuur van het oppervlakte van Io is -150°C. Bereken het verschil in uitgestraald vermogen tussen een vierkante meter van Pele en een vierkante meter van de rest van het oppervlak.

§1.4 Vingerafdruk van de zon.

40

Een opgave voor speurneuzen:

In een laboratorium wordt van een gasmengsel het volgende absorptiespectrum opgenomen:



Fig. 1.31

Bepaal aan de hand van de lijn*patronen* met behulp van BINAS tabel 20 welke stoffen zich mogelijk in dit gasmengsel bevinden.

41

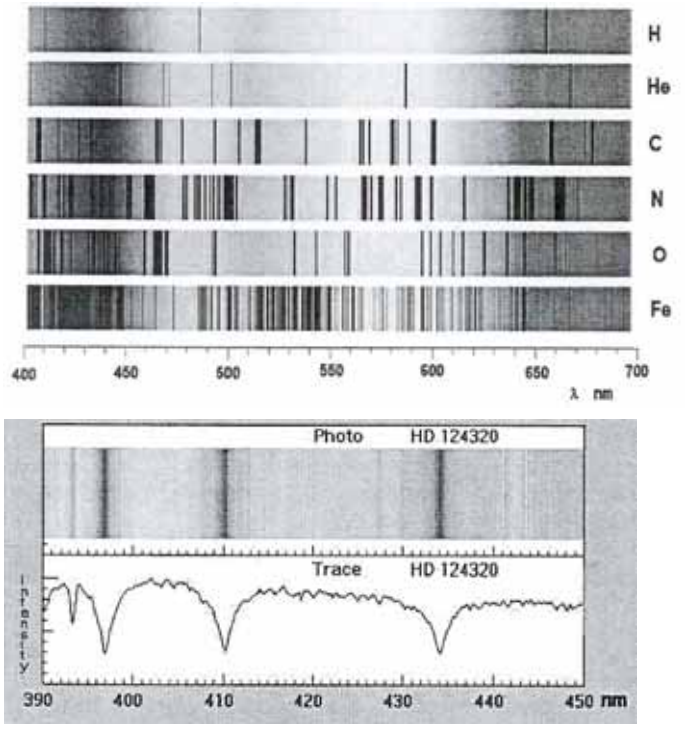
Er wordt een spectrum opgenomen van een ster die zich in een wolk van stof en gas bevindt. In het spectrum worden, naast de gebruikelijke absorptielijnen, ook een paar emissielijnen waargenomen. Verklaar hoe deze emissielijnen kunnen ontstaan.

42 Lijnenspectrum van de volle maan.

Je maakt via een nauwe lichtspleet en een prisma een opname van de volle maan. Leg uit of je met deze opname een lijnidentificatie van de zon kunt doen.

43 Lijnidentificatie.

In Binas tabel 20 staan enkele spectra van veel voorkomende elementen. In figuur 1.25 hieronder staat een stukje van de stralingskromme van een ster. Geef aan welke elementen je herkent in deze stralingskromme. Dit is, gezien het verschil in de schalen van λ, niet gemakkelijk!



Figuur 1.32

2 Straling en materie

Straling bevat informatie over materie en over zichzelf

Hoofdstukvraag	**Wat is de wisselwerking tussen materie en straling?**

In het vorige hoofdstuk zagen we dat het stralingsspectrum lijnen kan bevatten: emissielijnen en absorptielijnen. In dit hoofdstuk zullen we zien hoe we deze 'unieke vingerafdruk' kunnen lezen.

Dit hoofdstuk gaat over de fundamentele eigenschappen van licht. We zullen zien dat licht elektromagnetische straling is uitgezonden door atomen. Atomen zijn fundamentele stralingsbronnen en elektromagnetische straling is een vorm van energie met zowel golf- als deeltjes eigenschappen. Ieder soort atoom heeft zijn eigen unieke emissiespectrum van golflengten waarop elektromagnetische straling wordt uitgezonden. Dat maakt het mogelijk om uit stralingsspectra de samenstelling van stoffen en materialen te achterhalen. Geavanceerde spectraalanalyses worden in laboratoria voor allerlei doeleinden uitgevoerd. In de sterrenkunde maakt deze techniek het mogelijk uit het licht, zelfs van verre planeten en sterren te bepalen hoe hun atmosfeer er uit ziet.

Dit alles zijn we te weten gekomen door de bestudering van de atoomstructuur van materie en de wisselwerking van atomen met licht. Het begin van deze ontwikkeling is de veronderstelling van Max Planck (1900) en Albert Einstein (1905) dat elektromagnetische straling wordt uitgezonden in kleine golf-energiepakketjes (fotonen) en dat de energie van deze lichtpakketjes direct afhangt va de frequentie (golflengte) van het licht: hoe hoger de frequentie des te groter de energie. Deze veronderstelling werd bevestigd in talloze experimenten, en vindt toepassing in vele hedendaagse instrumenten en gebruiksartikelen. Ook alledaagse verschijnselen worden door de fotonhypothese verklaard, bijvoorbeeld, bruining van de huid door ultraviolet licht. Dit is een chemische reactie in de huid die door fotonen met hoge energie op gang wordt gebracht maar niet door fotonen van het zichtbare licht.

2.1 Wat hebben materie en straling met elkaar?

Paragraafvraag	Wat is licht en hoe ontstaat licht?



Figuur 2.1 Isaac Newton (1642-1727)



Figuur 2.2 Christiaan Huygens (1629-1695)



Figuur 2.3 Het principe van Huygens

We weten dat licht een golfverschijnsel is dat zich met de lichtsnelheid door vacuüm beweegt. We weten ook dat licht wordt geproduceerd in materiële lichtbronnen zoals de zon of een lamp, en dat de kleur van het licht de temperatuur verraadt van een stralend object. De afgegeven straling verschilt naar gelang de materiële eigenschappen van de stralingsbron anders zijn. Dus materie kan straling produceren, maar hoe werkt dat?

Materie en golven

Tot het eind van de 19e eeuw bestond een algemeen aanvaard onderscheid tussen materie enerzijds en golven anderzijds. Sinds Newton de nauwkeurige waarnemingen van planeetbanen door Galilei (1564-1642) en Kepler (1571-1630) in zijn gravitatiewet had bevestigd, werd algemeen aanvaard dat materie wordt gedomineerd door de gravitatiekracht. De mechanica ontwikkelde zich steeds meer als het wetboek, volgens welke de materie zich had te gedragen. Men geloofde daardoor steeds meer in de voorspelbaarheid van het gedrag van materiële deeltjes.

Ook Christiaan Huygens, een veelzijdig man, leverde zijn bijdrage aan de ontwikkeling van de mechanica. Naast veel ander werk op het gebied van de mechanica werd hij in het bijzonder gefascineerd door de slingerbeweging – hij geldt als de uitvinder van het slingeruurwerk. Ook hield hij zich bezig met bestudering van optische verschijnselen. Door waarneming van interferentieverschijnselen kwam hij op het idee om het gedrag van licht te vergelijken met dat van golven in water: in zijn Traité de la Lumière (1690) zette hij het gedrag van golven uiteen en stelde een golfmodel op voor licht– we kennen dat tegenwoordig nog steeds als het Principe van Huygens: licht plant zich voort als een bolvormige golf.

Dit leverde een nogal verbeten strijd op met tijdgenoot Newton, die in zijn werk Opticks (1704) een mechanische verklaring met 'lichtdeeltjes' gaf voor breking en spiegeling van licht. Ook geen onzinnige theorie overigens zoals we in dit hoofdstuk zullen zien. Maar de theorieën van Huygens en Newton leken lang strijdig met elkaar!

Historisch wordt vooral de interferentieproef van Thomas Young gezien als een beslissend experiment. Deze proef wordt uitgelegd in opdracht 45. In 1805 ontdekte Young dat monochromatisch licht ontegenzeggelijk golfeigenschappen vertoont: bij licht dat invalt op een diafragma met twee spleten kan achter het diafragma een interferentiepatroon worden waargenomen. Vanaf die tijd werd het golfkarakter van het licht algemeen aanvaard en raakte het deeltjesmodel van Newton in de vergetelheid.

44 Opdracht: Golfkarakter van licht

Materiaal: Oranje natriumlamp, paraplu

Bekijk bij duisternis een oranje natriumlamp vanuit de verte door het weefsel van bijv. een paraplu. Geef aan, waarom datgene wat je ziet, zo'n overtuigend argument is voor het golfkarakter van licht.



Figuur 2.4 Thomas Young (1773-1829)

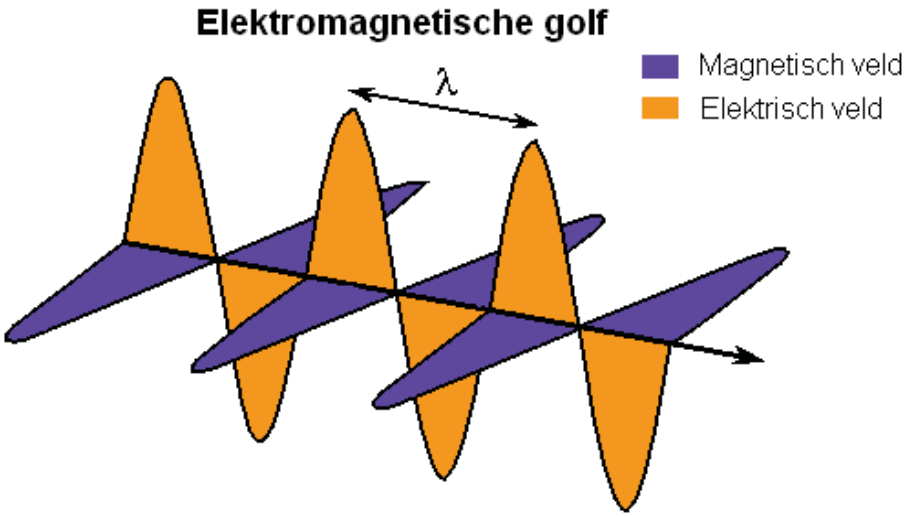
45 Opdracht: Twee-spleten experiment van Young

Open het bestand Young(1) op de leerlingen ICT-disk. (zie Hoofdstuk 2 Young(1)/ Young(1).htm). Bekijk het klassieke twee- spletenexperiment.

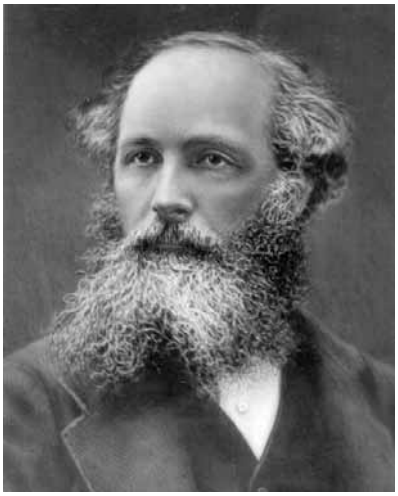
a. Beschrijf hoe het interferentiepatroon verandert, als de kleur van het licht, de afstand tussen de spleten en de schermafstand veranderen.
b. Beschrijf tevens, wat je zult zien, wanneer uit de spleten wit licht straalt.
c. Wat wordt met de proef van Young aangetoond?

Een soortgelijke opstelling is ook te vinden op:
www.virtueelpracticumlokaal.nl

Licht is een elektromagnetische golf



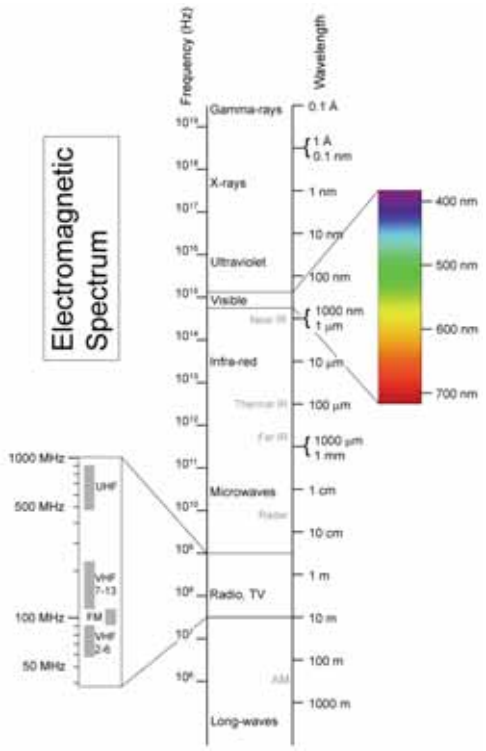
Figuur 2.5 Elektromagnetische straling (zoals licht) bestaat uit twee transversale golven. De maximale amplitudes van de elektrische- (geel) en magnetische- (blauw) velden staan loodrecht op elkaar terwijl de golf zich loodrecht op beide richtingen voortplant. De golflengte is aangegeven met λ



Figuur 2.6 James Clerk Maxwell (1831-1879)

Licht draagt energie; dat ervaar je lijfelijk in de warme zon. Maar wat is licht? De studie van elektriciteit en magnetisme in de 18e en 19e eeuw leidde ertoe dat James Clerk Maxwell in 1865 het bestaan voorspelde van **elektromagnetische golven** die zich voortplanten in de ruimte. Deze golven zijn een precies bepaalde combinatie van transversale elektrische en magnetische golven. Elektromagnetische golven blijken alle eigenschappenen van licht te hebben:

- elektromagnetische golven verplaatsen zich met de lichtsnelheid
- de kleur van licht kan verklaard worden als de golflente van deze golven
- de intensiteit wordt bepaald door de amplitude van deze golven.



Figuur 2.7 Het elektromagnetisch spectrum

Het bestaan van elektromagnetische golven werd in 1888 ook experimenteel aangetoond door Heinrich Hertz. Men kon dan ook niet anders dan concluderen dat zichtbaar licht uit elektromagnetische golven bestaat – en deel uitmaakt van een heel spectrum van elektromagnetische golven. Het elektromagnetisch spectrum omvat radiogolven met golflengtes tot vele kilometers, maar ook gamma straling opgewekt in atoomkernen met een golflengte tot honderdsten van nanometers. Licht is het zichtbare deel van het elektromagnetische spectrum en blijkt te corresponderen met een vrij nauwe golflengteband van 400 nm tot 700 nm.

Ook het ontstaan van licht werd daarmee verklaard door Maxwell. Licht is het gevolg van beweging van elektrische lading, of te wel bewegende materiedeeltjes met een elektrische lading. Die materiedeeltjes noemen we nu elektronen en protonen. De wisselwerking tussen straling en materiedeeltjes met elektrische lading wordt wiskundig vastgelegd door de zogeheten 'vergelijkingen van Maxwell', dat zijn vier wiskundige vergelijkingen waarmee alle elektrische en magnetische verschijnselen beschreven kunnen worden. Daarmee leek het dat een volledig begrip van het gedrag van straling en materie binnen handbereik lag.

Licht

Licht is een elektromagnetische golf die zich voorplant met de lichtsnelheid:

$$c = \lambda \cdot f$$

Symbolen: c is de lichtsnelheid in meters per seconde

$c = 2{,}998 \cdot 10^8\ \mathrm{ms}^{-1}$, λ is de golflengte in meters (m), f is de frequentie in Hz.

Geldigheid: deze vergelijking is geldig in vacuüm. In een medium is voortplantingssnelheid $\frac{c}{n}$, met n de brekingsindex van het medium.

46 Verschillen tussen straling en materie

Kun je eigenschappen noemen waarin materie en straling verschillen?

47 Mobiele telefoon

Een mobiele telefoon is eigenlijk een radiozender en -ontvanger. Je ontvangt een oproep als een radiogolf met een frequentie van 880.65 MHz. Wat is de golflengte in meters van deze golf?

Fotonen

Het pleit tussen de opvatting dat licht een golfverschijnsel is (Huygens) en de opvatting van licht als een stroom van lichtdeeltjes (Newton) leek aan het einde van de 19e eeuw beslecht in het voordeel van Huygens. Het probleem was echter dat een aantal verschijnselen zoals het bestaan van donkere lijnen in het lichtspectrum van de zon, zoals voor het eerst waargenomen door Fraunhofer in 1813, niet verklaard werden. Ook de vorm van de Planckkrommen voor het uitgestraalde licht van de zon en de sterren bleek niet zomaar verklaarbaar.

Dit laatste probleem werd door Max Planck (Nobelprijs natuurkunde 1918) opgelost door de veronderstelling dat licht (toch) bestond uit lichtpakketjes, met een energie bepaald door de frequentie

$$E = h \cdot f$$

Hierin is h de contante van Planck. Dat er een verband is tussen de energie en de frequentie van straling zien we o.a. in het feit dat röntgenstraling schadelijk is voor levende organismen en radiostraling met veel lagere frequentie niet.

Een voor de hand liggende vergelijking van de continuïteit die je normaliter ervaart bij het waarnemen van licht kun je maken met het continue geruis dat we horen van een stadion vol applaudisserende mensen: wanneer we maar scherp genoeg luisteren, blijkt dat monotone geruis uit allemaal afzonderlijke klapjes te bestaan. Zo bestaat het continue spectrum van licht dat we zien, uit afzonderlijke fotonen. De Planck constante is heel klein, dus ook de energie van de afzonderlijke fotonen. Een lichtbundel zal dus bestaan uit zoveel lichtdeeltjes dat die in de meeste gevallen niet individueel waarneembaar zijn.

Voorbeeld

Een lichtstraal kun je beschouwen als een stroom van fotonen. De barcodescanners die in de supermarkt worden gebruikt zenden oranjerood licht uit met een golflengte van 633 nm. Bereken de energie van één foton van dit licht.

Antwoord:

$$E = hf = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{\left(6,625 \cdot 10^{-34}\, Js\right) \cdot \left(3,0 \cdot 10^{8}\, ms^{-1}\right)}{633 \cdot 10^{-9}\, m} = 3,14 \cdot 10^{-19}\, J$$

Deze energie is bijzonder klein. Een dergelijke laser zendt gemiddeld ongeveer 10^{-3} J per seconde uit. Het aantal fotonen per seconde wordt dan:

$$\frac{10^{-3}\,\mathrm{Js}^{-1}}{3,14 \cdot 10^{-19}\,\text{Joule per foton}} = 3,2 \cdot 10^{15}\ \frac{\text{fotonen}}{\text{seconde}}$$

Dit is zo'n groot aantal, dat de laserstraal eruit ziet als een continue bundel en niet als een stroom van kleine energiepakketjes.

48 Vermogen

Je wilt twee lampen (een rode en een blauwe) met hetzelfde vermogen laten stralen. Welke lamp moet hiervoor meer fotonen per seconde uitzenden?

49 Extra: bepaling van de constante van Planck m.b.v. LED's

Met een eenvoudige schakeling kunnen we de spanning bepalen waarboven een LED licht begint uit te zenden. Als we tevens zo nauwkeurig mogelijk de golflengte van het door de LED uitgezonden licht bepalen, kunnen we een verband leggen tussen het energieverlies van het elektron die in de LED een foton uitzendt en de energie van het foton.

Een instructieblad voor dit applet staat op de leerlingen ICT-disk in de map Hoofdstuk 2 - Straling en materie onder de naam: "Opdrachtblad bij opdracht 49 – Bepaling Constante van Planck (LED).doc".

Een dispuut opgelost en een paradox geboren

In 1917 ging Einstein nog een stap verder door te stellen dat fotonen niet alleen een energie hebben maar ook een impuls:

$$p = \frac{h}{\lambda} = hcf$$

Hierin is h weer de constante van Planck. Dit is waarneembaar in het effect dat licht en andere elektromagnetische straling een zekere druk, de stralingsdruk, uitoefenen op andere objecten. Licht moet kennelijk opgevat worden als een stroom van discrete lichtdeeltjes. De stralingsdruk is dan de impuls (per vierkante meter) waarmee de straling elke seconde tegen een bepaald object aanbotst, net zoals de druk van een gas ontstaat door botsingen van atomen tegen een wand.

Het deeltjeskarakter van fotonen kon later door Arthur Holly Compton (Nobelprijs natuurkunde 1927) in een beroemd geworden experiment worden aangetoond: wanneer een foton van röntgenstraling tegen een elektron botst, veranderen de frequentie (dus de energie) van het foton en ook de richting waarin het foton beweegt (dus de impuls) alsof het een deeltje is. Ook de energie en de impuls van het elektron veranderen in de botsing precies zo dat de totale energie en de impuls van elektron en foton samen niet veranderen. Met andere woorden röntgenstraling gedraagt zich als een stroom kleine "projectielen", goed vergelijkbaar met biljartballen op een biljarttafel.
(zie: www.launc.tased.edu.au/online/sciences/physics/compton.html)

Foton

Een foton is een lichtdeeltje met energie en impuls gegeven door:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \qquad p = \frac{h}{\lambda}$$

Symbolen: E is de energie van het foton in Joule (J), h is de constante van Planck $6.626 \cdot 10^{-34}$ $m^2 kg\ s^{-1}$, f de frequentie in s^{-1} p is de impuls van het foton in $kgms^{-1}$ en λ is de golflengte van het foton in meters (m).

Geldigheid: deze vergelijkingen zijn geldig in vacuüm

50 Fotonen uit het heelal

Sinds de jaren 70 van de vorige eeuw hebben instrumenten in weerballonnen en ruimtevaartuigen fotonen waargenomen met een energie van 511 keV. De fotonen zijn afkomstig uit het centrum van onze Melkweg.

a. Wat is de golflengte van deze fotonen?
b. In welk deel van het elektromagnetische spectrum horen ze?

