



Uitwerkingen opgaven leerboek

13.1 INTRODUCTIE

Opgave 1

- a De fotonenergie van radiogolven is kleiner dan die van zichtbaar licht.
- b De fotonen van radiogolven hebben heel veel minder energie dan die van röntgenstraling, veel te weinig om atomen te ioniseren. Dus zullen ze bij het treffen van een atoom in levend weefsel geen schade kunnen aanrichten.
- c De golflengte van radiogolven is groter dan die van zichtbaar licht.

Opgave 2

a $c = \lambda \cdot f \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2,998 \cdot 10^8}{\lambda} \rightarrow$

violet licht: $f = \frac{2,998 \cdot 10^8}{380 \cdot 10^{-9}} = 7,89 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

rood licht: $f = \frac{2,998 \cdot 10^8}{780 \cdot 10^{-9}} = 3,84 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

Dus ligt de frequentie van de fotonen tussen $3,84 \cdot 10^{14}$ en $7,89 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$.

b $E_f = h \cdot f = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot f$ (in J) en $E_f = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot f}{1,602 \cdot 10^{-19}}$ (in eV).

violet licht: $E_f = 6,626 \cdot 10^{-34} \times 7,89 \cdot 10^{14} = 5,23 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ of $\frac{5,23 \cdot 10^{-19}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 3,27 \text{ eV}$.

rood licht: $E_f = 6,626 \cdot 10^{-34} \times 3,84 \cdot 10^{14} = 2,55 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ of $\frac{2,55 \cdot 10^{-19}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 1,59 \text{ eV}$.

Dus ligt de fotonenergie tussen $2,55 \cdot 10^{-19}$ en $5,23 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ en dat is tussen 1,59 en 3,27 eV.

Opgave 3

a $c = \lambda \cdot f \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2,998 \cdot 10^8}{750 \cdot 10^{-9}} = 4,00 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \rightarrow E_f = h \cdot f = 6,626 \cdot 10^{-34} \times 4,00 \cdot 10^{14} = 2,65 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

- b De energie die per seconde door de laser wordt uitgezonden is $0,15 \text{ mJ} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ J}$, dus dat zijn

$$\frac{0,15 \cdot 10^{-3}}{2,65 \cdot 10^{-19}} = 5,66 \cdot 10^{14} \text{ fotonen per seconde.}$$

13.2 OPPERVLAKTETEMPERATUUR VAN STERREN

Opgave 4

- a Niet waar: De helft van de stralingsenergie van de zon bestaat uit zichtbaar licht.
- b Waar
- c Waar
- d Niet waar: De stralingsintensiteit van een ster met een lagere oppervlaktetemperatuur dan de zon is maximaal bij een grotere golflengte dan bij de zon.
- e Waar
- f Niet waar: Koudere objecten dan de zon zenden vooral infraroodstraling en radiogolven uit.
- g Waar
- h Niet waar: De zonneconstante geeft aan hoeveel joule stralingsenergie van de zon er per seconde en per m^2 door een oppervlak stroomt loodrecht op de stralingsrichting ter plaatse van de aarde, buiten de atmosfeer.



Opgave 5

- a Een rode ster is kouder dan een blauwe ster, dus Rigel heeft de hoogste oppervlaktetemperatuur.
- b Betelgeuze heeft de laagste oppervlaktetemperatuur dus is de golflengte van het stralingsmaximum van Betelgeuze groter dan van Rigel.
- c Geel zit in het spectrum tussen blauw en rood in. Dat betekent dat de oppervlaktetemperatuur van de zon hoger is dan van Betelgeuze.
- d Ja dat klopt: als een ster heter is zit het stralingsmaximum aan de kant van de kortere golflengtes, dus aan de blauwe kant. Bij een koude ster is de golflengte van het stralingsmaximum juist groter, dus meer aan de rode kant.

Opgave 6

- a Voor het bepalen van de oppervlaktetemperatuur van de zon wordt de golflengte van het stralingsmaximum in de stralingskromme gebruikt.
- b Infraroodstraling komt nauwelijks door de dampkring heen, dus kun je een infraroodtelescoop beter op grote hoogte plaatsen of in de ruimte om de aarde laten draaien.
- c Röntgenstraling komt helemaal niet door de dampkring heen, dus zal de XMM-Newton telescoop in een satelliet zijn geplaatst.
- d Radiogolven bevinden zich bij een lange golflengte in het spectrum.

Opgave 7

- a Een voordeel van een optische telescoop in de ruimte boven een optische telescoop op aarde is dat je in de ruimte geen last hebt van de atmosfeer (en van wolken), die een deel van de straling kan (kunnen) absorberen. En vooral heel belangrijk is dat de atmosfeer het licht een beetje verstrooit, waardoor de afbeelding door een telescoop op aarde minder scherp is.
- b Een optische telescoop in de ruimte is erg duur en zichtbaar licht kan ook gemeten worden op aarde, dus zullen er maar weinig satellieten zijn die metingen doen aan zichtbaar licht in de ruimte.
- c Radiogolven zijn ook op de aarde te meten, daar is dus geen satelliet voor nodig.

Opgave 8

- a Bij een roodere kleur hoort een lagere temperatuur, dus de jonge sterren hebben een lagere temperatuur dan de zon
- b De temperatuur van het gas waaruit de nieuwe sterren ontstaan is lager de temperatuur van de sterren, want de kleur van het gas is roder.

Opgave 9

Eigen antwoord.

Opgave 10

- a Bij $T = 4000 \text{ K}$ ligt het stralingsmaximum bij $\lambda_{\max} = 700 \text{ nm}$ en bij $T = 6000 \text{ K}$ ligt het stralingsmaximum bij $\lambda_{\max} = 480 \text{ nm}$.

De temperatuur wordt $1,5 \times$ zo groot en $\lambda_{\max}$ wordt $\frac{700}{480} = 1,5 \times$ zo klein, dus bevestigt dit dat de golflengte omgekeerd evenredig is met de temperatuur.

- b $k_W = \lambda_{\max} \cdot T \rightarrow \lambda_{\max} = \frac{k_W}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{4000} = 7,245 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 724,5 \text{ nm}$.

Opmerking: er wordt hier gevraagd om een berekening. Deze golflengte kun je echter niet zo nauwkeurig aflezen uit figuur 20.

- c De eenheid van de constante van Wien komt voort uit de vermenigvuldiging van een lengte en een temperatuur, dus 'meter $\times$ kelvin' = m·K.



Opgave 11

- a Aflezen in Binas: bij $T = 3,0 \cdot 10^3 \text{ K}$ is $\lambda_{\text{max}} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ nm} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.
- b In figuur 17 is af te lezen dat een golflengte van $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ in het infrarode gebied ligt. Een gloeilamp levert dus vooral infraroodstraling en weinig zichtbare straling.

Opgave 12

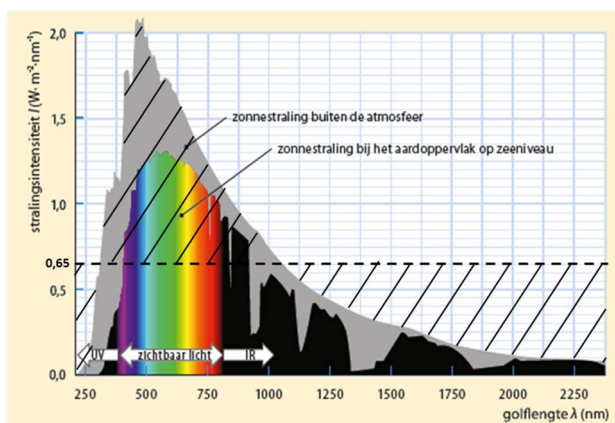
- a Voorwerpen in je omgeving zijn veelal koud en koudere voorwerpen zenden infraroodstraling uit. Deze straling kun je niet zien.
- b De uitgezonden infraroodstraling kun je detecteren met een infraroodcamera.

Opgave 13

- a Buiten de atmosfeer is $\lambda_{\text{max}} = 480 \text{ nm}$.
- b De planckkromme van 6000 K past het best bij de stralingskromme van de zon. De oppervlaktetemperatuur van de zon is dus ongeveer 6000 K.
- c Een rode reus zendt het meeste licht uit in het rode gebied van het spectrum. In figuur 20 is te zien dat daar een planck-kromme bij hoort van ongeveer 4000 K, dus de temperatuur van een rode reus is lager dan de temperatuur van de zon.

Opgave 14

- a Met behulp van de gemiddelde stralingsintensiteit van $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$ is de oppervlakte onder de grafiek te berekenen: $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm}) \times (2375 - 220) \text{ nm} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ W}/\text{m}^2$



- b De afstand van de aarde tot de zon is $r_{\text{aarde-zon}} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$.
Het totale stralingsvermogen van de zon is dan:
 $P_{\text{zon}} = I \cdot 4\pi \cdot r^2 = 1,4 \cdot 10^3 \times 4\pi \times (1,496 \cdot 10^{11})^2 = 3,94 \cdot 10^{26} \text{ W}$

Opgave 15

Oriëntatie:

De zonneconstante is de stralingsintensiteit van de zon ter plaatse van de planeet. Deze is te berekenen met $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$ waarbij P_{bron} het totale stralingsvermogen van de zon is en r de afstand van de planeet tot de zon, die beide op te zoeken zijn in Binas.

Uitwerking:

Binas: $P_{\odot} = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$, $r_{\text{Mercurius}} = 0,0579 \cdot 10^{12} \text{ m}$ en $r_{\text{Neptunus}} = 4,498 \cdot 10^{12} \text{ m}$.

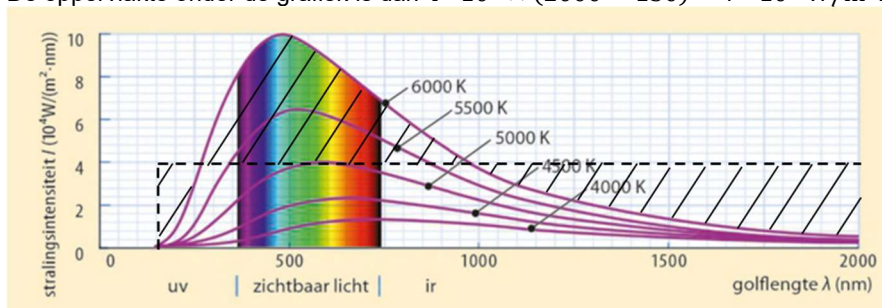
$$I_{\text{Mercurius}} = \frac{3,85 \cdot 10^{26}}{4\pi \times (0,0579 \cdot 10^{12})^2} = 9,14 \cdot 10^3 \text{ W}/\text{m}^2$$

$$I_{\text{Neptunus}} = \frac{3,85 \cdot 10^{26}}{4\pi \times (4,498 \cdot 10^{12})^2} = 1,51 \text{ W}/\text{m}^2$$



Opgave 16

- a Maak een schatting van de gemiddelde intensiteit: ca $4 \cdot 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$.
De oppervlakte onder de grafiek is dan $4 \cdot 10^4 \times (2000 - 150) = 7 \cdot 10^7 \text{ W}/\text{m}^2$.