Het dispuut tussen Newton en Huygens wordt dus in de moderne natuurkunde opgelost door aan te nemen dat licht zowel golf- als deeltjeseigenschappen heeft. 'Maar hoe kan dat?' kun je je afvragen. Daarop heeft de natuurkunde niet een echt antwoord, behalve dat deze veronderstelling keer op keer in de meest nauwkeurige experimenten en waarnemingen wordt bevestigd.

Tegenwoordig is de meetapparatuur zover ontwikkeld dat het zelfs mogelijk is individuele fotonen te tellen. Dat gebeurt bijvoorbeeld in de PET-camera; PET staat voor Positron Emissie Tomografie. Het is een techniek die in zie-

kenhuizen wordt toegepast om op bepaalde plaatsen in het lichaam afwijkingen in de normale stofwisseling te detecteren, wat kan duiden op bijvoorbeeld tumoren.



Figuur 2.8 Bron: www.delftintegraal.tudelft.nl

51 Webexperiment: PET-Camera

Ga naar de website http://webexperiments.nl voor een op afstand aangestuurd PET camera experiment.

Eigenlijk kun je ook een gewoon stukje fotonegatief beschouwen als een fotondetector, want individuele fotonen zorgen telkens voor het veranderen van één klein korreltje zilverchloride. Ieder korreltje kan dus, eenmalig, een foton detecteren. Deze mogelijkheid tot het registreren van individuele fotonen maakt het wel erg moeilijk hun bestaan nog te ontkennen.

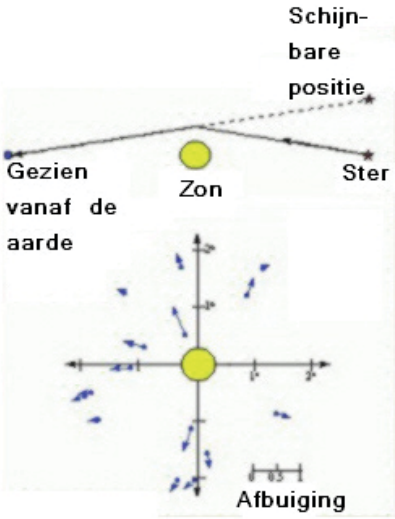
52 Alledaagse verschijnselen

Er zijn ook alledaagse verschijnselen die alleen met een golfmodel moeilijk te verklaren zijn. Het gaat hierbij onder andere om heel gewone verschijnselen, waaraan je waarschijnlijk niets vreemds opmerkt totdat je gaat proberen ze vanuit het golfmodel te verklaren.

Een paar voorbeelden:

a. Bij het afdrukken van zwartwit foto's kun je in de donkere kamer een rode lamp aanlaten, omdat het rode licht geen invloed heeft op het fotopapier. Maar al met een zwak blauw licht is het papier onmiddellijk bedorven. Hoe komt dat?
b. Planten gebruiken het licht van de zon als energiebron. Zonlicht kan vervangen worden door kunstlicht, maar in rood licht groeien ze niet, zelfs niet in heel veel rood licht.

(uit Project Moderne Natuurkunde www.phys.uu.nl/~wwwpmn/)



Figuur 2.9

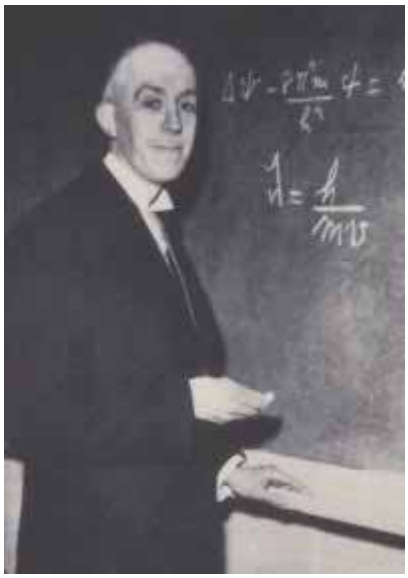
Extra: Afbuiging van licht

Een van de verrassende waarnemingen is het gedrag van sterlicht afkomstig van sterren die van ons uit gezien vlak bij de zon staan. Overdag zijn ze er wel maar zie je ze uiteraard niet: ze worden overstraald door de blauwe lucht. Een unieke gelegenheid om sterren vlak bij de zon waar te nemen vormt een totale zonsverduistering. De blauwe lucht wordt steeds donkerder, zodat sterren rondom de verduisterde zon zichtbaar beginnen te worden. Op 29 mei 1919 werden tijdens een totale zonsverduistering door Arthur Eddington de posities van sterren rondom de (verduisterde) zon op de fotografische plaat vergeleken met hun posities een half jaar eerder en een half jaar later: dus aan de nachthemel. De posities van de sterren op de fotografische plaat van de nachthemel waren hetzelfde. Dit in tegenstelling tot de posities van dezelfde sterren op de opname van de verduisterde zon. Ze bleken allen iets verder van de verduisterde zonneschijf te staan: zou dit iets met de zwaartekracht van de zon te maken kunnen hebben?
Einstein had eerder geopperd dat fotonen eigenschappen van deeltjes zouden moeten bezitten. En nu blijken deze fotonen net als materiële objecten ook nog eens door de gravitatiekracht van de zon te worden beïnvloed!
Het beschreven verschijnsel wordt verklaard met gebruikmaking van de algemene relativiteitstheorie van Einstein: een grote massa (bijvoorbeeld die van de zon) 'kromt' de ruimte eromheen door zijn gravitatiewerking. Dit heeft tot gevolg dat alles wat zich door die ruimte beweegt en 'rechtdoor' zou gaan in de niet gekromde ruimte (dus bij afwezigheid van grote massa's), in de buurt van de zon de lijnen van deze gekromde ruimte volgt. Dit geldt voor zowel straling (o.a. licht) als massa's. Ook in dit verband kun je zodoende vaststellen, dat straling en massa in hun gedrag in de gekromde ruimte niet van elkaar verschillen.

Deeltjes als golven

In het bovenstaande is aangetoond dat elektromagnetische golven, waaronder licht, eigenschappen hebben die zowel bij golven als bij deeltjes horen. Maar als dat zo is, vroeg de Franse natuurkundige Louis de Broglie zich af rond 1920, waarom dan ook niet andersom – zouden deeltjes ook golfeigenschappen kunnen bezitten?

Deze vraag blijkt met ja beantwoord te kunnen worden, hoe moeilijk dit ook voor te stellen is, en leidde tot een geheel nieuwe theorie voor het gedrag van materie en straling: de quantumnatuurkunde. De constante van Planck is daarin de belangrijke natuurconstante die een centrale rol speelt bij alle verschijnselen die door de quantumnatuurkunde worden beschreven.



Figuur 2.10 prins Louis-Victor de Broglie (1892-1987)

De redenering van de Broglie (Nobelprijs natuurkunde 1929) verliep als volgt. Door Einstein was al beweerd dat fotonen een impuls hebben. Zoals je weet betekent impuls 'hoeveelheid beweging', een belangrijke eigenschap bij botsingen (zoals bij biljartballen) en wisselwerking tussen deeltjes in het algemeen. De Broglie draaide dat om: het zou wel eens zo kunnen zijn dat een deeltje, zoals een elektron, met een impuls $p = mv$, een golflengte zou kunnen hebben gegeven door (vergelijk met de formulebox voor het foton):

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

De constante van Planck is heel klein waardoor deze golflengte voor materiële objecten om ons heen nooit te detecteren zal zijn. Maar voor deeltjes in de atomaire wereld (1 nm = 10^{-9} meter en kleiner), is deze golflengte van dezelfde orde van grootte als de afmeting van deze kleine deeltjes zelf. Voor deze deeltjes zou dus een effect waarneembaar moeten zijn met een geschikt meetinstrument.

53 De Broglie-golflengte

Ga na wat de 'de Broglie-golflengte' is van de volgende bewegende massa's:

a. een tennisbal van 100 gram, die een snelheid heeft van 150 km/h

b. een proton met een snelheid van $4{,}0 \cdot 10^{7}$ ms^{-1}

c. een elektron met een snelheid van $4{,}0 \cdot 10^{7}$ ms^{-1}

Vergelijk de uitkomsten met de afmetingen van deze objecten. Wat is je conclusie hieruit: zul je ooit met eigen ogen het golfkarakter van materie direct kunnen waarnemen?

De Broglie-golflengte

Met een deeltje met massa m en impuls $p = mv$ kan een **De Broglie-golflengte** geassocieerd worden gegeven door:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Symbolen: λ is de De Broglie-golflengte van het deeltje in meters (m), h is de constante van Planck $6.626 \cdot 10^{-34}$ m^{2}kg s^{-1}, m is de massa van het deeltje in kilogram (kg) en v is de snelheid van het deeltje in ms^{-1}.

Geldigheid: deze vergelijking is altijd geldig, maar openbaart zich (= is te meten) in de 'wereld van het hele kleine', zeg maar op schaalgroottes in de orde van nanometers.

Behalve Einstein vond aanvankelijk niemand het idee van De Broglie interessant. Maar het trok een paar jaar later de aandacht van de Oostenrijkse natuurkundige Erwin Schrödinger (Nobelprijs natuurkunde 1933) die op basis van dit idee de golfmechanica ontwikkelde. Vrijwel tegelijkertijd kwam de Duitse natuurkundige Werner Heisenberg (Nobelprijs 1932) met een rivaliserende theorie. Al snel was het duidelijk dat deze twee theorieën in feite hetzelfde waren, en in 1927 was de nieuwe *quantummechanica* geboren.

Extra

In datzelfde jaar 1927 werd bij toeval een direct bewijs voor de De Broglie hypothese gevonden in een experiment van Clinton Davisson and Lester Germer (Nobelprijs natuurkunde 1937) van het Bell Telephone Laboratory. Bij de verstrooiing van elektronen vonden zij bij toeval interferentiemaxima en –minima. Deze werden veroorzaakt doordat in een kristal de atomen in regelmatige rijen gerangschikt zijn. Bij golven met een voldoende kleine golflengte geeft dit effecten die vergelijkbaar zijn met de buiging van licht aan een tralie. De stof die in dit experiment werd onderzocht was per ongeluk uitgekristalliseerd en bij toeval had de elektronbundel een geschikte golflengte. Deze onverwachte ontdekking wordt nu gebruikt o.a. in de elektronenmicroscopie; zie www.vcbio.science.ru.nl/image-gallery/electron/.

Deeltje-golf dualiteit

In deze paragraaf hebben we gezien dat licht een vorm van elektromagnetische straling is. Elektromagnetische straling bestaat uit kleine golf-energiepakketjes: fotonen. Deze fotonen hebben zowel eigenschappen van golven (golflengte, frequentie) als eigenschappen van deeltjes (impuls). Als je elektromagnetische straling bestudeert zul je, afhankelijk van het experiment dat je doet, òf de golfeigenschappen òf de deeltjeseigenschappen zien. Daarnaast kun je van materie in bepaalde experimenten ook golfeigenschappen waarnemen (de De Broglie-golflengte). Deze ogenschijnlijke paradox dat elektromagnetische straling en materie beide zowel golf- als deeltjeseigenschappen lijken te bezitten, wordt de **deeltje-golf dualiteit** genoemd.

Begrippen

Elektromagnetische golven
Foton
De Broglie-golflengte
Deeltje-golf dualiteit

Samenvatting – paragraaf 2.1

- Licht is **elektromagnetische straling**. Alle elektromagnetische straling plant zich in vacuüm voort met de lichtsnelheid. Het verband tussen de golflengte en frequentie is: $\lambda \cdot f = c$.
- Elektromagnetische straling bestaat uit een stroom discrete **fotonen** 'golf-energie-pakketjes', met energie en impuls:
$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad p = \frac{h}{\lambda}$$
met $h = 6,62607 \text{ x } 10^{-34}$ Js de constante van Planck.
- Fotonen gedragen zich in sommige omstandigheden als **deeltjes** (PET camera, gevoeligheid voor gravitatie), en in andere omstandigheden als **golven** (superpositie, interferentie).
- Materie blijkt ook eigenschappen van golven te hebben. Deze **deeltje-golf dualiteit** manifesteert zich voor kleine deeltjes waarvoor de **De Broglie-golflengte**
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$
met m de massa (in kg) en v (in m/s) de snelheid van het deeltje, een meetbare waarde heeft. Dit is in experimenten o.a. met elektronen bevestigt.

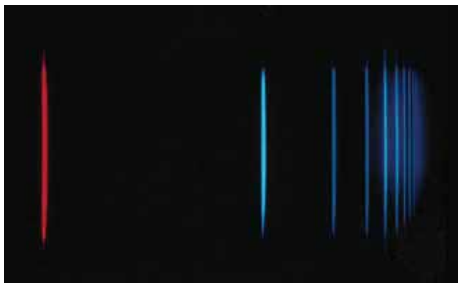
2.2 Spectraallijnen van het waterstofatoom

Licht als "muziek" in de ogen?

Paragraafvraag	**Wat is de natuurkundige verklaring voor het ontstaan van spectraallijnen?**

In hoofdstuk 1 kwam al aan de orde dat atomen, van welk materiaal dan ook, elektromagnetische golven uitzenden als ze daartoe gestimuleerd worden door bijvoorbeeld verhitting. Gezien door een prisma, geven deze golven een lijnenspectrum waarvan elke spectraallijn een karakteristieke golflengte en dus ook kleur heeft. Uit onderzoek is gebleken dat elke atoomsoort zijn eigen lijnenspectrum heeft. Daarop berust de techniek van de spectraalanalyse waarmee kan worden nagegaan welke atoomsoorten in een bepaalde stof voorkomen. Zelfs van zeer kleine hoeveelheden stof kan de samenstelling nog achterhaald worden. Een atoomspectroscopische analyse is in veel gevallen eenvoudiger en sneller uit te voeren dan een chemische.

Balmerreeks



Figuur 2.11 Het lijnenspectrum van waterstof

Al in de 19e eeuw was het bekend dat er een vast patroon aanwezig is in de ligging van de spectraallijnen van waterstof. In het zichtbare gebied is een reeks lijnen te zien, die begint met een lijn in het rode gebied van 656 nm met daaropvolgend een lijn in het blauw, dan enkele lijnen in het violet. Deze lijnenreeks blijkt zich voort te zetten in het UV-gebied en eindigt bij 364,6 nm. Veel sterren, waaronder de zon, hebben deze lijnen in hun spectra, hetgeen de aanwijzing is dat hun atmosfeer waterstof bevat.

Een leraar in Zwitserland, Johann Balmer, probeerde de regelmaat van het **waterstofspectrum** in een eenvoudige formule te 'vangen' en vond in 1885 dat de golflengten van de spectraallijnen als volgt berekend kunnen worden:

$$\lambda = B\left(\frac{n^2}{n^2 - 2^2}\right)$$

Voor iedere waarde van n= 3, 4... kan hiermee een golflengte van een spectraallijn van waterstof berekend worden. Om de vergelijking passend te maken met de waarnemingen gaf hij de Balmer constante B de waarde 364.56 nm. Met de uitdrukking toonde Balmer aan dat de waargenomen golflengten afhingen van gehele getallen. De Balmer-reeks beschreef ook dat de lijnen bij kortere golflengten steeds dichter bij elkaar liggen om ten slotte nagenoeg samen te vallen bij de golflengte $\lambda = B$ voor grote waarden van n.

Er worden ook andere emissielijnen van waterstof waargenomen in het ultraviolet (bekend als de Lyman reeks) en infrarood (bekend als de Paschen reeks). Deze reeksen volgen uit dezelfde formule met een kleine uitbreiding. In 1888 schreef de Zweedse wis- en natuurkundige Johannes Rydberg de vergelijking van Balmer als een formule voor de inverse golflengte. Een korte berekening levert:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

De evenredigheidsconstante wordt de rydbergconstante genoemd; deze heeft de numerieke waarde $R_H = 4/B = 1{,}0974.10^7\ \mathrm{m}^{-1}$. Het blijkt dat alle lijnen van het waterstof spectrum worden beschreven door de Balmer formule te generaliseren naar de Rydberg-formule:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (1)$$

De verschillende reeksen hebben ieder een bepaalde waarde voor *m*; de systematiek is: Lymanreeks (*m*=1), Balmerreeks (*m*=2) en Paschenreeks *m*= 3

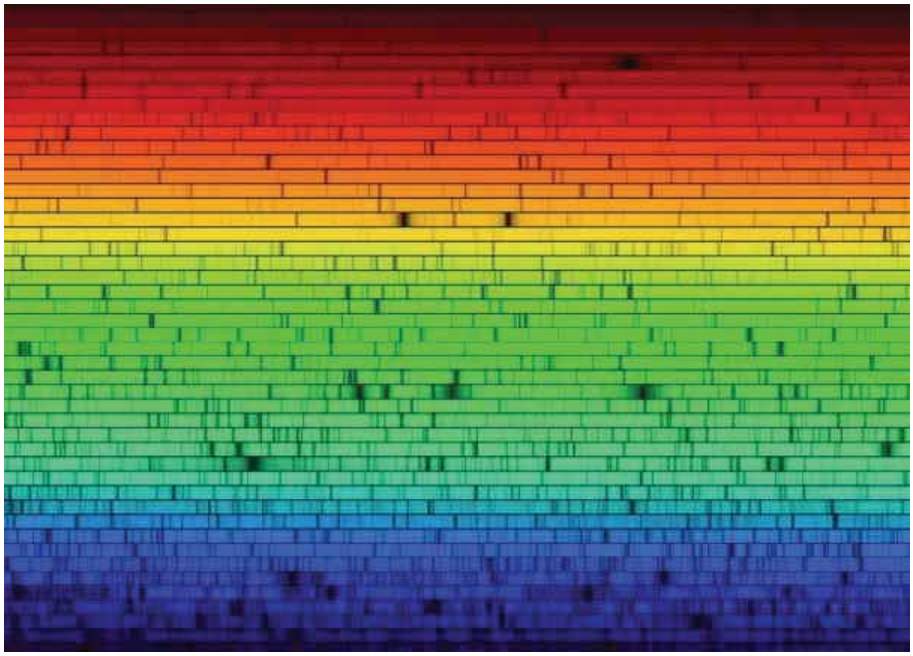
$R_H = 1.0974 \text{ x } 10^7\ \mathrm{m}^{-1}$.

54 Balmerreeks

Laat zien, door de waarden *m*=2, *n*=3,4,5,6 en 7 in te vullen in de Rydbergformule, dat Balmer een goede beschrijving had gevonden voor de waargenomen golflengten van de spectraallijnen van waterstof in het zichtbare gebied. De reeks spectraallijnen die je hiermee vindt (dus voor *m*=2) wordt de Balmerreeks genoemd.

Balmer en Rydberg waren er dus in geslaagd om een formule te vinden waarmee de ligging van de lijnen in het spectrum van waterstof beschreven kon worden – het 'waarom' ervan bleef echter onduidelijk.

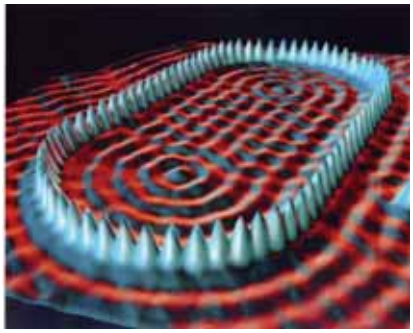
Er was ook nog een andere regelmaat ontdekt in de spectraallijnen door Rydberg: hij merkte op dat de som van de frequenties behorende bij twee lijnen in het spectrum van waterstof gelijk was aan de frequentie van een derde lijn. Het vermoeden was dat ook voor andere elementen dan waterstof wel eens een soortgelijke relatie zou kunnen gelden. Dit bleek het geval, maar een verklaring bleef uit tot 1913.



Figuur 2.12 Het absorptie spectrum van de zon in hoge resolutie met duizenden ***fraunhoferlijnen***



Figuur 2.13 John Dalton (1766- 1844)



Figuur 2.14 artist impression van een scanning-tunneling microscope opname van een ring van 48 ijzeratomen

Alles bestaat uit atomen

De grote natuurkundige Richard Feynman merkte ooit op dat als je de wetenschappelijke geschiedenis tot één belangrijke verklaring zou willen terugbrengen, die zou zijn dat 'alles uit atomen bestaat'. Het eigentijdse besef dat alle materiële dingen zijn opgebouwd uit atomen begon met het in 1808 verschenen boek 'A New System of Chemical Philosophy' van John Dalton. Het idee en de naam 'atoom' waren niet nieuw, maar Dalton dacht als eerste na over de aard van atomen en hun meetbare eigenschappen.

In de loop van de 19e eeuw werd het steeds duidelijker dat verschijnselen als spectraallijnen van stralende gassen alleen verklaard kunnen worden door op zoek te gaan naar de fundamentele bouwstenen van de materie. Alleen al het feit dat de zichtbare spectraallijnen van waterstof een golflente hebben van een paar honderd nanometer (nm), betekent dat die bouwstenen heel erg klein moeten zijn. Langzaam aan werd de gedachte dat materie bestaat uit kleine atomen steeds meer geaccepteerd, hoewel er tot in de 20e eeuw sceptici waren die het argument hanteerden 'wat je niet ziet bestaat niet'. Met hedendaagse geavanceerde technieken, zoals de scanning-tunneling microscope zijn atomen nu wel te zien en is de atoomtheorie de basis geworden van de moderne natuurkunde.

Het accepteren van het bestaan van atomen, heeft het natuurkundig wereldbeeld de afgelopen eeuw op spectaculaire wijze vooruit geholpen. En dat wereldbeeld hebben we bepaald niet cadeau gekregen! Daarvoor hebben we een belangrijk denkbeeld moeten prijsgeven: materie, zoals we dat in het dagelijkse leven ervaren, gedraagt zich op heel kleine schaal, zeg in de orde van een nanometer, of een miljardste meter, volkomen anders dan we in het dagelijkse leven gewend zijn. Maar wat is daar zo vreemd aan? De schaal waar we mee te maken hebben als we het over atomen hebben, is 0,000 000 001 meter, en dus onvoorstelbaar veel kleiner dan de wereld waar we dagelijks in verkeren. Is het niet gewoon zo dat we moeten accepteren dat er nieuwe denkbeelden nodig zijn om de eigenschappen van atomen te begrijpen?

De foto's uit het boek 'Powers of Ten' van Philip Morrison (ISBN 0-7167-1409-4) geven een prachtige illustratie van de afstand die we in gedachte moeten overbruggen om af te dalen van onze leefwereld van meters en kilogrammen, van tastbare objecten en zichtbare watergolven, naar de atomaire wereld van het hele kleine.

Atoommodel

Niemand zal ooit een atoom met het blote oog zien. We moeten ons realiseren dat we tot ongeveer afstanden van 10^{-6} m deeltjes, zoals de kern van een cel, kunnen zien met sterk vergrotende microscopen. Voor kleinere deeltjes moeten we een elektronenmicroscoop gebruiken. De laatste stand van de techniek is de scanning-tunneling microscope, uitgevonden in 1981 door Gerd Binnig and Heinrich Rohrer van het IBM-laboratorium in Zurich (Nobelprijs 1986). Uit de beelden van dit instrument kunnen natuurkundigen de eigenschappen van individuele atomen af leiden, om die te vergelijken met de quantummechanische atoom- en molecuulmodellen. De overeenstemming is zo goed dat we zijn gaan praten over atomen en moleculen alsof het alledaagse deeltjes zijn – hun eigenschappen staan als vanzelfsprekend vermeld in BINAS.



10^{0} m: onze eigen leefwereld



10^{-1} m: nog goed zichtbaar



10^{-2} m: met een vergrootglas nog goed te zien!



10^{-3} m: een zwak microscoopje nodig!



10^{-4} m: een sterkere vergroting gebruiken!



10^{-5} m: een wit bloedlichaampje



10^{-6} m: wand van een celkern – nog amper met een lichtmicroscoop te zien!



10^{-7} m: de helixvormige DNA-moleculen in de celkern – niet meer met lichtmicroscoop te zien!



10^{-8} m: de atomen in een DNA-molecuul

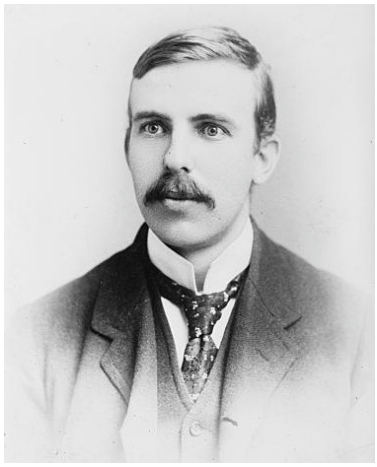


10^{-10} m atoom met elektronenwolk



10^{-13} m atoomkern

Fig. 2.15: Van onzewereld van de meterschaal naar het hele kleine

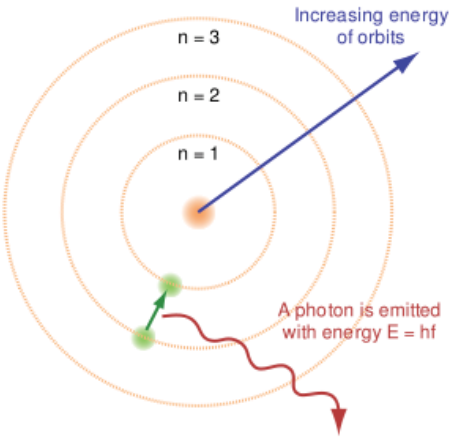


Figuur 2.16 Ernest Rutherford (Nobelprijs scheikunde 1908)

Vanaf ongeveer 10^{-9} m moeten we ons idee over atomen als een soort 'knikkertjes' laten varen. Een atoom is niet alleen heel klein, maar een atoom is ook bijna geheel leeg, zoals Ernest Rutherford in 1910 al aantoonde. Alle massa zit in een kern met afmetingen op een schaalgrootte van 10^{-12} à 10^{-13} m. Het is een verbazingwekkende gedachte dat atomen voornamelijk uit lege ruimte bestaan en dat de vastigheid die we overal om ons heen ervaren een illusie is. Op atomaire schaal lijkt de materie zich 'spookachtig' te gedragen! In ieder geval niet, zoals we in ons dagelijks leven gewend zijn.

Het atoommodel van Bohr

Het bestaan van spectraallijnen in het licht dat door atomen wordt uitgezonden of geabsorbeerd suggereert dat atomen op een of andere manier 'resoneren' bij bepaalde golflengten. Vergelijk het geluid dat we horen bij muziek: als we goed luisteren, dan kunnen we afzonderlijke tonen horen van verschillende instrumenten, en van die instrumenten ook nog afzonderlijke toonhoogten. Zoals we weten worden die toonhoogten bepaald door resonanties van snaren of luchtkolommen binnen die instrumenten. In het begin van de 20ste eeuw verspreidde zich het idee, dat de golflengten en dus de frequenties van de lijnen in atoomspectra wel eens kunnen worden toegeschreven aan resonanties binnen de atomen, die het licht uitzenden. Maar wàt resoneert er dan binnen een atoom?



Figuur 2.17 Het Bohr atoommodel



Figuur 2.18 Bohr (1885-1962)

Een heel belangrijke stap in de richting van de moderne atoomtheorie werd gezet door de Deense natuurkundige Niels Bohr. Hij vond in de regelmatigheden van de spectraallijnen de sleutel tot het begrijpen van de structuur van het atoom. In 1913 combineerde hij het fotonmodel van Planck en Einstein met het **atoommodel van Rutherford** van het atoom. In dat model bestaat het waterstofatoom uit een kleine positief geladen kern omringd door elektronen in cirkelvormige banen rond kern. De kracht die de elektronen in hun baan houdt is de elektrische kracht tussen de positief geladen kern en de negatief geladen elektronen —een structuur die doet denken aan het zonnestelsel, maar met de elektrostatische aantrekkingskracht in plaats van de zwaartekracht. Inmiddels weten we dat dit beeld van ronddraaiende elektronen niet correct is, maar dat elektronen als een soort 'schil' de kern omgeven. Niettemin blijft het model van Rutherford handig als we ons een voorstelling willen maken van een atoom.

Om het discrete karakter van spectraallijnen te kunnen verklaren, opperde Bohr de gedachte dat:

1. elektronen in een atoom zich slechts in bepaalde banen rond de kern kunnen bevinden.
2. ieder van die banen, genummerd met n=1,2,3,...., correspondeert met een bepaald energieniveau E_n; hoe verder van de kern des te groter de energie.
3. elektronen die zich in deze Bohrse banen bevinden alleen tussen die energieniveaus kunnen springen.
4. een foton zo'n 'quantum' sprong van een elektron van een lager naar een hoger energieniveau kan veroorzaken – en dat bij de sprong van een hoger naar een lager energieniveau een foton kan vrijkomen. Omdat energie behouden is, moet gelden bij een sprong van niveau n naar niveau m:

$$hf = |E_n - E_m| \qquad (2)$$

Het absoluut-teken zorgt ervoor dat steeds de positieve waarde van het energieverschil wordt genomen. Bij het uittreden van een foton neemt de energie van het atoom af met de waarde hf, en bij absorptie daarmee toe. Een elektron dat in zijn baan blijft, geeft geen foton af en neemt geen foton op.

55 Spectraallijn

a. Bereken de golflengte van de spectraallijn die hoort bij de overgang tussen de elektronbanen met n=5 en n=2 in een waterstof atoom. De energieniveaus zijn te vinden in BINAS.
b. In welk deel van het elektromagnetisch ligt deze golflengte?

De opsomming van de regels van Bohr hierboven noemt men het **atoommodel van Bohr**. Het aantal energieniveaus in het Bohr-model is oneindig, maar deze kunnen wel worden genummerd. Heel belangrijk is dat er in het model ook een laagste energieniveau bestaat. Deze toestand met de minimale

energie E_1 wordt de **grondtoestand** genoemd, en de andere energieniveaus **aangeslagen toestanden**.

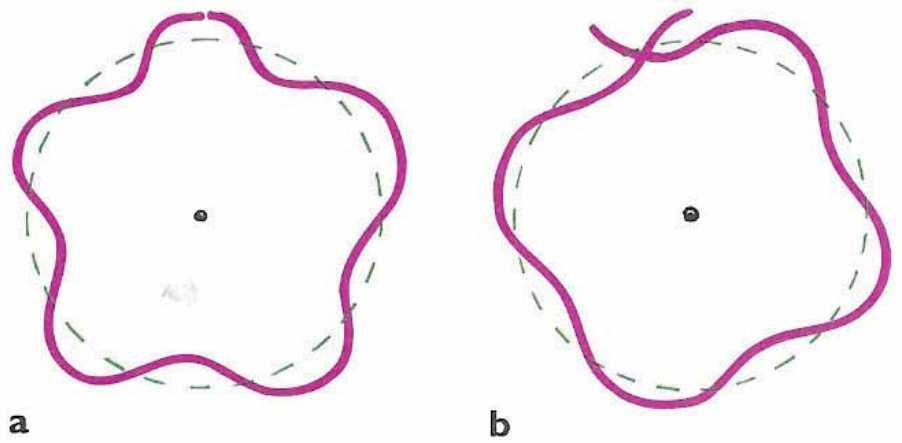
Hoe verder een baan van de atoomkern ligt, des te groter is de energie van het elektron. Dit kun je als volgt begrijpen. De kern oefent een aantrekkende kracht uit op het elektron uit. Om het elektron dan op een grotere afstand van de kern te brengen moet aan het atoom energie worden toegevoerd. Voor de verste afstanden nadert deze energie een maximum waarde, de **ionisatie-energie**. Bij toevoer van meer energie ontsnapt het elektron, zodat het atoom geïoniseerd wordt.

Quantisatieregel

Hoe kunnen we begrijpen dat de elektronen zich alleen in bepaalde banen rond de kern kunnen bevinden? Dit kunnen we plausibel maken uitgaande van de veronderstelling dat een bewegend elektron rond een waterstofkern kan worden beschouwd als een materiegolf met een golflengte gegeven door de De Broglie golflengte. Het is dan aannemelijk dat de kans om een elektron aan te treffen maximaal is op die afstanden, waar de materiegolflengte van het elektron precies een geheel aantal malen op de cirkelomtrek past, m.a.w.:

$$2\pi r_n = n\lambda = n\frac{h}{mv}$$

Alleen op die afstanden versterken de golven elkaar (figuur 2.20a); op andere afstanden 'doven' de golven elkaar uit (figuur 2.20b).



Figuur 2.19 ontleend aan Hewitt, P.G., Conceptual Physics, 10th ed., p. 628, ISBN 0-321-31532-4

De analogie met de staande golven geproduceerd door een muziekinstrument dringt zich op. Het atoom lijkt op een driedimensionale snaar die alleen bepaalde tonen kan voortbrengen. Hoewel Bohr een andere redenering volgde om de bovenstaande 'quantisatie-regel' voor elektronbanen af te leiden, was het wel precies deze regel die Bohr in staat stelde zijn discrete energieën te berekenen.

56 Fotonemissie

a. Als een atoom een foton uitzendt, zal dan de energie van het atoom dan toenemen of afnemen?

b. Een waterstof atoom wordt geëxciteerd naar een toestand waarbij het elektron in een baan komt met quantumgetal n = 3. Bij terugvallen naar de grondtoestand wordt licht uitgezonden dat meerdere golflengten bevat. Hoeveel lijnen levert dit op in het spectrum?

(uit Project Moderne Naturkunde http://www.phys.uu.nl/~wwwpmn/)

Verklaring waterstofspectrum

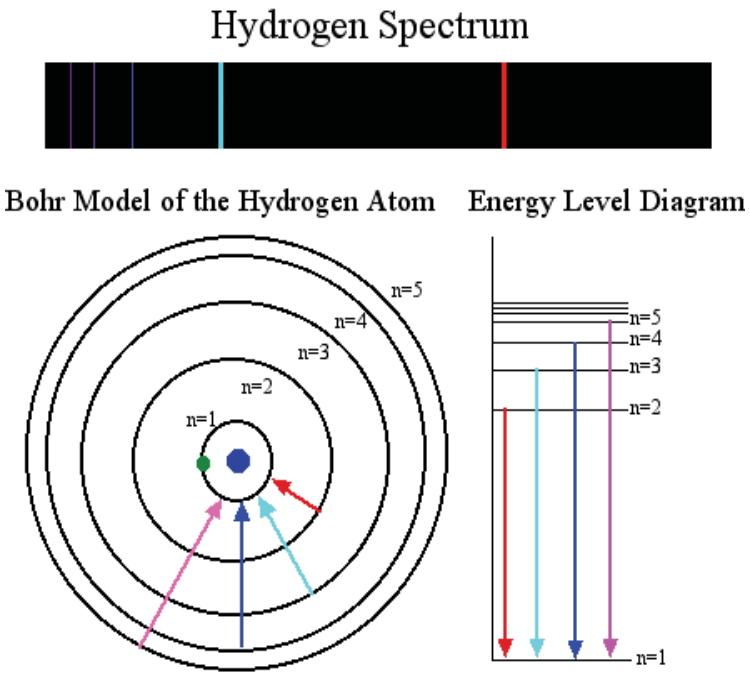
Met zijn atoommodel kon Bohr de Balmer- en andere reeksen voor het discrete spectrum van waterstof als volgt verklaren. Als je de formule van Rydberg (formule 1 – pag. 49) voor deze reeksen en de formule van Bohr (formule 2 – pag. 52) voor de energie van het uitgezonden foton, onder elkaar schrijft, kun je afleiden dat om deze twee formules met elkaar te laten kloppen, de discrete energie omgekeerd evenredig moet zijn met n^2 :

$$E_n = \text{constante}\ \frac{1}{n^2}$$

Bedenk $f = c / \lambda$. Bohr kon in zijn model deze energie exact uitrekenen (zie volgende paragraaf) en kwam uit op:

$$E_n = -13,6\frac{1}{n^2}\text{eV}$$

De energie is uitgedrukt in elektronvolts, een eenheid die in de atoomfysica veel gebruikt wordt omdat het makkelijker rekenen is (1 eV = 1,60 x 10^{-19} J). De energie is negatief omdat de elektrische kracht tussen een positieve en negatieve lading aantrekkend is. Hoe verder de baan van de kern, des te groter is de energie van het elektron. Het bijzondere van de afleiding van Bohr is dat deze numerieke waarde buitengewoon goed klopt met de Rydberg formule.



Figuur 2.20

57 Vergelijking met de Rydberg formule

Laat door vergelijking van de Bohr-formule (2) met de Rydberg formule (1) zien:

a. dat E_n omgekeerd evenredig moet zijn met n^2 (Tip vergelijk E_n met E_m, waarbij m de ongebonden toestand is ($m \to \infty$); gebruik $E = h \cdot f$).

b. dat de waarde van de evenredigheidsconstante gelijk moet zijn aan 13,6 eV. Ga na dat de eenheid klopt.

c. Wat is de waarde van de evenredigheidsconstante wanneer de energie niveaus zijn weergegeven in Joules i.p.v. in elektronvolts?

Energieniveaus van waterstof

De energieniveaus van het waterstof atoom worden gegeven door:

$$E_n = -13,6\frac{1}{n^2}$$

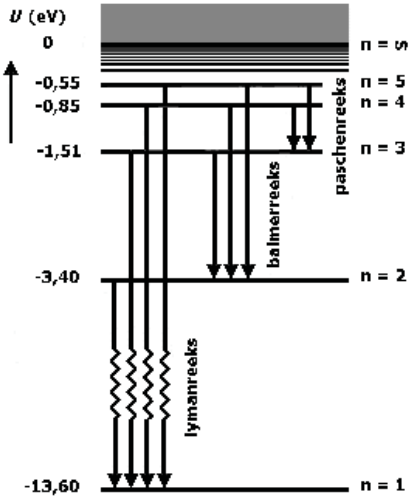
uitgedrukt in elektronvolt (1 eV = 1,60 x 10^{-19} J)!
De frequentie van een uitgezonden of geabsorbeerd foton is te berekenen uit het energieverschil tussen energie niveaus E_n en E_m:

$$hf = |E_n - E_m|$$

Symbolen: E_m, E_n zijn de energieën van de Bohrse baan met m,n=1,2,3,.... , en $m \neq n$, uitgedrukt in Joule (J), f is de frequentie (in Hz), h is de constante van Planck (zie Binas – tabel 7)

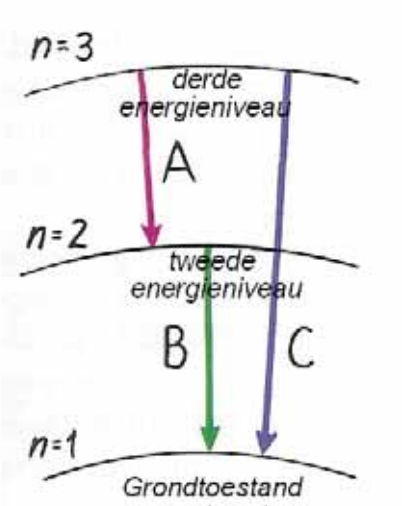
Geldigheid: deze vergelijking is geldig voor waterstof, maar op vergelijkbare manier zijn ook spectra van andere atomen te berekenen.

We zien in figuur 2.22 het energieniveauschema van het waterstofatoom afgebeeld. In dit energieniveauschema is de energie van het elektron t.o.v. de kern van het waterstofatoom in kaart gebracht. De ligging van deze energieniveaus van waterstof is bepaald met de boven gegeven formule voor E_n. De geschetste overgangen kloppen nauwkeurig met de waargenomen spectraallijnen van waterstof.



Figuur 2.21

Heel veel eigenschappen van atomen blijken direct samen te hangen met de ligging van de energieniveaus. Dit maakt ook begrijpelijk dat atomen van dezelfde soort zoveel op elkaar lijken. Het was echter vooral de verklaring van het bestaan van spectraallijnen, en in het bijzonder de kwantitatieve berekening van de spectra van waterstof en helium, die er voor zorgde dat Bohr's model een enorme invloed kreeg op de ontwikkeling van de moderne fysica.



Figuur 2.22 ontleend aan Hewitt, P.G., Conceptual Physics, 10th ed., p. 625, ISBN 0-321-31532-4, bewerkt

58 Balmerreeks

a. Bereken de frequenties voor de drie getekende overgangen van de Balmer reeks. Zijn deze frequenties in overeenstemming met de formule van Balmer?
b. Leg het min-teken voor de energie in bovenstaande schema uit.
c. Leg uit waarom beneden het ionisatieniveau de energieniveaus discreet zijn, en boven het ionisatieniveau continu.

Als een elektron vanuit de grondtoestand in het derde energieniveau terechtkomt (bijvoorbeeld door een foton op te nemen of door een botsing van het atoom tegen een ander atoom), kan het elektron in twee sprongen terug naar de grondtoestand: eerst van het derde naar het tweede energieniveau (A) en vervolgens daarvandaan naar de grondtoestand (B) òf in één keer naar de grondtoestand (C). In het eerste geval zendt het atoom een foton uit met energie E_A en vervolgens een tweede met energie E_B, in het tweede geval één foton met energie E_C.

59 Relatie van Rydberg

a. Controleer dat voor de boven beschreven situatie geldt:
$$E_C = E_A + E_B$$
b. Verklaar met deze aanname van Bohr de ontdekking van Rydberg, die opmerkte dat de som van de frequenties behorende bij twee lijnen in het spectrum van waterstof gelijk is aan de frequentie van een derde lijn.

60 Spectrum van waterstof

In het spectrum van waterstof komen de volgende twee lijnen voor: één in het infrarood met een frequentie van $2{,}7 \cdot 10^{14}$Hz en één in het rood met een frequentie van $4{,}6 \cdot 10^{14}$Hz.

a. Kun je op grond van deze gegevens een spectraallijn met een hogere frequentie voorspellen?
b. Zo ja, in welk gebied van het spectrum ligt die lijn?

Ook van complexere atomen en ionen zijn inmiddels energieniveaus van elektronen ten opzichte van de atoomkern, theoretisch en experimenteel bepaald en in kaart gebracht. Niet alleen de energieniveauverschillen van de elektronen ten opzichte van de kern blijken bepalend te zijn voor de energieinhoud van de fotonen, maar ook andere eigenschappen van elektronen zoals de impuls ervan. Bovendien beïnvloeden meerdere elektronen in de buurt van een atoomkern de energieniveaus onderling. Wij laten dit verder buiten beschouwing: voldoende voer voor hen, die zich verder in deze 'materie' willen verdiepen!