- b De waarde van I geeft de uitgezonden stralingsintensiteit per vierkante meter van het zonoppervlak. Je moet dus deze waarde vermenigvuldigen met de oppervlakte van de zon. De oppervlakte van een bol is $A = 4\pi \cdot R^2 \rightarrow P_{\text{bron}} = 4\pi \cdot R^2 \cdot I$.
- c De straal van de zon is $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$. Dat geeft $P_{\text{bron}} = 4\pi \times (6,96 \cdot 10^8)^2 \times 6,3 \cdot 10^7 = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Opgave 17

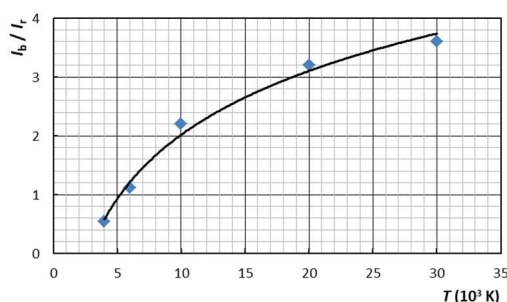
- a Als de golflengte van het maximum in het spectrum van deze ster twee keer zo klein is als die bij de zon, dan is volgens de wet van Wien de oppervlaktetemperatuur van deze ster twee keer zo groot.
- b Bij een hogere oppervlaktetemperatuur ligt het maximum van de planckkromme verder naar links dus is de kleur van de ster blauwer dan de kleur van de zon.

Opgave 18

Aflesen: $\lambda_{\text{max}} = 400 \text{ nm} = 4,00 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ en $\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_w \rightarrow T = \frac{k_w}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{4,00 \cdot 10^{-7}} = 7,25 \cdot 10^3 \text{ K}$

Opgave 19

- a Bij de bovenste stralingskromme lees je af dat de stralingsintensiteit I_b groter is dan I_r , dus is de verhouding groter dan 1.
- b Bij de bovenste kromme is $\frac{I_b}{I_r}$ groter en T hoger dan bij de onderste kromme. Dus hoe groter $\frac{I_b}{I_r}$, des te hoger T is.
- c Zie figuur.



- d Bepaal voor beide stralingskrommen de verhouding $\frac{I_b}{I_r}$ door opmeten uit figuur 22. Lees vervolgens de temperatuur af in het diagram.

Onderste kromme: $\frac{I_b}{I_r} = \frac{0,9}{1,6} = 0,56 \rightarrow T = 4 \cdot 10^3 \text{ K}$.

Bovenste kromme: $\frac{I_b}{I_r} = \frac{3,8}{3,2} = 1,2 \rightarrow T = 6 \cdot 10^3 \text{ K}$.



Opgave 20

- a Volgens Binas is de oppervlaktetemperatuur (effectieve temperatuur) van de zon $5,78 \cdot 10^3$ K, dus is de temperatuur van de zonnevlek $5,78 \cdot 10^3 - 1,250 \cdot 10^3 = 4,53 \cdot 10^3$ K.
- b $\lambda_{\max} \cdot T = k_w \rightarrow \lambda_{\max} = \frac{k_w}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{4,53 \cdot 10^3} = 6,40 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 640 \text{ nm}$
- c Deze golflengte ligt in het zichtbare gedeelte van het elektromagnetisch spectrum.
- d Volgens Binas hoort 640 nm bij oranje dus is de kleur van deze zonnevlek oranje.
- e De zonnevlek in figuur 24 is niet pikzwart, maar de lichtsterkte is wel veel minder dan van de omgeving van de zonnevlek en daardoor lijkt de zonnevlek zwart.

Opgave 21

- a $T = 273 + 15 = 288 \text{ K}$ invullen in $\lambda_{\max} \cdot T = k_w \rightarrow \lambda_{\max} = \frac{k_w}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{288} = 1,01 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 10,1 \mu\text{m}$
- b Deze golflengte ligt in het infrarode gedeelte van het elektromagnetisch spectrum.
- c In figuur 8 is te zien dat de absorptie van straling met golflengtes rond de $10 \mu\text{m}$ door de atmosfeer maar ongeveer 20% is. De stralingskromme van het gemiddelde aardoppervlak heeft een maximum bij $10 \mu\text{m}$, maar die stralingskromme is heel vlak (nog veel vlakker dan de onderste grafiek in figuur 20) en dus is de uitstraling door dat smalle microgolffvenster maar een klein deel van de uitgezonden warmtestraling. En bij de grotere golflengtes van de uitgezonden warmtestraling is volgens figuur 8 de absorptie 100%. Daardoor zal toch een groot deel van deze uitgezonden straling worden geabsorbeerd.
- d De atmosfeer zendt zelf ook weer straling uit, zowel naar de aarde als naar het heelal (zie keuzeonderwerp 1).

13.3 TOTALE STRALINGSVERMOGEN VAN STERREN

Opgave 22

- a Waar
- b Niet waar: Voor het bepalen van het totale stralingsvermogen van een ster heb je twee gegevens nodig: de op aarde waargenomen stralingsintensiteit van de ster en de afstand tot de aarde.
- c Niet waar: Twee sterren met hetzelfde totale stralingsvermogen geven op aarde dezelfde stralingsintensiteit als ze zich op dezelfde afstand van de aarde bevinden.
- d Niet waar: Twee sterren met hetzelfde totale stralingsvermogen hebben alleen dezelfde oppervlaktetemperatuur als ze ook dezelfde diameter hebben. Een grotere ster met een lagere oppervlaktetemperatuur kan ook hetzelfde totale stralingsvermogen hebben.
- e Waar.

Opgave 23

- a De oppervlaktetemperatuur van reuzen en superreuzen is kleiner dan van de zon, want in het HRD neemt de temperatuur naar rechts af.
- b Het totale stralingsvermogen van deze reuzen is groter dan van de zon, want in het HRD neemt het totale stralingsvermogen naar boven toe.
- c Als deze reuzen een groot totaal stralingsvermogen hebben bij een relatief lage oppervlaktetemperatuur, moeten ze wel een grote oppervlakte hebben. Het totale stralingsvermogen neemt immers toe als de oppervlakte en/of de temperatuur toeneemt. Reuzen en superreuzen zijn dus veel groter dan de zon.
- d Volgens het HRD is de straal van de superreuzen ongeveer $100 \times$ zo groot als de straal van de zon (afgelezen met behulp van de schuine stippellijnen).



Opgave 24

- a De oppervlaktetemperatuur van witte dwergen is groter dan van de zon, want in het HRD neemt de temperatuur naar links toe.
- b Het totale stralingsvermogen van deze dwergen is kleiner, want in het HRD neemt het stralingsvermogen naar beneden af.
- c Als deze dwergen een klein totaal stralingsvermogen hebben bij een relatief hoge oppervlaktetemperatuur, moeten ze wel een kleine oppervlakte hebben. Het totale stralingsvermogen neemt immers af als de oppervlakte en/of de temperatuur afneemt. Witte dwergen zijn dus veel kleiner dan de zon.
- d Volgens het HRD is de straal van de witte dwergen ongeveer $100 \times$ zo klein als de straal van de zon (afgelezen met behulp van de schuine stippellijnen).

Opgave 25

- a Om de stralingsintensiteit van een ster uit de stralingskromme te bepalen moet je de oppervlakte onder de hele grafiek bepalen.
- b De gegevens die je nodig hebt om het totale stralingsvermogen te bepalen zijn de stralingsintensiteit I en de afstand r tot de ster.
- c Het totale stralingsvermogen P_{bron} is dan te berekenen met $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$.

Opgave 26

Hoe verder weg een lichtbron van je af staat, hoe zwakker deze lijkt. Dus de ster met het grote totale stralingsvermogen, die voor ons zwakker lijkt, staat veel verder van ons af dan de ster met het kleine totale stralingsvermogen.

Opgave 27

- a Het door een ster uitgezonden totale stralingsvermogen verspreidt zich in alle richtingen en verdeelt zich dus over een steeds groter wordend boloppervlak. De oppervlakte van deze bol is evenredig met het kwadraat van de straal (= de afstand tot de ster). De stralingsintensiteit is het stralingsvermogen per m^2 boloppervlak, dus is de stralingsintensiteit omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot de ster.
- b Het totale stralingsvermogen van een ster op een bekende afstand van de aarde is te bepalen door de op aarde gemeten stralingsintensiteit te vermenigvuldigen met de oppervlakte van een bol met als straal de afstand tot de ster.
- c De afstand van een ster kun je bepalen door het bekende totale stralingsvermogen te delen door de op aarde gemeten stralingsintensiteit. De uitkomst is de oppervlakte van de bol waarvan de straal de afstand tot de ster is. De oppervlakte van een bol is $4\pi \cdot r^2$, dus hiermee is vervolgens de straal r te berekenen.

Opgave 28

- a Ster B heeft in vergelijking met de zon een lagere oppervlaktetemperatuur maar een groter totaal stralingsvermogen.
- b Ster C heeft in vergelijking met de zon een hogere oppervlaktetemperatuur maar een kleiner totaal stralingsvermogen.
- c Bij gelijke temperatuur heeft een ster met een grotere diameter ook een groter totaal stralingsvermogen, dus staan bij gelijke temperatuur de sterren met de grootste diameter bovenin het HRD. Voor een gelijk totaal stralingsvermogen zal een ster met een lagere temperatuur een grotere diameter moeten hebben, dus staan bij gelijk totaal stralingsvermogen de sterren met de grootste diameter rechts in het HRD. Ster B heeft dus de grootste diameter. Het omgekeerde geldt voor sterren met een kleine diameter en dus heeft ster C de kleinste diameter.

Opgave 29

Eigen antwoord.

Opgave 30

- a De afstand aarde-zon is $r = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$, dus $A = 4\pi \cdot r^2 = 4\pi \times (1,496 \cdot 10^{11})^2 = 2,812 \cdot 10^{23} \text{ m}^2$.
- b Met behulp van $P_{\text{bron}} = I \cdot A$ volgt $P_{\text{bron}} = 1,368 \cdot 10^3 \times 2,812 \cdot 10^{23} = 3,847 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Volgens Binas, tabel 32c, is het uitgestraald vermogen van de zon: $3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$, dus dat komt heel goed overeen.



Opgave 31

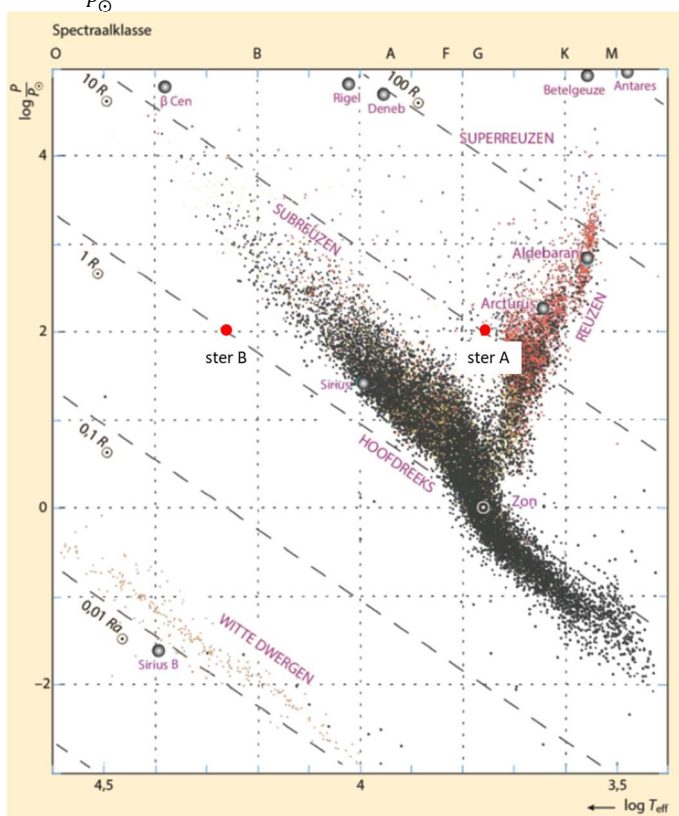
- a De oppervlakte van de bol om Sirius waarop de aarde ligt is: $A = 4\pi \cdot r^2 = 4\pi \times (8,2 \cdot 10^{16})^2 = 8,45 \cdot 10^{34} \text{ m}^2$.
Met behulp van $P_{\text{bron}} = I \cdot A$ volgt $P_{\text{bron}} = 1,13 \cdot 10^{-7} \times 8,45 \cdot 10^{34} = 9,5 \cdot 10^{27} \text{ W}$.
[Bij oplage 1 van het boek wordt gerekend met een straal van $8,1 \cdot 10^{16}$. Het eindantwoord is dan: $1,1 \cdot 10^{28} \text{ W}$]
- b $\frac{P_{\text{Sirius}}}{P_{\odot}} = \frac{9,5 \cdot 10^{27}}{3,85 \cdot 10^{26}} = 25$. Dus het totale stralingsvermogen van Sirius is 25 × zo groot als dat van de zon.
[Bij oplage 1 van het boek neem je als teller $1,1 \cdot 10^{28}$. Het antwoord is dan: 25 × zo groot als dat van de zon.]
- c Het totale stralingsvermogen van een ster hangt af van de oppervlaktetemperatuur en de straal van de ster.
- d Volgens Binas geldt voor Sirius A: $T_{\text{eff}} = 9,9 \cdot 10^3 \text{ K}$ en $r = 1,7 \cdot r_{\odot} = 1,7 \times 6,963 \cdot 10^8 = 1,18 \cdot 10^9 \text{ m}$.
 $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \sigma \cdot 4\pi r^2 \cdot T^4 = 5,670 \cdot 10^{-8} \times 4\pi \times (1,18 \cdot 10^9)^2 \times (9,9 \cdot 10^3)^4 = 9,6 \cdot 10^{27} \text{ W}$

Opgave 32

- a $\lambda_{\text{max}} \cdot T_{\text{eff}} = k_w \rightarrow T_{\text{eff}} = \frac{k_w}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{290 \cdot 10^{-9}} = 9,99 \cdot 10^3 \text{ K}$
- b $\log T_{\text{eff}} = \log (9,99 \cdot 10^3) = 4,0$. Opzoeken in de hoofdreeks van het HRD (aflezen in de wolk) geeft:
 $\log \frac{P}{P_{\odot}} = 1,5 \rightarrow \frac{P}{P_{\odot}} = 10^{1,5} = 31,6 \rightarrow P_{\text{bron}} = 31,6 \cdot P_{\odot} = 31,6 \times 3,85 \cdot 10^{26} = 1,2 \cdot 10^{28} \text{ W}$
- c $P_{\text{bron}} = I \cdot 4\pi \cdot r^2$ dus $r = \sqrt{\frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot I}} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{28}}{4\pi \times 1,4 \cdot 10^{-9}}} = 8,3 \cdot 10^{17} \text{ m}$.

Opgave 33

- a Bij een 10 × zo grote straal is de oppervlakte van ster A 100 × zo groot als van de zon. Bij gelijke oppervlaktetemperatuur zal het stralingsvermogen dus 100 × zo groot zijn.
- b Uit $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$ volgt dat als het stralingsvermogen P_{bron} van ster B 100 × zo groot is als van de zon terwijl de oppervlakte A even groot is, T^4 dan ook 100 × zo groot moet zijn. Dus is de temperatuur $T \sqrt[4]{100} \times$ zo groot als de temperatuur van de zon: $T = 5,78 \cdot 10^3 \times \sqrt[4]{100} = 1,83 \cdot 10^4 \text{ K}$.
- c Ster A: $\log T_{\text{eff}} = \log (5,78 \cdot 10^3) = 3,76$ en ster B: $\log T_{\text{eff}} = \log (1,83 \cdot 10^4) = 4,26$. Voor beide sterren geldt dat $\log \frac{P}{P_{\odot}} = \log(100) = 2,0$. Zie figuur.





Opgave 34

- a Voor het totale stralingsvermogen geldt: $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$. Als de straal 2 × zo groot is, is de oppervlakte 4 × zo groot. Is bovendien de oppervlaktetemperatuur 1,5 × zo groot, dan zal het totale stralingsvermogen P_{bron} van deze ster $4 \cdot 1,5^4 = 20 \times$ zo groot zijn als het totale stralingsvermogen van de zon.
- b Voor de stralingsintensiteit geldt: $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$. Bij dezelfde oppervlaktetemperatuur en straal zal het totale stralingsvermogen P_{bron} even groot zijn. Als de afstand r tot de aarde $3 \cdot 10^5 \times$ zo groot is, is de stralingsintensiteit $(3 \cdot 10^5)^2 = 9 \cdot 10^{10} \times$ zo klein.
- c $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2} \rightarrow P_{\text{bron}} = I \cdot 4\pi \cdot r^2$
 Als $r_A = 5 \cdot r_B$ en $I_A = I_B$, dan is $P_{\text{bron,A}} = 25 \cdot P_{\text{bron,B}}$.
 $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$ waarbij T voor beide sterren gelijk is, dus als $P_{\text{bron,A}} = 25 \cdot P_{\text{bron,B}}$ dan is $A_A = 25 \cdot A_B$.
 Voor de oppervlakte geldt: $A = 4\pi \cdot R^2$ en dus geldt voor de straal van de sterren dat $R_A = 5 \cdot R_B$.

Opgave 35

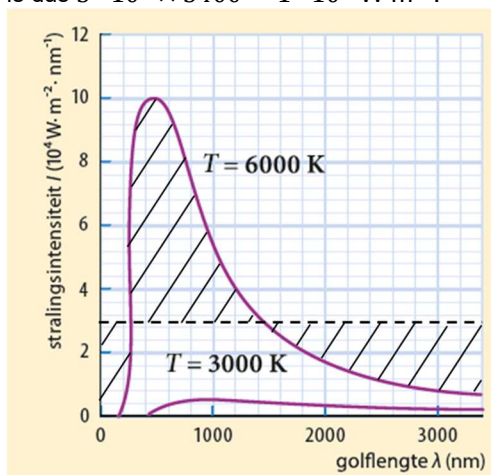
- a $\log T = 3,6 \rightarrow T = 10^{3,6} = 4,0 \cdot 10^3 \text{ K}$
- b De ster bevindt zich in de hoofdreeks, dus aflezen in de 'zwarte wolk' bij $\log T = 3,6$ geeft $\log \frac{P}{P_{\odot}} = -1,0 \rightarrow P = 10^{-1,0} P_{\odot} = 0,10 \cdot P_{\odot}$
- c $\log \frac{P}{P_{\odot}} = \log \frac{100 \cdot P_{\odot}}{P_{\odot}} = \log 100 = 2,0$, aflezen in het HRD in de 'zwarte wolk' bij $\log \frac{P}{P_{\odot}} = 2,0$ geeft $\log T = 4,0 \rightarrow T = 10^{4,0} = 1,0 \cdot 10^4 \text{ K}$.

Opgave 36

- a $T_{\text{Wega}} = 10,0 \cdot 10^3 \text{ K}$ en $T_{\odot} = 5,78 \cdot 10^3 \text{ K}$, dus $T_{\text{Wega}} = \frac{10,0}{5,78} \cdot T_{\odot} = 1,73 \cdot T_{\odot}$.
- b $R_{\text{Wega}} = 2,5 \cdot R_{\odot}$
- c Voor het totale stralingsvermogen van de ster geldt: $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4$. De straal is 2,5 × zo groot en de oppervlaktetemperatuur is 1,73 × zo groot, dus zal het totale stralingsvermogen $2,5^2 \times 1,73^4 = 56 \times$ zo groot zijn. Volgens Binas is de totale lichtsterkte of het totale stralingsvermogen van Wega vergeleken met de zon 57 × zo groot.

Opgave 37

- a Het stralingsvermogen per vierkante meter is: $\frac{P_{\text{bron}}}{A} = \sigma \cdot T^4 = 5,670 \cdot 10^{-8} \times 6000^4 = 7,348 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$.
- b Maak een grove schatting van de gemiddelde hoogte: $3 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$. De breedte is 3400 nm. De oppervlakte is dus $3 \cdot 10^4 \times 3400 = 1 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.



- c De temperatuur van 6000 K is $2 \times$ zo hoog als die van 3000 K, dus zou bij 3000 K het stralingsvermogen per vierkante meter $2^4 = 16 \times$ zo klein moeten zijn: $\frac{7,348 \cdot 10^7}{16} = 4,59 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$.

Opgave 38

- a Binas: $P_{\text{bron}} = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$ en $T = 5,78 \cdot 10^3 \text{ K}$.
- b $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4 \rightarrow R = \sqrt{\frac{P_{\text{bron}}}{\sigma \cdot 4\pi \cdot T^4}} = \sqrt{\frac{3,85 \cdot 10^{26}}{5,670 \cdot 10^{-8} \times 4\pi \times (5,78 \cdot 10^3)^4}} = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$
Volgens Binas is de straal van de zon: $6,963 \cdot 10^8 \text{ m}$.