Begrippen

Waterstofspectrum
Fraunhoferlijnen
Atoommodel van Rutherford
Atoommodel van Bohr
Grondtoestand
Aangeslagen toestand
Ionisatie-energie

Samenvatting – paragraaf 2.2

- Een atoom heeft een kleine zware kern omringd door lichte elektronen. De kern is positief geladen en de elektronen negatief. Een atoom is ladingsneutraal. Dit heet het **atoommodel van Rutherford**.
- In het atoommodel van Bohr kunnen de elektronen in een atoom slechts **discrete energieën** $E_n, n = 1, 2, 3, \ldots$ hebben (zoals de tonen van een muziekinstrument).
- Een atoom kan zich in de **grondtoestand** (E_1) bevinden: dit is de laagst mogelijke energie-inhoud van het atoom. Hogere energie-inhouden (E_2, E_3, E_4 ...) noemen we **aangeslagen toestanden** van het atoom. Komt het elektron geheel vrij van het atoom, dan spreken we van **ionisatie**.
- Voor waterstof is de **ionisatie-energie** gelijk aan $13,6\ \text{eV}$, de energie nodig om een elektron van het laagste energieniveau los te maken van het waterstofatoom.
- In een **energieniveauschema** geven we de energie-inhouden van een atoom overzichtelijk weer.
- Bij een sprong van een elektron tussen de discrete energieniveaus E_n en E_m wordt een foton uitgezonden of geabsorbeerd. De frequentie van een **uitgezonden** of **geabsorbeerd foton** is te berekenen uit het energieverschil tussen de energieniveaus E_n en E_m:
$$hf = |E_n - E_m|$$
- In het Bohr-model kunnen de **energieniveaus van het waterstofatoom,** uitgedrukt in eV, berekend worden met
$$E_n = -13,6\frac{1}{n^2}$$
- De **spectraal lijnen** van een bepaalde stof corresponderen met specifieke overgangen tussen de energieniveaus in de atomen waaruit die stof bestaat.

2.3 Extra: Afleiding energieniveaus van het waterstofatoom

Met behulp van bekende natuurwetten en een beetje wiskunde worden spectraallijnen voor waterstof nauwkeurige berekend en….. waargenomen!

Paragraafvraag	**Hoe kon Bohr de energieniveaus van waterstof berekenen en daarmee het lijnenspectrum van waterstof verklaren?**

In de vorige paragraaf is een overzicht gegeven van de natuurkundige ontdekkingen, die in het begin van de 20e eeuw hebben bijgedragen tot het Bohr-model van het waterstofatoom. Met dit model valt goed te rekenen, omdat we met een eenvoudig systeem van twee "deeltjes" te maken hebben, een elektron rond een zware kern. In deze extra paragraaf volgen we de berekening van Bohr voor de energieniveaus van waterstof.

Wat je al weet

Bij de berekening maken we in hoofdzaak gebruik van begrippen en verbanden die je al eerder bent tegengekomen bij de mechanica en de elektriciteitsleer. Hier volgt een opsomming van de gebruikte ingrediënten:

Uit de module 'Elektrische en magnetische velden' halen we:

- Een positief en een negatief geladen deeltje trekken elkaar aan volgens de *Wet van Coulomb*:

$$F_e = k \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

Hierin zijn q_1, q_2 lading 1, resp. lading 2 (in C), r hun onderlinge afstand (in m) en is $k = 8{,}99 \cdot 10^9$ (in $\mathrm{Nm^2C^{-2}}$) de constante van Coulomb; Binas – tabel 7.

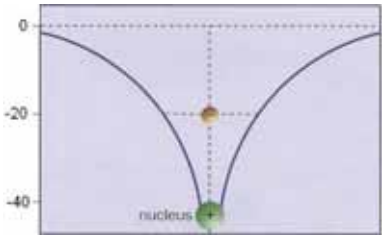
We passen dit toe op het waterstofatoom bestaande uit een waterstofkern met elementaire lading $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C en een elektron met lading $-e$.

- Tengevolge van de aantrekkende Coulombkracht heeft het elektron in de buurt van de eenwaardige atoomkern de elektrische energie:

$$E_e = -k \cdot \frac{e^2}{r} \qquad (1)$$

Deze elektrische energie is een voorbeeld van potentiële energie, geheel analoog aan de gravitatie-energie E_g van een massa m op een afstand r van het middelpunt van de aarde met massa M $\left(E_g = -G\frac{M \cdot m}{r} \right)$.

Energie



Figuur 2.23

Hoe moet je de elektrische energie van een elektron voorstellen? Wel, een (negatief) elektron wordt aangetrokken door de (positieve) atoomkern. Dit betekent dat - wil je het elektron van de kern verwijderen - je in dat geval arbeid moet verrichten.

Dus: een elektron heeft een negatieve energie wanneer die zich in de invloedsfeer van de kern bevindt: hoe dichter bij de kern, des te lager (negatiever!) is zijn energie ten opzichte van de atoomkern. Bevindt het elektron zich 'in het oneindige' dan is zijn energie t.o.v. die kern gelijk aan nul (je hoeft dan immers geen arbeid meer te verrichten tegengesteld aan de aantrekkende kracht van de kern).

Verder weten we uit de mechanica:

- Voor de middelpuntzoekende kracht op een massa in een cirkelbaan geldt:

$$F_{\text{mpz}} = \frac{mv^2}{r}$$

met m de massa van het deeltje (in kg), v de snelheid van het deeltje (in ms^{-1}) en r de straal van de cirkelbaan (in m).

61 Energie elektron

Vul de volgende zin aan: naarmate een elektron vanuit het oneindige een atoomkern nadert, neemt zijn elektrische energie ..... (toe/af) en wanneer die zie van een atoomkern verwijdert neemt zijn elektrische energie ..... (toe/af)

62 Snelheid elektron

Stel een elektron voor als een deeltje, dat in een cirkelbaan rond de waterstofkern draait op een afstand van $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m.

a. Bereken de onderling aantrekkende kracht tussen de kern en het elektron
b. Bereken voor dit geval de snelheid van het elektron in die cirkelbaan. Vergelijk je antwoord met de lichtsnelheid.

Quanisatieregel van Bohr

In het Bohr-model is de Coulombkracht de aantrekkende kracht die het elektron in een cirkelbaan rond de kern houdt, m.a.w. er geldt:

$$F_{\text{mpz}} = F_{\text{e}}$$

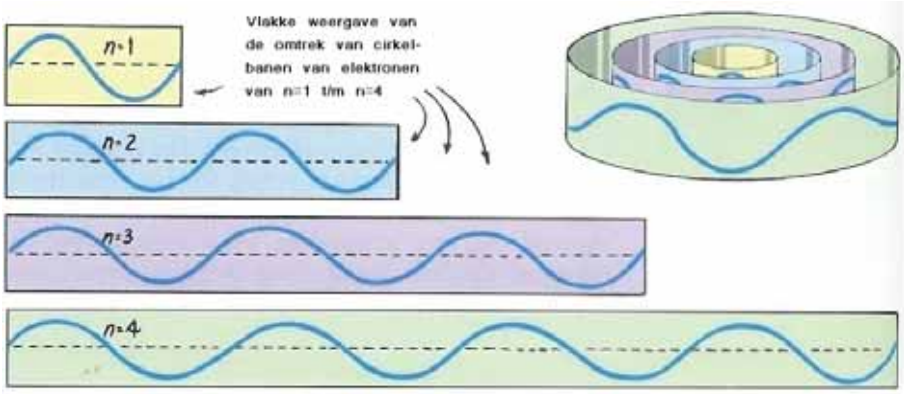
Ofwel

$$\frac{mv^2}{r} = k\frac{e^2}{r^2} \qquad (2)$$

Dit geeft een verband tussen de straal en de snelheid van het elektron. De veronderstelling van Bohr was nu dat er alleen bepaalde waarden van de straal r zijn toegelaten. Deze waarden r_n worden gegeven door de 'quantisatieregel':

$$2\pi r_n = n\lambda = n \cdot \frac{h}{m \cdot v_n} \text{ met } n = 1,2,3... \qquad (3)$$

Met v_n de bijbehorende snelheden van het elektron. Zoals we in de vorige paragraaf al hebben laten zien, komt de quantisatie-regel overeen met de veronderstelling dat de kans een elektron aan te treffen op afstand van de kern r_n maximaal is op die afstanden, waar de materiegolflengte van het elektron $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ een geheel aantal malen op de cirkelomtrek past.



Figuur 2.24 ontleend aan Hewitt, P.G., Conceptual Physics, 10th ed.,p. 628, ISBN 0-321-31532-4

Uit het bovenstaande kunnen we de conclusie trekken dat het elektron, of beter gezegd: de 'elektron-materiegolf' zich alleen maar in bepaalde banen rond de atoomkern van waterstof kan bevinden, met afstanden r_n tot de atoomkern. Iets minder vanuit het beeld van tastbare deeltjes geredeneerd: de grootste waarschijnlijkheid om het elektron rond de kern van het waterstofatoom aan te treffen is op de afstanden r_n.

63 Bohrse banen

Laat, uitgaande van formules (2) en (3), met een berekening zien dat voor de mogelijke baanstralen van het elektron geldt:

$$r_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{4\pi^2 kme^2} \qquad (4)$$

De verrassende uitkomst is dat we de 'toelaatbare' baanstralen r_n van het elektron rond de waterstofkern kunnen uitdrukken in louter en alleen natuurconstanten en in gehele getallen n=1,2,3,....., een opmerkelijk resultaat!

64 Bohr radius

Bereken de afstand van het elektron tot de waterstofkern in de grondtoestand (n=1). Deze afstand wordt de Bohr radius genoemd, aangeduid met a_o.

De afstanden van het elektron tot de kern kunnen we dus berekenen. Met verschillende experimentele methoden is bepaald, dat het waterstofatoom in de grondtoestand een diameter heeft van $1{,}06 \cdot 10^{-10}$ m, dus ongeveer 0,1 nm!

Als je de vorige opdracht goed hebt berekend, dan is dit eerste resultaat al binnen. Mocht het dan niet zijn bewezen dat de veronderstellingen van Bohr terecht zijn – het levert in ieder geval sterke aanwijzingen op dat bovengenoemde gedachtegang niet strijdig is met wat we waarnemen.

Energie van het elektron

Uiteraard zouden we wel wat meer aanwijzingen willen zien dat bovenstaande aannames plausibel zijn. Daarom berekenen we nu de energie van het elektron in het Bohr- atoom. We weten dat de kinetische energie van een deeltje met massa m en snelheid v is:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2$$

65 Kinetische energie

Laat met behulp van formule (2) hierboven zien, dat voor het kinetische deel van de elektronenergie in het Bohr atoom geldt:

$$E_{\text{kin}} = k\frac{e^2}{2r}$$

De totale energie van een elektron bestaat uit een kinetisch deel en een potentieel deel: in het geval van het elektron – elektrische energie. Samen vormen ze de totale energie van het elektron:

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{e}}$$

Aan het begin van dit hoofdstuk is reeds als ingrediënt de elektrische energie (1) van het elektron op afstand r van de atoomkern klaargelegd. Voor een elektron op afstand r kun je daarmee het verband hieronder bewijzen.

66 Verband elektron- en elektrische energie

a. Toon aan, dat voor de totale energie-inhoud van een elektron op afstand r van de waterstofkern geldt:

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{e}} = -k\frac{e^2}{2r}$$

b. Hoe zou deze vergelijking luiden voor een deeltje onder invloed van de zwaartekracht?

De algemene regel is dat de totale energie van een deeltje in een cirkelbaan gehouden door de elektrische kracht (of een andere kracht die afneemt met het kwadraat van de afstand) de helft is van de potentiële energie.

67 Totale energie elektron

Bereken de totale energie van het elektron, dat – beschouwd als deeltje – in een cirkelbaan beweegt rond de waterstofkern op een afstand van $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m.

Energieniveaus

De laatste stap is nu de totale energie van het elektron uit te rekenen voor de discrete banen gegeven in formule (4) in de volgende opgave:

68 Energieniveaus waterstofatoom

Leid af, m.b.v. formule (4), dat we voor de energie van een elektron in baan n kunnen schrijven:

$$E_n = -\frac{1}{n^2}\frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{h^2}$$

De totale energie-inhoud van een elektron op afstand r_n van de waterstofkern is, zoals we hier nu hebben afgeleid, slechts afhankelijk van een verzameling natuurconstanten en het nummer van de baan (n=1,2,3,.....). We vereenvoudigen de hiervoor afgeleide uitdrukking daarom tot:

$$E_n = -\frac{C}{n^2}$$

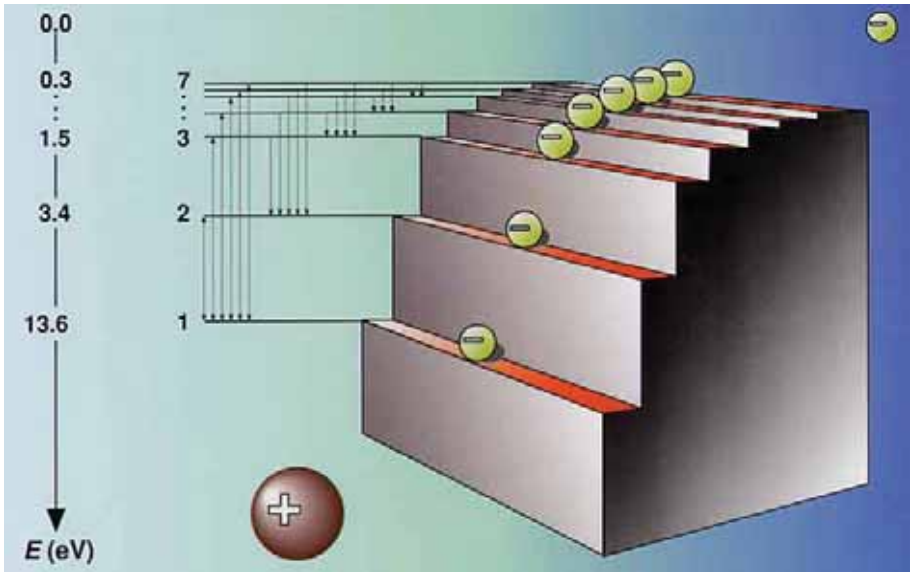
met de combinatie van constanten

$$C = \frac{2\pi^2 k^2 me^4}{h^2}$$

De betekenis van deze constante volgt direct als we de energie berekenen voor het waterstofatoom, waarin het elektron zich in het laagste energieniveau t.o.v. de kern bevindt (n=1):

$$E_1 = -C$$

Dit heet de grondtoestand of toestand met de laagste inwendige energie van het atoom.



Figuur 2.25 Energieniveaus van het waterstofatoom, weergegeven in een 'trapmodel' – hoe lager de trede, des te lager de energie-inhoud. Merk op dat bij lagere energie-inhouden de onderlinge afstand van de 'treden' groter wordt.
Bron: www.kuleuvenkortrijk.be/shakhashiri/download/tekst6.htm

Boven de grondtoestand kan het waterstofatoom zich in aangeslagen toestanden op hogere energieniveaus bevinden (n=2, 3, 4,...). De *ionisatie-energie* is de energie nodig om een elektron los te maken van het atoom. De ionisatie-energie correspondeert dus met een overgang van het grondniveau $n = 1$ naar een oneindig verre baan $n = \infty$. Dit is de energie C.

69 Ionisatie-energie

a. Laat door berekening met de waarden voor de constanten uit Binas zien dat de constante C gelijk is aan $2{,}18 \cdot 10^{-18}$ J.
b. Ga na dat C inderdaad de eenheid van energie heeft.

Als we deze ionisatie-energie berekenen met de waarden voor de constanten uit Binas vinden we:

$$C = 13{,}606 \text{ eV}$$

De ionisatie-energie kan ook gemeten worden; het resultaat correspondeert met de berekende waarde tot op 0,1% nauwkeurig!

Rydberg formule

Nu de slotconclusie: Wanneer een elektron springt van een energieniveau n naar een energieniveau m, kan dat doordat het elektron energie wint/verliest door een foton op te nemen/af te staan. De energie van dat foton is gelijk aan het verschil in energie-inhoud van het elektron, m.a.w.:

$$E_f = hf = \left|E_m - E_n\right| = C\left|\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right|$$

We kunnen, mits we er in slagen de energie van de fotonen uit stralend waterstof te meten, nagaan of de fotonen inderdaad beantwoorden aan het gemeten spectrum van waterstof. De frequenties van fotonen zijn moeilijk te meten, in tegenstelling tot golflengten. Daarom schrijven we voor de energie-inhoud van een foton voor $n > m$:

$$hf = h\frac{c}{\lambda} = C\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

of:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{C}{hc}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) = R_H\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

Uit de berekening van Bohr volgt dat de rydbergconstante gegeven wordt door:

$$R_H = \frac{C}{hc}$$

Hierboven staat de rydberg-formule, vernoemd naar de Zweedse natuurkundige Johannes Rydberg die deze al in 1888 publiceerde. Hiermee toonde hij de regelmaat van golflengten van licht aan van elementen die lijnenspectra uitstralen. En dat terwijl nog niets bekend was over hoe lijnenspectra ontstaan! Bekijk voor een uitgebreide beschrijving van zijn werk de website:
http://en.wikipedia.org/wiki/Johannes_Rydberg

70 Rydberg constante

a. Bereken de rydbergconstante voor waterstof en vergelijk deze met de waarde in tabel 7 van Binas.
b. Ga na dat de rydbergconstante de juiste eenheid heeft.

Er blijken meer lijnen in het spectrum van het waterstofatoom voor te komen dan de relatie die hierboven is afgeleid, kan verklaren. Dit komt o.a. door de ruimtelijke structuur van atomen. Bij de theoretische afleiding hierboven is uitgegaan van het model in het platte vlak, waarmee in ieder geval een gedeelte van de optredende spectraallijnen aannemelijk is gemaakt. In de quantummechanica wordt volledig rekening gehouden met de ruimtelijke structuur van atomen, alsmede met intrinsieke eigenschappen van elektronen zoals de magnetische oriëntatie ervan. Dit laatstgenoemde aspect hebben we hier buiten beschouwing gelaten.Voor de verklaring van lijnenspectra van zon en sterren levert de vereenvoudigde benadering zoals die in dit hoofdstuk is gebezigd, al een scala aan onderzoeksmogelijkheden op.

Opgaven

§2.1 Wat hebben materie en straling met elkaar?

71
Een lichtbron zendt infraroodstraling uit met een golflengte van 1150 nm. Wat is de frequentie van deze straling?

72
Zwarte gaten zijn objecten met zo'n sterk zwaartekrachtsveld dat zelfs iets dat met de lichtsnelheid beweegt niet van het oppervlak weg kan komen. Zwarte gaten zenden hierdoor zelf geen licht uit. Maar het is wel mogelijk om materiaal te zien dat naar een zwart gat toe aan het vallen is. Wanneer dit gebeurt wordt het materiaal samengedrukt en verhit tot 10^6 K. Bereken die golflengte waarop dit materiaal maximaal straling uitzendt bij deze temperatuur. In welk deel van het elektromagnetisch spectrum ligt deze golflengte?

73 Compton effect
In de map Comptoneffect op de leerlingendisk staat een simulatie van het comptoneffect. Het comptoneffect beschrijft de wisselwerking tussen een elektromagnetische straling en een elektron. Tijdens de botsing van het pakketjes straling met het elektron vindt energiebehoud plaats. De energie is na de botsing verdeeld tussen het elektron en het pakketje straling.

a. Dubbelklik op Leerlingen ICT-disk en ga naar Hoofdstuk 2 - Straling en materie/Comptoneffect/Compton.htm en bekijk hoe elektronen een stoot ondervinden wanneer ze door fotonen worden geraakt. Vergelijk dit met wat je ziet op een biljarttafel!
b. Geef aan, waarom datgene wat je ziet, zo'n overtuigend argument is voor het "deeltjeskarakter" van elektromagnetische straling.
c. Waarom gebruikte Compton Röntgenstraling in zijn experiment?

(N.B. Soms krijg je bij het opstarten een beveiligingsmelding, zonder dat het programma opstart. Klik je daarop dan verschijnt een venster met o.a. de keuze: Geblokkeerde inhoud toestaan – als je daarop klikt, start het applet daadwerkelijk op)

74 Extra: over quantummechanica
Op de web-site www.natuurkunde.nl staan twee artikelen over de essentie van de deeltje-golf dualiteit en de grondbeginselen van de quantummechanica:

- 'Interferentie van licht'
- 'Principes van de quantummechanica'.

Deze artikelen zijn de moeite van het lezen waard. Voor de fijnproevers is ook 'Quantum versus Klassiek' aan te raden.
Zie ook het lesmateriaal van het project Moderne Natuurkunde:
www.cdbeta.uu.nl/subw/mn/materiaal/h3/par1.php

§2.2 Spectraallijnen van het waterstofatoom.

75 Het atoom is leeg

Stel dat we een atoom zouden opblazen met een factor 10^{12} tot een diameter van 100 meter. Hoe groot zou de kern dan zijn?

76 Balmerreeks

We beschouwen het waterstofatoom in de energetische toestand m=2. Het elektron kan overgaan in energieniveaus n=3, 4, 5, 6, ... De golflengtes van spectraallijnen die bij deze energie-overgangen passen, zijn te berekenen met de Rydberg-formule formule:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

a. Maak in je schrift een tabel zoals hieronder en bereken daarin de golflengtes die behoren bij de overgangen vanuit de overgangen n=2 naar de in de tabel genoemde waarden voor m:

m	3	4	5	6	7	8	9	10	∞
λ (nm)									

De laatste kolom, gemerkt met ∞, betekent dat het elektron buiten de invloedsfeer van de waterstofkern raakt, m.a.w. het waterstofatoom komt in geïoniseerde toestand. De energie, die daarvoor nodig is, heet ionisatie-energie van het waterstofatoom vanuit energietoestand 2.

b. Bereken de ionisatie-energie van het waterstofatoom vanuit energietoestand 2 in Joule en in eV.