Opgave 39

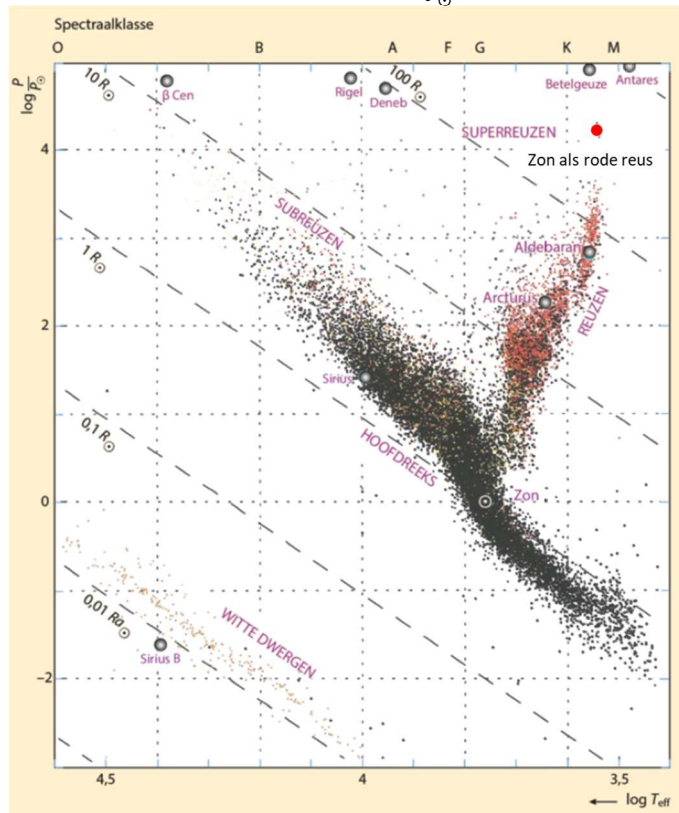
- a Aflezen uit het HRD voor Sirius A: $\log T = 4,0 \rightarrow T = 10^{4,0} = 1,0 \cdot 10^4 \text{ K}$.
- b Aflezen uit het HRD voor Sirius A: $\log \frac{P}{P_{\odot}} = 1,4 \rightarrow \frac{P}{P_{\odot}} = 10^{1,4} = 25 \rightarrow P = 25 \cdot P_{\odot}$.
- c Bekijk de schuine lijnen in het HRD, dit zijn lijnen van gelijke straal. Sirius A zit ten opzichte van de lijn $1 \cdot R_{\odot}$ iets hoger richting de lijn van $10 \cdot R_{\odot}$ (merk op dat dit ook logaritmisch gaat net als de horizontale en verticale as). Zo valt af te lezen dat de straal van Sirius A ongeveer $1,8 \times$ zo groot is als de straal van de zon (en dus is de diameter van Sirius A ook ongeveer $1,8 \times$ zo groot als de diameter van de zon).
- d Sirius A ligt in het HRD linksboven de zon. Dus niet alleen de diameter van Sirius A is groter dan van de zon, maar ook de oppervlaktetemperatuur van Sirius A is hoger. Samen zorgt dat voor een $25 \times$ zo groot totaal stralingsvermogen dan dat van de zon.

Opgave 40

- a De afstand van Mars tot de zon is $r_{\text{Mars}} = 0,228 \cdot 10^{12} \text{ m}$ dus geldt dan dat $R_{\odot} = 0,228 \cdot 10^{12} \text{ m}$. Gegeven is dat de oppervlaktetemperatuur van de zon dan $T = 3,5 \cdot 10^3 \text{ K}$ is. Daaruit kun je vervolgens berekenen:
 $P = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4 = 5,670 \cdot 10^{-8} \times 4\pi \times (0,228 \cdot 10^{12})^2 \times (3,5 \cdot 10^3)^4 = 5,6 \cdot 10^{30} \text{ W}$
- b Het huidige totale stralingsvermogen van de zon is $3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$ dus het totale stralingsvermogen is dan $\frac{5,6 \cdot 10^{30}}{3,85 \cdot 10^{26}} = 1,4 \cdot 10^4$ keer zo groot.



- c $\log T = \log (3,5 \cdot 10^3) = 3,54$ en $\log \frac{P}{P_{\odot}} = \log (1,4 \cdot 10^4) = 4,2$. Zie figuur.





Opgave 41

- a Voor ster α is $\log \frac{P_\alpha}{P_\odot} = 3,5 \rightarrow P_\alpha = P_\odot \cdot 10^{3,5}$ en voor ster β is $\log \frac{P_\beta}{P_\odot} = -1,8 \rightarrow P_\beta = P_\odot \cdot 10^{-1,8}$.
Dus $\frac{P_\alpha}{P_\beta} = \frac{10^{3,5}}{10^{-1,8}} = 10^{3,5+1,8} = 10^{5,3} = 2,0 \cdot 10^5$.
- b $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4$ en $T_\alpha = T_\beta$ ($T_\alpha^4 = T_\beta^4$) $\rightarrow \frac{P_\alpha}{P_\beta} = \frac{R_\alpha^2}{R_\beta^2} \rightarrow \frac{R_\alpha}{R_\beta} = \sqrt{\frac{P_\alpha}{P_\beta}} = \sqrt{2,0 \cdot 10^5} = 4,5 \cdot 10^2$
De diameter van ster α is dus $4,5 \cdot 10^2$ keer zo groot als de diameter van ster β .
- c $P_{\text{bron}} = I \cdot 4\pi \cdot r^2$ waarbij $P_{\text{bron},\alpha} = P_\odot \cdot 10^{3,5} = 3,85 \cdot 10^{26} \times 10^{3,5} = 1,22 \cdot 10^{30}$ W en gegeven is dat
 $I_\alpha = 2,1 \cdot 10^{-1}$ W/m². Dus is $r_\alpha = \sqrt{\frac{P_\alpha}{I_\alpha \cdot 4\pi}} = \sqrt{\frac{1,22 \cdot 10^{30}}{2,1 \cdot 10^{-1} \times 4\pi}} = 6,8 \cdot 10^{19}$ m.
Eén lichtjaar is $9,461 \cdot 10^{15}$ m dus de afstand is $\frac{6,8 \cdot 10^{19}}{9,461 \cdot 10^{15}} = 7,2 \cdot 10^3$ ly.

13.4 SAMENSTELLING VAN STERREN

Opgave 42

- a Niet waar: Het spectrum van de door de zon uitgezonden straling is een continu spectrum met daarin een aantal absorptielijnen: de fraunhoferlijnen.
- b Waar
- c Waar
- d Niet waar: In het absorptiespectrum van een koud ijl gas komen donkere absorptielijnen voor.
- e Waar
- f Niet waar: Sterren zoals de zon bestaan voor 90% uit waterstof.
- g Niet waar: Fraunhoferlijnen zijn absorptielijnen in het spectrum van de zon.

Opgave 43

- a Emissielijnen worden door een bepaald gas uitgezonden als het verhit wordt. Laat je nu wit licht van een heel hete gloeilamp op hetzelfde gas vallen als het koud is, dan worden juist die golflengtes door het gas geabsorbeerd. Zodoende liggen de absorptielijnen van een (koud) gas en de emissielijnen van datzelfde (hete) gas op precies dezelfde plaatsen in het spectrum.
- b De koudere gassen aan de buitenste rand van de ster absorberen bepaalde golflengtes van het licht dat dieper in de ster uitgezonden wordt, zodat er in het spectrum van die ster altijd absorptielijnen voorkomen.
- c De golflengtes in het absorptiespectrum van de ster komen overeen met die van de emissiespectra van bekende hete gassen in het laboratorium. Zo is dus de combinatie van gassen te bepalen die zich aan de buitenkant van de ster bevinden.
- d De absorptielijnen in het sterspectrum van figuur 34 komen wat betreft hun ligging overeen met de emissielijnen van waterstof in dezelfde figuur, dus is er waterstof aanwezig in de buitenste lagen van deze ster.

Opgave 44

- a Een ster zendt een absorptiespectrum uit, want de gassen aan de buitenkant van de ster absorberen een aantal golflengtes van het continue spectrum dat het binnenste van de ster uitzendt.
- b Een planeet zonder atmosfeer in de buurt van een ster zal het licht van de ster weerkaatsen, dus we zien het absorptiespectrum van de ster.
- c Het verhitte gas in de gaswolk zal zelf een emissiespectrum uitzenden.

Opgave 45

De gassen in de wolk worden verhit door de ster en zenden een emissiespectrum uit.



Opgave 46

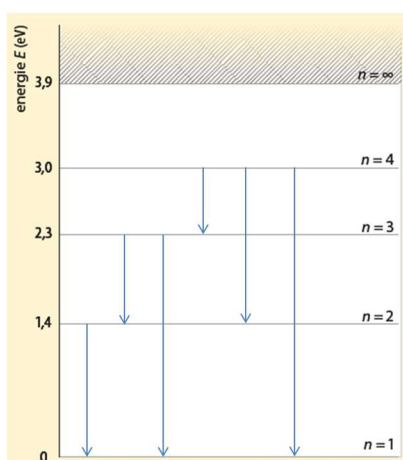
Eigen antwoord.

Opgave 47

- a** Na energieabsorptie komt het natrium- of kwikatoom in één van de hogere energieniveaus terecht: een aangeslagen toestand. Hierbij springt één van de buitenste elektronen naar een hoger energieniveau. Bij terugval van dit elektron naar een lager niveau zendt het atoom een foton uit. Er zijn meerdere mogelijkheden voor het elektron om naar een hoger niveau te springen (afhankelijk van de hoeveelheid energie die wordt geabsorbeerd) en ook meerdere mogelijkheden om terug te vallen (bijvoorbeeld trapsgewijs in plaats van in één keer naar de grondtoestand). Hierdoor bestaat het lijnenspectrum uit meerdere lijnen.
- b** Doordat zowel bij het absorberen als bij het emitteren de energiesprongen van het elektron even groot zijn, zitten de lijnen van het emissiespectrum op dezelfde plaats als de lijnen van het absorptiespectrum. Bij het emissiespectrum horen de lijnen bij de straling die het atoom uitzendt en zijn dit dus de enige lichte strepen in het spectrum. Bij het absorptiespectrum is juist het hele spectrum van een andere (witte) bron zichtbaar en zijn de spectraallijnen die bij het specifieke atoom horen juist veel minder intens verlicht, doordat bij het terugvallen van het elektron de fotonen in alle richtingen worden uitgezonden. Er straalt dan relatief weinig licht in de richting waarin de oorspronkelijke lichtbron scheen, zodat er een donkere streep in het spectrum ontstaat.

Opgave 48

- a** In de figuur hierna zijn de mogelijke 'sprongen' van het elektron waarbij een foton wordt uitgezonden getekend als pijlen. Er zijn zes mogelijkheden dus er zijn zes spectraallijnen te zien.



- b** Bij de spectraallijn met de kleinste golflengte hoort de grootste fotonenergie, dus de grootste energiesprong. Dat is de overgang van $n = 4$ naar $n = 1$.
- c** De ionisatie-energie is de energie die nodig is om het zwakst gebonden elektron van niveau $n = 1$ naar $n = \infty$ te brengen. Dat is bij dit atoom 3,9 eV.
- d** Licht met een golflengte van 600 nm heeft een fotonenergie van

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,998 \cdot 10^8}{600 \cdot 10^{-9}} = 3,31 \cdot 10^{-19} \text{ J, dat is } E = \frac{3,31 \cdot 10^{-19}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 2,07 \text{ eV.}$$

Dat is niet genoeg energie om dit atoom te ioniseren.



Opgave 49

- a $\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$. Als je deze formule gebruikt krijg je de energie in joule. Om de energie in elektronvolt om te rekenen moet nog gedeeld worden door de lading van het elektron e en bij gebruik van de golflengte λ in nm moet deze nog worden vermenigvuldigd met 10^{-9} om naar meters om te rekenen:

$$\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot 10^{-9} \cdot e} \rightarrow \lambda \cdot \Delta E = \frac{h \cdot c}{10^{-9} \cdot e} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,998 \cdot 10^8}{10^{-9} \times 1,602 \cdot 10^{-19}} = 1240$$

- b Gebruik dat $\lambda(\text{nm}) \cdot \Delta E(\text{eV}) = 1240$ met $\lambda = 1,7 \mu\text{m} = 1,7 \cdot 10^3 \text{ nm}$: $\Delta E = \frac{1240}{\lambda} = \frac{1240}{1,7 \cdot 10^3} = 0,73 \text{ eV}$.
- c Op de lijn in figuur 49 moet bij het energieniveau tussen 10,7 en 12,7 eV staan: $12,7 - 0,73 = 11,97 \text{ eV}$.
Bij overgang 2 is $\Delta E = 11,97 - 10,7 = 1,27 \text{ eV} \rightarrow \lambda(\text{nm}) = \frac{1240}{\Delta E(\text{eV})} = \frac{1240}{1,27} = 976 \text{ nm} = 0,98 \mu\text{m}$.
Bij overgang 3 is $\Delta E = 12,7 - 10,7 = 2,0 \text{ eV} \rightarrow \lambda(\text{nm}) = \frac{1240}{\Delta E(\text{eV})} = \frac{1240}{2,0} = 620 \text{ nm} = 0,62 \mu\text{m}$.

Opgave 50

- a Licht met een golflengte van 300 nm heeft een fotonenergie van

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,998 \cdot 10^8}{300 \cdot 10^{-9}} = 6,622 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \frac{6,622 \cdot 10^{-19}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 4,13 \text{ eV}$$

Dat is precies genoeg energie voor de overgang van de grondtoestand ($n = 1$) naar de tweede aangeslagen toestand ($n = 3$).

- b Als het atoom rechtstreeks terugvalt vanuit de tweede aangeslagen toestand naar de grondtoestand, wordt ook weer dezelfde energie uitgezonden in de vorm van een foton met dezelfde golflengte van 300 nm.
- c Als het atoom in twee stappen terugvalt, wordt er een foton uitgezonden met een energie van $4,1 - 2,4 = 1,7 \text{ eV}$ en een foton met een energie van 2,4 eV. Er worden dus twee fotonen met een verschillende hoeveelheid energie uitgezonden en dat betekent twee verschillende golflengtes van de straling.

Opgave 51

- a Kijk in Binas, tabel 21 C. De ionisatie-energie voor het tweede elektron van natrium is 47,29 eV.
- b Het buitenste elektron is relatief zwak gebonden, de aantrekkende kracht door de kern wordt een beetje afgeschermd door de andere elektronen. Het tweede elektron zit meer naar binnen en wordt iets sterker aangetrokken, dus is dit elektron sterker aan het atoom gebonden. Het kost daardoor veel meer energie om het tweede elektron los te maken van het atoom.

Opgave 52

- a Mogelijke sprongen van het elektron naar hogere energieniveaus zijn naar:

$$3,1 \text{ eV} \rightarrow E_f = 3,1 \times 1,602 \cdot 10^{-19} = 4,96 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{E_f} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,998 \cdot 10^8}{4,96 \cdot 10^{-19}} = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\text{of bereken dit met de bij opgave 49 afgeleide regel: } \lambda(\text{nm}) \cdot \Delta E(\text{eV}) = 1240 \rightarrow \lambda = \frac{1240}{3,1} = 4,0 \cdot 10^2 \text{ nm}$$

$$4,5 \text{ eV} \rightarrow \lambda = \frac{1240}{4,5} = 2,8 \cdot 10^2 \text{ nm}$$

$$5,4 \text{ eV} \rightarrow \lambda = \frac{1240}{5,4} = 2,3 \cdot 10^2 \text{ nm}.$$

Alleen de golflengtes die horen bij 3,1 en 4,5 eV zitten tussen de 250 en 500 nm dus alleen de golflengtes $2,8 \cdot 10^2$ en $4,0 \cdot 10^2 \text{ nm}$ kunnen worden geabsorbeerd.

- b Terugvallen is mogelijk op de volgende manieren:

$$\text{van } 3,1 \text{ naar } 0 \text{ eV} \rightarrow \lambda = 4,0 \cdot 10^2 \text{ nm}, \text{ van } 4,5 \text{ naar } 0 \text{ eV} \rightarrow \lambda = 2,8 \cdot 10^2 \text{ nm} \text{ en via de tussenstap: van } 4,5 \text{ naar } 3,1 \text{ eV} \rightarrow E_f = (4,5 - 3,1) = 1,4 \text{ eV} \rightarrow \lambda = \frac{1240}{1,4} = 8,9 \cdot 10^2 \text{ nm}.$$

De golflengtes van de straling die het atoom weer kan uitzenden zijn dus $2,8 \cdot 10^2$, $4,0 \cdot 10^2$ en $8,9 \cdot 10^2 \text{ nm}$.



Opgave 53

Oriëntatie:

Reken de energiesprongen in eV steeds om naar J door te vermenigvuldigen met $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ en bereken de golflengte vervolgens met $\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E}$.

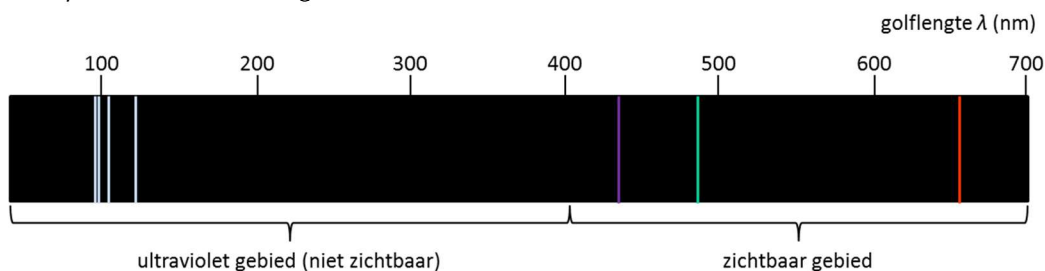
Dus bereken de golflengtes met $\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E \cdot e} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,998 \cdot 10^8}{\Delta E \times 1,602 \cdot 10^{-19}} = \frac{1240 \cdot 10^{-9}}{\Delta E} \text{ m} = \frac{1240}{\Delta E} \text{ nm}$.

Uitwerking:

De golflengtes die horen bij de Lyman- en de Balmerreeks zijn:

Lymanreeks		Balmerreeks	
ΔE (eV)	golflengte λ (nm)	ΔE (eV)	golflengte λ (nm)
10,20	121,6	$12,09 - 10,20 = 1,89$	656
12,09	102,6	$12,75 - 10,20 = 2,55$	486
12,75	97,25	$13,05 - 10,20 = 2,85$	435
13,05	95,02		

Het spectrum ziet er als volgt uit:



Opmerking: de lijnen rond de 100 nm zijn niet zichtbaar maar hebben hier toch een kleur gekregen om ze te onderscheiden van de achtergrond.

Opgave 54

Oriëntatie:

Bereken de energiesprongen met $\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ waarbij de golflengte in nm omgerekend moet worden naar m en de energie in J omgezet moet worden naar eV door te delen door de eenheidslading e. De berekening wordt dan:

$$\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot e} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,998 \cdot 10^8}{\lambda \cdot 10^{-9} \times 1,602 \cdot 10^{-19}} = \frac{1240}{\lambda} \text{ eV}$$

Uitwerking:

De energieën die horen bij de aangegeven golflengtes zijn:

$$\lambda = 589 \text{ nm} \rightarrow \Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,998 \cdot 10^8}{589 \cdot 10^{-9}} = 3,373 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow \Delta E = \frac{3,373 \cdot 10^{-19}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 2,11 \text{ eV, ofwel}$$

$$\Delta E = \frac{1240}{589} = 2,11 \text{ eV}$$

$$\lambda = 819 \text{ nm} \rightarrow \Delta E = \frac{1240}{819} = 1,51 \text{ eV}$$

$$\lambda = 616 \text{ nm} \rightarrow \Delta E = \frac{1240}{616} = 2,01 \text{ eV}$$

Dat betekent dat $E_2 = 2,11 \text{ eV}$, $E_3 = 2,11 + 1,51 = 3,62 \text{ eV}$ en $E_4 = 2,11 + 2,01 = 4,12 \text{ eV}$.



13.5 RADIALE SNELHEID VAN STERREN

Opgave 55

- a Niet waar: Het dopplereffect treedt op bij alle bewegende bronnen met een snelheidscomponent in de richting van een waarnemer en die golven uitzenden in de richting van de waarnemer.
- b Niet waar: Bij sterren die van ons af bewegen zijn de absorptielijnen verschoven in de richting van lagere frequenties (want in de richting van langere golflengtes).
- c Niet waar: Van sterren die van ons af bewegen zijn de absorptielijnen in het sterspectrum verschoven in de richting van het rode deel van het spectrum.
- d Niet waar: Uit de dopplerverschuiving in het sterspectrum is de radiale snelheid van de ster te bepalen.
- e Niet waar: Bijna alle sterrenstelsels blijken een roodverschuiving te vertonen en deze sterrenstelsels bewegen zich van ons af, maar er zijn ook sterrenstelsels met een blauwverschuiving (zoals de Andromedanevel).
- f Waar

Opgave 56

- a De verschuiving van de absorptielijnen wordt veroorzaakt door het dopplereffect dat optreedt als de ster zich van ons af of naar ons toe beweegt.
- b Er is sprake van een blauwverschuiving, want de absorptielijnen zijn in de richting van het blauw opgeschoven.
- c Bij een blauwverschuiving beweegt de ster naar ons toe.
- d $v_r = 0,006 \times 3,0 \cdot 10^8 = 1,8 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$
- e $\Delta\lambda = 0,006 \times 656,3 = 4 \text{ nm}$

Opgave 57

- a De onderkant van de ster beweegt van de waarnemer af, dat veroorzaakt dus een roodverschuiving. De bovenkant van de ster beweegt echter naar de waarnemer toe met een blauwverschuiving als resultaat. Dat betekent dat de spectraallijn verbreedt door de rotatie van de ster.
- b Als de ster sneller gaat ronddraaien, zullen zowel de roodverschuiving als de blauwverschuiving groter worden en dus zal de spectraallijn verder verbreden.
- c Als een ster van de aarde af beweegt, treedt er een roodverschuiving voor de hele ster op en zal de hele band richting het rood verschuiven.
- d De breedte van de band is een bepaald percentage van de golflengte van de spectraallijn. Dat percentage is afhankelijk van de straal en de rotatiesnelheid van de ster. Als de hele band naar een grotere golflengte verschuift, zal de band in theorie een klein beetje breder worden, doordat het dan eenzelfde percentage van een grotere golflengte is. (In de praktijk zul je dit niet meten, omdat daarvoor de snelheid (en dus de roodverschuiving) niet groot genoeg is.)