77 Continuümspectrum

Bekijken we het spectrum van waterstof in de Balmerreeks, dan valt op dat de lijnen behorende bij golflengtes voor steeds grotere waarde van n steeds dichter bij elkaar komen te liggen.

a. Waarom is dat zo?

Voorbij de golflengte, die behoort bij de ionisatie-energie, zien we geen lijnen meer maar een continuüm; dit continuüm heet het seriegrenscontinuum van de Balmerreeks.

b. Geef een verklaring voor het verschijnsel, dat voor hogere energieën dan de ionisatie-energie van het elektron geen discrete spectraallijnen meer zijn waar te nemen.

c. Beschrijf ook wat er met het elektron gebeurt, wanneer het waterstofatoom een foton opvangt met een energie, die groter is dan de ionisatie-energie.

d. Bereken de ionisatie-energie voor het waterstofatoom vanuit de grondtoestand (n=1). Ook tussen de grondtoestand zijn overgangen mogelijk van het elektron naar hogere energieniveaus (n= 2,3,4,...∞). Hierbij hoort uiteraard weer een reeks golflengtes in het spectrum van waterstof. Ook deze reeks heeft een naam: de Lyman-reeks. Beredeneer of deze golflengtes zich in het gebied met kortere of langere golflengtes dan het zichtbare spectrum bevinden.

78
Bereken de energie-inhoud van enkele fotonen in de volgende tabel in:

λ (nm)	350	450	550	650	700
E_f (J)					
E_f (eV)					

79
a. Beschrijf een experiment waarin licht zich gedraagt als golf.
b. Beschrijf een experiment waarin licht zich gedraagt als een deeltje.

80
a. Bereken de 4e golflengte uit de Paschen serie.
b. Teken een schema van de overgangen binnen het waterstofatoom. Geef aan welke overgang de spectraallijn uit vraag a veroorzaakt.
c. In welk deel van het elektromagnetisch spectrum ligt deze golflengte?

81
a. Bereken de golflengte van de spectraallijn die hoort bij de overgang tussen de elektronbanen met n=15 en n=2.
b. In welk deel van het elektromagnetisch ligt deze golflengte?

82
Bepaalde interstellaire gaswolken bevatten een zeer koud, dun gas van waterstofatomen. Ultraviolette straling met een golflengte korter dan 91.2 nm kan niet door dit gas heen; het wordt geabsorbeerd. Leg uit waarom.

83
Een denkbeeldig atoom heeft maar 3 energieniveaus: 0 eV, 1 eV en 3 eV. Teken een schema van alle mogelijke energieovergangen in dit atoom. Bepaal voor iedere overgang de energie en golflengte van de fotonen. Welke fotonen vallen onder zichtbaar licht?

84
a. Bereken de onderling aantrekkende kracht tussen een positief geladen bol met een lading van 45µC en een negatief geladen bol van 60 µC op een onderlinge afstand van 10 cm.
b. Bereken de onderling aantrekkende kracht tussen de kern van een waterstofatoom en een elektron op een onderlinge afstand van $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m.
c. Bereken de elektrische energie van een lading van -45 C op verschillende afstanden van een positief geladen bol van 60 µC bevindt. Vul de gevonden waarden in onderstaande tabel in:

Afstand (m)	0,10	1,00	10,0	100	1000	∞
E_e (J)						
E_e (eV)						

3 Onderzoek aan sterren

Hoofdstukvraag	**Wat kunnen we uit straling van sterren te weten komen en hoe?**

De sterrenkunde is een van de oudste wetenschappen. Al sinds mensenheugenis nemen we aan de nachtelijke hemel met het blote oog enkele duizenden sterren als lichtpuntjes waar. Met een verrekijker zie je al gauw 10.000 zwakker stralende sterren méér. Gezien door een telescoop met een objectiefdiameter van 15 cm komt de telling uit op meer dan 2 miljoen. Uit waarnemingen met grote telescopen en satellieten in de ruimte hebben astronomen becijferd dat er minstens 100 miljard sterren zijn, alleen al in ons eigen melkwegstelsel. De wetenschap van de sterrenkunde is in die zin een zuivere wetenschap te noemen, omdat we tijdens het onderzoeken van sterren niets aan de sterren kunnen veranderen – alleen maar waarnemen.

Maar wat zijn dat voor dingen, die verre lichtpuntjes? We weten nu dat sterren uit elementen bevatten die we ook op onze aarde kunnen vinden. We begrijpen ook waarom sterren verschillende kleuren hebben; blauwachtig met hoge oppervlakte temperatuur en rode en gele sterren die koeler zijn
We kennen vrij nauwkeurig de afmetingen en de massa van sterren, en ook iets van de inwendige structuur.

Hoe hebben astronomen dit kunnen ontdekken terwijl sterren zo ver weg staan dat het licht jaren of zelfs eeuwen nodig heeft om ons te bereiken? En licht dat zo zwak is dat de totale hoeveelheid licht dat door telescopen wordt opgevangen vergelijkbaar is met dat van in totaal één fietslampje! Met de grootste telescopen kunnen we nu de reuzensterren zelfs als kleine lichtvlekjes waarnemen.

In hoofdstuk 3 gaan we de in de eerste twee hoofdstukken opgedane kennis gebruiken om verder in het heelal te kijken. Dit hoofdstuk gaat over de waarnemingstechnieken die astronomen gebruiken om eigenschappen van sterren te achterhalen, en welke informatie in ieder geval uit de spectra van sterren kan worden gehaald en uit welk gebied van het elektromagnetisch spectrum.

3.1 Temperatuur, helderheid en lichtkracht van sterren.

Sterren lijken ruwweg allemaal op de zon. Toch zijn ze er in vele soorten en maten.

Paragraafvraag	**Wat voor verband bestaat er tussen helderheid, grootte en afstand van sterren?**

In hoofdstuk 1 hebben we geleerd hoe we door bestudering van spectra van de straling van de zon verschillende natuurkundige grootheden kunnen afleiden, zoals temperatuur, totale lichtkracht en samenstelling van de zon. We hebben tevens een verband gelegd tussen de van de zon ontvangen stralingsintensiteit en de afstand tot de zon: de kwadratenwet.

Sterren met verschillende helderheden en kleuren

De lichtkracht van de zon hebben we in hoofdstuk 1 bepaald:
$L = 4 \cdot 10^{26}$ Watt. De zonneconstante, het vermogen dat we van de zon per m^2 op aarde opvangen, kunnen we berekenen met de kwadratenwet. Deze bedraagt ongeveer 1,4 kW/m^2. Dat lijkt te verwaarlozen t.o.v. het vermogen dat de zon uitstraalt! We hebben ook de zonneconstante op de planeet Neptunus berekend. We hebben gezien dat die al behoorlijk kleiner dan die op onze aarde.

85 α Centauri-constante

Gegevens: de afstand van α Centauri, een vrij heldere ster in het sterrenbeeld Centaurus, bedraagt 4,3 lichtjaar. Eén lichtjaar is de afstand die licht in één jaar aflegt.

a. Hoe groot is de "zonneconstante" op de afstand van de ster α Centauri,?

Deze ster, α Centauri, lijkt veel op de zon en heeft ongeveer dezelfde lichtkracht als de zon.

b. Bereken de "α Centauri-constante" van de straling die wij hier op aarde opvangen van deze "zon".

Vergelijk de beide uitkomsten.



Figuur 3.1 Het sterrenbeeld Orion met Betelgeuze (rood) en Rigel (blauw.

Uit dit voorbeeld zien we dat een 'zon' zoals de onze op een afstand van 4,3 lichtjaar te zien is als een ster: de zon is eigenlijk niets anders is dan een ster tussen de sterren!

In januari is rond 10 uur 's avonds in het zuiden een prachtig "winter" sterrenbeeld te zien: Orion. Dit sterrenbeeld is afgebeeld in figuur 3.1 – precies zoals je hem op het eerste gezicht ziet. Wanneer je de sterren van het sterrenbeeld nauwkeuriger bekijkt zie je kleur- en helderheidverschillen.

Verschil in helderheid en kleur tussen de sterren is het meest opvallend. De *helderheid* hangt direct samen met de hoeveelheid licht van de ster dat in je oog valt. En deze hoeveelheid licht hangt af van de lichtintensiteit: de hoeveelheid sterlicht die per seconde op een oppervlakte van 1 m^2 valt (uitgedrukt in Wm^{-2}). We zijn deze grootheid reeds tegengekomen in de gedaante

van de zonneconstante. Helderheden van sterren worden al zeer lang met elkaar vergeleken met het blote oog. In de sterrenkunde spreekt men van ‘magnitude’.

86 Lichtkracht

Op de site:
http://www.gymnasiumhaarlem.nl/nina/lesmateriaal/images/stralingskrommen1.htm staan stralingskrommen weergegeven van vier sterren in Orion, zoals die zijn gemeten door o.a. de Hubble Space Telescope.

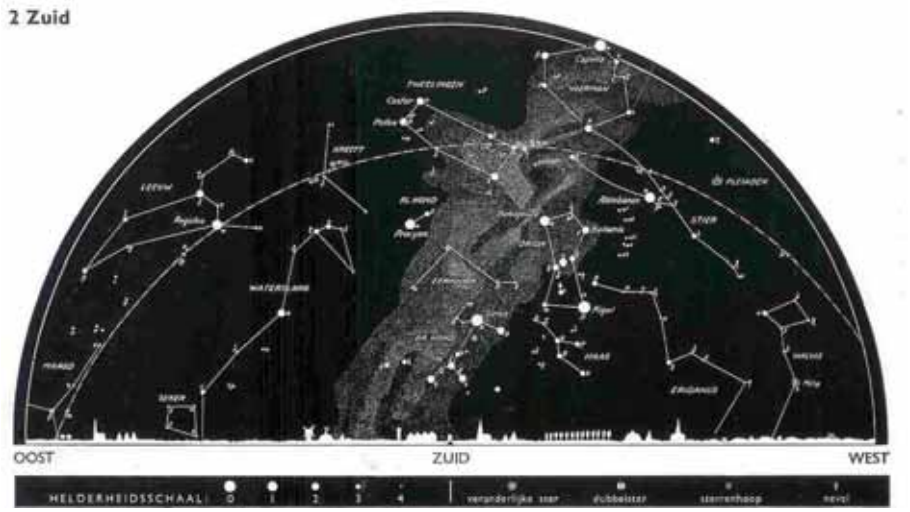
a. Bepaal aan de hand van deze krommen de temperatuur van deze vier sterren.
b. Bereken aan de hand van deze temperaturen vervolgens, hoeveel vermogen elk van de vier sterren uitstraalt per m² oppervlak.

De waargenomen intensiteit (ontvangen vermogen in W/m²) hangt in ieder geval af van de afstand van de ster. Natuurlijk verwacht je dit ook: immers de opgevangen stralingsintensiteit is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot de ster, zoals de kwadratenwet in hoofdstuk 1 ons heeft geleerd.

87

Rond het sterrenbeeld Orion met de sterren Rigel en Betelgeuze zijn andere heldere sterren zichtbaar: de sterren Castor en Pollux in het sterrenbeeld Tweelingen, de ster Procyon in de Kleine Hond, de ster Aldebaran in de Stier, de ster Capella in de Voerman. De ster Sirius in de Grote Hond is de helderste, maar die staat relatief dichtbij.

Gebruik de kaart uit figuur 3.2 om de sterren te vinden aan de hemel. Binnen zekere grenzen zijn ze allemaal even helder (Sirius is helderder). Zoek van deze sterren de afstand op in Binas - tabel 32. Wat kun je hieruit concluderen over de lichtkracht van die sterren?



Figuur 3.2

Aan de hand van de vorige opgave kunnen we ook concluderen dat de helderheid van de ster zoals we hem zien niet alleen afhangt van de afstand van de ster. Een ster met grote helderheid hoeft niet per se dichterbij te staan dan een ster met kleinere helderheid.

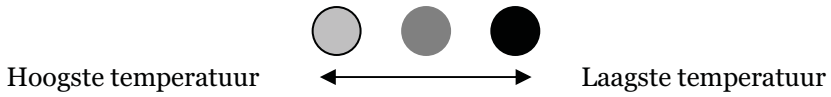
We hebben in hoofdstuk 1.3 het verband tussen de straling per m² oppervlak en de temperatuur van de zon leren kennen als de wet van Stefan Boltzmann.

De straling per m² oppervlak is evenredig met T^4. Om de totale lichtkracht

te berekenen, moeten we die vermenigvuldigen met de totaal uitstralende oppervlakte. Van sterren kunnen we echter geen oppervlakten zien: ze zijn allemaal zichtbaar als lichtpuntjes. Twee sterren met dezelfde oppervlaktetemperatuur kunnen enorm verschillen in uitgestraald vermogen als de ene ster klein is en de andere groot. Het gedachte-experiment in de volgende opdracht laat dit zien.

88 Fluitketelanalogie

We zetten twee identieke fluitketels met evenveel theewater uit de kraan op een elektrisch fornuis. Deze fluitketels zijn te vergelijken met de waarnemers. Deze vangen energie op van de kookplaten. De onderkanten van beide fluitketels passen precies op de kookplaat met de grootste diameter. In de afbeeldingen in figuur 3.3 geldt: hoe lichter de kookplaat, des te hoger de temperatuur ervan.



Figuur 3.3

c. Leg uit van welke paren kookplaten (a, b, c en/of d) je met zekerheid de ketel aan kan wijzen waarin het water als eerste zal koken.

a.



c.



b.



d.



d. Leg uit wat je bij de kookplaten waar je het niet zeker weet zou moeten veranderen om het wel zeker te weten?

De vorige opgaven illustreren dat de helderheid van een ster niet alleen afhangt van de afstand ervan. Conclusie:

- Sterren die even helder lijken, kunnen onderling een groot verschil in lichtkracht hebben;
- Sterren met dezelfde lichtkracht kunnen een groot verschil in helderheid vertonen (vergelijk de zon en α Centauri!). Om betrouwbare uitspraken te kunnen doen over natuurkundige eigenschappen van een ster, moet de afstand van de ster bekend zijn;
- Kleine blauwe sterren met hoge temperatuur kunnen hetzelfde vermogen uitstralen als grote rode sterren.

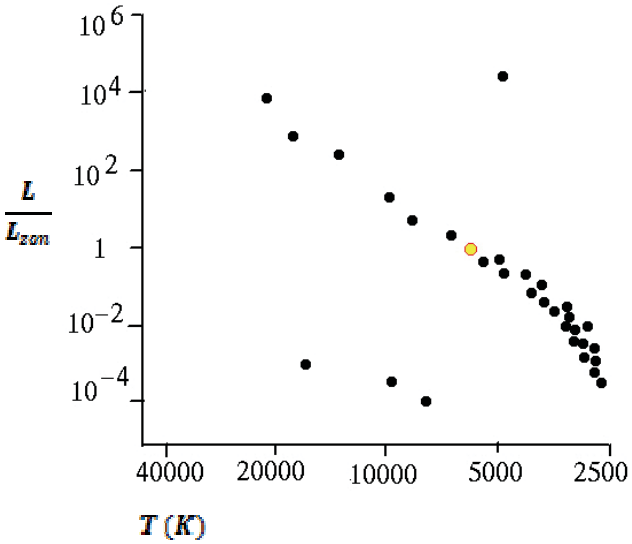
89 Helderheid en kleur Orion

Je kunt bij het waarnemen van de sterren in het sterrenbeeld Orion vooral verschillen zien in kleur en helderheid. Neem onderstaande tabel over in je schrift en geef daarin d.m.v. een kruis aan van welke eigenschappen van de sterren de helderheid en de kleur naar jou mening kunnen afhangen. Ben je niet zeker van het verband, zet dan een vraagteken. Beargumenteer je keuzes.

	Stralingsintensiteit	Kleur
Oppervlaktetemperatuur ster		
Grootte ster		
Afstand ster		

Het Hertzsprung-Russell diagram

In het *Hertzsprung-Russell diagram* (HR-diagram) wordt de lichtkracht van sterren uitgezet tegen hun oppervlaktetemperatuur. Het diagram is vernoemd naar Ejnar Hertzsprung en Henry Norris Russell die onafhankelijk van elkaar rond 1910 als eersten een dergelijk diagram maakten. Van een paar dozijn sterren in de omgeving van de zon heeft men met behulp van de bekende afstanden en hun helderheden de lichtkracht kunnen berekenen. (Van vele sterren in de "nabijheid" van de zon heeft men de afstand kunnen bepalen met de z.g. parallaxmethode. Wie hier meer over wil weten: bekijk de website: http://www.ster.be/urania/parallax.html). Een HR-diagram met daarin een aantal sterren staat in figuur 3.4 hieronder. De lichtkracht van elke ster staat in de verticale as weergegeven als de verhouding: L/Lzon. Dus de lichtkracht als veelvoud van die van de zon, ongeveer $3{,}90 \cdot 10^{26}$ Watt (hoofdstuk 1). Merk op dat vanwege de grote spreiding in lichtkracht en temperatuur beide assen in een logaritmische schaal zijn weergegeven.



Figuur 3.4 ontleend aan: Davison E. Soper, Institute of Theoretical Science, University of Oregon, Eugene OR 97403

De temperatuur is op de horizontale as in van hoog naar laag weergegeven. Vandaar dat links boven in figuur 3.4 de hete heldere sterren en rechtsonder de koele en minder heldere sterren voorkomen. De rij van linksboven naar rechtsonder wordt de *hoofdreeks* genoemd. Logisch dat voor de zon geldt: $L/L_{zon} = 1$. De oppervlaktetemperatuur van de zon is, zoals we al weten, 5800 K. De zon staat als een gele stip aangegeven.

Dit diagram heeft ons veel geleerd over de eigenschappen en de evolutie van sterren. De meeste sterren zoals de zon nemen tijdens de langste tijd van hun bestaan een plaats in op die hoofdreeks. Vooral aan het eind van hun leven beginnen zij van die hoofdreeks af te wijken, doordat de sterren gaan 'opzwellen'. Het HR-diagram kan ons zodoende iets vertellen over de grootte van sterren in vergelijking tot die op de hoofdreeks. Ook kan een HR-diagram van sterren uit een bepaalde sterrenhoop ons inzicht verschaffen over de ouderdom van die sterrenhoop.

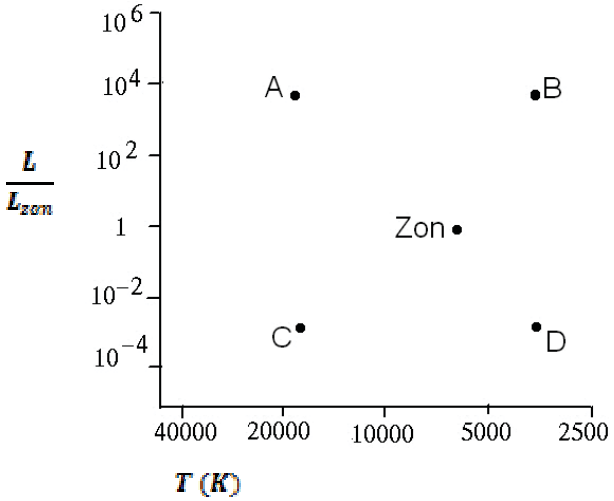
We gaan niet dieper in op de evolutie van sterren. Wil je hier meer over weten: zie http://www.sterrenkunde.nl/index/encyclopedie/sterevol.html

90 Diameter van sterren

In een denkbeeldige HR-diagram (figuur 3.5) staan vier sterren A, B, C, D en de zon.

a. Welke van de vier sterren heeft in vergelijking met de zon een lagere temperatuur maar een grotere lichtkracht? En welke heeft in vergelijking met de zon een hogere temperatuur maar een kleinere lichtkracht?

b. Is uit dit diagram te concluderen, welk van de vier sterren de grootste diameter heeft? En welke de kleinste?



Figuur 3.5 ontleend aan: Davison E. Soper, Institute of Theoretical Science, University of Oregon, Eugene OR 97403

91 HR- diagram

In het HR-diagram van de sterren in de omgeving van de zon (zie figuur 3.4) ligt het voor de hand om een lijn te trekken door de sterren van linksboven naar rechtsonder. We noemen deze lijn de hoofdreeks. We zien ook één ster rechtsboven.

a. Wat kun je zeggen over de grootte van deze ster?

b. En over de grootte van de drietal sterren linksonder?

In tabel 33 van Binas staat een HR-diagram van een groot aantal zichtbare sterren het HR-diagram afgebeeld.

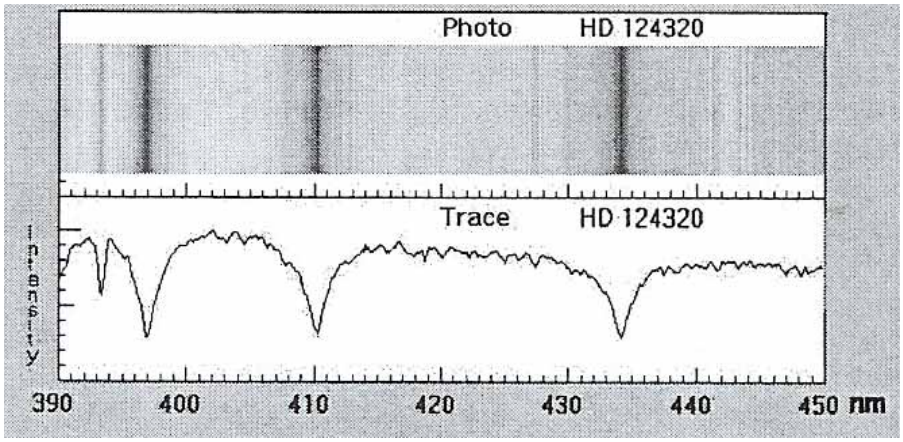
3.2 Spectra van sterren

Een zaak van noeste arbeid

Paragraafvraag	Wat kunnen we uit de spectra van sterren te weten komen?

In hoofdstuk 2 hebben we ons verdiept in het wezen van de straling en het ontstaan van spectra en spectraallijnen via het atoommodel van Bohr. We hebben het foton leren kennen als energiedrager die in wisselwerking met atomen treedt, en daardoor informatie met zich kan meedragen over zijn herkomst: de energie van fotonen correspondeert met energieniveauverschille binnen een atoom. Van vele bekende elementen zijn deze energieniveauverschillen in het laboratorium in kaart gebracht.
Aan de hand van bestudering van het licht van de zon, zijn we te weten gekomen dat de kleur van het licht uitsluitsel geeft over de temperatuur van de oppervlakte ervan. Met behulp van de absorptielijnen in het spectrum van de zon hebben we de samenstelling van de gaslaag boven het oppervlak kunnen bepalen. Uit spectraallijnen valt nog meer informatie te halen. We zullen dat zien aan de hand van spectra van sterren. Daarover gaat deze paragraaf.

Classificatie



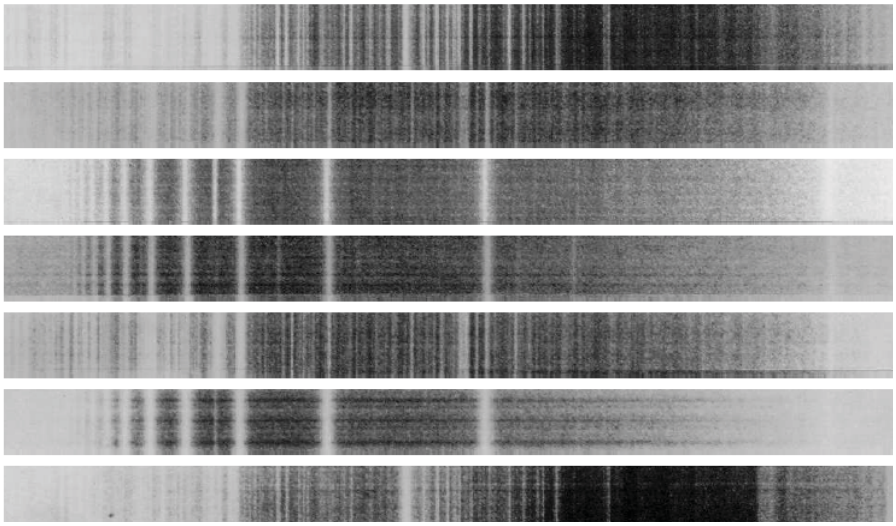
Figuur 3.6 Absorptiespectrum van een ster

Ook van het (zwakke!) licht van sterren kunnen we (met lange belichtingstijden) spectra opnemen. Ze vertonen dezelfde gedaante als het absorptiespectrum van de zon, zoals is afgebeeld in figuur 3.6.
Nauwkeurige meting van de intensiteit van het licht als functie van de golflengte vertaalt de bovenkant van figuur 3.6 in de onderkant van figuur 3.6: we herkennen de donkere lijnen.
Het patroon van die lijnen verraadt welke elementen in de gaslaag boven het stralende oppervlak van de ster aanwezig zijn. Hiermee hebben we reeds in hoofdstuk 1.4 kennis gemaakt. We zien in de onderste figuur diepe en ondiepe lijnen, brede en smalle lijnen.

92 Absorptie

Waardoor wordt de diepte van een spectraallijn bepaald?

In de absorptiespectra van de meeste sterren is een 'doolhof' aan lijnen te zien, zoals in figuur 3.7 is te zien.



Figuur 3.7



Figuur 3.7b Analyse van spectra op het Harvard College Observatory omstreeks 1890
Bron:phyics.carleton.edu/Astro/pages/marga_michele/harvard.html

Een betere illustratie hoe complex sterspectra in elkaar zitten, kun je bijna niet geven. Het laat dan zien dat het ontleden van een lijnenpatroon in het spectrum van een ster in de 'vingerafdrukken' van de verschillende elementen, veel oefening en ervaring vereist. Kortom werk voor de echte detective om van objecten op grote afstand de samenstelling te bepalen.

Eén van die detectives, die bergen werk heeft verzet in het **classificeren van sterspectra**, was Annie Cannon, werkzaam op de Harvard Sterrenwacht in de VS. Ze classificeerde ongeveer 250.000 sterspectra van fotografische platen. En dat, terwijl men nog geen verklaring had voor de aanwezigheid van lijnen in de sterspectra.

93 Classificatie van sterspectra

Om een indruk te krijgen, hoe dat in zijn werk ging, zullen wij 18 sterspectra classificeren. Op de Leerlingen ICT-disk staat een opdracht over het classificeren van sterspectra, genaamd "Classificatie van sterspectra.doc" (in de map Hoofdstuk 3 – Onderzoek aan sterren). Print deze opdracht en voer de opdrachten in dit bestand uit.



Figuur 3.7c Annie Cannon (1863-1941)
Bron:astro.berkeley.edu/~gmarcy/women/cannon.html

Wat heeft het speurwerk in absorptiespectra van sterren tot nu aan informatie opgeleverd?

- Relatief "koele" sterren (met een oppervlaktetemperatuur tot ca. 3000 K) vertonen absorptielijnen van moleculen;
- In hetere steratmosferen zijn die moleculen uiteengevallen (gedissocieerd) en zijn geen moleculaire lijnen in het spectrum zichtbaar;
- In spectra van zeer hete sterren (van 10.000 tot 30.000 K) zijn absorptielijnen van geïoniseerde elementen (ionen) in de meerderheid.

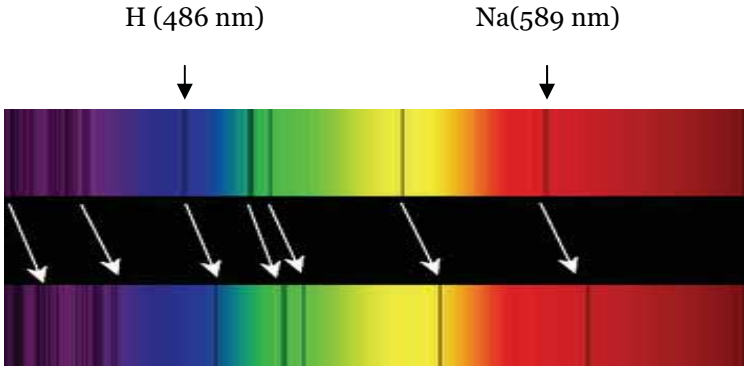
94 Spectraallijnenpatroon en temperatuur

In eerdere hoofdstukken is aangetoond dat met de Planck-kromme van een ster redelijk goed de oppervlaktetemperatuur kan worden bepaald. Beargumenteer of er tevens een verband zou kunnen bestaan tussen de spectraalclassificatie van het spectraallijnenpatroon van een ster en de temperatuur.

Rood- en blauwverschuiving

In spectra van sterren komt het voor dat alle lijnen van bekende elementen in het spectrum niet op de juiste golflengte liggen maar zijn verschoven.

In het bovenste spectrum zijn twee lijnen geïdentificeerd. In het onderste spectrum blijken deze lijnen, evenals de niet geïdentificeerde lijnen naar rechts te zijn verschoven, allen in de richting van het rode gebied. We spreken dan ook van **roodverschuiving**.



Figuur 3.8 Roodverschuiving, bron wikipedia

Een verschuiving van de golflengte van de spectraallijnen verraadt dat de desbetreffende deeltjes van het gas ten opzichte van ons snelheid hebben. Immers, de waargenomen golflengte verschilt van die zoals deze door de bron is uitgezonden. Bij geluid is dit verschijnsel bekend als het **dopplereffect**: wanneer een auto van een hulpdienst met sirene ons nadert horen we een hogere toon (grotere frequentie/kortere golflengte) dan wanneer die stilstaat. Als die zich van ons verwijdert, horen we een lagere toon (kleinere frequentie/langere golflengte). Alleen de component van de snelheid naar ons toe of van ons af - de **radiale snelheid** - speelt een rol bij het optreden van het Dopplereffect, zoals in het volgende filmpje wordt gedemonstreerd.



Figuur 3.9 Johann Christian Andreas Doppler (1803 – 1853)
Bron: nl.wikipedia.org

95 Dopplereffect

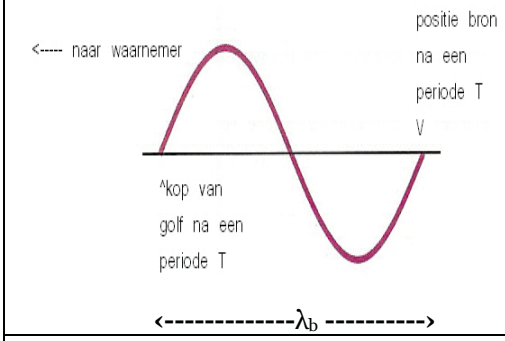
a. Bekijk de het filmpje: Dopplereffect.mpg in de map Videomateriaal → Hoofdstuk 3 van de Leerlingen ICT-disk. Daarin kun je, voor geluid zien, hoe de waargenomen golflengte (frequentie) verandert, doordat de bron ons nadert of zich van ons verwijdert.

b. Iemand beweert: 'Licht bestaat uit deeltjes, dus het dopplereffect kan nooit werken bij licht'. Leg uit waarom dit niet klopt

Omdat we het Doppler-effect in het dagelijks leven kunnen ervaren in het geval van geluid, zullen we de verschuiving in golflengte (dus de frequentie), welke optreedt bij verwijdering of nadering van de geluidsbron, eerst afleiden voor het verschijnsel geluid. Neem aan dat je als geluidsbron een sirene hoort van bijvoorbeeld een brandweerauto die jou zonet is gepasseerd. Je hebt in dat geval eerst een hogere toon gehoord (hogere frequentie, kortere golflengte) bij het naderen, daarna een lagere toon (lagere frequentie, langere golflengte). Dit verschijnsel is op de filmpjes zichtbaar gemaakt.

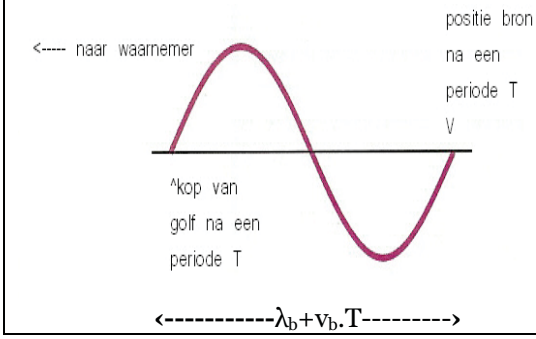
We kunnen het verschil tussen de door jou waargenomen golflengte, λ_w en de door de sirene uitgezonden golflengte, λ_b, verklaren, door de bekijken wat er met de golflengte gebeurt tijdens het uitzenden van één golf door de bron in de trillingsperiode T (=1/f).

We nemen daarbij aan dat de golf zich vanuit de bron naar de waarnemer links beweegt en dat de geluidsbron zich naar rechts beweegt met een snelheid v_b, dus van de waarnemer af. De geluidssnelheid in het medium is v_g.



Als een bron ten opzichte van de waarnemer *in rust* is, is de afstand tussen de kop van de door de bron uitgezonden golf en de bron na één trillingsperiode T gelijk zijn aan één golflengte: λ_b.
met:

$$\lambda_b = v_g \cdot T \qquad (1)$$



Als de geluidsbron zich van de waarnemer af beweegt met een snelheid v_b naar rechts, wordt de afstand tussen de kop van de uitgezonden golf en de bron na één trillingsperiode T (die niet is veranderd) "uitgerekt" tot:

$$\lambda_w = \lambda_b + v_b \cdot T \qquad (2)$$

(1) ingevuld in (2) geeft:

$$\lambda_w = v_g \cdot T + v_b \cdot T \qquad (3)$$

We zien dat bij verwijdering van de geluidsbron de golflengte is toegenomen van λ_b, de uitgezonden golflengte, tot λ_w, de golflengte die we waarnemen. Dit is wat we horen als een hulpdienstauto met sirene zich van ons verwijdert: bij een langere golflengte behoort een lagere frequentie, dus een lagere toon.
De golflengte*verandering*, $\Delta\lambda$, bedraagt zodoende ((3) minus (1)):

$$\Delta\lambda = \lambda_w - \lambda_b = v_g.T + v_b.T - v_g.T = v_b.T \qquad (4)$$

Gebruikmakend van:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda_b}{v_g} \qquad (5)$$

Volgt:

$$\Delta\lambda = \frac{v_b}{v_g} \cdot \lambda_b$$

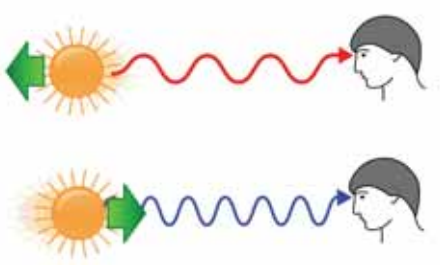
of:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_b} = \frac{v_b}{v_g}$$

M.a.w. voor een geluidsbron, die zich met snelheid v_b van ons verwijdert, geldt dat de verhouding tussen de golflengtetoename ($\Delta\lambda$) en de uitgezonden golflengte(λ_b), zich verhoudt als de snelheid van de geluidsbron tot de voortplantingssnelheid van het geluid v_g.
Ingeval van lichtgolven in plaats van geluidsgolven geldt, bij niet al te grote snelheid van de bron (tot ongeveer 0,1 c, i.e. één tiende van de voortplantingssnelheid van licht, c) dezelfde relatie:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_b} = \frac{v_b}{c}$$

Deze vergelijking voor de z.g. **Doppler verschuivingfactor** z werd afgeleid door de Oostenrijkse natuurkundige Christian Doppler in 1842.



Figuur 3. 10 Rood- en blauwverschuiving
Bron: commons.wikimedia.org

Uit deze formules zien we dat de factor alleen afhangt van de verhouding van de bronsnelheid ten opzichte van de lichtsnelheid. Dit betekent dat het effect klein zal zijn. Het Doppler-effect is alleen met zeer precieze metingen aan het spectrum te bepalen en zeker niet waarneembaar met het blote oog is. Als je een ster met een rode kleur ziet, dan is dat niet het gevolg van roodverschuiving, maar van de oppervlaktetemperatuur van deze ster.

Er bestaat dus een verband tussen de snelheid van de bron en de golflengte van het door ons opgevangen licht: met andere woorden we nemen licht waar dat bij afbeelding op een spectrum iets is verschoven in golflengte. Wanneer de waargenomen golflengte van een spectraallijn van een bron groter is dan die, welke door de bron is uitgezonden, spreken we van **roodverschuiving** ($z > 0$); de bron beweegt van ons af. Indien kleiner, spreken we van een **blauwverschuiving** ($z < 0$); de bron beweegt dan naar ons toe. Als er geen relatieve beweging is, is er ook geen spectrale verschuiving ($z = 0$).

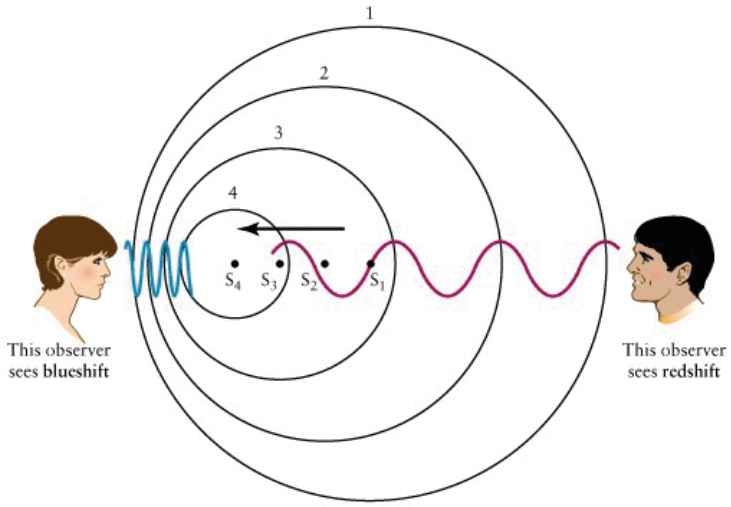
Dopplerverschuiving

De snelheid van een stralingsbron kan (tot ongeveer 0,1 c) uit de verschuiving in het spectrum van de golflengte $\Delta\lambda$ worden berekend met de Dopplerrelatie:

$$v_b = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_b} \qquad \Delta\lambda = \lambda_w - \lambda_b$$

Symbolen:
v_b is de snelheid van de stralingsbron in meter per seconde (ms^{-1}),
c is de lichtsnelheid $c = 3{,}0 \cdot 10^8\, ms^{-1}$,
λ_b is de golflengte van de door de bron uitgezonden straling
λ_w is de golflengte van de waargenomen straling in meter.

Geldigheid: Deze relatie is geldig snelheden tot ongeveer 0,1 c (lichtsnelheid)



Figuur 3.11 Wanneer een object van jou af beweegt, zal je een roodverschuiving waarnemen. Beweegt het object naar je toe, zullen de spectraallijnen blauwverschoven zijn.

Voorbeeld

Wanneer we het spectrum van waterstof bekijken in het laboratorium, zien we de spectraallijn H_α bij de golflengte $\lambda_o = 652{,}285$ nm.
In het spectrum dat opgenomen is van de ster Vega, is deze lijn Dopplerverschoven naar $\lambda = 652{,}255$ nm. Wat kunnen we concluderen over de beweging van Vega?

Antwoord:
De golflengteverschuiving wordt

$$\Delta\lambda = \lambda_w - \lambda_b = 652{,}255 \text{ nm} - 652{,}285 \text{ nm} = -0{,}030 \text{ nm}$$

De golflengte wordt korter. Er is hier dus sprake van blauwverschuiving.
Je ziet dat de verschuiving zeer klein is en alleen kan worden opgemerkt met speciale apparatuur. Voor de snelheid van Vega gebruiken we:

$$v_b = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_b} = 3{,}0 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} \cdot \frac{-0{,}03 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{656{,}285 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = -1{,}4 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

Het minteken geeft aan dat Vega naar ons toe beweegt met een snelheid van $1{,}4 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$

Let op

Er wordt wel eens gedacht dat het Doppler effect afhankelijk is van de afstand tussen de bron en de waarnemer. De frequentie die je waarneemt is alleen afhankelijk van de relatieve snelheid van de bron en de ontvanger. De intensiteit van de straling wordt wel anders als de afstand veranderd. Als er een ambulance nadert, zal je de intensiteit horen toenemen, maar de frequentie blijft gelijk. Wanneer de auto passeert hoor je de frequentie dalen naar een nieuwe constante waarde. De intensiteit zal nu verder afnemen.

96 Blauwverschuiving

Leid af dat z<0 ingeval van een *blauw*verschuiving.

97 Relatieve snelheid lichtbron

In figuur 3.8 zien we van twee geïdentificeerde lijnen (Na en H) de verschuiving weergegeven ten opzichte van hun oorspronkelijke positie. Bepaal hieruit zo nauwkeurig mogelijk de snelheid van de bron. Beweegt de bron van ons af of naar ons toe?"

98 Discussieopdracht ("Nadenker"):

Stel dat een ster van ons af beweegt, waardoor alle golflengten door het dopplereffect zijn verschoven. Je bepaalt van die ster een Planck-kromme, om met de wet van Wien de effectieve temperatuur te bepalen.

a. Wat denk je, zul je op deze manier een te hoge of een te lage temperatuur meten? Met andere woorden moet je de uitkomst corrigeren voor het dopplereffect of niet?
b. En hoe zit dat voor het geval je de temperatuur wilt bepalen met gebruikmaking van de wet van Stefan-Boltzmann?

We hebben gezien dat spectraallijnen, als gevolg van de nadering of verwijdering van de bron een rood- of blauwverschuiving kunnen ondergaan. Gassen in steratmosferen bestaan uit ontelbaar veel deeltjes die kriskras door elkaar heen krioelen, in alle richtingen – ook naar ons toe en van ons af. Naarmate het gas heter is, neemt de gemiddelde bewegingsenergie van alle gasdeeltjes toe. In het spectrum aan het begin van deze paragraaf zien we dat de spectraallijnen naast diep en ondiep, ook nog smaller en breder kunnen zijn. We noemen dit verschijnsel **lijnverbreding**. Deze verbreding heeft te maken met Dopperverschuivingen door snelheidsverschillen tussen individuele atomen. Hoe snel de atomen bewegen hangt samen met de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur hoe meer lijnverbreding zal optreden in het spectrum.