Opgave 58

- a De exoplaneet zorgt ervoor dat (ook) de ster rond het gemeenschappelijk zwaartepunt van het systeem ster en planeet beweegt. Die beweging van de ster kan opgemerkt worden als hij een snelheidscomponent in onze richting heeft, doordat de spectraallijnen ietsje heen-en-weer schuiven. Er wordt dus gekeken naar het licht van de ster om exoplaneten te ontdekken.
- b Als de ster afwisselend naar de aarde toe beweegt en van de aarde af beweegt, schuiven de spectraallijnen heen-en-weer in het spectrum.
- c Een zware exoplaneet die dicht bij zijn ster staat, oefent een grote gravitatiekracht uit op de ster. Deze gravitatiekracht werkt als middelpuntzoekende kracht voor de cirkelbeweging van de ster (en van de exoplaneet). Bij een relatief grote middelpuntzoekende kracht is de baansnelheid van de ster groot genoeg om een verschuiving van de spectraallijnen te zien.



Opgave 59

- a De dopplerverschuiving hangt af van de radiale snelheid v_r van de ster en van de golflengte λ van de absorptielijn.
- b Als de radiale snelheid v_r van de ster groter is, is de dopplerverschuiving $\Delta\lambda$ van de absorptielijn **groter**.
Als de golflengte λ van de absorptielijn groter is, is de dopplerverschuiving $\Delta\lambda$ van de absorptielijn **groter**.

Opgave 60

Eigen antwoord.

Opgave 61

- a Uit de dopplerformule volgt dat de dopplerverschuiving evenredig is met de golflengte λ dus met een bepaald percentage.
- b Uit de dopplerformule volgt ook dat de dopplerverschuiving evenredig is met de radiale snelheid van de ster, dus als deze radiale snelheid groter is zal de dopplerverschuiving ook groter zijn.
- c Uit de dopplerformule volgt dat bij een dopplerverschuiving van 1% de radiale snelheid van de ster 1% van de lichtsnelheid is en dat is $3 \cdot 10^6$ m/s.

Opgave 62

- a De verschuiving is naar kleinere golflengte, dus naar blauw, en dat betekent dat de Andromedanevel naar ons toe beweegt.
- b De dopplerverschuiving is $\Delta\lambda = 656,3 - 655,6 = 0,7$ nm en voor de dopplerverschuiving geldt: $\Delta\lambda = \frac{v}{c} \cdot \lambda$ dus

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c = \frac{0,7}{656,3} \times 3,00 \cdot 10^8 = 3 \cdot 10^5$$
 m/s.

Opgave 63

- a De golflengtes zijn verschoven in de richting van grotere golflengtes dus er is sprake van roodverschuiving. Deze quasar beweegt dus van ons af.
- b Bereken voor elke spectraallijn de dopplerverschuiving en vervolgens de radiale snelheid met $v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c$:

spectraallijn	λ (nm)	λ_w (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	v ($\times 10^7$ m/s)
H α	660	776	116	5,27
H β	485	570	85	5,26
H γ	435	508	73	5,03
H δ	410	475	65	4,76

De gemiddelde radiale snelheid is $5,1 \cdot 10^7$ m/s.

Opgave 64

- a Bij de stilstaande bron geldt voor de golflengte: $\lambda = c \cdot T$.
Bij de bewegende bron beweegt de bron in één periode T naar de waarnemer toe over een afstand $s = v \cdot T$ en daardoor wordt de golflengte kleiner. De waargenomen golflengte is dan $\lambda_w = \lambda - s = c \cdot T - v \cdot T$.
- b $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_w$ en uit $\lambda = c \cdot T$ volgt dat $T = \frac{\lambda}{c}$. Dit invullen in $s = \Delta\lambda = v_r \cdot T$ geeft $\Delta\lambda = v \cdot \frac{\lambda}{c} = \frac{v}{c} \cdot \lambda$.
- c $\Delta\lambda = \frac{v}{c} \cdot \lambda \rightarrow \Delta\lambda \cdot c = v \cdot \lambda \rightarrow v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c$
- d Als de bron van de waarnemer af beweegt, moet de golflengte van de onderste golf in figuur 63 juist groter zijn dan λ . Voor de golflengte van de waarnemer geldt dan dat $\lambda_w = c \cdot T + v \cdot T$. Maar ook dan geldt $s = \Delta\lambda = v \cdot T$ en dat $T = \frac{\lambda}{c}$ zodat we ook nu weer krijgen: $\Delta\lambda = v \cdot \frac{\lambda}{c} = \frac{v}{c} \cdot \lambda$.



13.6 VERDIEPING

Opgave 65

- a $1^\circ = 3600''$ dus $1'' = \left(\frac{1}{3600}\right)^\circ$ en $360^\circ = 2\pi$ rad dus $1^\circ = \left(\frac{2\pi}{360}\right)$ rad. Samenvoegen geeft:
 $1'' = \left(\frac{1}{3600}\right) \times \left(\frac{2\pi}{360}\right) = \frac{\pi}{648000} = 4,85 \cdot 10^{-6}$ rad
- b $p = 0,75'' = 0,75 \times 4,85 \cdot 10^{-6} = 3,6 \cdot 10^{-6}$ rad
- c $p = \frac{r_{za}}{r} \rightarrow r = \frac{r_{za}}{p} = \frac{1,50 \cdot 10^{11}}{3,6 \cdot 10^{-6}} = 4,1 \cdot 10^{16}$ m
- d $1 \text{ ly} = 3,00 \cdot 10^8 \times 365 \times 24 \times 3600 = 9,46 \cdot 10^{15}$ m
- e $r = \frac{4,1 \cdot 10^{16}}{9,46 \cdot 10^{15}} = 4,4$ ly. In Binas staan twee sterren in het sterrenbeeld α Centaurus genoemd: Rigil Kent A staat op $4,0 \cdot 10^{16}$ m (= 4,2 ly) en Proxima Centaurus staat op $4,1 \cdot 10^{16}$ m (= 4,3 ly).

Opgave 66

- a Ster B bevindt zich het dichtst bij de aarde want de parallaxverschuiving van ster B is het grootst. (Sterren die heel ver weg staan hebben nauwelijks parallaxverschuiving.)
- b In figuur 66 komt $0,1''$ overeen met 1,6 cm. Ster A verschuift 1,4 cm en ster B verschuift 4,0 cm (meet dit van middelpunt naar middelpunt). De verschuiving komt overeen met $2 \cdot p$ (zie figuur 65) dus:

$$p_A = \frac{1}{2} \times \frac{1,4}{1,6} \times 0,1 = 0,044'' \text{ en } p_B = \frac{1}{2} \times \frac{4,0}{1,6} \times 0,1 = 0,13''$$

- c Zoek de omrekenfactoren op in Binas: $1'' = \frac{\pi}{648000}$ rad en $1 \text{ ly} = 9,461 \cdot 10^{15}$ m.

Reken de parallax eerst om naar radialen:

$$p_A = 0,044 \times \frac{\pi}{648000} = 2,12 \cdot 10^{-7} \text{ m en } p_B = 0,13 \times \frac{\pi}{648000} = 6,06 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Gebruik nu $p = \frac{r_{za}}{r}$ om de afstand te berekenen:

$$r_A = \frac{r_{za}}{p_A} = \frac{1,50 \cdot 10^{11}}{2,12 \cdot 10^{-7}} = 7,1 \cdot 10^{17} \text{ m en dat is } r_A = \frac{7,1 \cdot 10^{17}}{9,461 \cdot 10^{15}} = 75 \text{ ly}$$

$$r_B = \frac{r_{za}}{p_B} = \frac{1,50 \cdot 10^{11}}{6,06 \cdot 10^{-7}} = 2,5 \cdot 10^{17} \text{ m en dat is } r_B = \frac{2,5 \cdot 10^{17}}{9,461 \cdot 10^{15}} = 26 \text{ ly}$$

Opgave 67

- a $\lambda_{\max} \cdot T = k_W \rightarrow T = \frac{k_W}{\lambda_{\max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{320 \cdot 10^{-9}} = 9,06 \cdot 10^3 \text{ K}$
- b $\log T = \log (9,06 \cdot 10^3) = 3,96$. Aflezen in HRD voor een ster in de hoofdreeks geeft $\log \left(\frac{P}{P_\odot}\right) = 1,5$ (aflezen in de wolk) $\rightarrow \frac{P}{P_\odot} = 10^{1,5} = 31,6 \approx 30$
- c $P_{\text{bron}} = 30 \cdot P_\odot = 30 \times 3,85 \cdot 10^{26} = 1,16 \cdot 10^{28} \text{ W}$
- $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2} \rightarrow r = \sqrt{\frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot I}} = \sqrt{\frac{1,16 \cdot 10^{28}}{4\pi \times 8,0 \cdot 10^{-1}}} = 1 \cdot 10^{18} \text{ m en dat is } \frac{1 \cdot 10^{18}}{9,5 \cdot 10^{15}} = 1 \cdot 10^2 \text{ ly.}$



Opgave 68

- a De Cepheïden in het Melkwegstelsel staan nog relatief dichtbij, zodat de afstand tot deze sterren te bepalen is met de parallax-methode.
- b Cepheïden zijn sterren waarvan het totale stralingsvermogen met een vaste periode groter en weer kleiner wordt, doordat hun straal regelmatig afwisselend toe- en afneemt. Uit metingen aan de Cepheïden in het Melkwegstelsel is een bekende relatie tussen de periode van de helderheidsverandering en het totale stralingsvermogen van deze sterren bekend. Deze periode is ook te meten voor een Cepheïde die zich buiten het Melkwegstelsel bevindt. Vervolgens is dan met de door Henrietta Leavitt bepaalde relatie het totale stralingsvermogen van deze Cepheïde te berekenen. Het totale stralingsvermogen van Cepheïden is relatief groot en daarom is hun stralingsintensiteit ook op aarde te meten. Vervolgens is met behulp van het totale stralingsvermogen en de gemeten stralingsintensiteit de afstand tot de ster (en dus tot het sterrenstelsel) te berekenen.

Opgave 69

- a De periode van de variatie in het totale stralingsvermogen is af te lezen uit figuur 68:
 $T = 6 \text{ dagen} = 6 \times 24 \times 3600 = 5,2 \cdot 10^5 \text{ s} \rightarrow P_{\text{gem}} = 1,8 \cdot 10^{24} \cdot T = 1,8 \cdot 10^{24} \times 5,2 \cdot 10^5 = 9,3 \cdot 10^{29} \text{ W}$
- b $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi r^2} \rightarrow r = \sqrt{\frac{P_{\text{gem}}}{4\pi \cdot I_{\text{gem}}}} = \sqrt{\frac{9,3 \cdot 10^{29}}{4\pi \times 1,2 \cdot 10^{-1}}} = 2,5 \cdot 10^{22} \text{ m}$ en dat is $\frac{2,5 \cdot 10^{22}}{9,461 \cdot 10^{15}} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ ly}$.
- c De evenredigheidsconstante van type II heeft een $4 \times$ zo kleine waarde, dus zal P_{gem} $4 \times$ zo klein zijn en dat betekent dat de afstand $\sqrt{4} = 2$ keer zo klein is. De ster staat dus dichterbij.