99 Invloed stereigenschappen op het spectrum

Hieronder zie je verschillende natuurkundige grootheden en de mogelijke invloed ervan op de lijnen in het spectrum van een ster. Neem het schema over in je schrift en geef daarin aan of een natuurkundige grootheid wel of geen invloed heeft op de gedaante van de spectraallijnen

Natuurkundige eigenschap van de steratmosfeer heeft invloed op.....	Breedte van de spectraallijnen	Diepte van de spectraallijnen	Verschuiving van de spectraallijnen
De dichtheid van het gas in een steratmosfeer			
De temperatuur van de steratmosfeer			
Radiale snelheid van de ster			
De temperatuur van het steroppervlak			
Het afwisselend groter en kleiner worden (pulseren)van de ster			



Figuur 3.12Edwin Hubble (1889 – 1953) Bron: www.collectspace.com/ubb/Forum20/HTML/000451.html

Extra - Kosmologische roodverschuiving

De lichtspectra die op aarde worden ontvangen van de verre sterrenstelsels zijn verschoven naar het rode eind van het spectrum ten opzichte van de ligging van de spectraallijnen die hier op aarde worden gemeten. Voor elk sterrenstelsel heeft deze verschuiving een andere waarde van z. Edwin Hubble ontdekte in 1929, samen met Milton Humason, een rechtlijnig verband tussen de roodverschuiving van verre sterrenstelsels en hun afstand. Dit verband staat thans bekend als de wet van Hubble:

$$v(r) = H_0 \cdot r$$

Hierin is $v(r)$ de snelheid van het sterrenstelsel op afstand r en H_0 de z.g. Hubbleconstante.
De waargenomen roodverschuiving wordt ook wel de kosmologische roodverschuiving genoemd. Deze roodverschuiving kan verklaard worden door het dopplereffect: de oorzaak van de roodverschuiving is dat de verste sterrenstelsels zich met grote snelheid van de aarde af bewegen. Dit was de eerste observationele ondersteuning voor de theorie van het uitdijend heelal.

Aan de hand van de grootte van de roodverschuiving kan de relatieve snelheid worden berekend. De verst verwijderde sterrenstelsels hebben een zeer grote kosmologische roodverschuiving, hetgeen betekent dat deze sterrenstelsels zich van de aarde weg bewegen met een snelheid van 95% van de lichtsnelheid. Bij zulke grote snelheden is de Dopplerverschuivingsfactor z niet meer geldig. We moeten dan een relativistische dopplerverschuivingswet gebruiken. Met o.a. deze metingen kan een schatting gemaakt worden van de leeftijd van het heelal; ook via andere methoden is berekend dat deze leeftijd ongeveer 13,7 miljard jaar is.
Zie: http://nl.wikipedia.org/wiki/Roodverschuiving
en/of: http://nl.wikipedia.org/wiki/Wet_van_Hubble.
Voor belangstellenden is de site: www.astroex.org zeker aan te bevelen: deze site bevat een aantal sterrenkundige onderzoekspractica om met behulp van waarneemresultaten meer over ons heelal te ontdekken.

3.3 Waarneemtechnieken in het elektromagnetisch spectrum

Straling in ieder gebied van het elektromagnetisch spectrum heeft zijn eigen verhaal over zijn oorsprong

Paragraafvraag	**Met welke instrumenten kunnen we straling uit verschillende gebieden van het elektromagnetisch spectrum opvangen en wat heeft die straling ons te vertellen?**

Met onze oren nemen we het trillen van de lucht waar als geluid. In tegenstelling tot wat de Starwars films ons suggereren is het dus muisstil in het heelal. Door middel van elektromagnetische straling kunnen we echter veel informatie uit de ruimte ontvangen.

Wat betreft deze straling hebben we als mensen alleen maar zintuigen ontwikkeld voor het zichtbare licht en infrarode straling: van kinds af aan zijn wij gewend aan het zien van licht met onze ogen en het voelen van warmte met onze huid.

En gelukkig maar: zouden we zintuigen hebben voor bijvoorbeeld straling met frequenties in het radiogebied en zouden die zintuigen ook nog eens in staat zijn vanuit alle richtingen (zoals onze oren) golven op te vangen, dan zouden we momenteel waarschijnlijk letterlijk 'horendol' worden van de herrie.

Het "zichtbare" heelal.



Figuur 3.13 Mount Palomar telescoop
Bron:john.moisttowelettemuseum.com/astroglass/index.html

Het menselijk oog is een goed 'instrument' om scherp te zien: het detecteert elektromagnetische straling met golflengten tussen ca. 400 en 750 nm – het optische gebied. Onze ogen kunnen veel details waarnemen als we naar iets kijken. Echter, ze zijn niet zo gevoelig. Kijk bijvoorbeeld naar een heldere ster en kijk dan met een verrekijker of prismakijker - tel eens de zwakke sterren eromheen die je dan ziet! Hieruit blijkt dat je met het blote oog maar moeilijk zwakkere objecten kunt zien. Dat is niet zo verwonderlijk, want de pupillen van je ogen hebben maar een kleine diameter en kunnen dus maar weinig licht opvangen.

Om toch zwakke objecten te kunnen zien zijn grote **telescopen** gebouwd. Telescopen verzamelen zoveel mogelijk licht met behulp van grote lenzen of parabolische spiegels (dus spiegels met de vorm van een parabool). Die kunnen van zwakke objecten met lage intensiteiten toch voldoende licht opvangen om ze zichtbaar te maken. Deze instrumenten hebben zodoende een grotere gevoeligheid dan het menselijke oog.

100 Mount Palomar

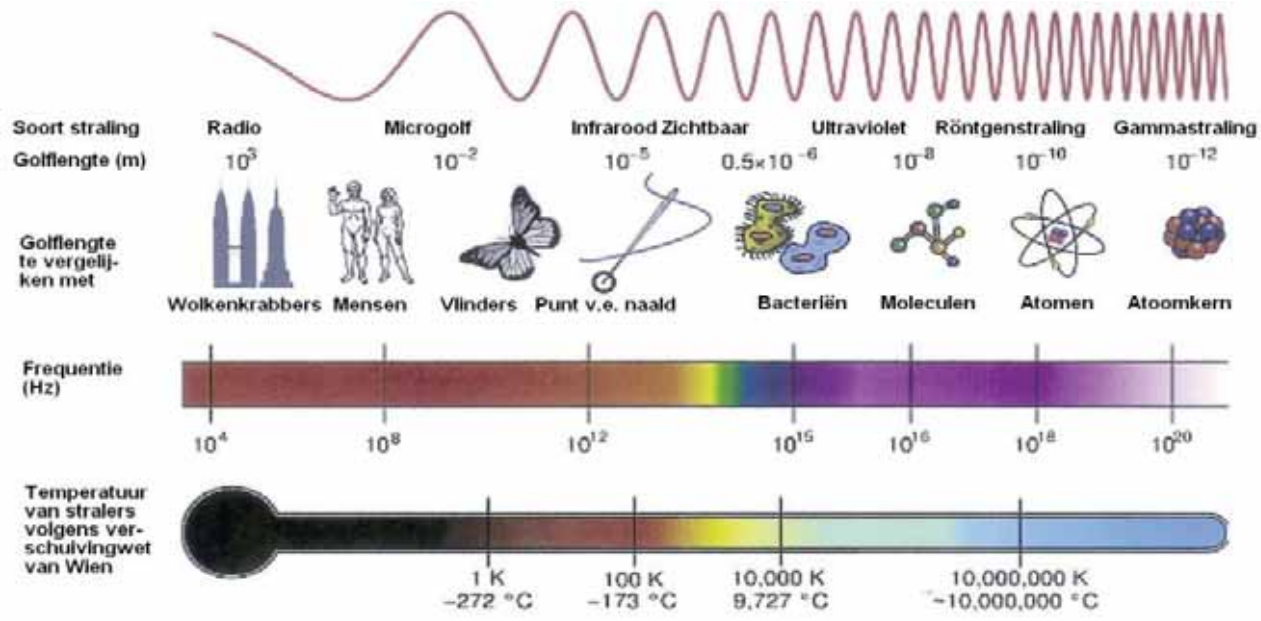
De telescoop van Mount Palomar is met een spiegeldiameter van 5 m lange tijd de grootste optische telescoop van de wereld geweest. Bereken hoeveel keer meer licht van zwakke objecten deze telescoop kan opvangen in vergelijking met je oog. Neem aan dat de pupildiameter van je oog in het donker ongeveer 7 mm bedraagt.

Het “onzichtbare” heelal.

Als we de zon, sterren en andere objecten alleen maar met behulp van zichtbaar licht konden waarnemen, dan hadden we nu een heel beperkt beeld van dat heelal. Buiten het optische gebied bereikt ons uit de ruimte “onzichtbare” straling met golflengten buiten het zichtbare gebied. Boven 750 nm wordt de straling met toenemende golflengte aangeduid als **infrarood, microgolf** en **radiostraling.** Beneden 400 nm als **ultraviolet (UV), röntgen** en **gammastraling** (γ-straling).

De belangrijkste gebieden van het elektromagnetisch spectrum zijn:

- radiogolven
- microgolven
- (verre en nabije) infraroodstraling (nemen we waar als warmtestraling via de huid)
- het zichtbare licht (nemen we waar met onze ogen)
- UV-straling (merken we aan de bruining van onze huid)
- Röntgenstraling
- γ-straling



Figuur 3.14 Ontleend aan: nl.wikipedia.org/wiki/Spectrum, bewerkt

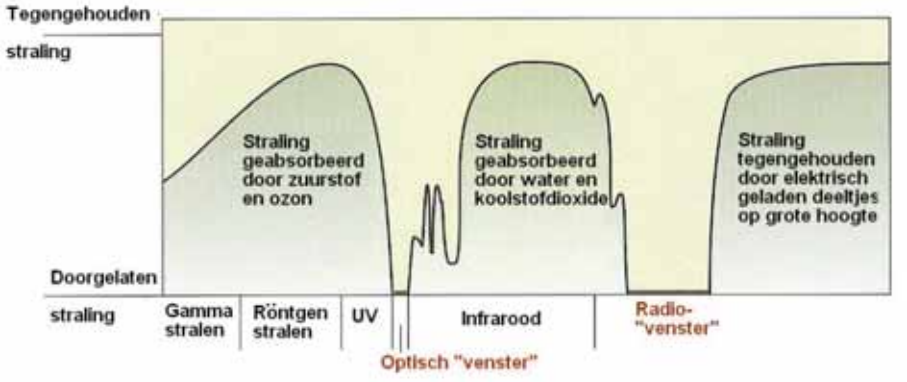
Het waarnemen van andere golflengten dan zichtbaar licht moeten we ‘via een omweg’ doen: daar hebben we waarneeminstrumenten voor nodig. Zoals we zullen zien zijn sommige van die instrumenten gestationeerd op de aarde en andere in de ruimte.

Doorlaatbaarheid van onze atmosfeer

Objecten in de ruimte leveren door het uitzenden van straling op alle golflengtegebieden informatie over hun eigenschappen. Maar een klein deel van deze straling kan ons echter bereiken: onze atmosfeer absorbeert en filtert veel van deze straling weg. Voor het leven op aarde is dat een bescherming. Door UV-straling op onze huid worden we bruin, maar teveel van deze straling leidt tot verbranding en huidziekten. Röntgen- en gammastralen kunnen

tot beschadigingen van cellen leiden. Hoe korter de golflengte, des te schadelijker voor onze gezondheid. Immers de energie van elk foton is weergegeven door $E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

In figuur 3.15 zien we in welke mate de straling vanuit de ruimte door onze atmosfeer wordt geabsorbeerd. Zoals in de figuur is weergegeven, kunnen maar enkele golflengtegebieden vanaf het aardoppervlak worden waargenomen: het optisch 'venster' en een gebied binnen de radiofrequenties (het 'radiovenster').
Vanuit hoge bergen kunnen we nog wat straling uit het nabije infrarood opvangen. Dit heeft als consequentie, dat - willen we alle informatie uit de straling van een hemellichaam te weten komen – we buiten onze dampkring moeten gaan om de niet toegankelijke stralinggebieden waar te nemen.



Figuur 3.15 Ontleend aan: In Quest of the Universe (fig. 4.6 - pag 109),bewerkt

Voor het opvangen en onderzoek van de straling vanuit de ruimte wordt gebruik gemaakt van waarneeminstrumenten. Zoals we zullen zien zijn sommige van die instrumenten gestationeerd op de aarde en andere in de ruimte.



Figuur 3.16 Hubble telescope

101 Hubble telescoop

Zoals in bovenstaande figuur is te zien, kunnen waarnemingen in het optische gebied worden gedaan vanaf de aarde. Waarom zijn desondanks toch dergelijke waarnemingen vanuit de ruimte gedaan, zoals bijvoorbeeld met de Hubble Space Telescope?

Waarnemen van kortgolvige straling

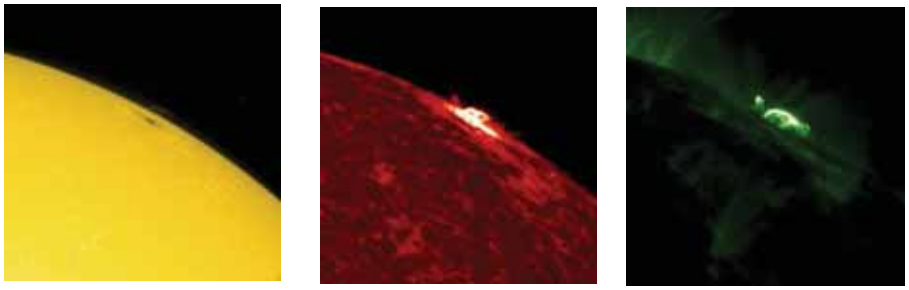


Figuur 3.17 Trace-satellite

We keren terug naar het object uit het begin van deze module: de zon. Omdat de zon de meest nabij ster is, vormt deze vandaag de dag nog steeds een belangrijk onderzoeksobject voor de astronomen.
We kunnen de zon behalve in zichtbaar licht ook bekijken met instrumenten die gevoelig zijn voor ultraviolet licht en röntgenstraling. Op deze manier kunnen we meer leren over de atmosfeer van de zon.
Dergelijke waarnemingen van de zon zijn gedaan met de SOHO ruimtesonde (SOlar and Heliospheric Observatory) gelanceerd in 1995 en de TRACE satelliet (Transition Region and Cornal Explorer), gelanceerd in 1998, welke satelliet scherpe beelden naar de aarde heeft gezonden van de fotosfeer van de zon.

102 Discussieopdracht:

We zien drie opnamen van een zonnevlam (‘flare’) op de zon, gemaakt op ongeveer hetzelfde tijdstip door de TRACE-satelliet. Deze zijn vastgelegd met camera’s die gevoelig zijn voor resp. zichtbaar licht, UV- en Röntgenstraling.



Figuur 3.18 Zichtbaar licht (links), UV-C ;160 nm (midden) en Röntgen - 17,1 nm (rechts)

Let vooral op de helderheid van de beelden, niet op de kleur. Op de foto voor het zichtbare licht is de vlam niet te zien: we zien slechts een donkere vlek op het zonsoppervlak. Op de beide andere foto’s is de vlam wel zichtbaar, terwijl dan juist het oppervlak van de zon nauwelijks is te ‘zien’.

a. Welke conclusie kun je daarmee trekken over de temperatuur van de zonnevlam in vergelijking met die van het zonneoppervlak?
b. Geef ook een verklaring voor het feit dat op de foto van het zichtbare licht, op de plaats van de zonnevlam juist een donkere plek is te zien.

Wil je meer weten over observatie van zonnevlekken, bekijk dan de site: http://nl.wikipedia.org/wiki/Zonnevlek

103 Satelliet

In figuur 3.10 staan drie foto’s van de zon. Waarom kunnen de twee rechter-foto’s alleen opgenomen zijn met behulp van een satelliet en niet vanaf de aarde?



Figuur 3.19 ontleend aan www.astron.nl

Waarnemen van radiostraling

Zon, planeten, sterren, sterrenstelsels, gaswolken en andere objecten zenden ook radiostraling uit. Bij ‘radio’ denk je direct aan zoiets als muziek, maar van deze objecten komt slechts ruis. In 1956 werd de eerste **radiotelescoop** met een diameter van 25 m te Dwingeloo (Drente) in gebruik genomen. Als je aan die **telescoop** een krachtige versterker en een luidspreker koppelt, en je richt hem op de zon, zou je van de zon de radioruis hoorbaar kunnen maken.

Er zijn objecten in de ruimte die alleen maar radiogolven uitzenden, zoals gaswolken. Die zijn dus onzichtbaar voor het menselijke oog, als ze niet worden verlicht door naburige sterren. Ongeïoniseerde waterstofwolken blijken op een specifieke frequentie van 1420 Mhz straling uit te zenden: onder sterrenkundigen bekend als de 21-cm lijn in het spectrum van de radiostraling.

Dankzij deze 21-cm straling hebben we in ieder geval wolken van neutraal waterstof in het heelal goed in kaart kunnen brengen, zowel hun plaats als hun snelheden. Neutraal waterstof vormt de grondstof voor de vorming van eer-ste generatie sterren.



Figuur 3.20

104 Overdag waarnemen

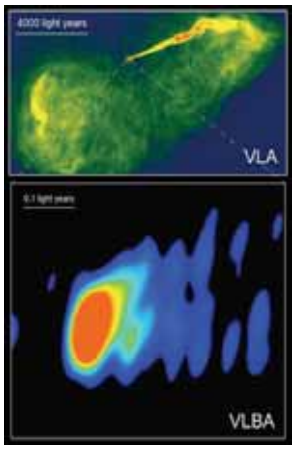
a. Welke objecten buiten ons zonnestelsel kun je alleen waarnemen met optische instrumenten als het donker is

b. Welke objecten kun je ook overdag waarnemen? Hoe?

c. Welke hulpmiddelen heb je hiervoor nodig?

10521 cm straling

Dankzij het gegeven dat het neutrale waterstof op precies één golflengte straling uitzendt, kunnen we van dat waterstofatoom de snelheid naar ons toe of van ons af bepalen. Leg uit waarom dat kan.



Figuur 3.21

Om meer details waar te nemen, zijn radiotelescopen met grotere diameters nodig dan die in Dwingeloo. Echter, hoe groter de telescoop, hoe moeilijker deze te maken is. Een oplossing werd gevonden door, in plaats van een heel grote telescoop, een 14-tal telescopen met dezelfde diameter als de Dwingeloo telescoop te bouwen op een rij met een lengte van 1,6 km: WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope). Met behulp van deze radiosynthesetechniek kan evenveel detail worden waargenomen als met een enkele telescoop welke een diameter van 1,6 km heeft.

De volgende generatie radiotelescopen was van het type VLA (Very Large Array; grotere afstanden van de telescopen), waardoor steeds meer details konden worden waargenomen. Sinds de jaren 70 en 80 van de vorige eeuw zijn nog veel grotere exemplaren van dit type radiotelescoop gebouwd, zoals de Very Long Baseline Interferometry (VLBI), waarin de opgevangen radiostraling door telescopen in verschillende continenten draadloos met elkaar worden gecombineerd. Hiernaast zijn radiokaarten te zien van de M87. Met VLBI-waarnemingen zijn ook details in de kern zichtbaar. Door gebruik te maken van de VLBI-technologie is het heelal ook op de radiogolflengten zeer gedetailleerd in kaart gebracht.

Extra - VLBI

Voor belangstellenden is een goede beschrijving van deze techniek te vinden op de website: http://en.wikipedia.org/wiki/Very_Long_Baseline_Interferometry

Op deze site staan ook enige wetenschappelijke resultaten van de VLBI techniek beschreven: het Europese VLBI Netwerk (EVN) is een van de meest geavanceerde radiotelescopen ter wereld voor golflengtes tussen 3 en 110 cm. De waarnemingen leveren astronomen informatie op over allerlei astrofysische verschijnselen: over de beweging van en in sterrenstelsels en ook over pulsars en zwarte gaten.

Extra - LOFAR

Voor belangstellenden is op verschillende sites informatie te vinden over de techniek en de waarnemingen van het LOFAR: o.a. http://www.astron.nl http://www.lofar.nl/

Een nieuwe ontwikkeling is LOFAR (LOw Frequency ARray). Dit is de grootste radiotelescoop ter wereld, bestaande uit ruim 25.000 kleine antennes die worden geplaatst over Friesland, Groningen, Drenthe, Overijssel en Gelderland en een stuk van Duitsland. Dit stelsel van sensoren kan radiofrequenties opvangen tussen 10 en 250 MHz. De antennes van LOFAR hoeven niet naar de waar te nemen objecten te worden gericht. Vanuit Dwingeloo, de locatie van de eerste radiotelescoop worden de waarnemingen van LOFAR gecoördineerd. Waarnemingen van radiostraling worden met computers verwerkt en geanalyseerd.

Waarneming van infraroodstraling:

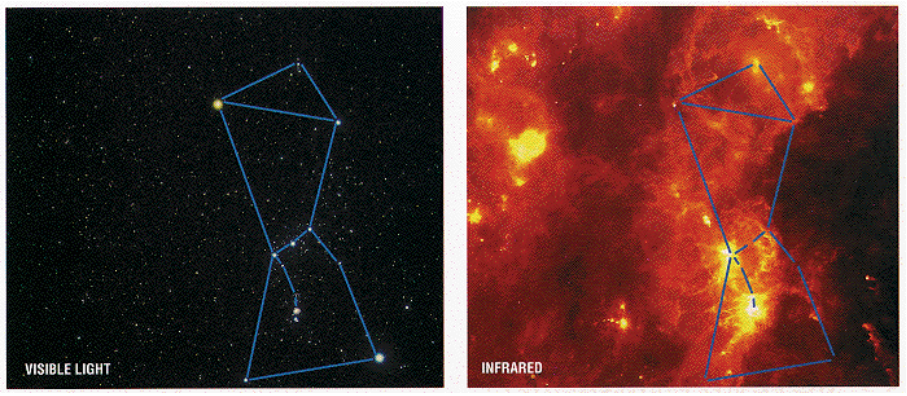
Sir Frederick William Herschel (1738-1822) kwam er tot zijn eigen verrassing achter dat straling “voorbij de rode kleur” van het zonlicht de temperatuur van een thermometer het hoogste deed oplopen, hoger dan de zichtbare kleuren van het spectrum van zonlicht. Uit deze ogenschijnlijke tegenstrijdigheid concludeerde hij dat bestraling met infraroodstraling vooral invloed heeft op de temperatuur van het bestraalde voorwerp. Wij hebben - naast onze ogen voor zichtbaar licht - de huid als zintuig om warmtestraling waar te nemen. Richt eens met je ogen dicht de buitenkant van je hand in de richting van de zon of een gloeilamp: dan voel je dat er een stralingsbron in de

buurt is, je kunt ook nog wel redelijk de richting met je hand bepalen, maar details van de bron, bijvoorbeeld de grootte kun je niet gemakkelijk bepalen. Dat zie je pas als je je ogen opent.