Opgave 70

In de paragraaf staat dat supernova's van het type Ia een totaal theoretisch stralingsvermogen van zo'n 10^{36} W hebben.

$$I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi r^2} \rightarrow r = \sqrt{\frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot I}} = \sqrt{\frac{10^{36}}{4\pi \times 6,2 \cdot 10^{-15}}} = 10^{24} \text{ m}$$

en dat is $\frac{10^{24}}{10^{16}} = 10^8 \text{ ly}$ (omdat we van P_{bron} alleen de ordegröte weten, kunnen we ook alleen maar de ordegröte van de afstand berekenen).

Opgave 71

Oriëntatie:

Bereken eerst met de dopplerformule de radiale snelheid van het sterrenstelsel en vervolgens met de wet van Hubble de afstand van het sterrenstelsel tot ons Melkwegstelsel. Reken eventueel de afstand om in lichtjaar (één lichtjaar is $9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$).

Uitwerking:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0,17 \rightarrow v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c = 0,17 \cdot 3,00 \cdot 10^8 = 5,10 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

$$v_r = H_0 \cdot d \rightarrow d = \frac{v}{H_0} = \frac{5,10 \cdot 10^7}{2,3 \cdot 10^{-18}} = 2,2 \cdot 10^{25} \text{ m. Dat is } \frac{2,2 \cdot 10^{25}}{9,46 \cdot 10^{15}} = 2,3 \cdot 10^9 \text{ ly}$$

Opgave 72

- a De evenredigheidsconstante H is gelijk aan de helling van de lijn in figuur 69:

$$H = \frac{v}{d} = \frac{10,3 \cdot 10^2 \text{ km/s}}{2,0 \text{ Mpc}} = \frac{10,3 \cdot 10^5 \text{ m/s}}{2,0 \times 3,086 \cdot 10^{22} \text{ m}} = 1,7 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$$

- b Met behulp van de formule voor de snelheid en de wet van Hubble is de tijd te berekenen die verstreken is sinds de oerknal: $s = v \cdot t$ en $v = H \cdot d$ waarbij geldt:

$$d = s \rightarrow t = \frac{s}{v} = \frac{d}{H} = \frac{1}{2,3 \cdot 10^{-18}} = 4,35 \cdot 10^{17} \text{ s} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ jr}$$

- c De snelheid is vast niet al die tijd constant gebleven: de uitdijing van het heelal zou vertraagd moeten zijn als gevolg van het aantrekkende effect van de onderlinge gravitatiekracht. Het lijkt er echter op dat die uitdijing juist versneld is door een nog onbekende 'afstotende kracht' die groter is dan de aantrekkende gravitatiekracht.



13.7 AFSLUITING

Opgave 73

Eigen antwoord.

Opgave 74

- a De zon zendt zichtbaar licht, infraroodstraling en ultravioletstraling uit. Jonge sterren en koudere objecten in het heelal zenden infraroodstraling en radiogolven uit. Zeer hete sterren en hete gaswolken zenden ultravioletstraling en röntgenstraling uit. Bij krachtige sterexplosies zoals een supernova komt gammastraling vrij.
- b Zichtbaar licht en radiogolven met golflengtes tussen 10 cm en 10 m worden door de atmosfeer van de aarde doorgelaten en kunnen dus goed op het aardoppervlak worden waargenomen. Infraroodstraling wordt gedeeltelijk doorgelaten, daarvoor is een infraroodtelescoop op grote hoogte (5 km) nodig. Andere golflengtes worden geabsorbeerd door de atmosfeer, dus deze kunnen het best vanuit de ruimte worden waargenomen.
- c De frequentie f hangt samen met de golflengte λ volgens: $c = \lambda \cdot f$. Hierin is c de lichtsnelheid ($3,00 \cdot 10^8$ m/s). De fotonenergie E_f hangt af van de frequentie f van de elektromagnetische straling: $E_f = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$. Hierin is h de constante van Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s).
- d De golflengte van het maximum van de stralingskromme bepaalt de temperatuur van het object. Hoe hoger de temperatuur, des te kleiner is de golflengte van het stralingsmaximum.
- e De wet van Wien geeft het verband tussen de effectieve temperatuur van een stralend voorwerp en de golflengte van het stralingsmaximum: $\lambda_{\max} \cdot T = k_w$. Hierin is $\lambda_{\max}$ de golflengte (in m) bij het maximum van de stralingskromme, T de oppervlaktetemperatuur (in K) en k_w de constante van Wien ($2,898 \cdot 10^{-3}$ m·K).
- f Het totale stralingsvermogen van een ster is de totale energie die de ster per seconde uitzendt in alle richtingen. Het door de ster uitgezonden totale stralingsvermogen verspreidt zich in alle richtingen en verdeelt zich dus over een steeds groter wordend boloppervlak. De op aarde waargenomen stralingsintensiteit van een ster is het stralingsvermogen per m² op dat boloppervlak, waarbij de straal van de bol overeen komt met de afstand tot de ster.
- g Het verband tussen de op aarde waargenomen stralingsintensiteit, het totale stralingsvermogen van en de afstand tot de ster wordt weergegeven door: $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$. Hierin is I de stralingsintensiteit (in W/m²), P het totale stralingsvermogen van de ster (in W) en A de oppervlakte (in m²) van de bol met straal r (dat is dus de afstand tot de ster in m) waarover de ster het vermogen in de ruimte verspreid.
- h Het verband tussen het totale stralingsvermogen, de straal en de oppervlaktetemperatuur van de ster wordt weergegeven door de wet van Stefan-Boltzmann: $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4$. Hierin is P_{bron} het totale stralingsvermogen van de ster (in W), σ de constante van Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}$ W · m⁻² · K⁻⁴, A de oppervlakte (in m²) van de ster met straal R (in m) en T de oppervlaktetemperatuur (in K) die ook wel wordt aangeduid als de effectieve temperatuur van de ster.
- i Het spectrum van de door een ster uitgezonden straling is een continu spectrum met daarin een aantal absorptielijnen.
- j In het sterspectrum bevinden zich absorptielijnen. Door vergelijking van de golflengtes van deze donkere lijnen met de emissiespectra van bekende gassen is af te leiden welke gassen zich in de buitenste laag van de ster bevinden.
- k In het atoommodel van Bohr kan een elektron in een waterstofatoom zich slechts in een beperkt aantal 'toegestane' banen rondom de atoomkern bevinden. Bij elk van die banen hoort een bepaald energieniveau: hoe groter de baanstraal is, des te hoger is het energieniveau. Door absorptie van energie (bij botsing met een elektron of absorptie van een foton) kan het elektron vanuit de grondtoestand in een aangeslagen toestand (met een hoger energieniveau) komen. Bij terugval uit deze baan zendt het atoom een foton uit met een fotonenergie die gelijk is aan het verschil tussen de energieniveaus van de 'sprong' die het elektron in het atoom maakt. Het model van Bohr met 'banen' waarin elektronen rond de kern 'cirkelen' is niet meer goed bruikbaar voor andere elementen dan waterstof. Maar het abstracte model van energieniveaus, sprongen en spectraallijnen wel. Bij verhitting van een gas worden dus bepaalde golflengtes uitgezonden die horen bij de 'sprongen' en ontstaat een emissiespectrum. Een absorptiespectrum ontstaat als we wit licht laten invallen op een koud gas. De golflengtes die horen bij het element dat zich in het gas bevindt, worden dan geabsorbeerd en vervolgens weer naar alle kanten uitgezonden. Hierdoor beweegt slechts een zeer klein gedeelte van de weer uitgezonden fotonen in dezelfde richting als het doervallende witte licht, en is de stralingsintensiteit in een absorptielijn lager.



- I** Het aantal toegestane banen van het elektron is in het atoommodel van Bohr beperkt. Hierdoor is ook het aantal mogelijke 'sprongen' van het elektron binnen het atoom van het ene naar het andere energieniveau, en daarmee het aantal spectraallijnen, beperkt: elke spectraallijn hoort bij een bepaalde sprong in het energieniveauschema.
- m** De energie van het foton dat door een atoom wordt uitgezonden bij de overgang van een elektron in het atoom van een hoger naar een lager energieniveau is te berekenen met $E_f = h \cdot f = |E_m - E_n|$. Hierbij is E_f de energie (in J) van het uitgezonden foton, h de constante van Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s), f de frequentie (in Hz) van het uitgezonden foton, en zijn E_m en E_n de energieniveaus (in J) waarin het atoom zich bevindt vóór en ná het uitzenden van het foton.
- n** Uit de dopplerverschuiving van de absorptielijnen in het sterspectrum is af te leiden of de ster van ons af of naar ons toe beweegt. Als er sprake is van een roodverschuiving, beweegt de ster van ons af. Bij een blauwverschuiving beweegt de ster naar ons toe. Hoe groter de dopplerverschuiving van de absorptielijnen in het sterspectrum is, des te groter is de radiale snelheid van de ster.
- o** Het verband tussen de radiale snelheid van een ster of sterrenstelsel en de dopplerverschuiving van de golflengtes van de spectraallijnen in het sterspectrum wordt weergegeven door de dopplerformule: $v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c$. Hierin is v_r de radiale snelheid van de ster (in m/s), $\Delta\lambda$ de golflengteverandering (in m), λ de door de bron uitgezonden golflengte (in m) en c de lichtsnelheid ($3,00 \cdot 10^8$ m/s).

Opgave 75

Oriëntatie:

Voor het verband tussen de golflengte van het maximum in de stralingskromme van een stralend voorwerp en de effectieve temperatuur geldt de wet van Wien: $\lambda_{\max} \cdot T = k_W$ met $k_W = 2,898 \cdot 10^{-3}$ m · K.

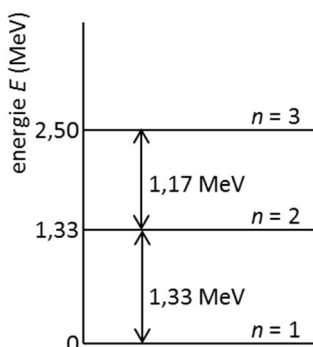
Voor het totale stralingsvermogen dat een ster uitzendt geldt: $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$ met $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}$ W · m⁻² · K⁻⁴.

Uitwerking:

- a** Zonnevlek: $T = 5,8 \cdot 10^3 - 1,3 \cdot 10^3 = 4,5 \cdot 10^3$ K $\rightarrow \lambda_{\max} = \frac{k_W}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^3} = 644$ nm = $6,4 \cdot 10^{-7}$ m
 Zon: $T = 5,8 \cdot 10^3$ K $\rightarrow \lambda_{\max} = \frac{k_W}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^3} = 500$ nm = $5,0 \cdot 10^{-7}$ m
- b** Zonnevlek: $\frac{P_{\text{bron}}}{A} = \sigma \cdot T^4 = 5,670 \cdot 10^{-8} \times (4,5 \cdot 10^3)^4 = 2,3 \cdot 10^7$ W/m²
 Zon: $\frac{P_{\text{bron}}}{A} = \sigma \cdot T^4 = 5,670 \cdot 10^{-8} \times (5,8 \cdot 10^3)^4 = 6,4 \cdot 10^7$ W/m²
- c** De golflengte van het maximum van de stralingskromme van de zon zit in het blauwe gebied, zodat de zon wit licht uitzendt (op de foto is dit oranje gekleurd). De golflengte van maximum van de stralingskromme van de zonnevlek zit in het rode gebied zodat dit gedeelte een meer roodachtig licht uitzendt. Bovendien is de intensiteit bij het normale zonneoppervlak ongeveer 3 × zo groot als de intensiteit bij de zonnevlek. De lagere intensiteit en de meer rode kleur van de zonnevlekken zorgen ervoor dat deze zwart afsteken op de oranjekeurige zon op de foto.