Extra

Voor belangstellenden is meer informatie te vinden over infraroodstraling op de volgende sites:
www.ontdekhetonzichtbareheelal.nl
en/of
http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/ir_tutorial/discovery.html

Infraroodstraling heeft een lage energie en is afkomstig van “koele” processen in het heelal: zoals de vroege stadia van stervorming, moleculaire gaswolken, vorming van planetenstelsels. De straling heeft als eigenschap dat het gemakkelijk door gaswolken heen kan en nauwelijks wordt geabsorbeerd. Dit in tegenstelling tot zichtbaar licht, zoals de beide foto’s van het sterrenbeeld Orion hierboven laten zien: de linkerfoto is opgenomen in het zichtbare licht, de rechterfoto in het infrarood. Merk op dat in de rechterfoto alleen Betegeuze (de ster linksboven) een beetje zichtbaar is.



Figuur 3.22 Het gebied rond het sterrenbeeld Orion, opgenomen in zichtbaar licht (links) en Infrarood (rechts)

3.4 Eigen onderzoek

Hoe meer we begrijpen, des te groter is het arsenaal nog onbeantwoorde vragen.

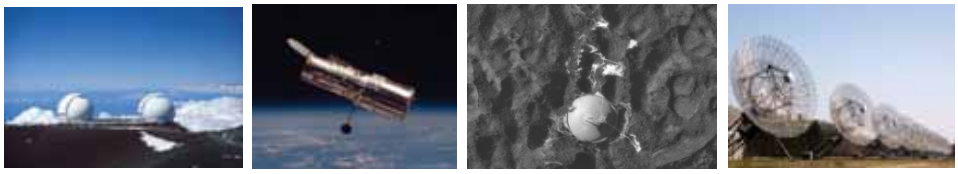
Inleiding

Het hele elektromagnetische spectrum levert ons informatie over de processen waardoor hemellichamen straling uitzenden. Hoe korter de golflengte van deze straling, des te meer energie vrijkomt bij die processen. Omdat de aardatmosfeer niet alle elektromagnetische straling doorlaat, hebben we mede dankzij de ruimtevaart pas toegang gekregen tot het waarnemen van infrarood-, ultraviolet-, röntgen-, en gammastraling. Op deze manier slagen we erin het heelal waarin wij leven, steeds vollediger en gedetailleerder in kaart te brengen. Daardoor naderen we steeds dichter tot het mysterie, hoe en wanneer het heelal is ontstaan, waaruit het bestaat, en hoe het mogelijk verder zal evolueren.

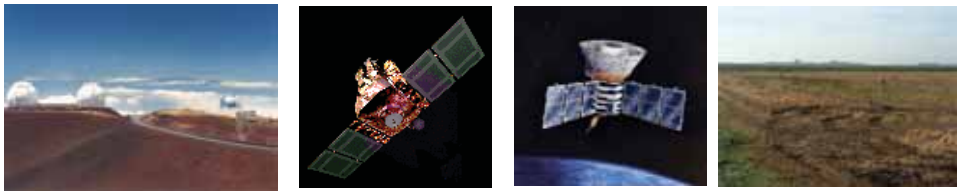
Het is natuurlijk fenomenaal hoe we de waargenomen straling kunnen interpreteren, met de op aarde ontwikkelde natuurkundige theorieën. Op deze manier hebben we iets wat ver buiten ons bereik ligt, toch leren begrijpen. Nieuwe ontdekkingen leveren echter ook weer nieuwe onbeantwoorde vragen op. Dit is de uitdaging van de toekomst en misschien ook voor jou interessant – wie weet, slaag je er nog eens in om wezenlijke grenzen te verleggen in ons begrip van het heelal.

Onderzoeksopdracht:

Hier volgen twee onderzoeksopdrachten. Kies één van de opdrachten.



Figuur 3.23 v. l. n. r. de Keck-telescoop, de Hubble Space-telescoop de Arecibo-telescoop en de Westerborktelescoop



Figuur 3.24 v. l. n. r. de Mauna Kea telescoop, de SOHO-telescoop, de COBE-telescoop en LOFAR

Onderzoeksopdracht A:

Vorm een groep met klasgenoten en zoek per groep informatie over een van de in de figuur 3.16 en 3.17 weergegeven waarneeminstrumenten.
Geef in ieder geval informatie over:

- Het gebied van het elektromagnetische spectrum, waarin met de telescoop wordt waargenomen;
- De locatie van de telescoop met een verantwoording van de keuze van die locatie;
- Enkele objecten die met deze telescopen recent zijn waargenomen en waarom juist met die telescoop;
- Wat de waarnemingen hebben opgeleverd aan: kennis over details en over de fysische omstandigheden (zoals temperatuur, chemische samenstelling, grootte) van de waargenomen objecten;
- De leeftijd van de telescoop.

Maak van je onderzoek een (powerpoint) presentatie.

Onderzoeksopdracht B (individueel of in tweetallen):

In het heelal zijn allerlei verschillende objecten te vinden. Van zwarte gaten tot supernova's, van planeten tot stofwolken. Voor deze opdracht kies je een van deze types objecten. Met behulp van internet ga je informatie zoeken over de verschillende golflengtegebieden waarin het door jou gekozen object kan worden waargenomen.
Geef in ieder geval informatie over:

- De verschillende golflengtegebieden waarin het object licht uitzendt.
- De processen in het object die de verschillende soorten straling veroorzaken.
- De verschillende instrumenten die kunnen worden gebruikt voor het waarnemen van het object. Probeer opnamen van jouw object, gemaakt met deze instrumenten te vinden.
- De geschiedenis van het object; hoe is het ontstaan? Blijft het altijd bestaan of vergaat het later weer?

Enkele mogelijke onderwerpen voor onderzoek:

- Zon
- Maan
- Planeten
- Sterren
- Melkweg
- Melkwegstelsels
- Leven in het heelal
- Oerknal
- Eigen onderwerp

Begrippen

Classificeren van sterspectra
Roodverschuiving
Dopplereffect
Radiale snelheid
Blauwverschuiving
Lijnverbreding
Telescoop
Infrarode straling
Radiostraling
Ultraviolet licht (UV),
Röntgenstraling
Gammastraling (γ)
Radiotelescoop
Ruimtetelescoop
LOFAR

Samenvatting – hoofdstuk 3

- De **helderheid** van een ster die wij waarnemen hangt af van zijn lichtkracht en afstand.
- Zoals bij de zon geldt ook voor een ster het verband tussen de **lichtkracht** (L) van de ster, zijn **stralende oppervlakte** ($4\pi r^2$) en **temperatuur** (T):

$$L = 4\pi\ r^2 \sigma\ T^4$$

- In het Hertzsprung-Russeldiagram (HR-diagram) is het verband tussen de temperatuur en de lichtkracht van sterren zichtbaar.
- Het lijnenspectrum van een ster maakt het mogelijk, vanwege verschuiving ervan door het dopplereffect, de naar ons toe of van ons af gerichte snelheid, de **radiale snelheid** (v_{bron}), te berekenen:

$$v_{bron} = c \cdot \frac{\lambda_w - \lambda_b}{\lambda_b}$$

  Hierin zijn λ_w en λ_b resp. de waargenomen en de uitgezonden golflengte.
- Bij **roodverschuiving** van de spectraallijnen in het spectrum heeft de ster een snelheid van ons af; bij **blauwverschuiving** naar ons toe.
- **Lijnverbreding** in een spectrum treedt des te meer op naarmate de temperatuur van het gas hoger is. Het is een direct gevolg van het **dopplereffect** als gevolg van spreiding in de snelheden van de gasdeeltjes
- De straling binnen het hele **elektromagnetisch spectrum** bevat informatie over de natuurkundige eigenschappen van de stralingsbron.
- Naarmate bij een proces meer **energie** vrijkomt, is de frequentie van de straling hoger (dus de golflengte kleiner) en de intensiteit hoger.
- Slechts enkele 'golflengtegebieden' kunnen wij door de atmosfeer heen waarnemen: het **zichtbare gebied**, het **nabije infrarood** en een '**venster' in het radiogebied**.
- Alle andere gebieden van het elektromagnetisch spectrum worden door onze atmosfeer afgeschermd. Voor waarneming ervan zijn we aangewezen op **ruimtetelescopen.** Dit is de afgelopen 50 jaar mogelijk geworden door de ontwikkeling van de ruimtevaart.

Opgaven

§3.1 Temperatuur, helderheid en lichtkracht van sterren.

106 Twee sterren

Stel, dat twee sterren, A en B, met een oppervlaktetemperatuur van resp. 5000 K en 25000 K een even grote lichtkracht hebben.

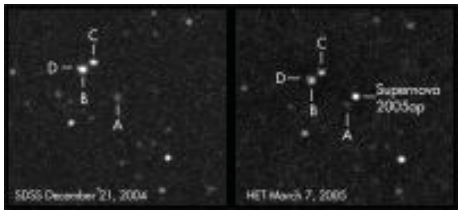
Wat is de verhouding van de oppervlakten van de sterren?

107 De dubbelster Sirius.

De ster Sirius is, nauwkeurig bekeken, een dubbelster: twee sterren die om elkaar heen draaien. We onderscheiden de helderste van de twee als Sirius A en zijn zwakker stralende metgezel als Sirius B. Neem aan dat de afstand van beide sterren tot ons gelijk is. Bepaal de verhouding van de lichtkracht van beide sterren. Zoek de benodigde gegevens op in Binas – tabel 32.

108 Intensiteit van Sirius A.

Sirius A is aan de hemel vanuit Nederland gezien de helderste ster. Hij is op winteravonden te zien links onder het sterrenbeeld Orion. Zijn schijnbare visuele helderheid staat in Binas tabel 32 gegeven, evenals die van de zon. Van de zon vangen we per m^2 een stralingsvermogen op van $1{,}4 \cdot 10^3$ Watt (de zonneconstante). Bereken het stralingsvermogen welke we van Sirius per m^2 opvangen. Hoeveel stralingsvermogen vangt de aarde op van Sirius?



Supernova breekt ruimterecord met extreme explosie

Door een onzer redacteuren

ROTTERDAM. Een team van astronomen van het California Intitute of Technology in de VS heeft een nieuw ruimterecord geregistreerd. Een supernova was gedurende korte tijd honderd miljard keer zo helder als onze eigen zon. Waarom deze explosie zo enorm krachtig was, is onduidelijk, zo schrijft het team in *The Astrophysical Journal* die zaterdag verschijnt. Supernova's treden op aan het einde van het leven van zeer zware sterren: als hun brandstof op is, kunnen zij van binnenuit geen tegendruk meer leveren tegen de zwaartekracht. Het gevolg is ineenstorting en een explosie. Zulke explosies worden al tientallen jaren geregistreerd en in verschillende typen ingedeeld, maar de nu waargenomen uitbarsting valt buiten de bestaande classificatie. De explosie, 2005ap gelabeld, vond plaats op 4,7 miljard lichtjaar van de aarde.

Figuur 3.25 uit: NRC-next van 19 oktober 2007

109 Lichtkracht van Sirius A.

Vergelijk de magnitude van Sirius A in Binas – tabel 32 met die van de zon. Ook de afstanden van beide hemellichamen staan in die tabel weergegeven. Bekend is dat de lichtkracht van de zon, L_{zon} gelijk is aan $4{,}0 \cdot 10^{26}$ Watt. Bereken de lichtkracht van Sirius A.

110 Supernova waargenomen

Lees het artikel uit NRC-next van 19 oktober 2007 in figuur 3.18 en beantwoord de volgende vragen.

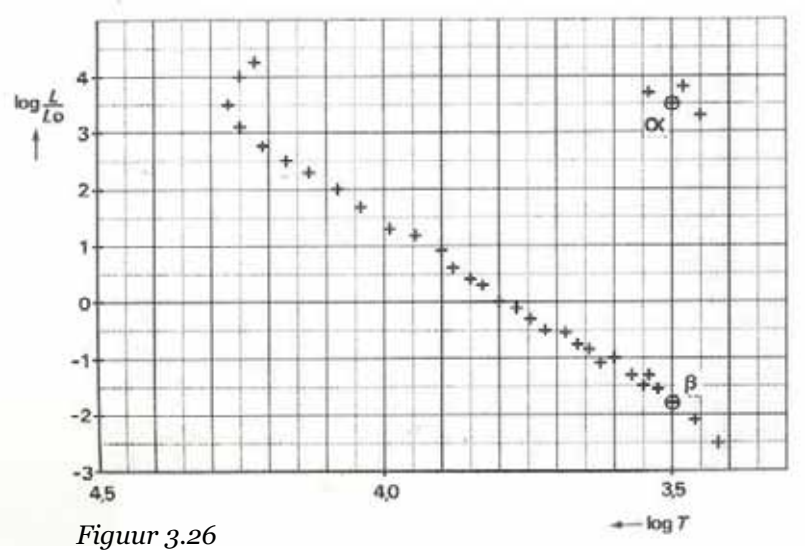
a. Bereken de afstand van de supernova in m.
b. Bereken het vermogen, welke de aarde bereikte tijdens de uitbarsting van deze supernova.

We nemen aan dat de ster tijdens zijn uitbarsting een straal heeft die 150 maal zo groot is als die van de zon.

c. Bereken de temperatuur van de ster tijdens de uitbarsting.
d. Ga na met welk waarneeminstrument het maximum van de stralingskromme het beste kan worden waargenomen.

111 Bepaling van de diameter van een ster uit het HR-diagram

In figuur 3.19 is een Hertzsprung-Russelldiagram van een aantal sterren uit een open sterrenhoop Perseï weergegeven. In het diagram staat een ster α en een ster β aangegeven. Deze sterren hebben dezelfde temperatuur. Bepaal de verhouding van de middellijnen van de sterren α en β.



Figuur 3.26

§3.2 Spectra van sterren.

112

In de figuur 3.20 is in de bovenste afbeelding een emissiespectrum te zien van waterstof vanuit een stilstaande bron. De onderste afbeelding geeft een absorptiespectrum van een ster weer met dezelfde waterstoflijnen, die iets zijn verschoven ten opzichte van die in de bovenste afbeelding. De golflengten van deze waterstoflijnen zijn te vinden in Binas.

a. Beweegt de ster naar ons toe of van ons af?

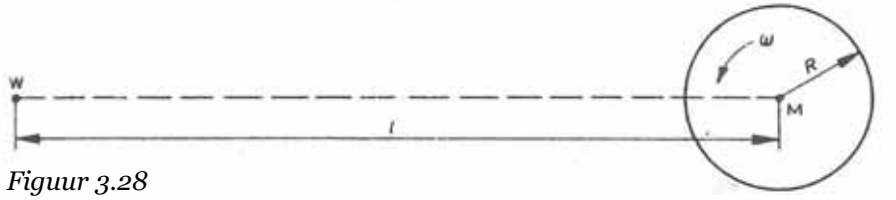
b. Bereken de snelheid van deze ster.



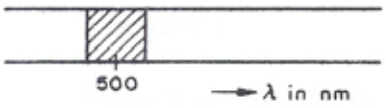
Figuur 3.27 ontleend aan: Kuhn, F. et al., In Quest of the Universe, Jones & Bartlett Publ., 4th ed.

113 Draaiende ster

M is het middelpunt van een denkbeeldige ster, welke vanuit zijn gehele oppervlakte monochromatisch licht uitzendt met een golflengte van 500 nm, en die met een hoeksnelheid ω om zijn as draait. Deze as staat loodrecht op het vlak in figuur 3.21.



Figuur 3.28



Figuur 3.29

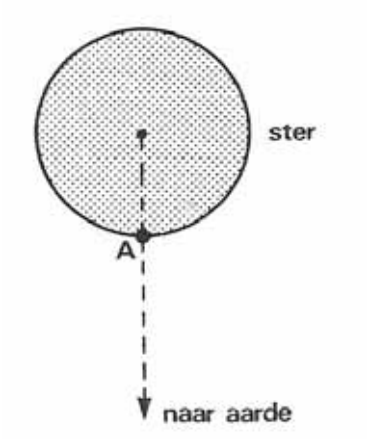
Een aardse waarnemer W op grote afstand ℓ van de ster beeldt met een prisma op een scherm een spectrum af van het naar hem uitgezonden licht, zoals in figuur 3.22 is weergegeven.

a. Waardoor wordt de 500 nm lijn breder?
b. Wat gebeurt er met het gebied als snelheid waarmee de ster om zijn as draait, groter wordt.
c. Waarheen verschuift het gebied als de ster met een constante snelheid van de waarnemer af beweegt?

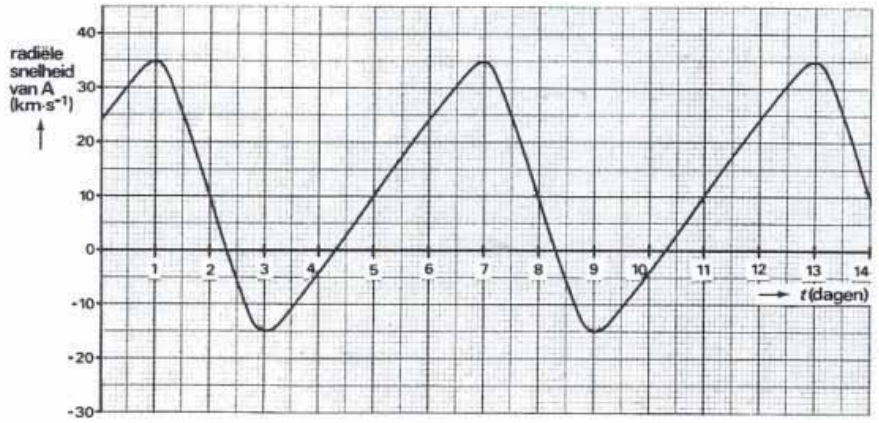
114 Pulserende ster

Een pulserende ster wordt afwisselend groter en kleiner. We kunnen het ook wel een 'kloppende' ster noemen.

In figuur 3.23 hiernaast is punt A op het steroppervlak aangegeven. Dit punt staat vanuit het middelpunt van de ster gezien, naar de waarnemer op de aarde gericht. Dit punt beweegt door de pulserende beweging van het steroppervlak. In figuur 3.24 is de snelheid van A in de richting van de waarnemer als functie van de tijd weergegeven. Een positieve snelheid betekent een beweging van de aarde af. In het spectrum van de ster komen absorptielijnen voor, die ten gevolge van de radiale snelheid een verschuiving ondergaan.



a. Leg uit tussen welke tijdstippen de absorptielijnen, gevormd uit licht uit punt A een roodverschuiving vertonen.



Figuur 3.30

b. Bereken tussen welke golflengten we de waterstoflijn van 486 nm kunnen waarnemen gedurende één pulsatieperiode.

§3.3 Waarneemtechnieken in het elektromagnetisch spectrum.

115 Snelheid van een waterstofwolk met de 21-cm lijn gemeten

Van radiostraling van een waterstofwolk is de frequentie nauwkeurig bepaald. Deze blijkt 1 Mhz minder te bedragen dan de standaardfrequentie van de 21-cm lijn. Bereken de snelheid van die wolk. Is de snelheid naar ons toe of van ons af gericht?

116 21-cm straling van een melkwegstelsel

Van een melkwegstelsel zijn de z.g. 21 cm radiosignalen van neutraal waterstof opgevangen. De golflengte van deze signalen blijken van die 21 cm tot 1,5 mm zowel naar boven als beneden af te wijken. Wat voor conclusies kun je trekken uit deze gegevens?

117

Van een andere melkwegstelsel blijken de golflengten van deze radiosignalen te liggen tussen 1,5 en 3,0 mm boven de golflengte van 21 cm! Wat voor conclusies kun je hieruit trekken?



Figuur 3.31 Ontleend aan: http://dissertations.ub.rug.nl/FILES/faculties/science/2006/e.noordermeer/samenvat.pdf

118

In figuur 3.25 zien we een opname in het nabije infrarood (op een golflengte van 2 micrometer) van onze Melkweg, zoals die zich uitstrekt over de hele hemel ("All Sky Survey"). De foto is opgenomen met verschillende telescopen en bewerkt door het 2Mass onderzoeksteam.

In een commentaar bij de foto staat dat de golflengte (2 micron) van de ontvangen straling nauwelijks wordt geabsorbeerd door stof en gas tussen de sterren. Daardoor kunnen we het centrum van ons melkwegstelsel goed zien.

a. Noem nog een voordeel van het waarnemen op deze golflengte.
b. De opnamen zijn gemaakt met o.a. telescopen in Arizona en Chili, die zich op hoogten van meer dan 2000 m bevinden. Waarom is dat nodig?