Opgave 76

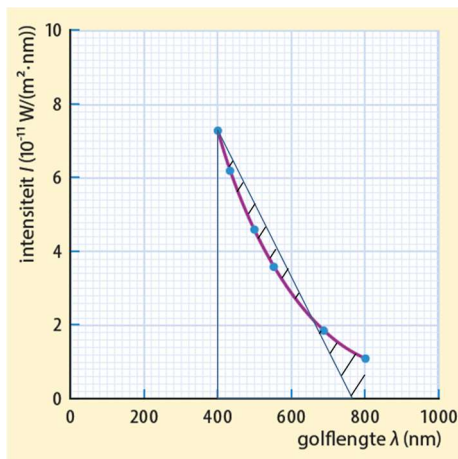
De energie van de eerste aangeslagen kerntoestand is 1,33 MeV. Van de tweede aangeslagen kerntoestand is de energie 1,33 + 1,17 = 2,50 MeV. Zie figuur.





Opgave 77

- a De golflengte van het maximum van de stralingskromme van de zon ligt in het zichtbare gebied (ongeveer bij 500 nm). Aan het diagram van figuur 71 is te zien dat de golflengte van het maximum bij Vega links van het zichtbare gebied ligt en minder dan 400 nm is. Dat betekent dat Vega een hogere temperatuur moet hebben dan de zon, want $\lambda_{\max} \cdot T = \text{constant}$.
- b Als het maximum van de stralingskromme van Vega bij 400 nm ligt, kunnen we de oppervlaktetemperatuur berekenen met de wet van Wien: $\lambda_{\max} \cdot T = k_w \rightarrow T = \frac{k_w}{\lambda_{\max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 10^{-9}} = 7,2 \cdot 10^3 \text{ K}$. Maar in figuur 71 ligt het maximum iets verder naar links, en dan is de oppervlaktetemperatuur dus hoger dan deze berekende waarde.
- c De intensiteit van een bepaald golflengtegebied is de oppervlakte onder de curve. Het zichtbare gebied ligt globaal tussen 400 en 800 nm. De oppervlakte onder de curve in dit gebied is ongeveer (zie figuur):
 $\frac{1}{2} \times 7,3 \cdot 10^{-11} \times (760 - 400) = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$



Dat is $\frac{1,3 \cdot 10^{-8}}{2,9 \cdot 10^{-8}} \times 100\% = 45\%$ van de totale stralingsintensiteit over het volledige spectrum.

- d Het totale stralingsvermogen van Vega is te berekenen met $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$. Hierin is r de afstand van Vega tot de aarde: $r = 23,7 \cdot 10^{16} \text{ m}$ (Binas) $\rightarrow P_{\text{bron}} = I \cdot 4\pi \cdot r^2 = 2,9 \cdot 10^{-8} \times 4\pi \times (23,7 \cdot 10^{16})^2 = 2,05 \cdot 10^{28} \text{ W}$. Het totale stralingsvermogen van de zon is $3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$ (Binas tabel 32C) dus is het totale stralingsvermogen van Vega $\frac{2,05 \cdot 10^{28}}{3,85 \cdot 10^{26}} = 53 \times$ zo groot als het totale stralingsvermogen van de zon.

Opgave 78

- a De waargenomen helderheid hangt ook af van de afstand tot de ster, dus de conclusie dat de helderste ster het grootste totale stralingsvermogen heeft hoeft niet juist te zijn.
- b Het totale stralingsvermogen van Sirius A is te berekenen met $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$ met $I = 1,141 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$ en $r = 8,141 \cdot 10^{16} \text{ m}$, dus $P_{\text{bron}} = I \cdot 4\pi \cdot r^2 = 1,141 \cdot 10^{-7} \times 4\pi \times (8,141 \cdot 10^{16})^2 = 9,503 \cdot 10^{27} \text{ W}$. Het verband tussen het totale stralingsvermogen en de oppervlaktetemperatuur van een ster wordt gegeven door: $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4$ waarin R de straal van de Sirius A is:

$$R = 1,713 \times 6,963 \cdot 10^8 = 1,1928 \cdot 10^9 \text{ m en } T = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{bron}}}{\sigma \cdot 4\pi \cdot R^2}} = \sqrt[4]{\frac{9,503 \cdot 10^{27}}{5,6704 \cdot 10^{-8} \times 4\pi \times (1,1928 \cdot 10^9)^2}} = 9840 \text{ K}$$

Opgave 79

- a Aflezen in het HRD geeft voor Sirius A: $\log \frac{P_{\text{bron}}}{P_{\odot}} = 1,4 \rightarrow \frac{P}{P_{\odot}} = 10^{1,4} = 25$.
- b $\frac{P_{\text{bron}}}{P_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^4 \rightarrow \frac{M}{M_{\odot}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{bron}}}{P_{\odot}}} = \sqrt[4]{25} = 2,2$ dus de massa van Sirius A is te klein om aan het eind van zijn leven te ontploffen als een supernova (want kleiner dan 8 zonsmassa's).



Opgave 80

Oriëntatie:

Reken eerst het totale stralingsvermogen uit van de ontplofende ster met behulp van $I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$. Gebruik vervolgens $E = P \cdot t$ om de totale hoeveelheid energie te berekenen..

Uitwerking:

$$\text{a } P_{\text{bron}} = I \cdot 4\pi \cdot r^2 = 2,5 \cdot 10^{-7} \times 4\pi \times (40 \times 3,086 \cdot 10^{22})^2 = 4,79 \cdot 10^{42} \text{ W}$$

$$E = P \cdot t = 4,79 \cdot 10^{42} \times 25 = 1,2 \cdot 10^{44} \text{ J}$$

$$\text{b } P_{\odot} = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W dus de energie die de zon in 10 miljard jaar uitstraalt is:}$$

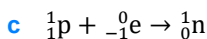
$$E = P \cdot t = 3,85 \cdot 10^{26} \times 10 \cdot 10^9 \times 365 \times 24 \times 3600 = 1,2 \cdot 10^{44} \text{ J}$$

Dat komt dus inderdaad overeen met de bij **a** berekende energie van de gammaflits.

Opgave 81

a Alleen bij de magnetische polen bewegen de deeltjes in de richting van de magnetische veldlijnen en kunnen daardoor niet worden afgebogen door de lorentzkracht. Op andere plaatsen dan bij de magnetische polen staan (componenten van) de magnetische veldlijnen loodrecht op de bewegingsrichting van de geladen deeltjes. Daardoor werkt er een lorentzkracht loodrecht op de bewegingsrichting van de geladen deeltjes, waardoor deze afgebogen worden terug naar de pulsar.

b De richting van de pulsarbundels is willekeurig, waardoor slechts enkele pulsars de aarde bestrijken en de meeste de aarde zullen 'missen'.



Oriëntatie:

$m_{\text{neutron}} = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ en $r_{\text{neutron}} = 1,25 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ en voor de massa van de pulsar geldt:

$$m_{\text{pulsar}} = 1,4 \cdot M_{\odot} = 1,4 \times 1,9884 \cdot 10^{30} = 2,784 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Het volume van het neutron is te berekenen met $V = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3$, vervolgens is de dichtheid van het neutron (en dus ook van de pulsar) te berekenen met $\rho = \frac{m}{V}$. Aangezien ook de massa van de pulsar bekend is, kan nu het volume van de pulsar berekend worden en ten slotte de straal.

Uitwerking:

$$V_{\text{neutron}} = \frac{4}{3}\pi \cdot r_{\text{neutron}}^3 = \frac{4}{3}\pi \cdot (1,25 \cdot 10^{-15})^3 = 8,181 \cdot 10^{-45} \text{ m}^3$$

$$\rho_{\text{pulsar}} = \rho_{\text{neutron}} = \frac{m_{\text{neutron}}}{V_{\text{neutron}}} = \frac{1,675 \cdot 10^{-27}}{8,181 \cdot 10^{-45}} = 2,047 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{pulsar}} = \frac{m_{\text{pulsar}}}{V_{\text{pulsar}}} \rightarrow V_{\text{pulsar}} = \frac{m_{\text{pulsar}}}{\rho_{\text{pulsar}}} = \frac{2,784 \cdot 10^{30}}{2,047 \cdot 10^{17}} = 1,360 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$$

$$V_{\text{pulsar}} = \frac{4}{3}\pi \cdot r_{\text{pulsar}}^3 \rightarrow r_{\text{pulsar}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{\text{pulsar}}}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \times 1,360 \cdot 10^{13}}{4\pi}} = 1,5 \cdot 10^4 \text{ m} = 15 \text{ km}$$

Het kan ook anders, met minder tussenberekeningen:

$$\rho_{\text{pulsar}} = \rho_{\text{neutron}} \text{ dus } \frac{m_{\text{pulsar}}}{V_{\text{pulsar}}} = \frac{m_{\text{neutron}}}{V_{\text{neutron}}}$$

Invullen van $V = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3$ geeft:

$$\frac{m_{\text{pulsar}}}{\frac{4}{3}\pi \cdot r_{\text{pulsar}}^3} = \frac{m_{\text{neutron}}}{\frac{4}{3}\pi \cdot r_{\text{neutron}}^3} \rightarrow \frac{m_{\text{pulsar}}}{r_{\text{pulsar}}^3} = \frac{m_{\text{neutron}}}{r_{\text{neutron}}^3} \rightarrow \frac{r_{\text{pulsar}}^3}{r_{\text{neutron}}^3} = \frac{m_{\text{pulsar}}}{m_{\text{neutron}}} \rightarrow$$

$$r_{\text{pulsar}} = r_{\text{neutron}} \cdot \sqrt[3]{\frac{m_{\text{pulsar}}}{m_{\text{neutron}}}} = 1,25 \cdot 10^{-15} \times \sqrt[3]{\frac{1,4 \times 1,9884 \cdot 10^{30}}{1,675 \cdot 10^{-27}}} = 1,5 \cdot 10^4 \text{ m} = 15 \text{ km}$$

e Als het pulsarmateriaal uit neutronen bestaat en we neutronen als bolletjes voorstellen, zal de dichtheid van het pulsarmateriaal altijd kleiner zijn dan van een neutron, omdat er ook ruimte tussen de bolletjes zit.



Opgave 82

a $\Delta\lambda = 656,3 - 653,0 = 3,3 \text{ nm} \rightarrow v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c = \frac{3,3}{656,3} \times 3,00 \cdot 10^8 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ m/s}$

- b Omdat de golflengte van de waargenomen waterstoflijn (653,0 nm) kleiner is dan de golflengte van de normale waterstoflijn (656,3 nm), is er sprake van blauwverschuiving, dus dit gedeelte van de Krabnevel beweegt naar ons toe.